

TS. ĐÀO THANH TOẢN (Chủ biên)
TS. PHẠM THANH HUYỀN, TS. ĐỖ VIỆT HÀ, ThS. NGUYỄN THÚY BÌNH

KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ TƯƠNG TỰ



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI



TS. ĐÀO THANH TOẢN (Chủ biên)
TS. PHẠM THANH HUYỀN, TS. ĐỖ VIỆT HÀ, ThS. NGUYỄN THÚY BÌNH

KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ TƯƠNG TỰ



**NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI
HÀ NỘI - 2019**



Lời nói đầu

Tài liệu này được biên soạn để phục vụ giảng dạy trực tiếp học phần “Kỹ thuật điện tử tương tự” cho sinh viên các ngành Kỹ thuật Điện; Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa tại Đại học Giao thông Vận tải. Đồng thời, đây cũng là tài liệu tham khảo hữu ích cho sinh viên trong quá trình thực tập cơ sở ngành, chuyên ngành Điện - Điện tử và bạn đọc quan tâm đến lĩnh vực điện tử nói chung.

Nội dung cơ bản của Kỹ thuật điện tử tương tự được trình bày trong 7 chương và 4 phụ lục của Giáo trình này. Chương 1 giới thiệu về cấu tạo, ký hiệu, nguyên tắc hoạt động và ứng dụng điển hình của các linh kiện điện tử thụ động là điện trở, tụ điện, cuộn cảm và biến áp. Tương tự, Chương 2 trình bày chi tiết về các linh kiện điện tử bán dẫn như diode, transistor, thyristor ... Các sơ đồ cấp nguồn một chiều và mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ sử dụng transistor sẽ được phân tích trong Chương 3. Để tăng hệ số khuếch đại hay giảm tạp âm, tăng độ ổn định ... các mạch khuếch đại sẽ được ghép với nhau, các phương pháp ghép tầng khuếch đại sẽ được trình bày trong Chương 4. Chương 5 trình bày về các mạch khuếch đại tín hiệu lớn hay còn được gọi là mạch khuếch đại công suất. Nhằm thuận tiện cho người sử dụng trong việc thay đổi hệ số khuếch đại cũng như mạch hoạt động ổn định ít bị ảnh hưởng bởi các yếu tố bên ngoài, mạch khuếch đại thuật toán được tạo ra dưới dạng mạch tích hợp. Phần giới thiệu về khuếch đại thuật toán và ứng dụng điển hình được thể hiện trong Chương 6. Chương 7 tập trung phân tích nguyên tắc hoạt động và xác định tần số đầu ra của các loại mạch tạo dao động điều hoà và mạch tạo dãy xung kích.

Để bạn đọc tiện theo dõi và hiểu rõ nội dung chính của Giáo trình, chúng tôi đưa vào các phần Phụ lục từ A tới D để giới thiệu các khái niệm cơ bản của điện-điện tử, vật liệu điện, vật liệu từ và các định luật cơ bản cần thiết trong việc phân tích mạch điện tử. Ngoài ra, các thuật ngữ viết tắt và ký hiệu toán học đã sử dụng cũng được thống kê lại trong các bảng.

Giáo trình **Kỹ thuật Điện tử tương tự** do TS. Đào Thanh Toản là chủ biên; ThS. Nguyễn Thuý Bình biên soạn Chương 1, 4 và 7; TS. Phạm Thanh Huyền biên soạn Chương 2, 3 và Phụ lục; TS. Đỗ Việt Hà biên soạn Chương 5 và 6.

Mặc dù được các tác giả biên soạn rất cẩn thận trong thời gian dài và đã nhận được nhiều góp ý của các đồng nghiệp trong và ngoài trường nhưng chắc vẫn còn những thiếu sót. Chúng tôi mong nhận được những ý kiến phản hồi của bạn đọc để hoàn thiện hơn cho lần xuất bản sau.

Các ý kiến đóng góp xin gửi về địa chỉ:

Bộ môn Kỹ thuật điện tử,

Khoa Điện - Điện tử,

Trường Đại học Giao thông Vận tải,

Số 3 Cầu Giấy, Láng Thượng, Đống Đa, Hà Nội.



Danh mục thuật ngữ viết tắt

(Sắp xếp theo bảng chữ cái)

Viết tắt	Tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
AC	Alternative Current	Dòng xoay chiều Thành phần xoay chiều
ACLL	Alternative Current Load Line	Đường tải xoay chiều Đường tải động
BJT	Bipolar Junction Transistor	Transistor hai chuyển tiếp Transistor lưỡng cực
BPF	Band Pass Filter	Mạch lọc thông dải
CB	Common Base configuration	Cách măc BJT kiểu cực gốc chung
CC	Common Collector configuration	Cách măc BJT kiểu cực góp chung
CD	Common Drain configuration	Cách măc FET kiểu cực máng chung
CE	Common Emitter configuration	Cách măc BJT kiểu cực phát chung
CG	Common Gate configuration	Cách măc FET kiểu cực cửa chung
CMRR	Common Mode Rejection Ratio	Hệ số nén đồng pha
CS	Common Source configuration	Cách măc FET kiểu cực nguồn chung
D	Diode	Diode

Viết tắt	Tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
DC	Direct Current	Dòng một chiều Thành phần một chiều
DCLL	Direct Current Load Line	Đường tải một chiều Đường tải tĩnh
D-MOSFET	Depletion mode MOSFET	MOSFET kênh có sẵn MOSFET nghèo hạt dãn
E-MOSFET	Enhancement mode MOSFET	MOSFET kênh cảm ứng MOSFET giàu hạt dãn
FET	Field-Effect transistor	Transistor hiệu ứng trường
GBP	Gain Bandwidth Product	Tích số băng thông và hệ số khuếch đại
HPF	High Pass Filter	Mạch lọc thông cao
IC	Integrated Circuit	Mạch tích hợp
KCL	Kirchhoff's Current Law	Định luật Kirchhoff về dòng điện
KVL	Kirchhoff's Voltage Law	Định luật Kirchhoff về điện áp
LCD	Liquid Crystal Display	Màn hình tinh thể lỏng
LED	Light Emitting Diode	Diode phát quang
LPF	Low Pass Filter	Mạch lọc thông thấp
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-effect-transistor	Transistor hiệu ứng trường kiểu kim loại-oxide-bán dẫn
OLED	Organic LED	LED hữu cơ
Op-amp	Operational Amplifier	Mạch khuếch đại thuật toán
PCB	Printed Circuit Board	Mạch in
P-N	Positive-Negative junction	Chuyển tiếp (tiếp giáp) P-N
RFC	Radio Frequency Choke	Cuộn chấn cao tần
SMD	Surface Mount Device	Linh kiện kiểu hàn dán

Viết tắt	Tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
T	Transistor	Transistor
THD	Through Hole Device	Linh kiện kiểu xuyên lỗ
V-I	Volt-Ampere characteristic	Đặc tuyến điện áp - dòng điện



Danh mục ký hiệu toán học

(Sắp xếp theo thứ tự xuất hiện)

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
i, v, p	Giá trị tức thời của dòng điện, điện áp, công suất biến đổi theo thời gian	
I, V, P	Giá trị định, trung bình (DC) và hiệu dụng của dòng điện, điện áp và công suất	
X_A	Giá trị một chiều (DC) của đại lượng X tại điểm A	
x_a	Giá trị tức thời biến đổi (AC) của đại lượng x tại điểm A	
x_A	Giá trị tức thời gồm cả một chiều và xoay chiều tại điểm A	
X_i	Tương ứng với đại lượng X đầu vào	
X_o	Tương ứng với đại lượng X đầu ra	
V_{dc}	Điện áp nguồn cung cấp một chiều	V
V_{CC}	Điện áp nguồn cung cấp một chiều (thường cho các mạch BJT))	V
V_{DD}	Điện áp nguồn cung cấp một chiều (thường cho các mạch FET)	A/V ²
v_s	Nguồn tín hiệu điện áp xoay chiều	V
R	Điện trở	Ω
G	Điện dẫn	S
C	Tụ điện, điện dung	F
L	Cuộn dây, cuộn cảm, độ tự cảm	H

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
M	Hỗn cản	H
K	Hệ số khuếch đại	
σ	Độ dẫn điện	$\Omega^{-1}m^{-1}$
ρ	Điện trở suất	Ωm
ε	Độ điện thấm	F/m
μ	Độ từ thấm	H/m
β	Hệ số khuếch đại dòng một chiều của BJT	
V_D	Điện áp mở của diode	V
V_{br}	Điện áp đánh thủng	V
g_m	Hệ số hỗn dẫn của FET	S
k_n	Thông số dẫn của E-MOSFET kênh N	A/V ²
k_p	Thông số dẫn của E-MOSFET kênh P	A/V ²
V_P	Điện áp thắt kênh dẫn	V
$V_{GS(off)}$	Điện áp ngắt hoàn toàn kênh dẫn	V
V_{th}	Điện áp ngưỡng	V
η	Hiệu suất	%
ω	Tần số góc	rad/s
f	Tần số	Hz
V_T	Điện thế nhiệt	V

Mục lục

Danh mục thuật ngữ viết tắt	i
Danh mục ký hiệu toán học	iv
Chương 1 LINH KIỆN ĐIỆN TỬ THỤ ĐỘNG	1
1.1 ĐIỆN TRỞ	3
1.1.1 Ký hiệu và phân loại	4
1.1.2 Cấu tạo cơ bản và nguyên tắc hoạt động	4
1.1.3 Trị số điện trở	6
1.1.4 Ứng dụng điển hình	8
1.2 TỰ ĐIỆN	11
1.2.1 Ký hiệu và phân loại	11
1.2.2 Cấu tạo chung và nguyên tắc hoạt động	12
1.2.3 Ứng dụng điển hình	16
1.3 CUỘN CẨM	19
1.3.1 Ký hiệu và phân loại	19
1.3.2 Cấu tạo chung và nguyên tắc hoạt động	21
1.3.3 Ứng dụng điển hình	23
1.4 BIẾN ÁP	26
1.4.1 Ký hiệu và cấu tạo	26
1.4.2 Các thông số kỹ thuật cơ bản của biến áp	27
1.4.3 Phân loại và ứng dụng của biến áp	30
Ôn tập chương	32

Chương 2 LINH KIỆN ĐIỆN TỬ BÁN DẪN	33
2.1 CHẤT BÁN DẪN VÀ CHUYỂN TIẾP P-N	33
2.1.1 Chất bán dẫn thuần	33
2.1.2 Chất bán dẫn pha tạp	35
2.1.3 Chuyển tiếp P-N	37
2.2 DIODE	40
2.2.1 Ký hiệu và phân loại diode	40
2.2.2 Nguyên tắc hoạt động	42
2.2.3 Trở kháng của diode	44
2.2.4 Sơ đồ tương đương	46
2.2.5 Thông số cơ bản của diode	46
2.2.6 Các loại diode thông dụng	48
2.3 TRANSISTOR BJT	62
2.3.1 Ký hiệu và cấu tạo của BJT	63
2.3.2 Nguyên tắc hoạt động của transistor BJT	65
2.3.3 Đặc tuyến Volt-Ampere điển hình của BJT	68
2.3.4 Ứng dụng điển hình của BJT	69
2.4 TRANSISTOR FET	70
2.4.1 JFET	73
2.4.2 D-MOSFET	79
2.4.3 E-MOSFET	82
2.4.4 Ứng dụng điển hình của FET	86
2.4.5 So sánh giữa các loại transistor	88
2.5 MỘT SỐ LINH KIỆN BÁN DẪN KHÁC	89
2.5.1 Thysistor	89
2.5.2 Diac	92
2.5.3 Triac	93
2.5.4 Transistor đơn nối (UJT)	95

Ôn tập chương	96
Chương 3 MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ	102
3.1 GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI	102
3.1.1 Giới thiệu	102
3.1.2 Cách phân tích mạch khuếch đại	105
3.1.3 Các thông số cơ bản của mạch khuếch đại	107
3.2 MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT	114
3.2.1 Phân tích các sơ đồ cấp nguồn một chiều cho BJT	114
3.2.2 Đánh giá sơ đồ phân cực	130
3.2.3 Phân tích các sơ đồ mạch khuếch đại BJT	133
3.2.4 Đánh giá các sơ đồ khuếch đại BJT	152
3.3 MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET	156
3.3.1 Các sơ đồ cấp nguồn một chiều cho FET	157
3.3.2 Các sơ đồ mắc FET	166
3.3.3 Đánh giá các sơ đồ mắc FET	182
Ôn tập chương	182
Chương 4 GHÉP TẦNG MẠCH KHUẾCH ĐẠI	191
4.1 GIỚI THIỆU CHUNG	191
4.2 CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI	192
4.2.1 Ghép tầng sử dụng tụ điện	193
4.2.2 Ghép tầng bằng biến áp	196
4.2.3 Ghép tầng trực tiếp	199
4.2.4 Một số kiểu ghép đặc biệt	202
4.3 MỘT SỐ VÍ DỤ	211
Ôn tập chương	219
Chương 5 MẠCH KHUẾCH ĐẠI CÔNG SUẤT	223
5.1 GIỚI THIỆU CHUNG	223
5.1.1 Định nghĩa và phân loại	223

5.1.2	Phân loại mạch khuếch đại công suất	224
5.1.3	Transistor công suất	225
5.1.4	Biểu diễn và tính toán các thông số cơ bản của mạch khuếch đại công suất	228
5.2	MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A	230
5.2.1	Mạch tải điện trở	230
5.2.2	Mạch tải cuộn cảm	235
5.2.3	Mạch tải biến áp	237
5.3	MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B	241
5.3.1	Mạch khuếch đại đẩy kéo dùng nguồn đối xứng	242
5.3.2	Mạch khuếch đại công suất chế độ B ghép biến áp	248
5.3.3	Hiện tượng méo điểm "0" trong mạch chế độ B	249
5.4	MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ AB	250
5.4.1	Mạch khuếch đại chế độ AB dùng nguồn đối xứng	250
5.4.2	Mạch khuếch đại chế độ AB dùng nguồn đơn	252
5.4.3	IC khuếch đại công suất	255
5.5	MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ C	256
Ôn tập chương		257
Chương 6 MẠCH KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN		262
6.1	KHÁI NIỆM VÀ THÔNG SỐ CƠ BẢN	262
6.1.1	Cấu tạo và ký hiệu	262
6.1.2	Các đặc tính cơ bản của Op-Amp	266
6.1.3	Đặc tuyến truyền đạt của Op-Amp	266
6.1.4	Bảng thông của bộ khuếch đại thuật toán	267
6.1.5	Dòng vào tĩnh và điện áp lệch "0"	268
6.1.6	Tỷ số nén tín hiệu đồng pha	269
6.2	CÁC MẠCH ỨNG DỤNG OP-AMP CƠ BẢN	270
6.2.1	Mạch khuếch đại đảo/không đảo	271

6.2.2	Mạch cộng đảo/không đảo	273
6.2.3	Mạch khuếch đại hiệu	275
6.2.4	Mạch tích phân/vi phân	276
6.2.5	Mạch so sánh	280
6.2.6	Mạch hàm mũ/logarit	281
6.2.7	Mạch nhân/chia tương tự	283
6.3	THIẾT KẾ MẠCH SỬ DỤNG OP-AMP	283
Ôn tập chương		287
Chương 7 MẠCH TẠO DAO ĐỘNG		292
7.1	GIỚI THIỆU CHUNG	292
7.2	MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA	293
7.2.1	Cấu tạo và nguyên lý	293
7.2.2	Mạch tạo dao động RC	294
7.2.3	Mạch tạo dao động LC	299
7.3	MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT	306
7.3.1	Giới thiệu	306
7.3.2	Mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định	307
7.3.3	Mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định	311
7.3.4	Mạch tạo dao động đa hài tự kích	313
7.3.5	Vi mạch định thời 555	316
Ôn tập chương		318
Chương A Phụ lục Một số khái niệm cơ bản về điện, điện tử		320
A.1	HẠT DẪN ĐIỆN	320
A.2	ĐIỆN ÁP VÀ NGUỒN ĐIỆN ÁP	320
A.2.1	Điện áp	320
A.2.2	Nguồn điện áp	321
A.3	DÒNG ĐIỆN VÀ NGUỒN DÒNG ĐIỆN	323
A.3.1	Dòng điện	323

A.3.2	Nguồn dòng điện	325
A.4	TÍN HIỆU	327
A.4.1	Tín hiệu tương tự	327
A.4.2	Tín hiệu số	329
Chương B	Phụ lục Đặc tính điện của một số vật liệu điện tử	330
B.1	DÀI NĂNG LƯỢNG TRONG VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ	331
B.2	VẬT LIỆU DẪN ĐIỆN	332
B.2.1	Đặc điểm chung	332
B.2.2	Một số vật liệu dẫn điện và ứng dụng điển hình	333
B.3	VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN	334
B.3.1	Đặc điểm chung	334
B.3.2	Phân loại và ứng dụng	335
B.4	VẬT LIỆU BẢN DẪN	337
Chương C	Phụ lục Đặc tính từ của vật liệu từ	338
C.1	MỘT SỐ ĐẶC TÍNH CỦA VẬT LIỆU TỪ	339
C.1.1	Từ trỏ và từ thấm	339
C.1.2	Độ từ dư	340
C.2	PHÂN LOẠI VÀ ỨNG DỤNG CỦA VẬT LIỆU TỪ	340
C.2.1	Vật liệu từ mềm	341
C.2.2	Vật liệu từ cứng	341
Chương D	Phụ lục Một số định luật cơ bản phân tích mạch điện tử	343
D.1	ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF	343
D.1.1	Định luật Kirchhoff về dòng điện	343
D.1.2	Định luật Kirchhoff về điện áp	344
D.2	ĐỊNH LÝ THEVENIN	345
D.3	NGUYÊN LÝ XẾP CHỒNG	348
TÀI LIỆU THAM KHẢO		351

Chương 1

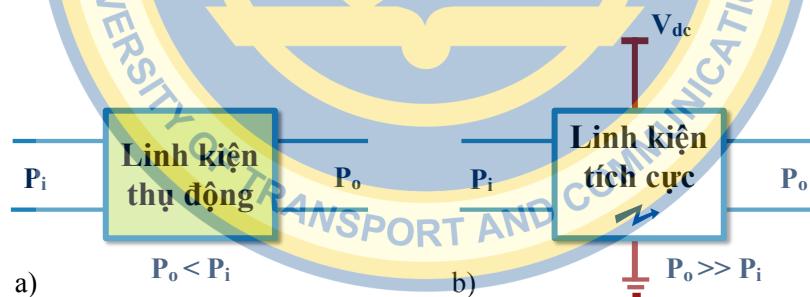
LINH KIỆN ĐIỆN TỬ THỤ ĐỘNG

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Cấu tạo và nguyên tắc làm việc của các linh kiện điện tử thụ động như điện trở, tụ điện, cuộn cảm, biến áp;
- ▷ Phân biệt các kiểu khác nhau trong mỗi loại linh kiện;
- ▷ Các ứng dụng điển hình của mỗi loại linh kiện.

Linh kiện điện tử (*electronic components*) là phần tử rời rạc cơ bản với những đặc tính điện xác định để xây dựng nên mạch điện tử, hệ thống điện tử hay thiết bị điện tử. Linh kiện điện tử được phân loại thành: linh kiện thụ động (*passive components*) và linh kiện tích cực (*active components*).

Hình 1.1 minh họa sự khác nhau giữa hai loại linh kiện này.



Hình 1.1: Sự khác nhau giữa a) Linh kiện thụ động và b) Linh kiện tích cực.

Việc phân chia một linh kiện thuộc loại thụ động hay tích cực có thể dựa trên một số đặc điểm khác nhau¹ nhưng cách đơn giản nhất là:

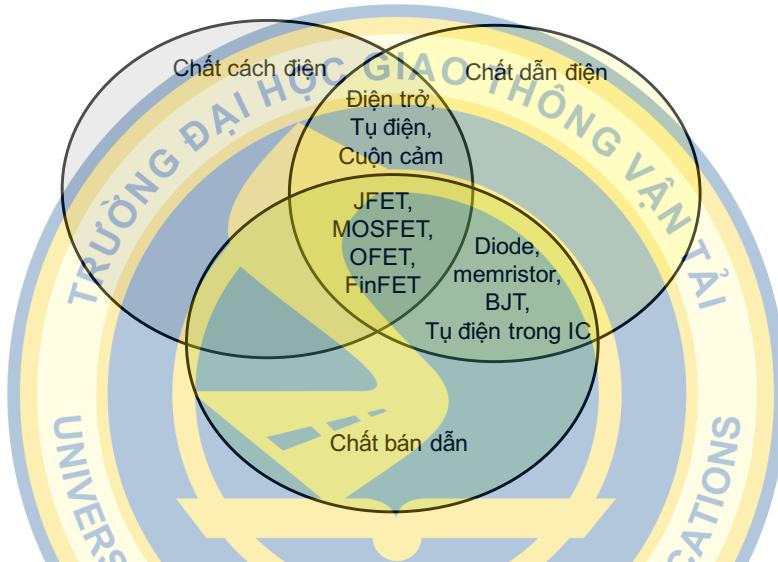
¹ví dụ như khả năng biến đổi năng lượng, khả năng khuếch đại, khả năng điều khiển

Chương 1: Linh kiện điện tử thụ động

+ **Linh kiện thụ động** là linh kiện không đưa thêm năng lượng vào mạch, chúng chỉ tiêu tán và chuyển đổi năng lượng. Các linh kiện thụ động điển hình bao gồm điện trở, tụ điện và cuộn cảm.

+ **Linh kiện tích cực** là linh kiện đưa thêm năng lượng vào mạch. Các linh kiện tích cực điển hình bao gồm: nguồn điện áp hoặc dòng điện, transistor và khuếch đại thuật toán.

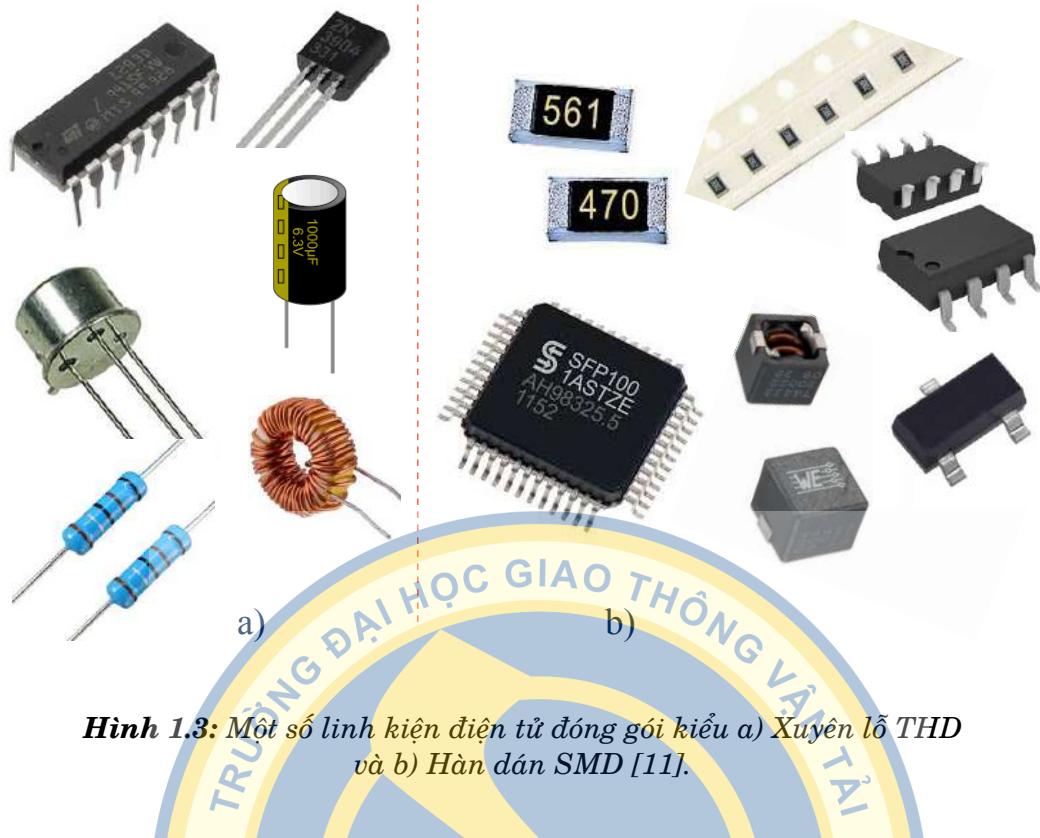
Hầu hết các linh kiện điện tử đều được sản xuất từ 4 loại vật liệu điện tử là vật liệu dẫn điện, vật liệu bán dẫn, vật liệu cách điện và vật liệu từ mà đã được trình bày chi tiết trong phụ B và C. Mỗi loại linh kiện có cấu tạo khác nhau và sử dụng tổ hợp vật liệu như một số loại được minh họa trong hình 1.2.



Hình 1.2: Quan hệ giữa các loại vật liệu tạo ra linh kiện điện tử [1].

Để tránh ảnh hưởng của oxy và điều kiện môi trường cũng như các tác động về cơ lý khi làm việc, phần cấu tạo thực của linh kiện điện tử sau khi sản xuất được “đóng gói” bằng vật liệu cách điện và kết nối với thế giới bên ngoài thông qua các chân linh kiện. Bên cạnh đó, trên thân của linh kiện còn giúp ghi các thông tin như giá trị, loại, nhà sản xuất, xuất xứ,... Linh kiện điện tử được đóng gói theo hai kiểu chính để tương thích với mạch in khi thi công. Đó là kiểu xuyên lỗ THD (Through Hole Device) dùng cho linh kiện có kích thước lớn và kiểu hàn dán SMD (Surface Mount Device) dùng cho linh kiện kích thước nhỏ như minh họa² trong hình 1.3.

²kích thước các linh kiện trong hình không theo tỉ lệ thực



Hình 1.3: Một số linh kiện điện tử đóng gói kiểu a) Xuyên lỗ THD và b) Hàn dán SMD [11].

- + Linh kiện đóng gói kiểu xuyên lỗ THD có chân linh kiện dài và thẳng để xuyên qua lỗ của bảng mạch in và được hàn ở mặt dưới.
- + Linh kiện đóng gói kiểu hàn dán SMD có chân ngắn cong hoặc không có chân thò hẳn ra ngoài và được hàn ngay tại mặt trên của bảng mạch.

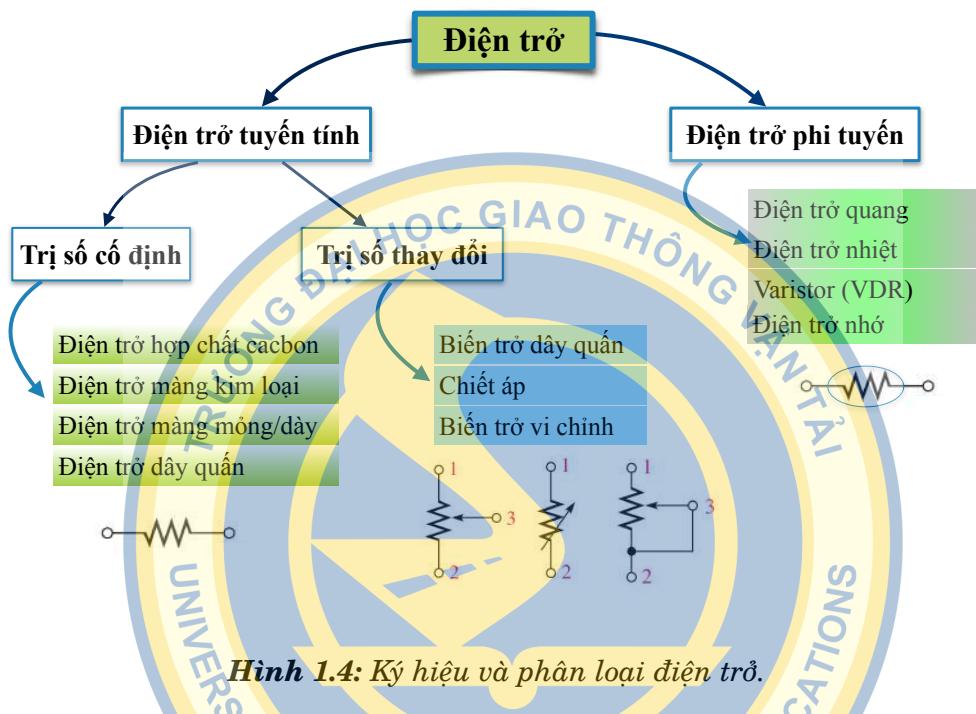
1.1 ĐIỆN TRỞ

Điện trở (*Resistor*)³ là linh kiện có tác dụng ngăn cản dòng điện, nghĩa là nó được dùng để điều tiết dòng điện trong mạch. Để đạt được một giá trị dòng điện hay giá trị điện áp mong muốn giữa hai điểm nào đó của mạch điện có thể sử dụng một số điện trở có trị số thích hợp.

³trong sơ đồ mạch, điện trở được ký hiệu là R

1.1.1 Ký hiệu và phân loại

Ký hiệu và phân loại điện trở được tóm tắt trong hình 1.4. Điện trở tuyến tính là điện trở có sút áp và dòng điện trên nó tỉ lệ bậc nhất với nhau còn điện trở phi tuyến có tỉ lệ này kiểu hàm mũ. Các điện trở có trị số thay đổi được gọi là biến trở và có thể điều chỉnh trị số bằng cách dịch chuyển con chạy. Trong khi đó, điện trở phi tuyến có trị số thay đổi theo điều kiện ngoài tác động như ánh sáng, nhiệt độ hay điện áp.



Hình dạng thực tế của một số loại điện trở được biểu diễn trong hình 1.5 với các kiểu dáng đa dạng là loại xuyên lỗ THD hay hàn dán SMD; loại linh kiện rời rạc hay tích hợp.

1.1.2 Cấu tạo cơ bản và nguyên tắc hoạt động

Điện trở có cấu tạo cơ bản là vật liệu cản điện⁴ bọc hoặc quấn bên ngoài lõi để định hình về cơ khí. Chân điện trở và mủ chụp bằng kim loại nối với phần cản điện, tất cả được bọc trong lớp vỏ làm bằng vật liệu cách điện như minh họa trong hình 1.6.

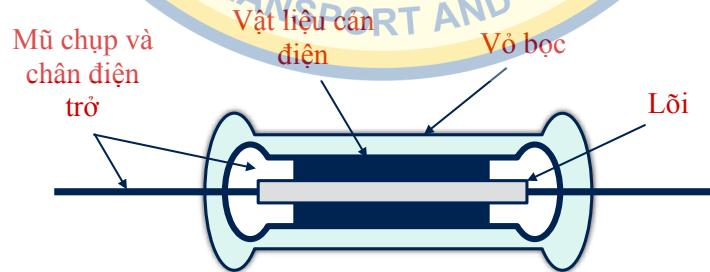
⁴do trộn lẫn giữa vật liệu cách điện và vật liệu dẫn điện để có trị số điện trở suất mong muốn, xem Phụ lục B



Hình 1.5: Một số loại điện trở thường sử dụng [11].

Trị số của điện trở được tính bằng đơn vị ohm, ký hiệu là Ω ; giá trị của ohm càng lớn thì điện trở càng lớn và dòng điện càng khó lưu thông.

Xét theo cấu tạo [3], điện trở $R(\Omega)$ của một đoạn dây dẫn làm bằng vật liệu cản điện có điện trở suất $\rho(\Omega\text{m})$, chiều dài $l(\text{m})$, tiết diện $S(\text{m}^2)$, được tính theo biểu thức 1.1.



Hình 1.6: Cấu trúc cơ bản của điện trở.

$$R = \rho \times \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

Khi làm việc trong mạch điện, có thể xác định giá trị điện trở theo định luật Ohm.

+ Với đại lượng một chiều, giá trị của điện trở R có dòng điện I đi qua, sụt áp trên nó là V , được tính theo biểu thức:

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.2)$$

+ Với đại lượng xoay chiều, giá trị điện trở r được tính theo biểu thức:

$$r = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{\delta v}{\delta i} \quad (1.3)$$

Biểu thức 1.2 và 1.3 cho thấy tác dụng của điện trở không khác nhau trong mạch điện một chiều và cả mạch xoay chiều, nghĩa là trị số của điện trở không phụ thuộc vào tần số của tín hiệu tác động lên nó.

Đôi khi khái niệm điện dẫn được dùng thay cho điện trở. Điện dẫn G , đơn vị là siemen (ký hiệu là S) có giá trị bằng nghịch đảo giá trị điện trở R .

Tức là:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.4)$$

1.1.3 Trị số điện trở

Trên thực tế, điện trở được sản xuất theo trị số nhất định được quy định trong E-series [14], xem minh họa trong bảng 1.1. Nghĩa là, các điện trở được sản xuất theo bội hoặc ước thập phân của các giá trị có trong bảng.

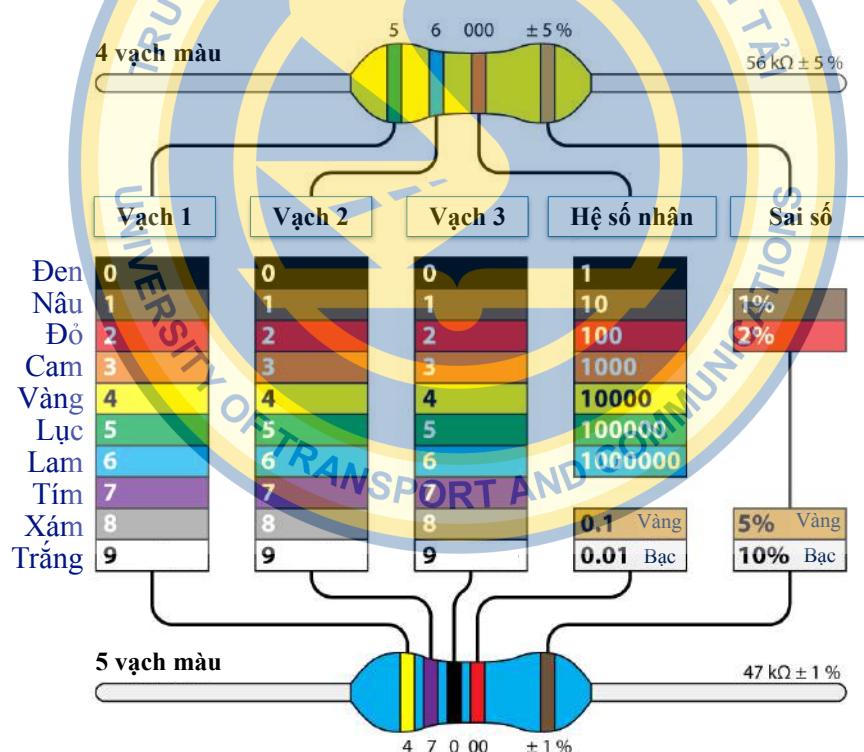
Độ lớn của điện trở thường là: $m\Omega, \Omega, k\Omega, G\Omega$. Khi muốn điện trở có trị số khác giá trị sản xuất cần mắc các điện trở đã có theo kiểu nối tiếp, song song hay hỗn hợp.

1.1. ĐIỆN TRỞ

Bảng 1.1: Bảng trị số điện trở và sai số tương ứng của các họ E-series điển hình.

Họ E-series	Sai số	Trị số
E6	20 %	1.0, 1.5, 2.2, 3.3, 4.7, 6.8
E12	10 %	1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2
E24	5 %	1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6, 3.9 4.3, 4.7, 5.1, 5.6, 6.2, 6.8, 7.5, 8.2, 9.1
E48	1 %	1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.21, 1.27, 1.33, 1.40, 1.47, 1.54, 1.62, 1.69 1.78, 1.87, 1.96, 2.05, 2.15, 2.26, 2.37, 2.49, 2.61, 2.74, 2.87, 3.01 3.16, 3.32, 3.48, 3.65, 3.83, 4.02, 4.22, 4.42, 4.64, 4.87, 5.11, 5.36 5.62, 5.90, 6.19, 6.49, 6.81, 7.15, 7.50, 7.87, 8.25, 8.66, 9.09, 9.53

Giá trị của điện trở thường được ghi trên thân điện trở nếu thân điện trở đủ lớn (như điện trở công suất) hoặc được mã hóa bởi vạch màu khi thân điện trở nhỏ (như điện trở than). Quy ước mã màu được cho trong hình 1.7.



Hình 1.7: Quy ước mã màu cho điện trở.

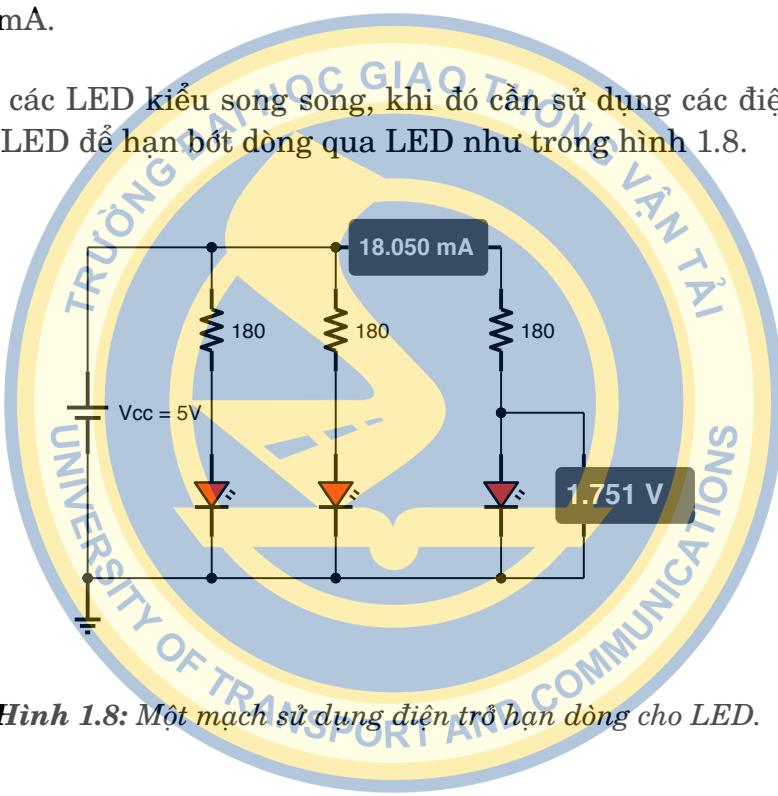
1.1.4 Ứng dụng điển hình

a. Hạn dòng trong mạch

Trong trường hợp dòng trong mạch có thể vượt quá ngưỡng chịu đựng của linh kiện thì cần thiết phải mắc thêm điện trở để hạn chế giá trị của dòng điện. Nếu không có các điện trở hạn chế và kiểm soát dòng điện thì có thể làm các linh kiện bị quá tải và có thể nóng lên quá mức dẫn đến tiêu tốn điện năng, giảm tuổi thọ và thậm chí có thể gây cháy nổ trong mạch.

Ví dụ: Hãy thiết kế mạch sử dụng nguồn điện 5 V để làm sáng ba đèn LED. Biết LED sáng rõ với điện áp thuận đặt lên khoảng 1,75 V và chịu được dòng tối đa là 20 mA.

Giả sử mắc các LED kiểu song song, khi đó cần sử dụng các điện trở mắc nối tiếp với LED để hạn bớt dòng qua LED như trong hình 1.8.



Hình 1.8: Một mạch sử dụng điện trở hạn dòng cho LED.

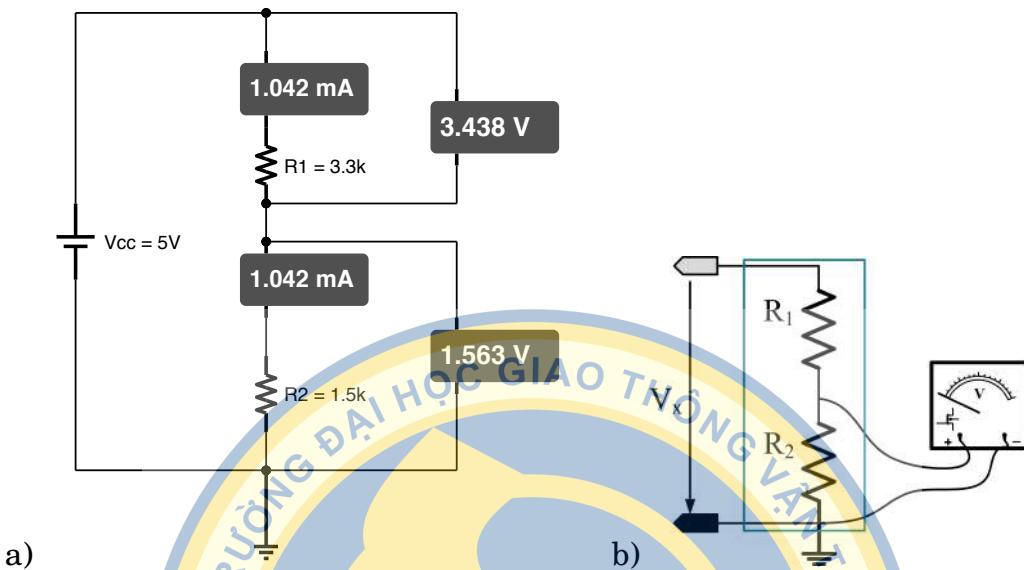
Giá trị điện trở tối thiểu được xác định là:

$$R_{\min} = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,75}{20 \times 10^{-3}} = 162,5 \Omega$$

Do vậy cần sử dụng điện trở có trị số lớn hơn R_{\min} , chọn điện trở 180Ω . Khi này kết quả mô phỏng mạch trong hình 1.8 cho thấy việc tính toán thông số là hợp lý.

b. Mạch phân áp

Điện trở được sử dụng trong mạch phân áp điện áp để có được điện áp nhỏ từ điện áp lớn như mô tả trong hình 1.9 với hai điện trở mắc nối tiếp⁵.



Hình 1.9: a) Mạch phân áp sử dụng điện trở mắc nối tiếp và b) Mạch chia áp đầu vào cho Vôn mét điện tử.

Biểu thức xác định điện áp thành phần là sụt áp trên R_2 khi đó được tính theo điện áp tổng V_{CC} như sau:

$$V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} \quad (1.5)$$

Tương tự, từ điện áp thành phần là sụt áp trên R_2 xác định được điện áp tổng V_{CC} như sau:

$$V_{CC} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \times V_{R_2} \quad (1.6)$$

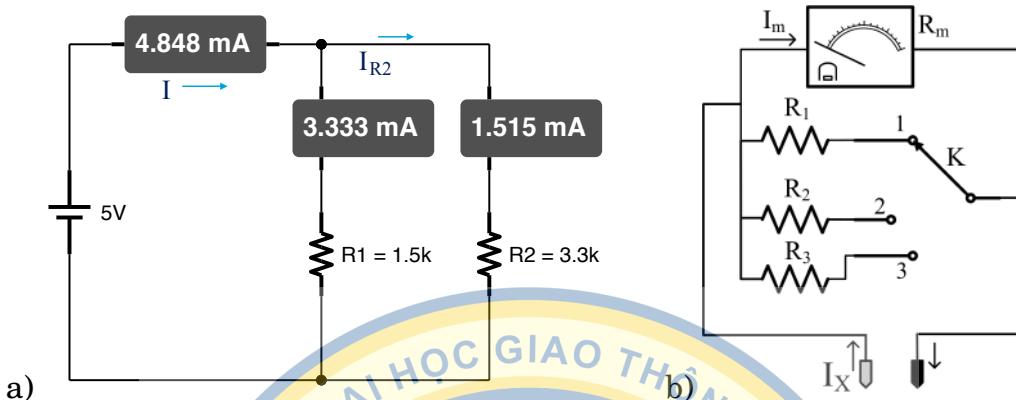
Mạch trên được sử dụng rất nhiều làm mạch vào cho dụng cụ đo lường như ví dụ trong hình 1.9(b) và các mạch phân cực cho transistor⁶.

⁵có một điểm nối chung và dòng đi qua hai điện trở như nhau

⁶sẽ trình bày chi tiết trong Chương 3

c. Mạch chia dòng

Điện trở được sử dụng trong mạch chia dòng để có được dòng điện nhỏ từ dòng điện lớn như mô tả trong hình 1.10(a) với hai điện trở mắc song song⁷.



Hình 1.10: a) Mạch chia dòng điện trở và b) Mạch chia dòng đầu vào của một Ampe mét.

Biểu thức xác định dòng điện nhánh qua R_2 khi đó được tính theo dòng điện tổng I như sau:

$$I_{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I \quad (1.7)$$

Tương tự, từ dòng nhánh qua R_2 có thể xác định dòng tổng I như sau:

$$I = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times I_{R_2} \quad (1.8)$$

Mạch chia dòng được sử dụng phổ biến trong mạch đầu vào của Ampe mét để mở rộng thang đo cho Ampe mét như ví dụ trong hình 1.10(b).

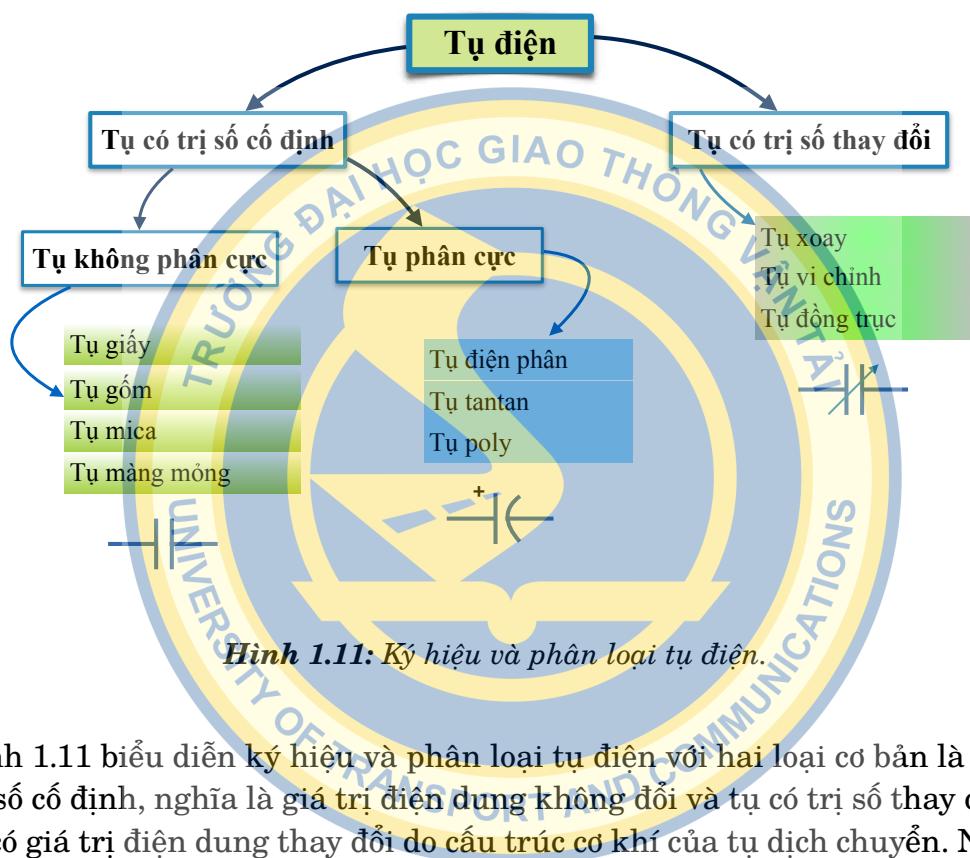
Ngoài ra, điện trở còn được sử dụng để xác định hằng số thời gian trong các mạch có sự phóng/nạp của tụ điện; phối hợp trở kháng giữa các mạch và làm cảm biến nhiệt, cảm biến quang ...

⁷có hai điểm nối chung và sụt áp trên hai điện trở như nhau

1.2 TỤ ĐIỆN

Tụ điện (*Capacitor*)⁸ là linh kiện điện tử dùng để lưu trữ năng lượng điện dưới dạng điện tích. Tụ điện được cấu tạo bởi hai bản cực làm bằng chất dẫn điện ở giữa là lớp điện môi. Tên của tụ điện thường được đặt theo vật liệu làm lớp điện môi, ví dụ như là tụ mica, tụ giấy, tụ gốm, tụ tantan ...

1.2.1 Ký hiệu và phân loại



Hình 1.11 biểu diễn ký hiệu và phân loại tụ điện với hai loại cơ bản là tụ có trị số cố định, nghĩa là giá trị điện dung không đổi và tụ có trị số thay đổi là tụ có giá trị điện dung thay đổi do cấu trúc cơ khí của tụ dịch chuyển. Ngoài ra, tụ điện cũng có loại phân biệt cực tính dương / âm⁹ hoặc không phân biệt cực tính.

Hình dạng thực tế của một số loại tụ điện thông dụng được minh họa trong hình 1.12 với các kiểu đóng gói THD hay SMD và loại có trị số cố định cũng như trị số thay đổi.

⁸trong sơ đồ mạch, tụ điện được ký hiệu là C

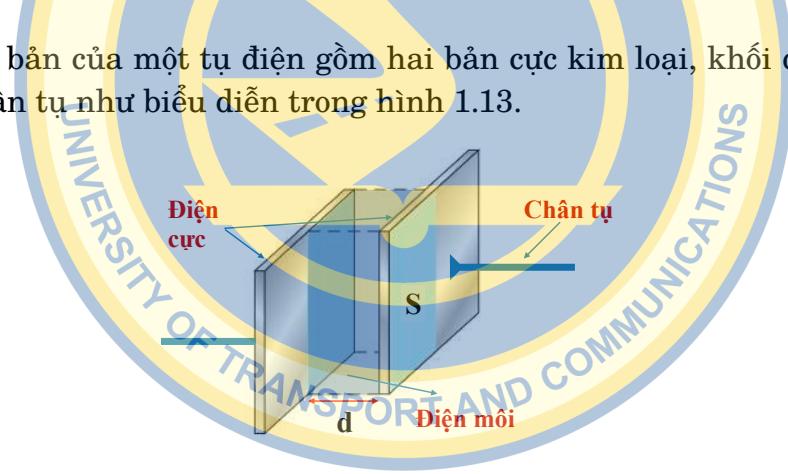
⁹chân tụ tương ứng với cực âm thường được đánh dấu rõ ràng trên thân tụ



Hình 1.12: Hình ảnh một số tụ điện trong thực tế [11].

1.2.2 Cấu tạo chung và nguyên tắc hoạt động

Cấu tạo cơ bản của một tụ điện gồm hai bản cực kim loại, khối điện môi ở giữa và chân tụ như biểu diễn trong hình 1.13.



Hình 1.13: Cấu tạo điển hình của một tụ điện.

Giá trị điện dung của tụ ký hiệu là C, đơn vị là Fara - F, nếu xét theo cấu tạo [3] thì được xác định theo biểu thức:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \times \frac{S}{d} \quad (1.9)$$

trong đó:

ϵ_r là hệ số điện môi tương đối của chất điện môi; được xác định bằng tỉ số giữa độ điện thẩm ϵ của chất điện môi và độ điện thẩm của chân không $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$$

S là tiết diện hiệu dụng¹⁰ của hai bản cực tụ;

d là khoảng cách giữa hai bản cực tụ.

Biểu thức 1.9 cho thấy giá trị điện dung của tụ điện tỉ lệ thuận với độ lớn của bản cực tụ và tỉ lệ nghịch với độ dày của lớp điện môi. Vì vậy để tăng dung lượng của tụ điện thì cần tạo lớp điện môi cực mỏng và quấn nhiều lớp. Bên cạnh đó, nếu hai tụ điện có kích thước hình học như nhau thì giá trị điện dung C lại phụ thuộc vào hằng số điện môi tương đối ϵ_r của chất điện môi. Độ lớn của ϵ_r sẽ cho biết điện dung của tụ tăng lên bao nhiêu lần so với khi lớp cách điện là chân không (hay không khí).

Giá trị 1 F là giá trị rất lớn, thông thường tụ điện có các giá trị điện dung theo đơn vị pF, nF hay μF . Tụ có tri số điện dung lớn thường có kích thước lớn nhưng sự nặng nề của tụ phụ thuộc vào điện áp một chiều tối đa mà nó chịu đựng được nhiều hơn là so với trị số điện dung.

Thông số đặc trưng cho mức độ cản trở dòng điện của tụ điện gọi là dung kháng, ký hiệu là $X_C (\Omega)$ được xác định theo biểu thức sau:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1.10)$$

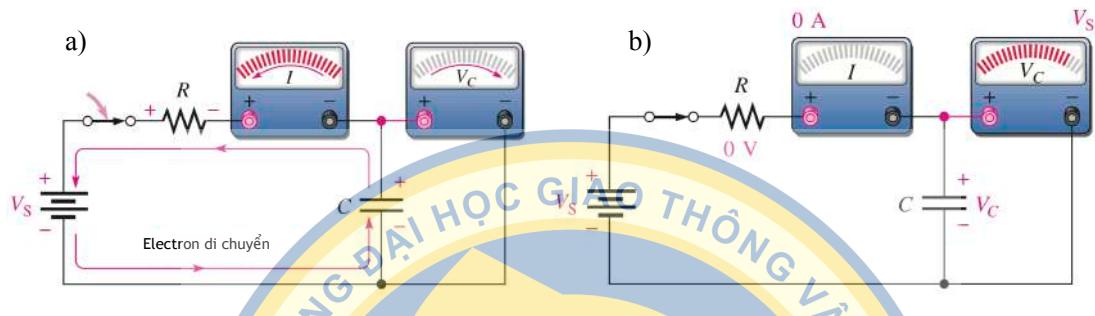
trong đó ω (rad/s) là tần số góc và f (Hz) là tần số của dòng điện qua tụ có điện dung C (F).

Biểu thức 1.10 cho thấy dòng điện một chiều ($f = 0 \text{ Hz}$) không thể qua tụ, tức là tụ đóng vai trò làm hở mạch dòng một chiều. Với dòng xoay chiều thì dòng có tần số càng cao thì càng dễ qua tụ và ngược lại.

¹⁰phần đối diện nhau giữa hai bản cực

* Quá trình phóng / nạp của tụ điện

Khi nối tụ điện với nguồn điện áp như hình 1.14(a) tụ sẽ được nạp với dòng điện lớn nhất tại thời điểm bắt đầu vì sự chênh lệch áp giữa nguồn và bản cực tụ là lớn nhất. Sau đó, do điện áp trên bản cực tụ tăng dần nên dòng nạp cũng giảm dần. Kết thúc quá trình nạp là khi điện áp trên bản cực tụ bằng điện áp nguồn V_S , dòng nạp bằng 0 như biểu diễn trong hình 1.14(b).



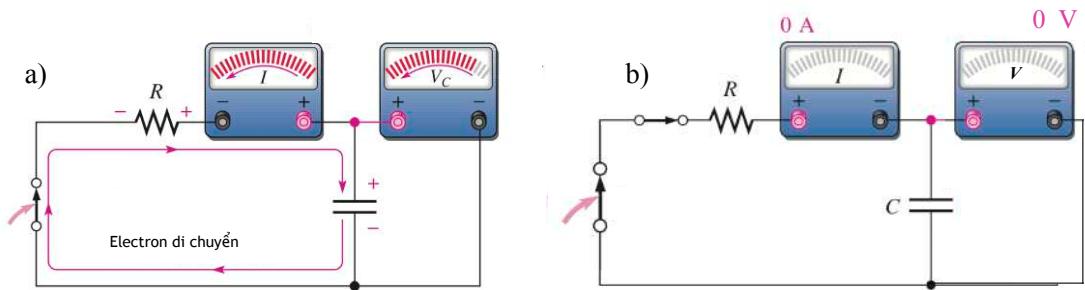
Hình 1.14: Quá trình nạp cho tụ điện: a) Bắt đầu và b) Kết thúc.

Khi giữa hai bản cực tụ có điện áp V_C thì điện tích Q và năng lượng W_C tích trên bản cực tụ [3] được tính theo biểu thức:

$$Q = CV_C \quad (1.11)$$

$$W_C = \frac{1}{2}CV_C^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \quad (1.12)$$

Sau khi tụ điện được nạp đầy, ngắn mạch nguồn điện áp để được mạch như hình 1.15(a). Tụ điện đang có đầy điện tích sẽ phóng dòng điện qua điện trở R làm cho điện tích dương trên bản cực dương giảm dần nên điện áp trên tụ cũng giảm dần trong khi dòng điện cũng giảm dần vì sự chênh lệch áp giảm đi. Khi điện tích trên các bản cực tụ bị trung hoà hết thì quá trình phóng kết thúc, cả dòng và áp trên tụ đều bằng 0 như biểu diễn trong hình 1.15(b).

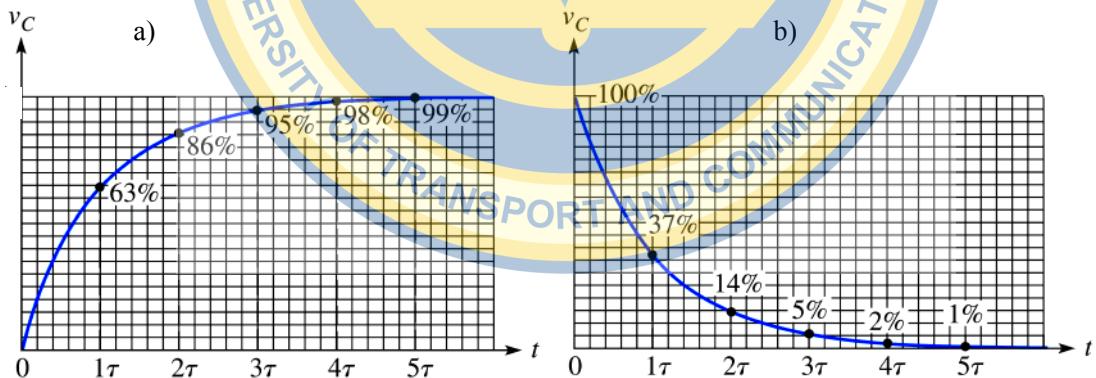


Hình 1.15: Quá trình phỏng (xả) của tụ điện: a) Bắt đầu và b) Kết thúc.

Thời gian nạp/phỏng của tụ điện được xác định theo tham số τ được gọi là hằng số thời gian và được tính theo biểu thức:

$$\tau = RC \quad (1.13)$$

Hình 1.16 thể hiện giá trị điện áp trên tụ đạt được theo thời gian. Nếu tụ nạp/phỏng trong khoảng thời gian 5τ thì điện áp trên tụ tương ứng với 99 % và 1 % của quá trình nạp và phỏng [3], nghĩa là coi như đã nạp đầy và phỏng hết.



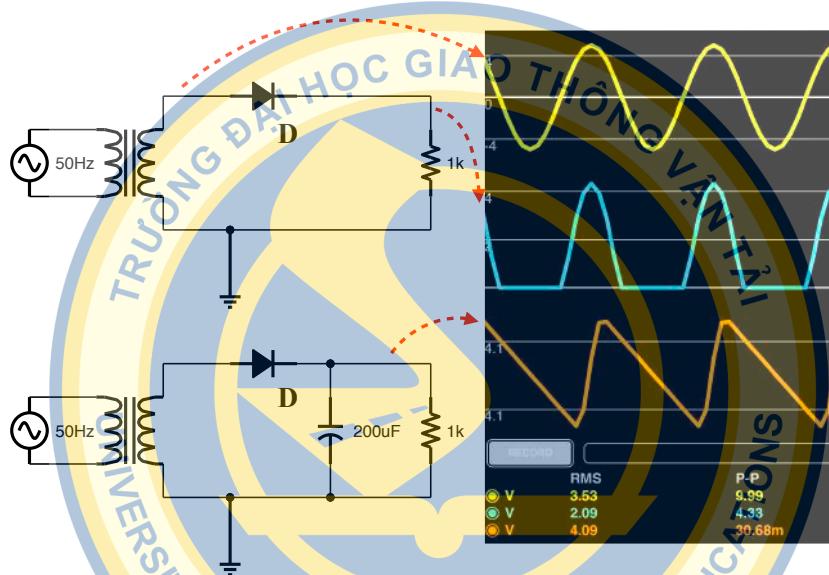
Hình 1.16: Biểu đồ thời gian [3] của điện áp trên tụ trong quá trình:
a) Nạp và b) Phỏng.

1.2.3 Ứng dụng điển hình

Tụ điện không quan trọng trong các mạch điện một chiều không đổi thuần túy nhưng nó trở nên có ý nghĩa tại nơi có dòng một chiều không đều đang dao động hay mạch điện xoay chiều. Một số ứng dụng dưới đây sẽ làm rõ điều này.

a. Tụ san phẳng điện áp trong mạch nguồn

Một mạch chỉnh lưu chuyển đổi dòng xoay chiều thành một chiều trong trường hợp không và có sử dụng tụ điện được biểu diễn trong hình 1.17.



Hình 1.17: Mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ khi không sử dụng tụ điện (trên) và khi có sử dụng tụ điện (dưới).

Khi không có tụ điện, dòng qua tải có dạng đứt quãng vì chỉ có bán kỵ dương của điện áp vào làm diode dẫn dòng¹¹. Khi sử dụng tụ thì do tụ nạp lúc diode dẫn và phóng khi diode ngắt nên dòng qua tải coi như liên tục. Tụ điện cần sử dụng trong trường hợp này gọi là **tụ nguồn** và có trị số điện dung lớn.

Kết quả mô phỏng trong hình 1.17 cho thấy khi không sử dụng tụ, điện áp trên tải có dạng nửa hình sin với các bán kỵ dương có biên độ đỉnh-đỉnh là

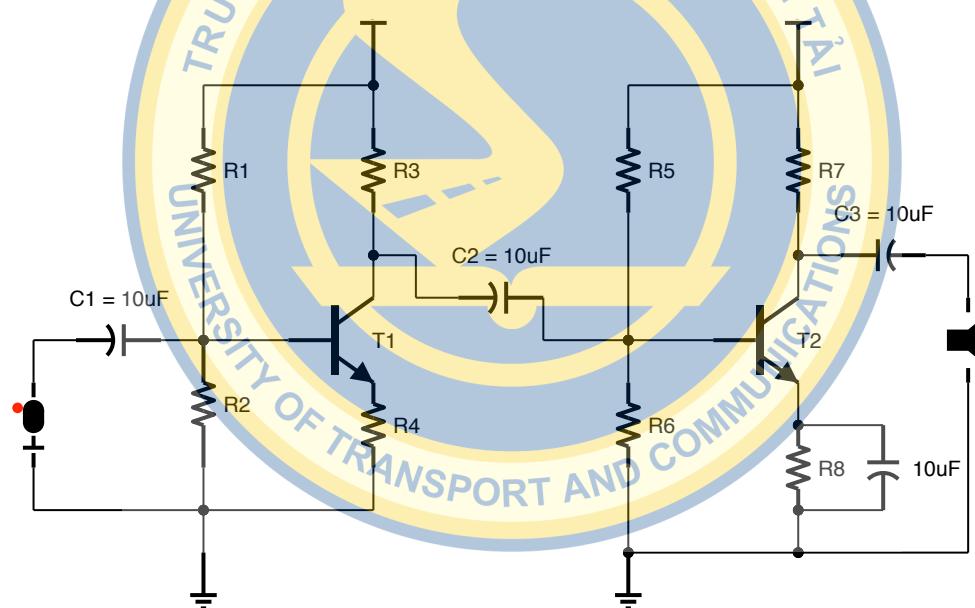
¹¹hoạt động của diode sẽ được trình bày chi tiết trong Chương 2

4,33 V; giá trị hiệu dụng¹² là 2,09 V. Khi sử dụng tụ $200 \mu\text{F}$ mắc song song với tải thì điện áp trên tải lúc này có biên độ đỉnh-đỉnh chỉ còn là 30,68 mV và giá trị hiệu dụng là 4,09 V. Điều này có nghĩa là nhờ có hiệu tượng nạp/phóng của tụ mà điện áp ngắn quãng trên tải sau mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ đã gần như được san phẳng để có giá trị đầu ra ổn định hơn rất nhiều.

Lưu ý là để tụ có lượng điện tích đủ lớn để phóng trong khoảng thời gian không có dòng cung cấp từ nguồn mà điện áp trên tải không bị sụt quá nhiều thì tụ cần có điện dung tương đối lớn và điện áp một chiều tối đa mà tụ chịu được phải lớn hơn từ $(1,2 \div 1,5)$ giá trị điện áp đỉnh của điện áp một chiều đặt lên nó.

b. Tụ ghép tầng tín hiệu

Hình 1.18 biểu diễn một mạch khuếch đại¹³ âm thanh sử dụng các tụ điện để nối tầng.



Hình 1.18: Tụ điện được sử dụng để dẫn tín hiệu giữa các tầng trong mạch khuếch đại.

¹²trong hình 1.17, ký hiệu $p - p$ là giá trị đỉnh-đỉnh; rms là giá trị hiệu dụng

¹³mạch này sẽ được trình bày chi tiết trong Chương 4

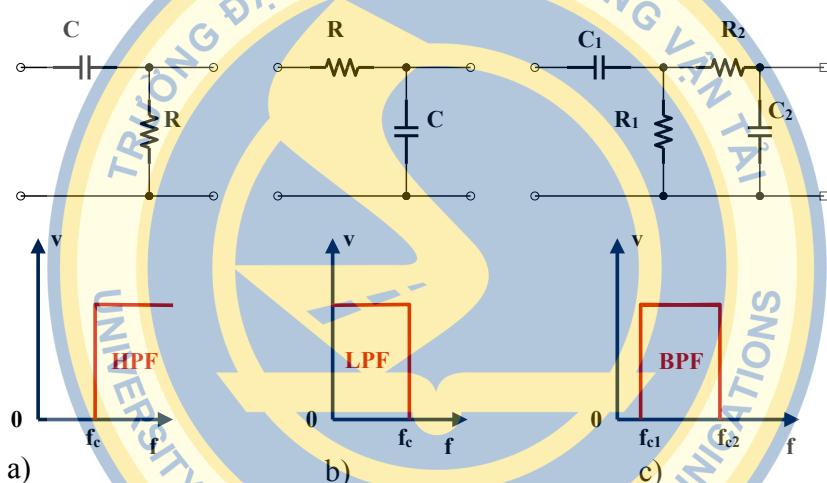
Chương 1: Linh kiện điện tử thụ động

Trong đó, tụ điện C_1, C_2 lần lượt có nhiệm vụ dẫn tín hiệu xoay chiều từ micro vào tầng khuếch đại T_1 , dẫn từ T_1 sang T_2 và từ T_2 ra loa trong khi chặn thành phần một chiều giữa các tầng để các tầng độc lập nhau ở chế độ tĩnh (*nội dung này sẽ được thảo luận chi tiết trong các chương sau*).

Chú ý: Giá trị của tụ nối tầng được chọn sao cho tại khu vực tần số làm việc của mạch, trớ kháng của tụ nhỏ hơn ít nhất là 10 lần so với trớ kháng vào của mạch phía sau.

c. **Tụ lọc tần số**

Khi tụ điện kết hợp với điện trở hoặc cuộn dây như trong hình 1.19 thì sẽ tạo thành mạch chọn lọc tần số với tần số cắt¹⁴ f_c và đặc tuyến tần số lý tưởng thể hiện tương ứng.



Hình 1.19: Ví dụ một số mạch lọc (trên) và đặc tuyến tần số tương ứng (dưới).

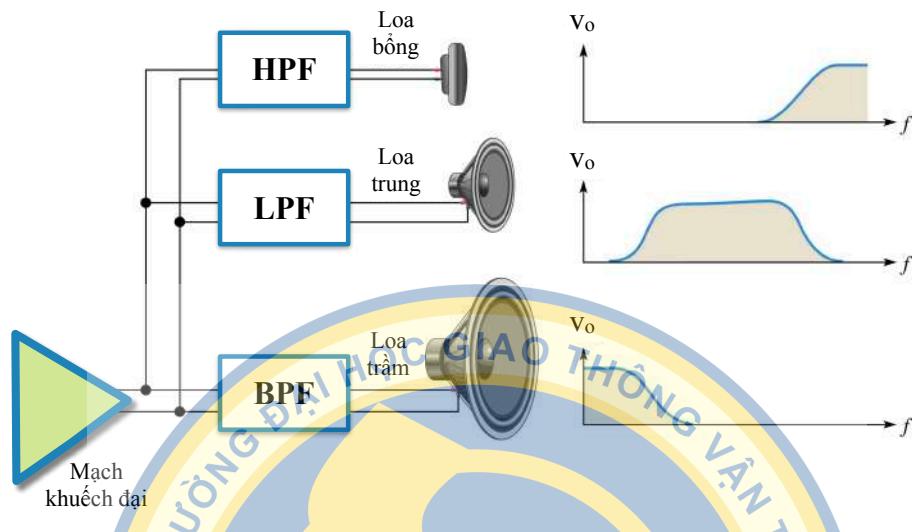
trong đó:

- + Hình 1.19(a) là mạch lọc thông cao - HPF (High-Pass Filter) chỉ cho qua tần số cao hơn tần số cắt f_c ;
- + Hình 1.19(b) là mạch lọc thông thấp - LPF (Low-Pass Filter) chỉ cho qua tần số thấp hơn tần số cắt f_c ;

¹⁴tần số cắt là tần số mà tại đó giá trị điện áp đầu ra hoặc hệ số truyền đạt của mạch giảm đi 0,707 lần so với tại tần số trung tâm

+ Hình 1.19(c) là mạch lọc thông dải - BPF (Band-Pass Filter) chỉ cho qua tần số nằm trong khoảng ($f_{c1} \div f_{c2}$).

Như vậy bằng việc sử dụng mạch lọc tần số mà có thể chọn lọc ra dải tần mong muốn như ví dụ trong hình 1.20.



Hình 1.20: Minh họa một ứng dụng của mạch lọc tần số trong dàn âm thanh.

Tín hiệu sau khi được khuếch đại sẽ được đưa tới bộ HPF trước khi ra loa bõng (tần số cao), bộ LPF trước khi ra loa trung (tần số trung) và bộ BPF trước khi ra loa trầm (tần số thấp).

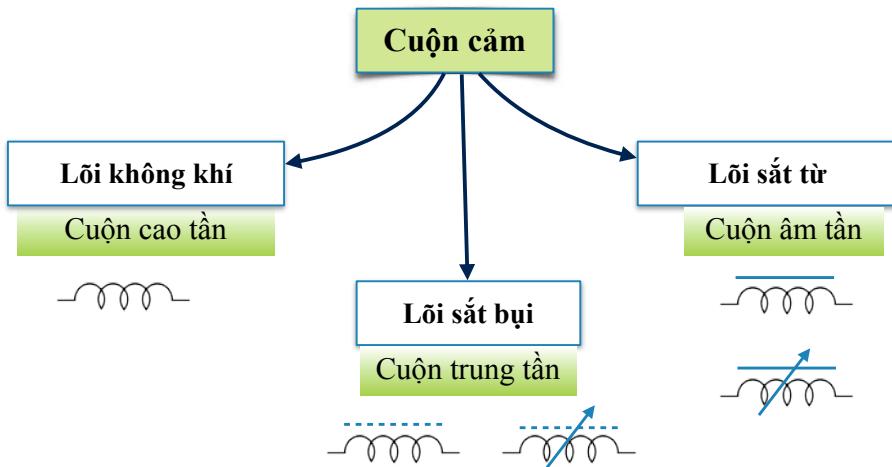
1.3 CUỘN CẢM

Cuộn cảm (Inductor)¹⁵ là linh kiện thụ động cản trở dòng xoay chiều bằng cách tích trữ năng lượng dưới dạng từ trường.

1.3.1 Ký hiệu và phân loại

Ký hiệu và phân loại cuộn cảm có thể được thực hiện bằng cách chia theo vật liệu làm lõi, theo khu vực tần số làm việc như mô tả trong hình 1.21.

¹⁵trong sơ đồ mạch, cuộn cảm được ký hiệu là L



Hình 1.21: Ký hiệu và phân loại cuộn cảm.

Trong đó cuộn lõi không khí hay lõi không có từ tính thường có trị số cố định rất nhỏ và làm việc ở khu vực cao tần. Cuộn lõi sắt bụi và cuộn lõi sắt từ thường làm việc ở khu vực tần số thấp hơn và trị số có thể thay đổi tùy theo vị trí của lõi.

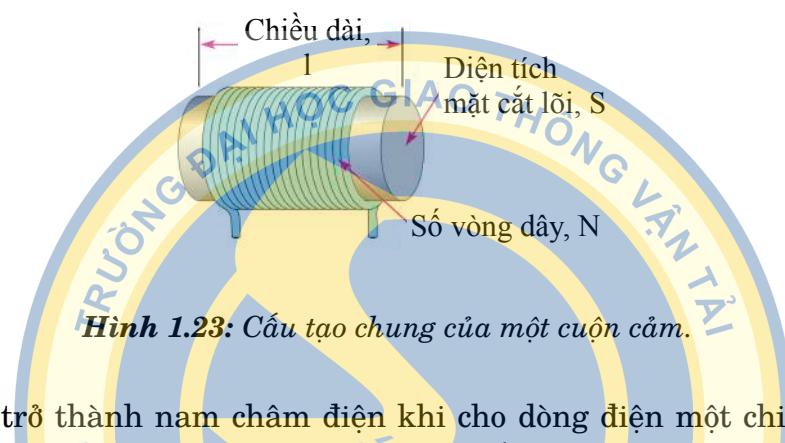


Hình 1.22: Một số hình ảnh thực tế của cuộn cảm [11].

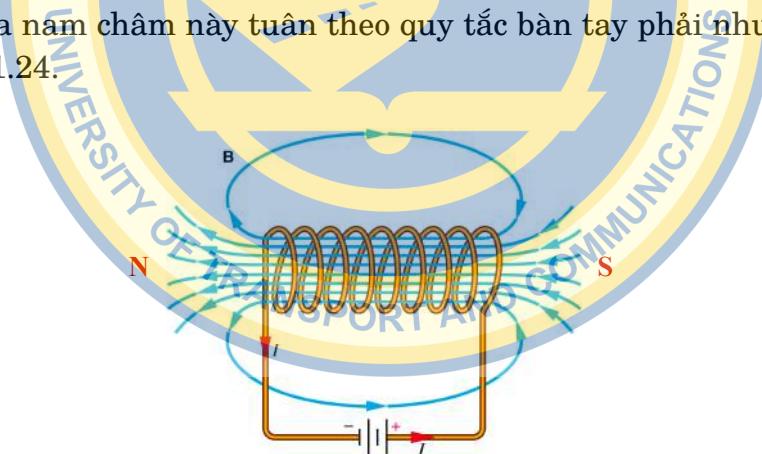
Hình ảnh thực tế của một số cuộn cảm điển hình được cho trong hình 1.22. Hình này cho thấy sự đa dạng của các loại cuộn cảm, từ kiểu xuyên lõi rất đơn giản chỉ có vài vòng dây (nên còn gọi là cuộn dây), đến loại khá phức tạp kiểu hàn dán hay loại có lõi và cả vỏ bọc.

1.3.2 Cấu tạo chung và nguyên tắc hoạt động

Cuộn cảm có cấu trúc cơ bản như mô tả trong hình 1.23 với dây kim loại quấn quanh một lõi. Lõi của cuộn cảm được làm từ vật liệu có từ tính như sắt từ, sắt bụi hoặc vật liệu không có từ tính như không khí, nến.



Cuộn cảm trở thành nam châm điện khi cho dòng điện một chiều đi qua. Cực tính của nam châm này tuân theo quy tắc bàn tay phải như minh họa trong hình 1.24.

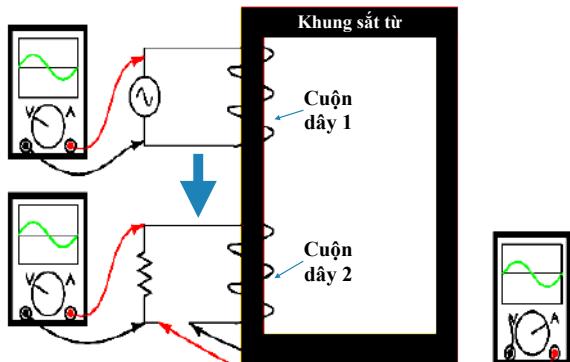


Hình 1.24: Cuộn dây trở thành nam châm điện khi có dòng điện một chiều đi qua.

Khi cho dòng điện xoay chiều qua cuộn cảm sẽ có một sức điện động tự cảm được sinh ra để chống lại sự biến thiên của dòng điện sinh ra nó. Hiện tượng

Chương 1: Linh kiện điện tử thụ động

tương tự xảy ra nếu đặt một cuộn dây trong từ trường biến thiên của một cuộn dây khác, gọi là hiện tượng hổ cảm như minh họa trong hình 1.25.



Hình 1.25: Hiện tượng cảm ứng sang cuộn dây 2 do tác động của từ trường biến thiên của cuộn dây 1.

Đặc trưng cho khả năng cảm ứng của cuộn dây là hệ số độ tự cảm, ký hiệu là L, đơn vị tính là Henry - H và được xác định theo biểu thức [3]:

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2}{l} S \quad (1.14)$$

trong đó:

μ_r là độ từ thẩm tương đối so với chân không của vật liệu làm lõi; được xác định bằng tỉ số của độ từ thẩm μ của vật liệu làm lõi so với độ từ thẩm của chân không $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

N là số vòng dây quấn trên lõi;

l là chiều dài của lõi;

S là tiết diện của lõi.

Bíểu thức 1.14 cho thấy hệ số tự cảm tỉ lệ thuận với độ từ thẩm của vật liệu làm lõi, tức là cuộn cảm lõi sắt từ (độ từ thẩm cao) sẽ có hệ số L lớn hơn so với cuộn cảm lõi sắt bụi (độ từ thẩm thấp) hay cuộn cảm không lõi cùng kích thước. Nếu cùng vật liệu làm lõi thì cuộn dây có càng nhiều vòng dây sẽ có hệ số L càng lớn.

Khi một cuộn cảm có dòng điện I đi qua thì năng lượng từ trường W_L tích lũy trong cuộn cảm được tính theo biểu thức [3]:

$$W_L = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1.15)$$

Hiện tượng cảm ứng chống lại sự biến thiên của dòng xoay chiều được gọi là cảm kháng, ký hiệu là $X_L (\Omega)$. Giá trị cảm kháng của cuộn dây được xác định theo biểu thức:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (1.16)$$

với ω (rad/s) là tần số góc và f (Hz) là tần số của dòng điện qua cuộn dây có độ tự cảm L .

Biểu thức 1.16 cho thấy cuộn cảm được coi như ngắn mạch đối với thành phần dòng điện một chiều ($f = 0$ Hz) vì khi đó trở kháng của nó bằng 0. Với thành phần dòng điện có tần số càng cao thì càng khó qua cuộn cảm vì cảm kháng của nó tăng theo tần số.

Nếu bản thân cuộn cảm có điện trở R bên trong thì trở kháng của nó khi đó được xác định bằng biểu thức:

$$\begin{aligned} Z_L &= R + j X_L = R + j 2\pi f L \\ |Z_L| &= \sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2} \end{aligned} \quad (1.17)$$

1.3.3 Ứng dụng điển hình

a. Cuộn cộng hưởng

Cuộn cộng hưởng là cuộn cảm được sử dụng cùng với tụ điện trong mạch cộng hưởng để tạo dao động, chọn sóng, bẫy nhiễu ...

+ Mạch cộng hưởng song song¹⁶ có trở kháng đạt giá trị lớn nhất tại tần số cộng hưởng, nghĩa là điện áp giữa hai đầu mạch đạt giá trị lớn nhất tại tần số cộng hưởng.

¹⁶cuộn cảm và tụ điện mắc song song với nhau

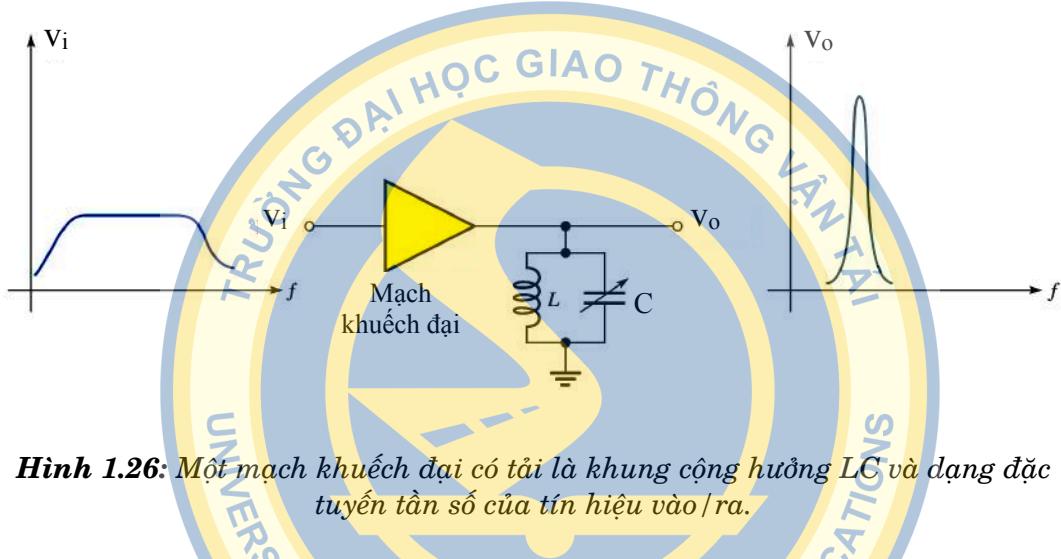
Chương 1: Linh kiện điện tử thụ động

+ Mạch cộng hưởng nối tiếp¹⁷ có trờ kháng đạt giá trị nhỏ nhất tại tần số cộng hưởng, nghĩa là dòng điện trong mạch đạt giá trị lớn nhất tại tần số cộng hưởng.

Tần số cộng hưởng khi đó được tính theo cùng một biểu thức là:

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.18)$$

Hình 1.26 minh họa một khung cộng hưởng LC mắc song song được sử dụng như tải của mạch khuếch đại để chọn lọc tần số.



b. Cuộn lọc

Cuộn lọc là loại cuộn cảm kết hợp với tụ điện để tạo thành các mạch lọc thụ động để phân chia dải tần.

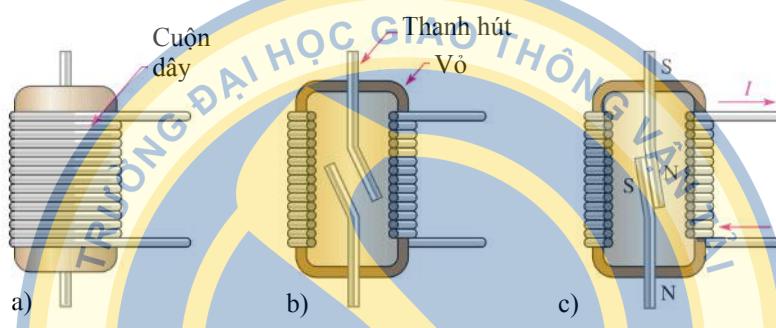
Như đã trình bày trong phần 1.2, hình 1.19 biểu diễn một số mạch lọc RC thụ động và đáp ứng biên độ – tần số của chúng. Tương tự vậy, để có mạch lọc tần số LC thì thay vị trí của điện trở bằng cuộn cảm. Hiện nay rất phổ biến loại mạch lọc LC được chế tạo thành module riêng lẻ để thuận tiện sử dụng.

¹⁷cuộn cảm và tụ điện mắc nối tiếp với nhau

c. Relay điện từ

Relay là một ứng dụng rất phổ biến của cuộn dây cho phép điều khiển công tắc bằng điện thay vì đóng mở bằng tay. Hoạt động của relay điện từ dựa vào hiện tượng cảm ứng từ của cuộn dây khi có dòng điện đi qua. Khi này cuộn dây hoạt động như một nam châm điện có khả năng hút lá kim loại chạm vào tiếp điểm. Khi sử dụng relay cần chú ý điện áp hoạt động và dòng chịu đựng của các tiếp điểm, các thông số này đều được ghi trên thân của relay.

Hình 1.27 mô tả cấu tạo của một relay điện từ đơn giản, trong đó a) là cuộn dây chính, b) là hình cắt cho thấy bên trong cuộn dây khi chưa có dòng qua cuộn dây, hai thanh từ chưa bị từ hóa và c) là hình cắt cho thấy khi có dòng qua cuộn dây hai thanh từ sẽ hút nhau để nối mạch.



Hình 1.27: Một relay điện từ được tạo ra từ cuộn dây và thanh từ bên trong.

d. Liên lạc vô tuyến

Antena của các thiết bị thu phát như điều khiển từ xa, đài phát thanh, truyền hình hay tivi... thực chất cũng là những cuộn dây thu hay phát sóng điện từ. Từ trường biển thiên từ antena phát sẽ lan toả trong không gian và cảm ứng sang các antena ở máy thu và như vậy thông tin được truyền tải đi xa mà không cần truyền tải qua đường dây vật lý.

e. Máy phát điện

Máy phát điện được cấu tạo với bộ phận chính là các cuộn dây bố trí trong lõng của một nam châm. Khi cho các cuộn dây quay hoặc cho nam châm quay (nhờ thuỷ lực, khí nóng, gió hay năng lượng mặt trời ...) sẽ có từ trường biến

Chương 1: Linh kiện điện tử thụ động

thiên và do đó sinh ra cảm ứng điện từ sang các cuộn dây, nghĩa là tạo ra các dòng điện xoay chiều (một pha hoặc ba pha).

1.4 BIẾN ÁP

Biến áp (*Transformer*) là linh kiện dùng để biến đổi độ lớn của điện áp và dòng điện xoay chiều dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ. Trong kỹ thuật điện tử, biến áp được sử dụng trong nhiều mạch khác nhau như mạch nguồn, mạch chọn lọc tần số, mạch khuếch đại công suất ...

1.4.1 Ký hiệu và cấu tạo

Hình 1.28 biểu diễn ký hiệu và hình ảnh thực tế của một số loại biến áp thông dụng.



Hình 1.28: Ký hiệu và hình ảnh của một số loại biến áp thực tế [11].

Biến áp gồm hai hay nhiều cuộn dây được tráng sơn cách điện và quấn chung trên một lõi¹⁸. Lõi của biến áp có thể là sắt lá, sắt bụi hay không khí.

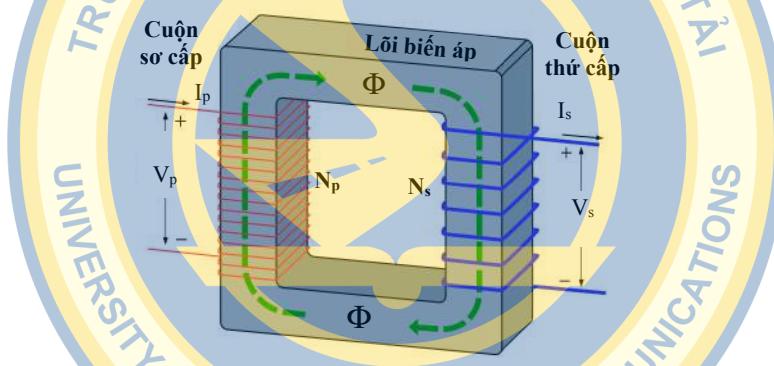
¹⁸lõi biến áp được gọi là mạch từ vì có nhiệm vụ khép kín đường sức từ

Cuộn dây đầu vào nguồn xoay chiều gọi là cuộn sơ cấp (*primary coil*), cuộn đầu ra tải tiêu thụ gọi là cuộn thứ cấp (*secondary coil*). Theo định luật Faraday, hiện tượng cảm ứng điện từ chỉ xảy ra khi có từ trường biến thiên; vì vậy, biến áp chỉ hoạt động khi cuộn sơ cấp được cung cấp dòng điện xoay chiều.

Khi đưa dòng điện xoay chiều vào cuộn dây sơ cấp thì dòng điện sẽ tạo ra từ trường biến thiên chạy trong mạch từ (chính là lõi hình chữ nhật rỗng hoặc hình xuyên) và cảm ứng sang cuộn dây thứ cấp. Cuộn dây thứ cấp nhận được từ trường biến thiên nên trong nó sẽ xuất hiện một dòng điện cảm ứng xoay chiều cùng tần số.

1.4.2 Các thông số kỹ thuật cơ bản của biến áp

Hình 1.29 biểu diễn cấu trúc đơn giản của biến áp và các thông số cơ bản trên các cuộn dây. Đại lượng điện áp, dòng điện¹⁹ và công suất được thể hiện trong hình với chỉ số _p cho bên sơ cấp và chỉ số _s cho bên thứ cấp.



Hình 1.29: Cấu tạo cơ bản và các thông số chính của biến áp.

1.4.2.1 Hệ số biến áp n

Giả sử số vòng dây của cuộn sơ cấp là N_p và cuộn thứ cấp có số vòng dây là N_s . Khi đó tỷ số giữa số vòng dây của cuộn sơ cấp và số vòng dây của cuộn thứ cấp được gọi là hệ số biến áp n .

¹⁹nếu hai cuộn dây được quấn cùng chiều thì dòng và áp trên cuộn thứ cấp sẽ cùng dấu với dòng và áp trên cuộn sơ cấp và ngược lại

$$n = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.19)$$

1.4.2.2 Hệ số ghép biến áp K

K là tỉ số giữa từ thông liên kết giữa hai cuộn dây và tổng từ thông sinh ra bởi hai cuộn dây. K được tính theo biểu thức:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1.20)$$

với M là hệ số hõ cảm giữa cuộn sơ cấp có hệ số tự cảm L_p và cuộn thứ cấp có hệ số tự cảm L_s . Hõ cảm M là thông số biểu thị sự liên hệ về từ giữa hai cuộn dây.

Độ lớn của hệ số K phản ánh cách ghép giữa hai cuộn dây.

- + Khi hai cuộn dây không có liên hệ với nhau về từ trường thì $K = 0$;
- + Khi chỉ có một lượng nhỏ từ thông từ bên cuộn sơ cấp được chuyển qua cho cuộn thứ cấp thì $K \ll 1$ gọi là ghép lỏng;
- + Khi hầu hết từ thông từ bên cuộn sơ cấp được chuyển qua cho cuộn thứ cấp thì $K \approx 1$ gọi là ghép chật;
- + Lý tưởng, hệ số ghép biến áp $K = 1$; khi đó, toàn bộ số từ thông sinh ra do cuộn sơ cấp đều được đi qua cuộn thứ cấp và ngược lại.

1.4.2.3 Các tỉ lệ của biến áp

Bảng 1.2 thể hiện các biểu thức biểu diễn mối quan hệ giữa các đại lượng điện áp, dòng điện, điện trở và công suất của hai bên thứ cấp và sơ cấp của biến áp trong điều kiện ghép chật lý tưởng ($K = 1$).

1.4. BIẾN ÁP

Bảng 1.2: Tỉ lệ giữa các thông số của biến áp trong điều kiện ghép chát lý tưởng.

Thông số	Công thức tính
Tỉ lệ về điện áp	$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = n \quad (1.21)$

Tỉ lệ về dòng điện

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{n} \quad (1.22)$$

Tỉ lệ về điện trở

$$\frac{R_p}{R_s} = n^2 \quad (1.23)$$

Công suất

$$P_s = P_p \quad (1.24)$$

Chú ý:

- + Biểu thức 1.21 và 1.22 cho thấy một biến áp tăng áp bao giờ cũng làm hạ dòng và ngược lại, biến áp hạ áp sẽ làm tăng dòng;
- + R_s là điện trở mắc với cuộn thứ cấp, khi đó sẽ làm xuất hiện một điện trở phản ánh²⁰ về bên sơ cấp, gọi là R_p .

1.4.2.4 Hiệu suất của biến áp

Để đánh giá chất lượng của biến áp có thể sử dụng thông số hiệu suất của biến áp, đây là tỉ số giữa công suất đầu ra và công suất đầu vào như thể hiện

²⁰đây không phải là linh kiện vật lý thực sự

trong biểu thức 1.25.

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100 \% = \frac{P_s}{P_s + P_{\text{loss}}} \times 100 \% \quad (1.25)$$

trong đó:

P_p là công suất cấp cho cuộn sơ cấp;

P_s là công suất thu được ở cuộn thứ cấp;

P_{loss} là công suất mất mát do tổn hao trên cuộn dây và mạch từ.

Khi hở mạch tải trên mạch bên thứ cấp thì vẫn có tổn hao trên biến áp gọi là tổn hao không tải, nó thường chiếm khoảng 5% công suất danh định của biến áp. Khi biến áp có tải lớn nhất theo công suất danh định (gọi là đầy tải) thì hiệu suất cao nhất khoảng 80% đến 90%.

Để tăng hiệu suất của biến áp phải giảm tổn hao bằng cách dùng lõi làm bằng các lá sắt từ mỏng có quét sơn cách điện²¹, dây quấn dùng loại có tiết diện lớn và ghép chật.

1.4.3 Phân loại và ứng dụng của biến áp

Biến áp được phân loại theo ứng dụng của chúng, một số loại biến áp thường gặp bao gồm:

a. Biến áp nguồn (biến áp cấp điện)

Biến áp nguồn là biến áp làm việc ở tần số 50 Hz hoặc 60 Hz²² để biến đổi điện áp thường là 220 V, 50 Hz hoặc 110 V, 60 Hz thành điện áp và dòng điện đầu ra theo yêu cầu đồng thời ngăn cách thiết bị khỏi nguồn điện cao áp.

Các biến áp nguồn thường có 3 đầu vào (0 V, 110 V, 220 V) và nhiều đầu ra (0 V; 1, 5 V; 3 V; 4, 5 V; ... 24 V).

Các thông số chính để chọn biến áp nguồn là các trị số điện áp đầu ra và dòng điện lớn nhất qua được biến áp. Hai thông số này sẽ quyết định tới kích

²¹để giảm thiểu phát sinh nhiệt do dòng Fucos

²²đây là các tần số của lưới điện dân dụng

thước và giá thành của biến áp. Các yêu cầu đối với một biến áp nguồn tốt là tổn hao trong lõi nhỏ, hệ số ghép cao và kích thước nhỏ gọn. Tuy nhiên, do làm việc với dòng điện có tần số thấp nên biến áp nguồn phải sử dụng lõi sắt từ nên kích thước thường cồng kềnh và nặng nề.

b. Biến áp cộng hưởng

Loại biến áp này thường là biến áp cao tần có lõi không khí, sắt bụi hoặc ferit được ghép lỏng để có thể điều chỉnh lõi. Các tụ được mắc với các cuộn sơ cấp và thứ cấp để tạo thành các mạch cộng hưởng. Nếu chỉ có một tụ gọi là mạch cộng hưởng đơn, nếu có hai tụ gọi là cộng hưởng kép hoặc cộng hưởng lệch (nếu tần số cộng hưởng lệch nhau).

Biến áp cộng hưởng thường ~~được sử dụng làm tải cho các tầng khuếch đại trộn tần, chọn lọc tần số~~.

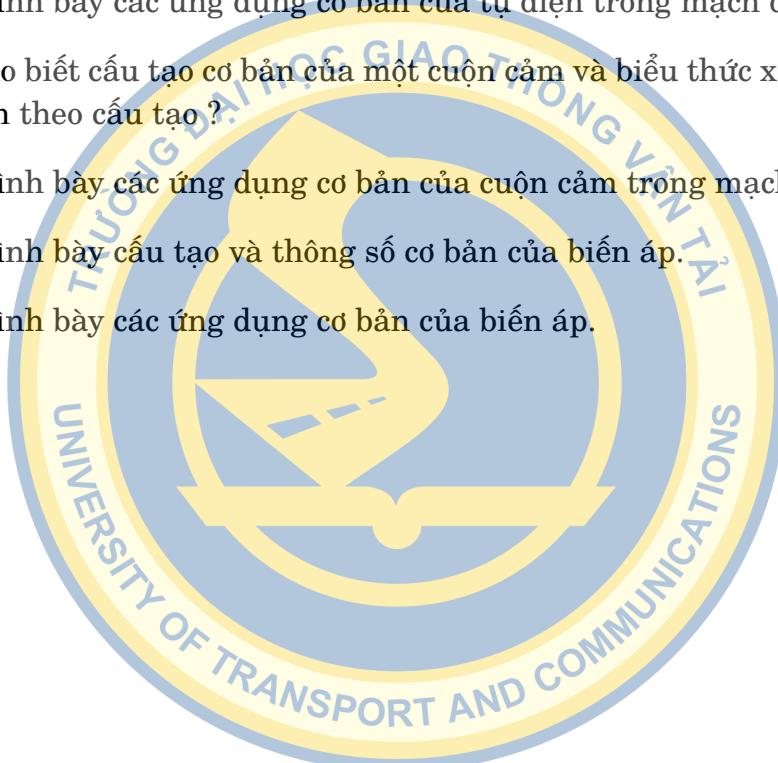
c. Biến áp âm tần

Biến áp âm tần làm việc ở dải tần số âm tần ($20\text{ Hz} \div 20\text{ kHz}$). Biến áp này cho phép biến đổi điện áp mà không gây méo dạng sóng, ngăn cách thành phần một chiều giữa các tầng, biến đổi pha ... Do làm việc ở tần số thấp nên các biến áp âm tần thường có lõi sắt từ, kích thước và trọng lượng lớn. Chính vì lý do này mà biến áp âm tần càng ngày càng ít được sử dụng.

Ôn tập chương 1

CÂU HỎI LÝ THUYẾT

- 1.1.** Hãy cho biết cấu tạo cơ bản của một điện trở và biểu thức xác định trị số điện trở theo cấu tạo ?
- 1.2.** Hãy trình bày các ứng dụng cơ bản của điện trở trong mạch điện tử.
- 1.3.** Hãy cho biết cấu tạo cơ bản của một tụ điện và biểu thức xác định trị số tụ điện theo cấu tạo ?
- 1.4.** Hãy trình bày các ứng dụng cơ bản của tụ điện trong mạch điện tử.
- 1.5.** Hãy cho biết cấu tạo cơ bản của một cuộn cảm và biểu thức xác định trị số cuộn cảm theo cấu tạo ?
- 1.6.** Hãy trình bày các ứng dụng cơ bản của cuộn cảm trong mạch điện tử.
- 1.7.** Hãy trình bày cấu tạo và thông số cơ bản của biến áp.
- 1.8.** Hãy trình bày các ứng dụng cơ bản của biến áp.



Chương 2

LINH KIỆN ĐIỆN TỬ BÁN DẪN

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Cấu tạo và nguyên tắc làm việc của các linh kiện điện tử bán dẫn điển hình như diode, transistor, thyristor...
- ▷ Phân biệt các kiểu khác nhau trong mỗi loại linh kiện;
- ▷ Các ứng dụng điển hình của mỗi loại linh kiện.

2.1 CHẤT BÁN DẪN VÀ CHUYỂN TIẾP P-N

Chất bán dẫn là chất có độ dẫn điện nằm trong khoảng $(10^{-7} \div 10^3 (\Omega m)^{-1})$ như đã giới thiệu trong Phụ lục B.

Có hai loại chất bán dẫn là chất bán dẫn thuần (còn gọi là bán dẫn ròng hay bán dẫn nguyên tính) và chất bán dẫn tạp (hay bán dẫn ngoại tính gồm loại N và loại P).

2.1.1 Chất bán dẫn thuần

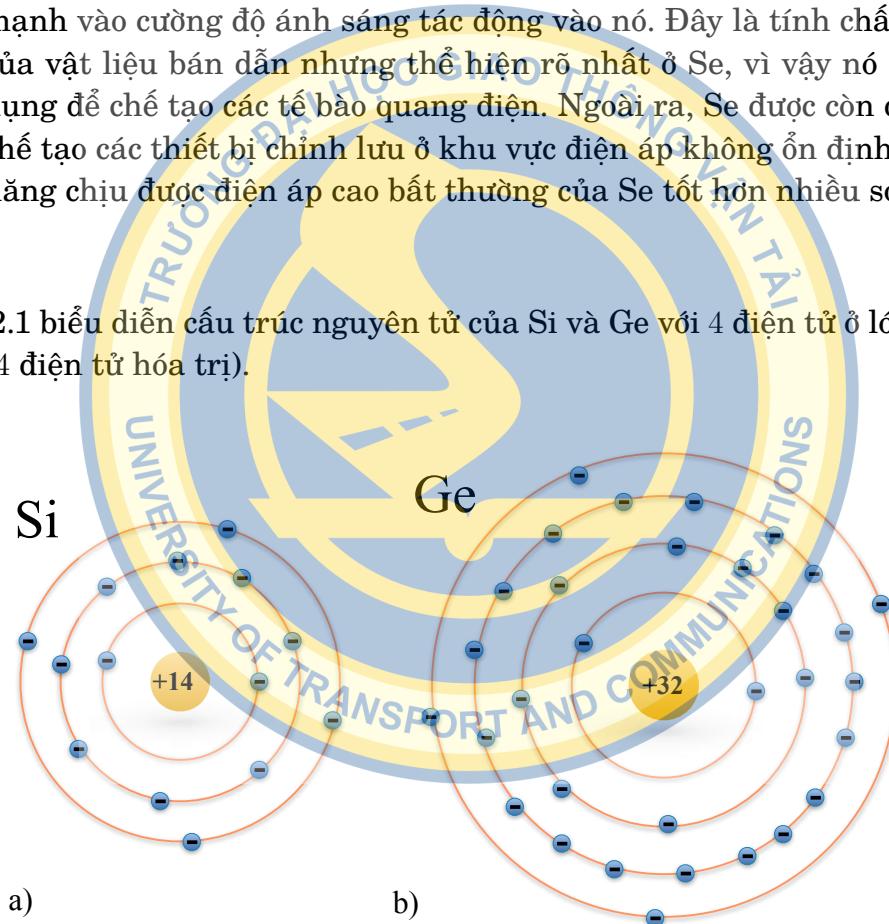
Chất bán dẫn thuần (bán dẫn nguyên tính) là chất bán dẫn mà trong cấu trúc mạng tinh thể tại mỗi nút mạng chỉ có nguyên tử của một nguyên tố nhóm IV. Các chất bán dẫn thuần điển hình là:

- ▷ Silicon (*Si*), là nguyên tố thứ 14 trong bảng tuần hoàn và là nguyên tố phổ biến nhất trên trái đất sau Oxy. Trong kỹ thuật điện tử, Si được sử dụng rộng rãi để chế tạo linh kiện bán dẫn như diode, transistor và mạch tích hợp. Si có thể được khai thác trong tự nhiên hoặc để có chất

lượng cao nhất thì tạo ra bằng cách nuôi các tinh thể trong điều kiện phòng thí nghiệm, sau đó sẽ được đưa vào sản xuất.

- ▷ Germanium (*Ge*) là nguyên tố thứ 32 trong bảng tuần hoàn, ở dạng nguyên chất nó là một chất dẫn điện kém. Ge trở thành chất dẫn điện tốt hơn nhiều khi thêm một số tạp chất vào. Ge được sử dụng rộng rãi trong giai đoạn đầu khi con người bắt đầu chế tạo được các linh kiện từ chất bán dẫn nhưng vì dễ bị hỏng bởi nhiệt độ nên sau đó vật liệu này ít được dùng, trừ những trường hợp đặc biệt.
- ▷ Selenium (*Se*) là nguyên tố ở vị trí thứ 34, có trở kháng phụ thuộc rất mạnh vào cường độ ánh sáng tác động vào nó. Đây là tính chất chung của vật liệu bán dẫn nhưng thể hiện rõ nhất ở Se, vì vậy nó được sử dụng để chế tạo các tế bào quang điện. Ngoài ra, Se được còn dùng để chế tạo các thiết bị chỉnh lưu ở khu vực điện áp không ổn định do khả năng chịu được điện áp cao bất thường của Se tốt hơn nhiều so với Si.

Hình 2.1 biểu diễn cấu trúc nguyên tử của Si và Ge với 4 điện tử ở lớp ngoài cùng (4 điện tử hóa trị).



Hình 2.1: Cấu trúc nguyên tử của a) Silicon và b) Germanium.

2.1. CHẤT BÁN DẪN VÀ CHUYỂN TIẾP P-N

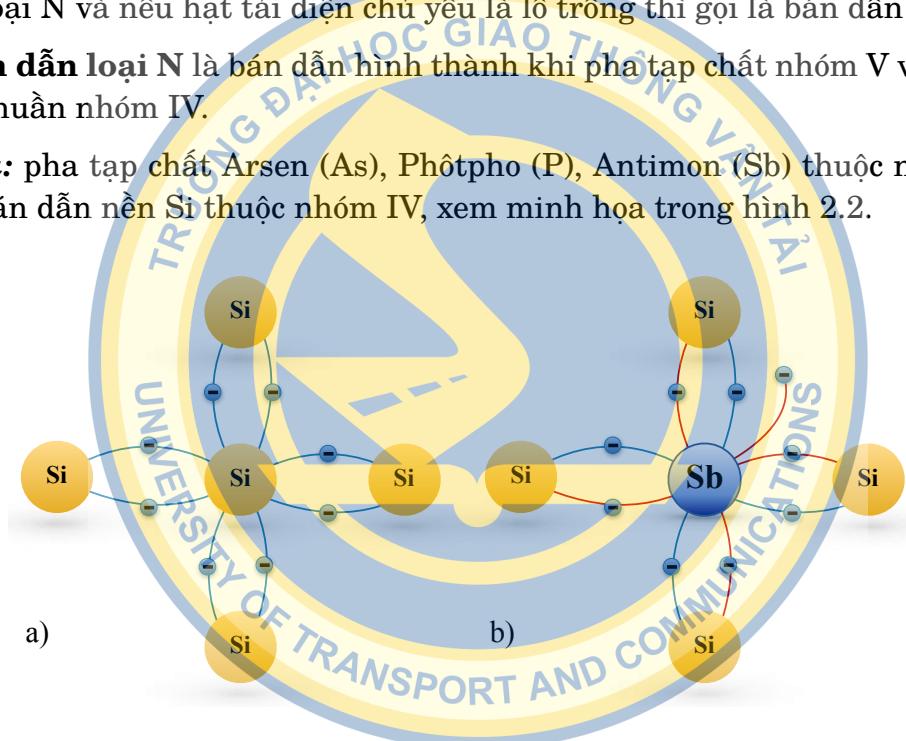
2.1.2 Chất bán dẫn pha tạp

Chất bán dẫn thuần có nồng độ electron tự do bằng nồng độ lỗ trống nên đặc tính điện không tốt. Để có tính chất điện mong muốn cần phải đưa các chất khác vào chất bán dẫn thuần.

Quá trình thêm tạp chất vào được gọi là **quá trình pha tạp (doping)** và việc này làm cho tính chất của vật liệu thay đổi rất nhiều tùy vào chất pha tạp và nồng độ của chất đó. Nghĩa là, bán dẫn pha tạp (bán dẫn ngoại tính) là bán dẫn mà trong mạng tinh thể ở một số nút mạng được thay thế bởi nguyên tử của một nguyên tố khác. Mức độ pha tạp được tính bằng đơn vị ppm (đơn vị phần triệu). Khi này nồng độ của điện tử và lỗ trống không còn cân bằng nữa. Nếu bán dẫn có hạt tải điện chủ yếu là điện tử thì gọi đó bán dẫn loại N và nếu hạt tải điện chủ yếu là lỗ trống thì gọi là bán dẫn loại P.

+ **Bán dẫn loại N** là bán dẫn hình thành khi pha tạp chất nhóm V vào bán dẫn thuần nhóm IV.

Ví dụ: pha tạp chất Arsen (As), Phôtpho (P), Antimon (Sb) thuộc nhóm V vào bán dẫn nền Si thuộc nhóm IV, xem minh họa trong hình 2.2.



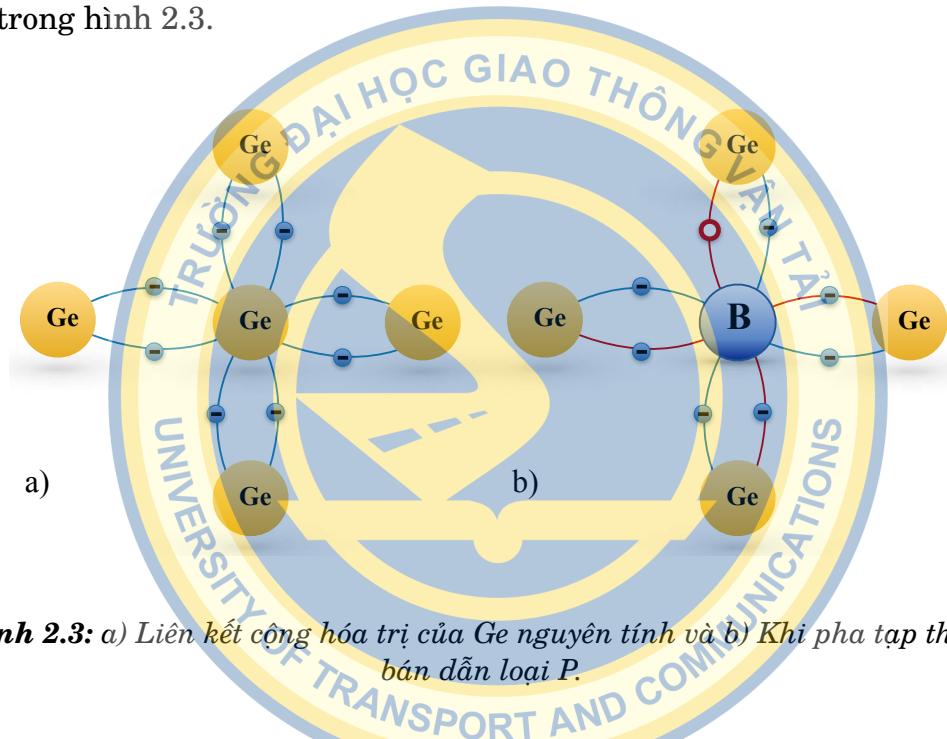
Hình 2.2: a) Liên kết cộng hóa trị của Si nguyên tính và b) khi pha tạp thành bán dẫn loại N.

Nguyên tử tạp chất có 5 điện tử hóa trị ở lớp ngoài cùng nên nó sẽ dùng 4 điện tử cho 4 liên kết cộng hóa trị với 4 nguyên tử Si (hoặc Ge) ở bên cạnh. Điện tử thứ 5 sẽ thừa ra và có liên kết rất yếu với nguyên tử tạp chất. Để giải phóng điện tử này chỉ cần cung cấp một năng lượng rất nhỏ vào khoảng

0,01 eV đối với Ge và 0,05 eV đối với Si. Khi tách khỏi nguyên tử thì điện tử thứ 5 sẽ trở thành điện tử tự do và nguyên tử tạp chất trở thành ion dương cố định. Như vậy, số điện tử tự do chính bằng số nguyên tử pha tạp vào. Tạp chất nhóm V vì vậy được gọi là tạp chất cho (hay tạp chất donor). Ở nhiệt độ phòng các điện tử thứ 5 đều được giải phóng thành điện tử tự do, vì vậy trong bán dẫn loại N nồng độ hạt dẫn điện tử nhiều hơn nhiều so với nồng độ lỗ trống. Điện tử được gọi là **hạt dẫn đa số** (*majority charger*) và lỗ trống được gọi là **hạt dẫn thiểu số** (*minority charger*).

+ **Bán dẫn loại P** là bán dẫn hình thành khi đưa tạp chất là nguyên tử của nguyên tố nhóm III vào bán dẫn thuần nhóm IV.

Ví dụ: pha Ga, In, B (nhóm III) vào bán dẫn nền Ge (nhóm IV), xem minh họa trong hình 2.3.



Hình 2.3: a) Liên kết cộng hóa trị của Ge nguyên tính và b) Khi pha tạp thành bán dẫn loại P.

Nguyên tử tạp chất có 3 điện tử ở lớp ngoài cùng nhưng chúng lại phải thiết lập 4 mối liên kết cộng hóa trị với 4 nguyên tử Si hoặc Ge bên cạnh. Do đó, mỗi liên kết thứ 4 có một lỗ trống. Các điện tử bên cạnh sẽ nhảy sang để lấp đầy vào lỗ trống này và nguyên tử tạp chất sẽ trở thành ion âm còn nguyên tử có điện tử vừa rời đi trở thành ion dương cố định. Tạp chất nhóm III, vì vậy được gọi là tạp chất nhận (hay tạp chất acceptor). Nồng độ lỗ trống bằng chính nồng độ tạp chất pha vào. Như vậy, trong bán dẫn loại P hạt dẫn đa số là lỗ trống còn điện tử là hạt dẫn thiểu số.

2.1. CHẤT BÁN DẪN VÀ CHUYỂN TIẾP P-N

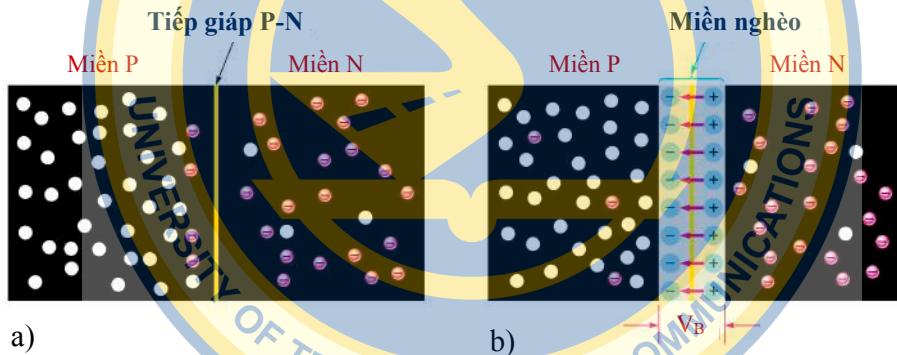
Quá trình pha tạp chất vào bán dẫn nguyên tử không chỉ làm tăng độ dẫn điện mà còn tạo ra chất dẫn điện có điện tử chiếm ưu thế (loại N) hay lỗ trống chiếm ưu thế (loại P).

2.1.3 Chuyển tiếp P-N

Chuyển tiếp P-N (*P-N junction*) được tạo ra bằng cách cho hai bán dẫn loại P và N tiếp xúc công nghệ¹ với nhau. Chuyển tiếp P-N chính là cấu trúc cơ bản để tạo ra các linh kiện tích cực, vì vậy để hiểu rõ hoạt động của diode và các linh kiện tích cực thì cần nắm rõ những hiện tượng vật lý xảy ra trong chuyển tiếp P-N (còn gọi là *tiếp giáp P-N*).

2.1.3.1 Sơ hình thành miền điện tích không gian

Hình 2.4 mô tả sơ hình thành miền điện tích không gian khi có sự di chuyển của các hạt dẫn.



Hình 2.4: a) Trạng thái ban đầu của chuyển tiếp P-N và b) Hạt dẫn di chuyển theo cơ chế khuếch tán.

Do có sự chênh lệch về nồng độ điện tử và lỗ trống giữa hai bán dẫn P và N nên tại miền chuyển tiếp xảy ra **hiện tượng khuếch tán** của các hạt dẫn đa số (lỗ trống di chuyển từ miền P sang N và điện tử di chuyển từ miền N sang P), tạo nên dòng điện khuếch tán. Nếu mức độ pha tạp của hai bán

¹hình thành trong quá trình pha tạp, tránh nhầm lẫn với kiểu tiếp xúc cơ khí

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

dẫn đơn tinh thể P và N bằng nhau thì cường độ dòng điện của hai thành phần điện tử và lỗ trống là bằng nhau.

Khi các hạt dẫn đa số dịch chuyển để lại các ion tạp chất gần bề mặt chuyển tiếp và do vậy làm xuất hiện lớp điện tích khói. Lớp điện tích khói này có rất ít hạt dẫn tự do nên có điện trở rất lớn và được gọi là **miền nghèo hạt dẫn** (*depletion region*). Kết quả là, điện trường tiếp xúc được hình thành trong lớp điện tích khói, có chiều từ miền N sang miền P, tạo nên một hàng rào thế (*barrier potential*) V_B . Điện thế tiếp xúc này sẽ cản trở quá trình khuếch tán của các hạt dẫn đa số nhưng lại gây nên chuyển động của các hạt dẫn thiểu số. Tức là, hạt thiểu số là điện tử trong miền P sẽ di chuyển sang N và lỗ trống trong miền N sẽ di chuyển sang P, hiện tượng này gọi là **hiện tượng trôi**. Hai quá trình khuếch tán và trôi xảy ra đồng thời và sẽ dẫn đến trạng thái cân bằng của **chuyển tiếp P-N khi dòng điện trôi bằng dòng điện khuếch tán**². Khi này, độ rộng miền nghèo không đổi và điện thế tiếp xúc [5] đạt giá trị xác định được tính theo biểu thức:

$$V_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{N_i} = V_T \ln \frac{N_D N_A}{N_i} \quad (2.1)$$

trong đó:

k là hằng số Boltzmann; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K;

q là điện tích của hạt mang điện; $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C;

$V_T = kT/q$ gọi là điện thế nhiệt tại nhiệt độ T , khoảng 26 mV tại nhiệt độ phòng 300 K;

N_D là nồng độ của tạp chất pha vào để tạo ra bán dẫn N;

N_A là nồng độ của tạp chất pha vào để tạo ra bán dẫn P;

N_i là nồng độ của hạt dẫn trong bán dẫn nguyên tính (không pha tạp).

Với điều kiện tiêu chuẩn và tại nhiệt độ phòng, V_B có giá trị khoảng (0,3 ÷ 0,35 V) với bán dẫn làm từ Ge và (0,6 ÷ 0,7 V) với bán dẫn làm từ Si.

²trạng thái cân bằng này phụ thuộc vào nhiệt độ nên gọi là cân bằng nhiệt động

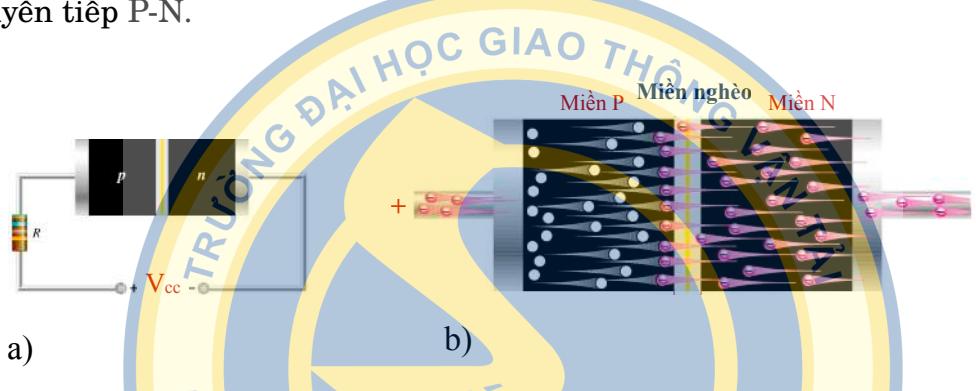
2.1. CHẤT BÁN DẪN VÀ CHUYỂN TIẾP P-N

2.1.3.2 Phân cực cho chuyển tiếp P-N

Với chuyển tiếp P-N, phân cực³ được thực hiện trong hai trường hợp: phân cực thuận và phân cực ngược.

a. Phân cực thuận

Cực dương nguồn nối với miền P và cực âm nguồn nối với miền N như biểu diễn trong hình 2.5(a). Trong trường hợp này, điện trường ngoài tập trung chủ yếu trong miền điện tích không gian có chiều ngược với điện trường tiếp xúc V_B nên làm cho điện trường tổng giảm, độ rộng miền nghèo giảm. Điều này sẽ làm tăng quá trình khuếch tán của hạt dẫn đa số và làm giảm quá trình trôi của hạt dẫn thiểu số, gọi là **hiện tượng phun hạt dẫn đa số** qua chuyển tiếp P-N.



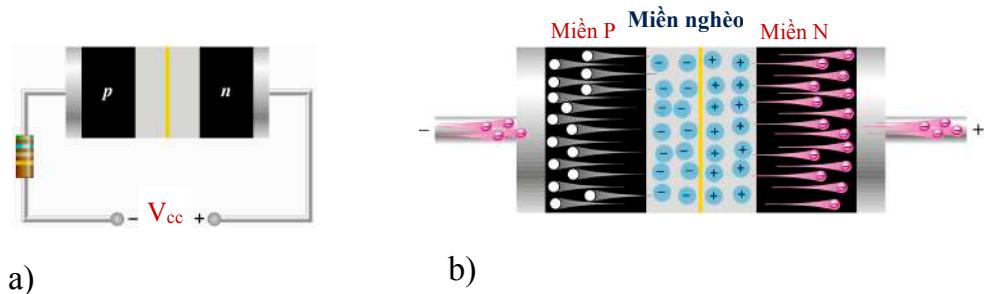
Hình 2.5: a) Sơ đồ phân cực thuận và b) Sự thay đổi của miền điện tích không gian.

Khi điện áp bên ngoài lớn hơn điện trường trong V_B thì miền nghèo coi như biến mất, các điện tử từ âm cực, qua miền N, qua miền P và về dương cực. Chuyển tiếp P-N lúc này tương đương như một khóa điện tử dẫn dòng qua như minh họa trong hình 2.5(b).

b. Phân cực ngược

Điện cực dương của nguồn nối với miền N và điện cực âm của nguồn nối với miền P như thể hiện trong hình 2.6(a). Vì điện trường ngoài cùng chiều với điện trường tiếp xúc nên miền nghèo rộng thêm như minh họa trong hình 2.6(b).

³là việc cấp điện áp một chiều nhằm xác lập chế độ hoạt động



Hình 2.6: a) Sơ đồ phân cực ngược và b) Sự thay đổi của miền điện tích không gian.

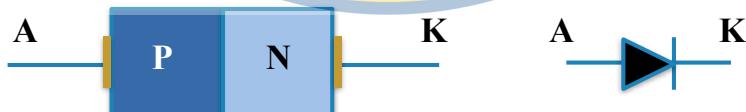
Khi này dòng khuếch tán nhanh chóng giảm tới 0 còn dòng trôi tăng nhẹ và đạt giá trị bão hòa rất nhỏ (gọi là **dòng ngược bão hòa**) dù tiếp tục tăng điện áp ngược. Lúc này chuyển tiếp P-N tương đương như một khóa điện tử mở, không cho dòng đi qua.

2.2 DIODE

Diode là linh kiện bán dẫn có cấu tạo với một chuyển tiếp P-N.

2.2.1 Ký hiệu và phân loại diode

Diode⁴ có kí hiệu và cấu tạo cơ bản như thể hiện trong hình 2.7. Cấu tạo điển hình của diode là một chuyển tiếp P-N được tạo ra từ hai bán dẫn loại P và N. Điện cực nối với bán dẫn P gọi là Anode, kí hiệu là A và điện cực nối với bán dẫn loại N gọi là Cathode, kí hiệu là K⁵.

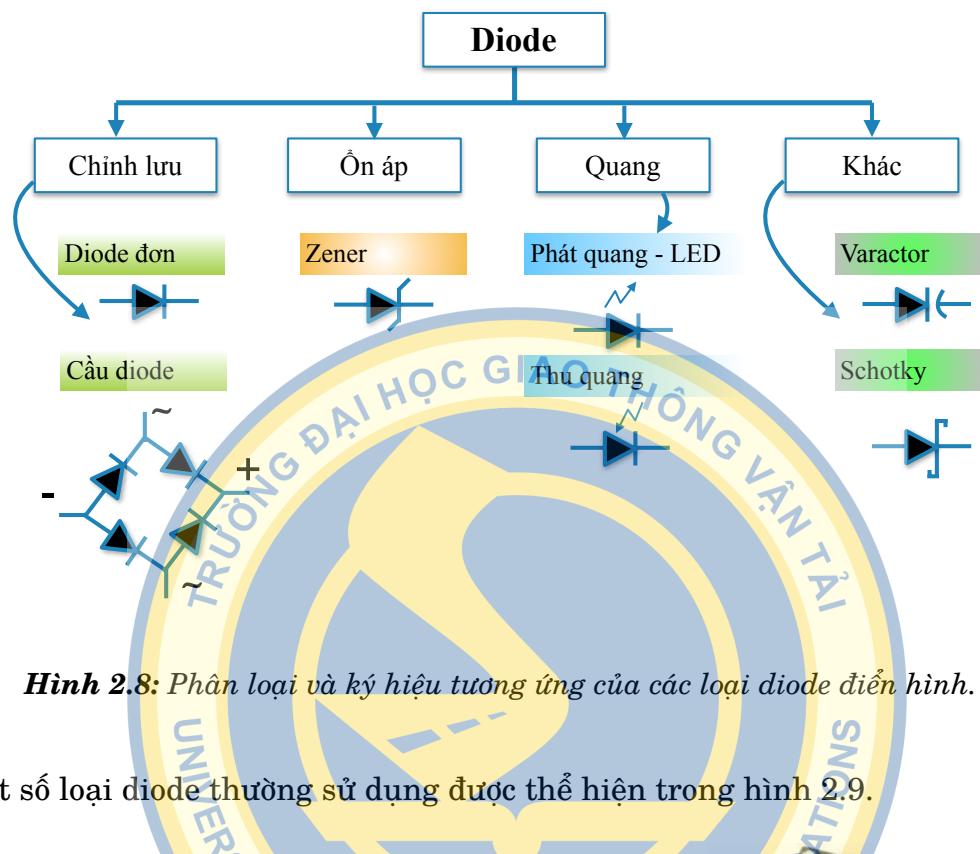


Hình 2.7: Cấu tạo cơ bản và kí hiệu của diode.

⁴trong sơ đồ mạch, diode được kí hiệu là D

⁵điện cực K thường được đánh dấu bằng vạch màu trên thân diode

Trên thực tế, diode có nhiều loại khác nhau và chúng được đặt tên theo các ứng dụng tương ứng, trong đó điển hình là loại diode chỉnh lưu, diode ổn áp và diode quang. Hình 2.8 biểu diễn một số loại diode khác nhau với các ký hiệu tương ứng trong mạch điện.



Hình 2.8: Phân loại và ký hiệu tương ứng của các loại diode điển hình.

Một số loại diode thường sử dụng được thể hiện trong hình 2.9.

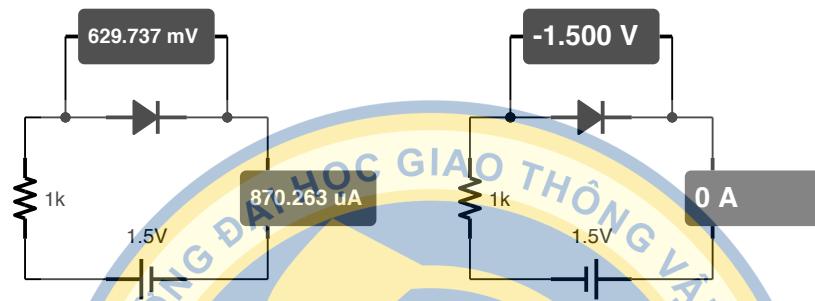


Hình 2.9: Hình ảnh thực tế của một số loại diode [11].

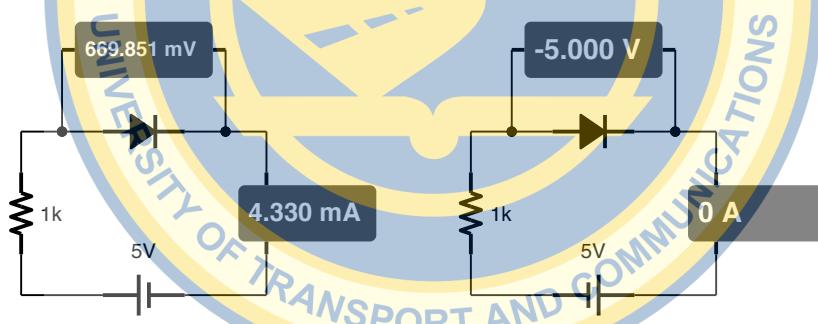
2.2.2 Nguyên tắc hoạt động

Diode hoạt động dựa vào điều kiện phân cực cho nó, nghĩa là tùy vào điện áp chênh lệch đặt lên hai đầu của diode.

Hình 2.10, 2.11 và 2.12 mô tả một số điều kiện thí nghiệm khác nhau, trong đó các mạch điện bên trái là khi điện cực dương được nối với Anode, gọi là phân cực thuận còn các mạch bên phải là khi điện cực dương nối với Cathode, gọi là phân cực ngược.

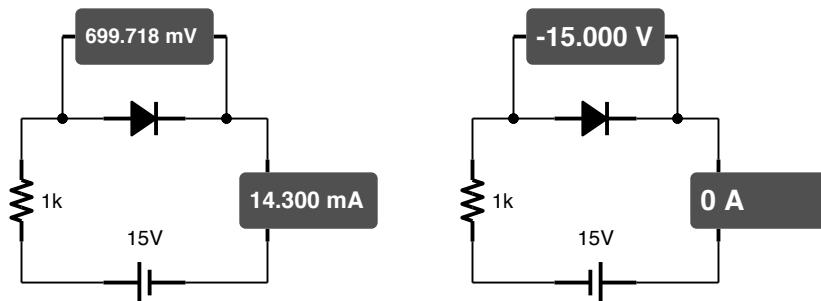


Hình 2.10: Phân cực cho diode với nguồn điện áp 1,5V.



Hình 2.11: Phân cực cho diode với nguồn điện áp 5V.

Các kết quả cho thấy khi diode được phân cực thuận sẽ có dòng qua diode, độ lớn của dòng điện tỉ lệ thuận với độ lớn của điện áp dùng để phân cực nhưng sụt áp trên diode lại thay đổi rất ít. Cụ thể là khi điện áp nguồn tăng 10 lần từ 1,5 V lên 15 V thì sụt áp trên diode chỉ tăng 0,11 lần từ 0,629 V lên thành 0,699 V.



Hình 2.12: Phân cực cho diode với nguồn điện áp 15 V.

Dòng điện thuận I_D cỡ mA đi qua diode khi diode được phân cực thuận được xác định theo phương trình Shockley [5] cho diode như sau:

$$I_D = I_S(e^{V_{AK}/nV_T} - 1) \quad (2.2)$$

trong đó:

V_{AK} điện áp thuận đặt lên diode;

I_S là dòng ngược bão hòa; cỡ vài pA với vật liệu Si và cỡ μ A với vật liệu Ge;

n là hệ số phụ thuộc vào điều kiện hoạt động và cấu trúc vật liệu; n có giá trị trong khoảng từ 1 đến 2;

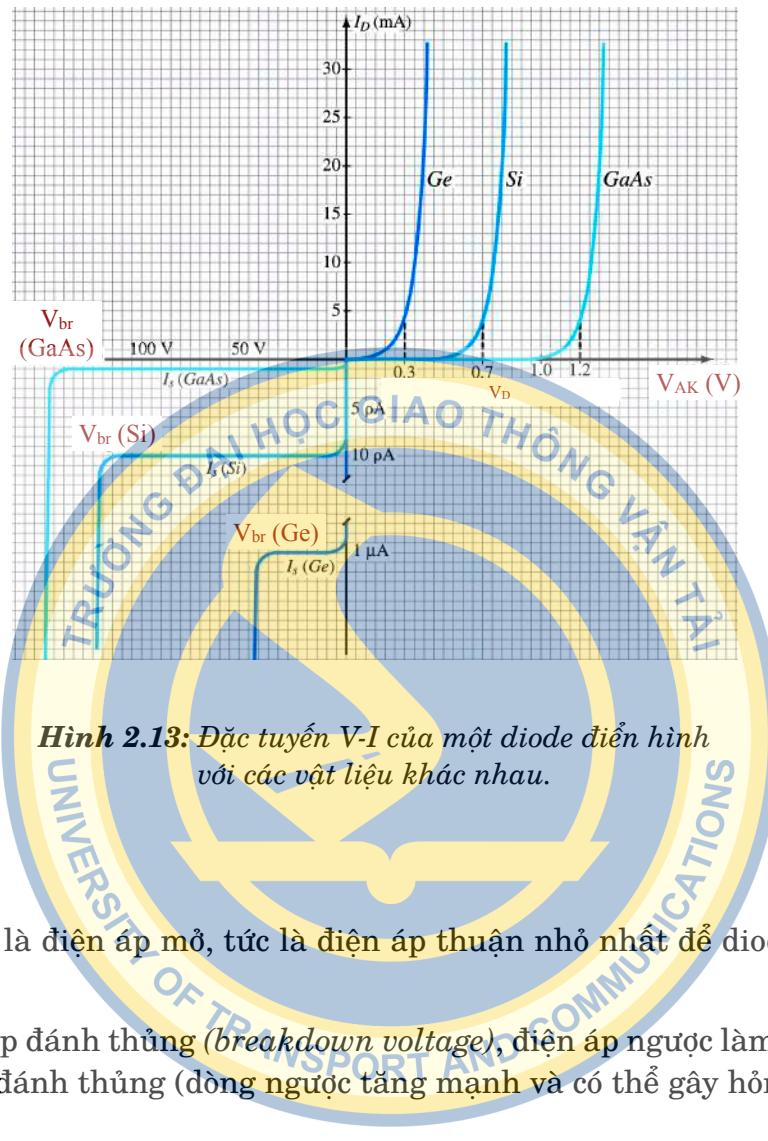
$V_T = kT/q$ là điện thế nhiệt tại nhiệt độ T , khoảng 26 mV tại nhiệt độ phòng 300 K.

Biểu thức 2.2 cho thấy khi V_{AK} nhỏ, dòng qua diode tỉ lệ coi như tuyến tính với nó nhưng khi V_{AK} vượt điện áp mở V_D thì dòng I_D tăng rất mạnh trong khi sụt áp trên diode thay đổi không đáng kể (điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả mô phỏng trong các hình 2.10, 2.11, 2.12).

Khi diode bị phân cực ngược thì dù nguồn điện áp lớn hay nhỏ cũng không có dòng qua diode, nghĩa là diode tương đương như một khóa điện tử mở. Sụt áp trên diode chính là điện áp của toàn mạch như minh họa trong các hình 2.10, 2.11 và 2.12. Trên thực tế thì vẫn có một dòng điện rất nhỏ chạy từ Cathode sang Anode, gọi là dòng rò rỉ với độ lớn khoảng vài pA.

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

Hiện tượng chỉ cho dòng điện qua theo một chiều và chặn dòng điện theo chiều ngược lại của diode gọi là **hiệu ứng chỉnh lưu**. Đặc tuyến V-I của diode thể hiện đặc tính trên được biểu diễn trong hình 2.13.



Hình 2.13: Đặc tuyến V-I của một diode diển hình với các vật liệu khác nhau.

với:

V_D được gọi là điện áp mở, tức là điện áp thuận nhỏ nhất để diode bắt đầu dẫn mạnh⁶;

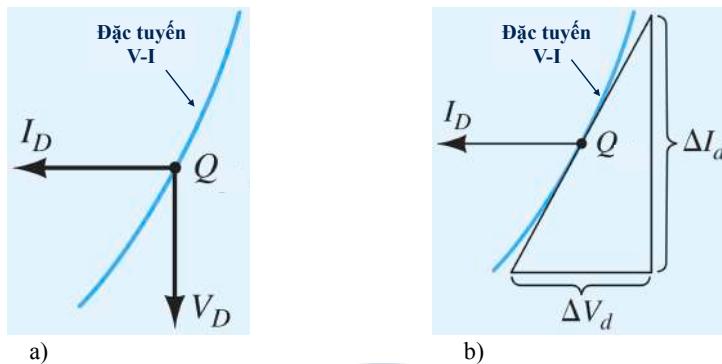
V_{br} là điện áp đánh thủng (*breakdown voltage*), điện áp ngược làm xuất hiện hiện tượng đánh thủng (dòng ngược tăng mạnh và có thể gây hỏng diode).

2.2.3 Trở kháng của diode

Việc xác định trở kháng của diode trong mạch được chia thành hai chế độ là chế độ một chiều (còn gọi là chế độ DC) và chế độ xoay chiều (còn gọi là chế độ AC).

⁶tương đương với giá trị V_B của chuyển tiếp P-N

Hình 2.14 biểu diễn điểm làm việc⁷ Q tương ứng của hai chế độ trên, qua đó xác định trở kháng cho diode.



Hình 2.14: Cách xác định trở kháng của diode trên đặc tuyến V-I: a) Chế độ làm việc DC và b) Chế độ làm việc AC.

+ Khi diode làm việc với nguồn một chiều như thể hiện trong hình 2.14(a), điểm Q không di chuyển nên còn gọi là **điểm làm việc tĩnh**. Điện trở một chiều R_D được tính theo biểu thức:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} \quad (2.3)$$

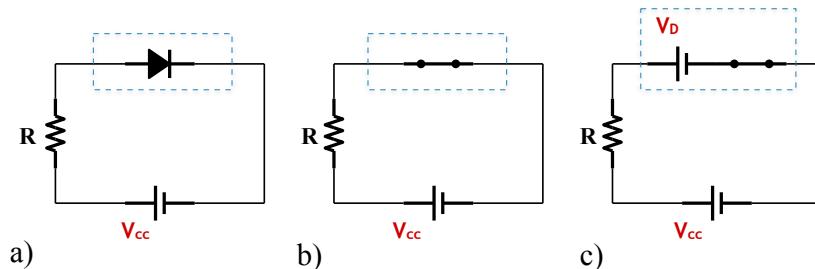
+ Khi diode làm việc với nguồn xoay chiều, điểm làm việc của diode chạy trên đoạn đặc tuyến (gọi là **điểm làm việc động**) tương ứng với sự thay đổi của điện áp và dòng qua diode, như thể hiện trong hình 2.14(b). Điện trở xoay chiều r_D được tính theo biểu thức:

$$r_D = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} \quad (2.4)$$

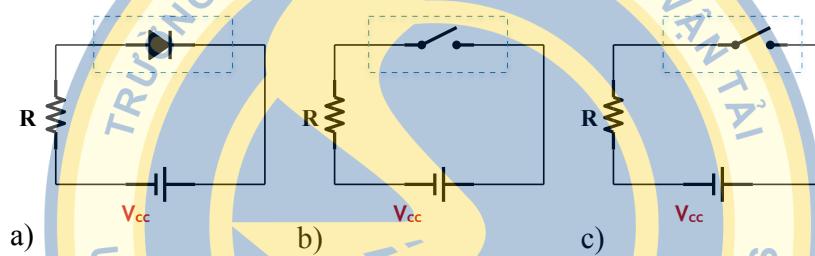
⁷là điểm trên đặc tuyến V-I ứng với giá trị điện áp sụt trên diode và dòng qua diode tại thời điểm xét

2.2.4 Sơ đồ tương đương

Để đơn giản hóa trong tính toán, khi hoạt động diode sẽ được mô hình hóa như thể hiện trong hình 2.15 và 2.16.



Hình 2.15: a) Sơ đồ phân cực thuận cho diode, b) Mô hình lý tưởng và c) Mô hình thực tế.



Hình 2.16: a) Sơ đồ phân cực ngược cho diode, b) Mô hình lý tưởng và c) Mô hình thực tế.

Khi phân cực thuận cho diode như hình 2.15(a) nó sẽ tương đương như một khóa điện tử đóng (ngắn mạch) nếu lý tưởng hóa như hình 2.15(b) hay mô hình thực tế lại tương đương với một nguồn điện áp V_D như hình 2.15(c). Khi diode bị phân cực ngược như hình 2.16(a) thì sơ đồ tương đương lý tưởng hay thực tế đều như một khóa điện tử mở (hở mạch) như biểu diễn trong hình 2.16(b) và (c).

2.2.5 Thông số cơ bản của diode

Mỗi loại diode đều có đặc điểm riêng nhưng những thông số cơ bản nhất bao gồm:

▷ Loại diode

Thông số này cho biết chức năng chính của diode là chỉnh lưu, ổn áp hay phát quang, thu quang ...

▷ Điện áp mở V_D

Là điện áp phân cực thuận nhỏ nhất để diode bắt đầu dẫn⁸. Thông số này chủ yếu phụ thuộc vào vật liệu tạo ra diode. Nếu vật liệu là Si thì $V_D \approx (0,6 \div 0,7)$ V; nếu vật liệu là Ge thì $V_D \approx 0,3$ V. Để diode bắt đầu dẫn dòng thì nó cần phân cực thuận với điện áp lớn hơn V_D .

▷ Dòng thuận lớn nhất I_F

Đây là thông số cho biết dòng thuận cực đại có thể qua diode là bao nhiêu mà diode không bị hỏng. Nếu diode liên tục phải chịu dòng lớn hơn giá trị I_F thì có thể nó sẽ bị quá nhiệt và cháy.

▷ Dòng ngược bão hòa I_S

Là dòng điện ngược không đổi chảy qua diode khi diode bị phân cực ngược với điện áp nhỏ hơn điện áp đánh thủng. Dựa vào thông số này có thể xác định dòng qua diode theo điện áp đặt lên nó tại nhiệt độ đã cho theo biểu thức 2.2.

▷ Điện áp đánh thủng V_{br}

Thông số này cho biết điện áp ngược tối đa có thể đặt lên diode là bao nhiêu để hiện tượng đánh thủng chưa xảy ra. Nếu quá điện áp này sẽ xảy ra hiện tượng đánh thủng vì điện khi chính các nguyên tử của bán dẫn nền bị ion hóa làm cho lượng hạt dẫn tăng đột biến, làm cho dòng ngược tăng mạnh. Trong trường hợp không tản nhiệt kịp hay ngưng cấp điện áp ngược ngay thì dòng ngược lớn sẽ làm diode nóng lên nhanh chóng và dẫn tới hiện tượng đánh thủng vì nhiệt gây cháy diode.

▷ Dải nhiệt độ làm việc

Đây là dải nhiệt độ đảm bảo cho diode hoạt động bình thường, thông thường là ($-65 \div +200$ °C). Các đường đặc tuyến của diode biến đổi rất mạnh ở nhiệt độ khác nhau nên thông số này rất quan trọng khi xem xét hoạt động của diode.

⁸khi dòng điện thuận bằng 1/10 dòng điện thuận lớn nhất

- ▷ Công suất tiêu tán tối đa trên diode

Thông số này cho biết công suất lớn nhất mà diode có thể chịu đựng được mà không gây hỏng tại một nhiệt độ nhất định. Công suất tiêu thụ trên diode cần nhỏ hơn công suất tiêu tán tối đa và được xác định theo biểu thức sau:

$$P_D = V_D I_D < P_{D(\max)} \quad (2.5)$$

2.2.6 Các loại diode thông dụng

Tên gọi của các diode được đặt theo ứng dụng của chúng như đã thể hiện trong hình 2.8, trong phần này sẽ giới thiệu các loại diode điển hình như diode chỉnh lưu, diode ổn áp, diode biến dung và diode phát quang.

2.2.6.1 Diode chỉnh lưu

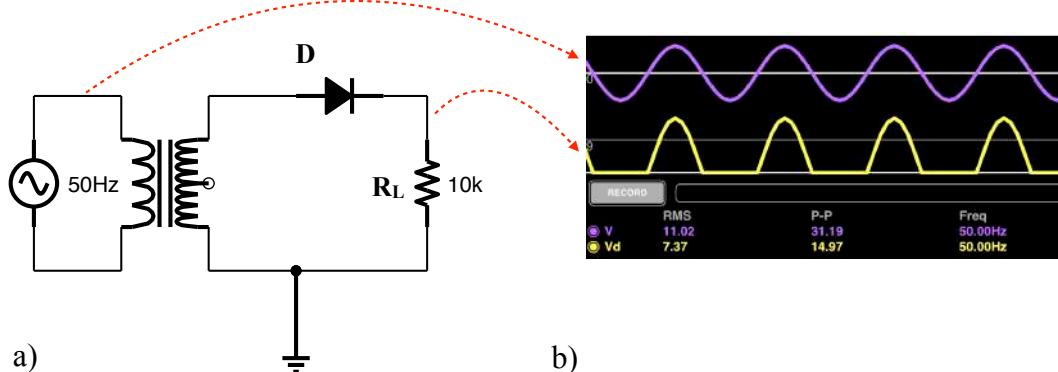
a. Mạch chỉnh lưu dòng điện xoay chiều

Mạch chỉnh lưu (*Rectifier*) là mạch sử dụng diode chỉnh lưu làm nhiệm vụ biến đổi dòng xoay chiều thành một chiều. Đây chính là khái quan trọng nhất trong mạch nguồn để tạo ra điện áp một chiều⁹ từ nguồn điện lưới xoay chiều (tần số 50 Hz hoặc 60 Hz). Khi này có thể sử dụng sơ đồ mạch như trong hình 2.17, 2.18 hoặc 2.19.

+ Hình 2.17 biểu diễn một **mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ**. Ở bán kỵ dương của tín hiệu xoay chiều đầu vào, diode dẫn (vì điện áp đặt lên Anode của diode cao hơn trên Cathode) nên có dòng qua tải R_L . Ở bán kỵ âm của tín hiệu đầu vào, diode ngắt nên không có dòng qua tải R_L . Điều này có nghĩa trong cả chu kỳ tín hiệu đầu vào thì chỉ có một bán kỵ dương xuất hiện ở đầu ra, tức là điện áp ra bị ngắt quãng suốt cả một chu kỳ.

Khi này điện áp đầu ra của mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ sẽ có giá trị trung bình được xác định theo biểu thức:

⁹sau khái chỉnh lưu, điện áp có dạng một cực tính với độ gợn còn rất lớn

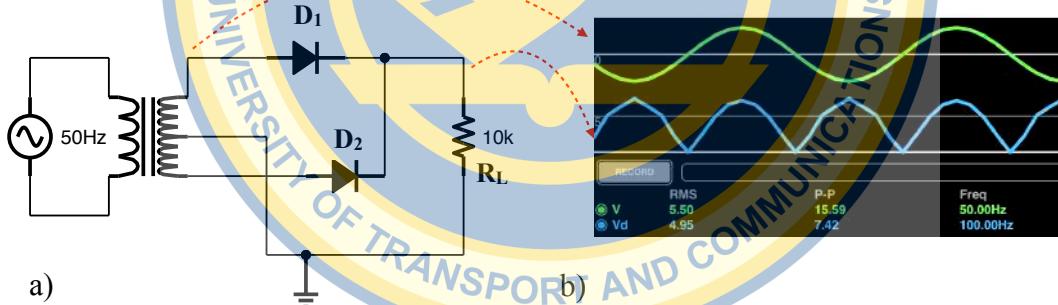


Hình 2.17: a) Mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ và b) Dạng điện áp vào/ra tương ứng.

$$V_{dc} = \frac{V_{s(p)} - V_D}{\pi} = 0,318(V_{s(p)} - V_D) \quad (2.6)$$

với $V_{s(p)}$ là giá trị đỉnh của điện áp giữa hai đầu cuộn thứ cấp của biến áp.

+ Hình 2.18 biếu diễn một **mạch chỉnh lưu cả chu kỳ sử dụng hai diode** với biến áp có cuộn thứ cấp nối đất tại điểm giữa.



Hình 2.18: a) Mạch chỉnh lưu cả chu kỳ dùng hai diode và b) Dạng điện áp vào/ra tương ứng.

Ở bán kỵ dương của tín hiệu xoay chiều đầu vào, diode \$D_1\$ dẫn (vì điện áp đặt lên Anode cao hơn trên Cathode) còn \$D_2\$ ngắt nên có dòng qua tải \$R_L\$ theo chiều từ trên xuống dưới như hình vẽ. Ở bán kỵ âm của tín hiệu đầu vào, diode \$D_1\$ lại ngắt trong khi \$D_2\$ dẫn nên dòng qua tải \$R_L\$ cũng có chiều

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

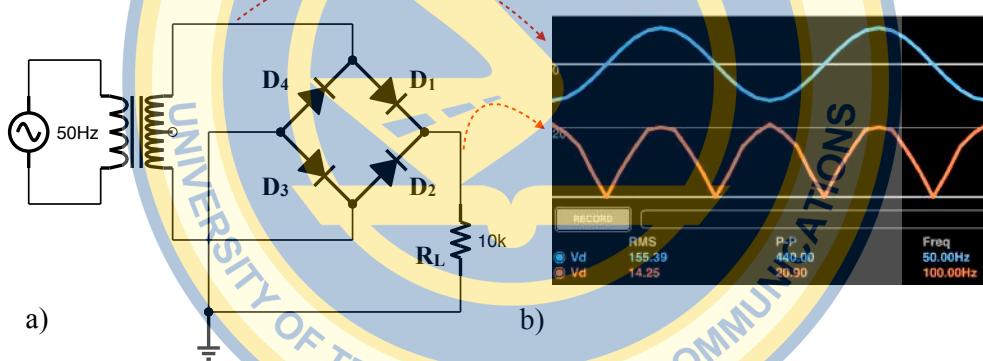
từ trên xuống dưới. Điều này có nghĩa trong cả chu kỳ tín hiệu đầu vào thì đều có điện áp ở đầu ra. Nghĩa là, dạng điện áp đầu ra không còn bị ngắt quãng trong suốt cả một bán kỲ như sơ đồ 2.17.

Khi này điện áp đầu ra xuất hiện ở cả hai bán kỲ nên giá trị trung bình được xác định theo biểu thức:

$$V_{dc} = 2 \times \frac{V_{s(p)}/2 - V_D}{\pi} = 0,636(V_{s(p)}/2 - V_D) \quad (2.7)$$

với $V_{s(p)}$ là giá trị đỉnh của điện áp giữa hai đầu cuộn thứ cấp của biến áp có điểm giữa nối đất.

+ Hình 2.19 biêt dien môt **mạch chỉnh lưu cả chu kỳ sử dụng cầu diode**. Hoạt động của mạch này tương tự mạch chỉnh lưu dùng hai diode, tức là điện áp đầu ra có một cực tính và xuất hiện ở cả hai bán kỲ của tín hiệu vào. Các cặp diode ($D_1 - D_3$) và ($D_2 - D_4$) thay phiên nhau làm việc ở bán kỲ dương - âm tương ứng.



Hình 2.19: a) Mạch chỉnh lưu cả chu kỳ dùng cầu diode và b) Dạng điện áp vào / ra tương ứng.

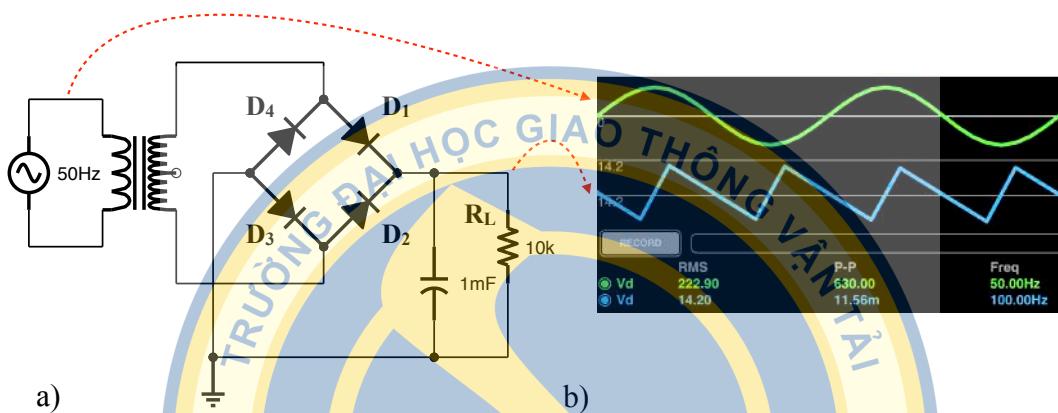
Giá trị điện áp trung bình lấy ra trên tải của mạch cầu diode được xác định theo biểu thức:

$$V_{dc} = 2 \times \frac{V_{s(p)} - 2V_D}{\pi} = 0,636(V_{s(p)} - 2V_D) \quad (2.8)$$

với $V_{s(p)}$ là giá trị đỉnh của điện áp giữa hai đầu cuộn thứ cấp của biến áp.

Ưu điểm của mạch chỉnh lưu dùng cầu diode là lấy được điện áp ra lớn hơn so với mạch chỉnh lưu dùng hai diode nếu dùng biến áp cùng tỉ số. Hoặc nếu điện áp ra có độ lớn như nhau thì mạch chỉnh lưu dùng cầu diode có thể chọn diode có điện áp chịu đựng khi bị phân cực ngược nhỏ hơn hai lần so với loại diode dùng trong mạch chỉnh lưu hai diode.

Trên thực tế các mạch trên đều có điện áp và dòng qua tải có độ lớn thay đổi liên tục nên để giảm độ gợn này thường dùng thêm tụ lọc nguồn có giá trị điện dung lớn để san phẳng điện áp đầu ra như minh họa trong hình 2.20.



Hình 2.20: a) Sử dụng tụ điện nguồn để san phẳng điện áp và b) Dạng điện áp vào/ra tương ứng.

Kết quả mô phỏng trong hình 2.19(b) cho thấy điện áp đầu ra có giá trị hiệu dụng là 14,25 V, giá trị đỉnh-đỉnh là 20,9 V. Trong khi đó kết quả mô phỏng của mạch có tụ điện ở hình 2.20(b) lại cho thấy điện áp đầu ra có giá trị hiệu dụng là 14,2 V, giá trị đỉnh-đỉnh là 11,56 mV. Tức là, nhờ có tụ điện¹⁰ mà điện áp đầu ra gần như đã được san phẳng.

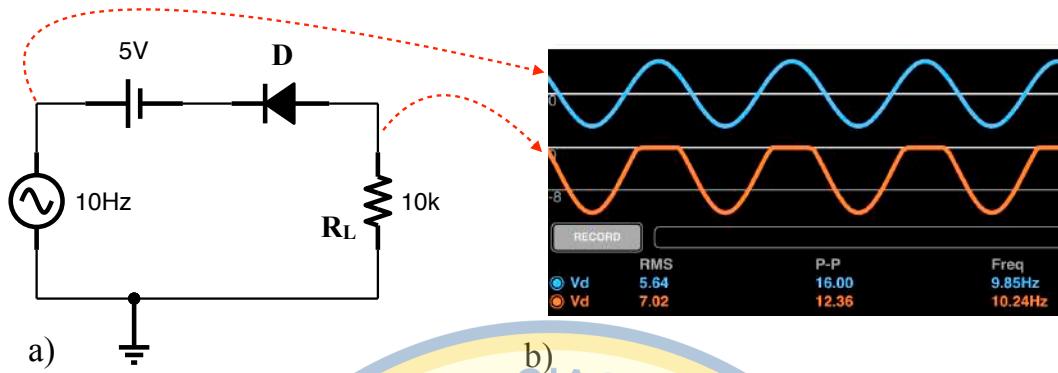
b. Mạch xén điện áp

Mạch xén (Clipper) có nhiệm vụ hạn chế biên độ điện áp ra bởi một giá trị xác định nào đó. Mạch xén được phân loại thành hai dạng: mạch xén mắc nối tiếp và mạch xén mắc song song.

¹⁰cách thức tụ điện hoạt động đã được mô tả chi tiết trong mục 1.2.3

+ **Mạch xén măc nối tiếp:**

Khi diode măc nối tiếp với nguồn tín hiệu, mạch sẽ bị xén đi biên trên hoặc biên dưới khi trong khoảng điện áp này diode ngắt.

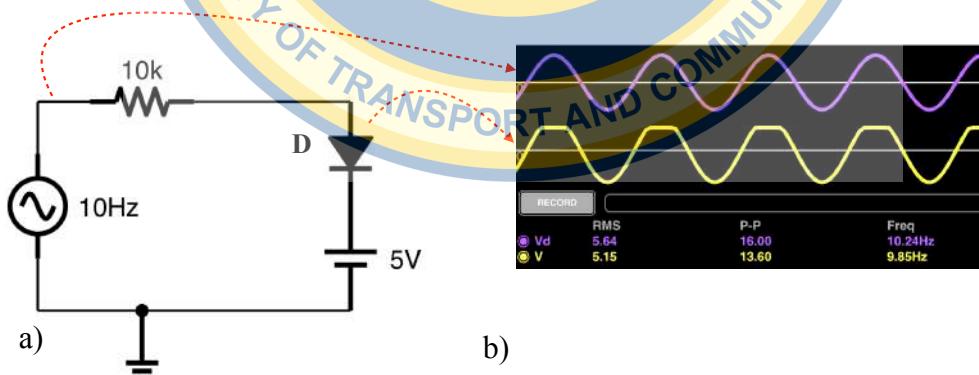


Hình 2.21: Một mạch xén măc nối tiếp và dạng tín hiệu vào ra tương ứng.

Trong hình 2.21 nguồn điện áp xoay chiều v_i có biên độ đỉnh 8 V măc nối tiếp với dương cực của nguồn điện áp một chiều $V = 5$ V. Diode ngắt khi điện áp Cathode cao hơn Anode, tức là khi $(v_i - V > 0)$ điện áp đầu ra bị xén trong khoảng này, xem kết quả mô phỏng trong hình 2.21(b).

+ **Mạch xén măc song song:**

Khi diode măc song song với nguồn tín hiệu, mạch sẽ bị xén đi biên trên hoặc biên dưới trong khoảng điện áp làm diode bị ngắt.



Hình 2.22: Một mạch xén măc song song và dạng tín hiệu vào ra tương ứng.

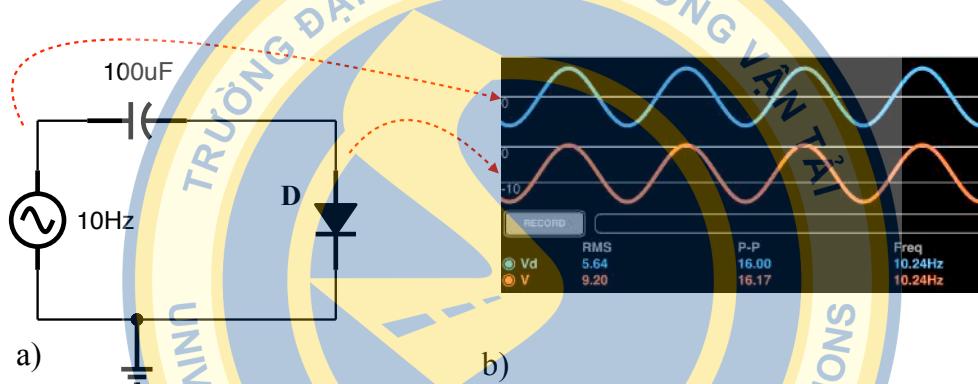
Trong hình 2.22, nguồn điện áp xoay chiều v_i biên độ đỉnh 8 V cấp cho mạch, diode có Cathode mắc nối tiếp với dương cực của nguồn điện áp một chiều $V = 5$ V. Diode ngắn khi điện áp Anode cao hơn 5 V, tức là điện áp đầu ra bị xén, xem kết quả mô phỏng trong hình 2.21(b).

c. Mạch ghim điện áp

Mạch ghim (Clamper) là mạch dịch tín hiệu đến một mức điện áp một chiều khác. Một mạch ghim gồm có một tụ điện, một diode, một điện trở và có thể thêm một nguồn điện áp một chiều. Hằng số thời gian τ được tính toán¹¹ sao cho điện áp trên tụ C khi xả giảm không đáng kể khi diode ngưng dẫn.

Mạch ghim gồm 2 loại: **mạch ghim mức âm** và **mạch ghim mức dương**

* Mạch ghim mức âm



Hình 2.23: Một mạch ghim mức âm và dạng tín hiệu vào ra tương ứng.

Xét diode lý tưởng, hoạt động của **mạch ghim mức âm** trong hình 2.23 như sau:

- + Nửa chu kỳ dương, diode dẫn, tụ điện nạp nhanh đến trị số đỉnh của điện áp xoay chiều;
- + Nửa chu kỳ âm, diode ngưng dẫn, tụ điện C phóng điện qua R. Do trị số đủ lớn nên tụ C xả điện không đáng kể. Nói cách khác, tụ điện đã ghim một mức điện áp âm lên cực Anode của diode bằng mức điện áp đỉnh âm.

Bắt đầu từ đây diode luôn ngắn trong lúc mạch hoạt động, nghĩa là điện áp

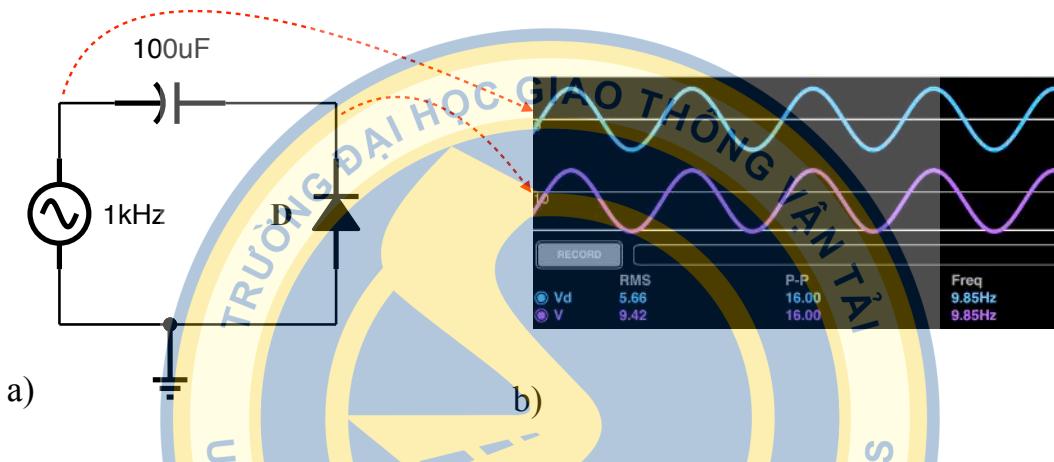
¹¹thông thường τ lớn hơn ít nhất 10 lần giá trị chu kỳ của tín hiệu

đầu ra có dạng giống như đầu vào nhưng đã bị hạ giá trị trung bình xuống một khoảng bằng điện áp trên tụ được nạp trước đó.

Kết quả mô phỏng cho thấy điện áp đầu ra đã bị ghim đỉnh cao nhất ở mức 0, tức là giá trị trung bình bị hạ xuống 8 V.

+ Mạch ghim mức dương

Trong mạch ghim ở hình 2.24, tụ điện ghim mức điện áp dương lên cực Cathode của diode nên ở bán kỵ dương của tín hiệu diode sẽ không dẫn, đầu ra có dạng giống như đầu vào nhưng với mức điện áp trung bình bằng điện áp ghim trên tụ.



Hình 2.24: Một mạch ghim mức dương và dạng tín hiệu vào ra tương ứng.

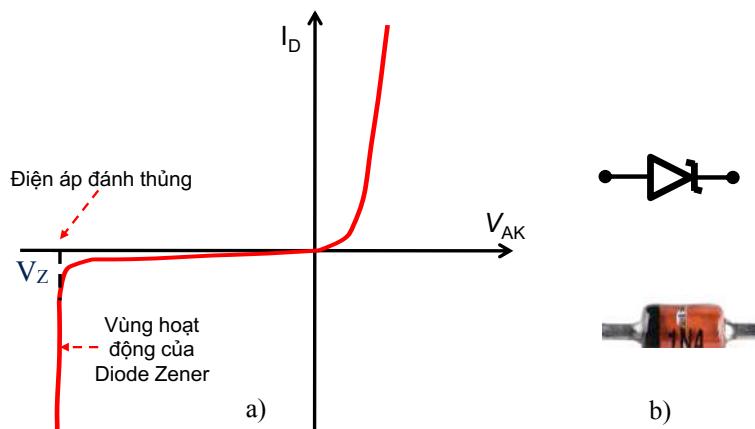
Kết quả mô phỏng cho thấy điện áp đầu ra đã bị ghim đỉnh thấp nhất ở mức 0, tức là giá trị trung bình được nâng lên 8 V.

2.2.6.2 Diode ổn áp - Zener

Diode Zener là loại diode đặc biệt có khả năng tạo ra điện áp ổn định khi bị phân cực ngược. Loại diode này có nồng độ pha tạp rất lớn, vỏ bọc thuỷ tinh và thông số đặc trưng là điện áp Zener, ký hiệu là V_Z .

Dạng đặc tuyến V-I và hình ảnh thực tế của một diode Zener được biểu diễn trong hình 2.25.

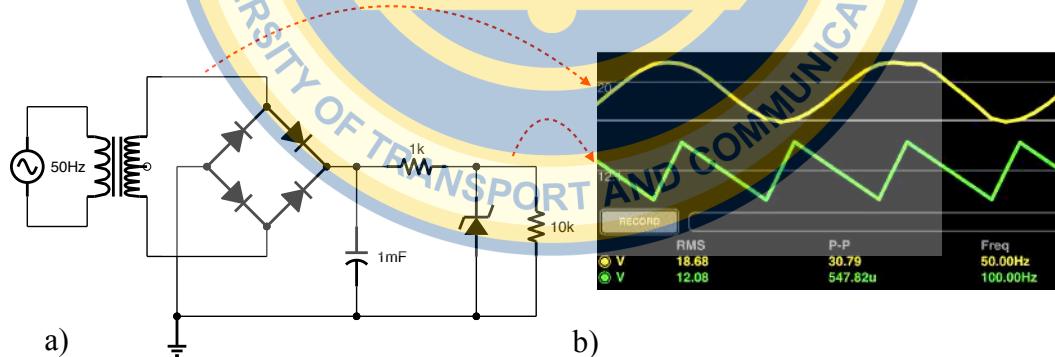
Trong miền phân cực thuận, diode Zener hoạt động như một diode chỉnh lưu. Trong miền phân cực ngược, khi điện áp phân cực ngược lớn hơn giá



Hình 2.25: a) Đặc tuyến V - I và b) Ký hiệu và hình ảnh thực tế của một diode Zener.

trị điện áp đánh thủng V_Z , dòng qua diode tăng mạnh, nhưng điện áp V_Z không đổi nên diode này được sử dụng để ổn định điện áp một chiều. Nghĩa là, diode Zener hoạt động trong miền đánh thủng¹² của đặc tuyến V - I mà không bị hỏng. Các mạch tạo điện áp nguồn như thể hiện trong hình 2.17 - 2.20 có thể cải thiện chất lượng điện áp đầu ra bằng cách sử dụng diode ổn áp.

Hình 2.26 biểu diễn một mạch nguồn điện áp sử dụng diode Zener để ổn định điện áp đầu ra. Khi này điện áp đầu ra có độ gợn chỉ là $547,82 \mu\text{V}$ so với độ gợn $11,56 \text{ mV}$ trong hình 2.20.



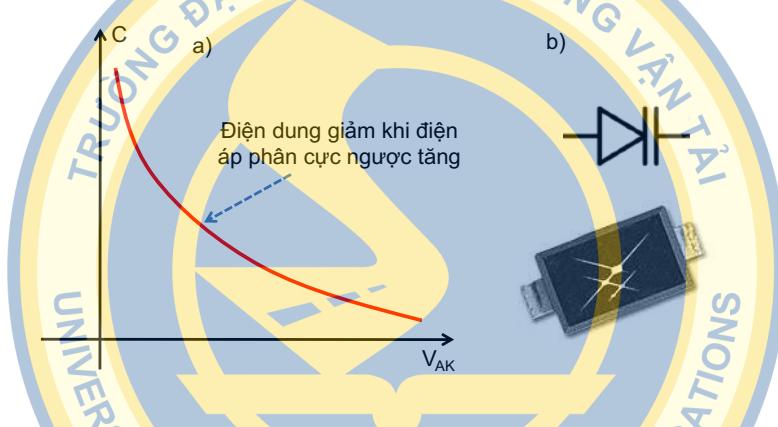
Hình 2.26: a) Mạch nguồn dùng diode ổn áp và b) Dạng điện áp vào / ra tương ứng.

¹²đánh thủng vì điện

Mạch điện trong hình 2.26 cho thấy trong quá trình làm việc bình thường của mạch, diode Zener bị phân cực ngược và sụt áp trên hai đầu diode bằng giá trị điện áp V_Z của nó. Để đảm bảo giá trị V_Z ổn định thì điện áp sau chỉnh lưu phải đảm bảo lớn hơn V_Z từ $(1,2 \div 1,5)$ lần.

2.2.6.3 Diode biến dung

Diode biến dung (*varactor diode*) về bản chất là diode có giá trị điện dung thay đổi nhờ sự điều khiển của điện áp ngược đặt vào. Có thể coi chuyển tiếp P-N khi phân cực ngược tương đương như một tụ điện với cấu trúc là miền điện tích không gian điện trở suất lớn¹³ bị kẹp giữa hai miền bán dẫn đóng vai trò như hai bản cực. Độ rộng của miền điện tích không gian phụ thuộc vào điện áp phân cực ngược nên giá trị điện dung của miền điện tích không gian thay đổi theo giá trị điện áp phân cực ngược đặt lên nó.



Hình 2.27: a) Đặc tuyến biểu diễn mối quan hệ giữa điện dung và điện áp V_{AK} và
b) Ký hiệu và hình ảnh thực tế của một diode biến dung.

Hình 2.27(a) biểu diễn mối quan hệ giữa giá trị điện dung và điện áp của một diode biến dung. Khi điện áp ngược tăng, độ rộng miền nghèo tăng làm cho giá trị điện dung giảm và ngược lại. Ký hiệu và hình ảnh của một diode biến dung thực tế được minh họa trong hình 2.27(b).

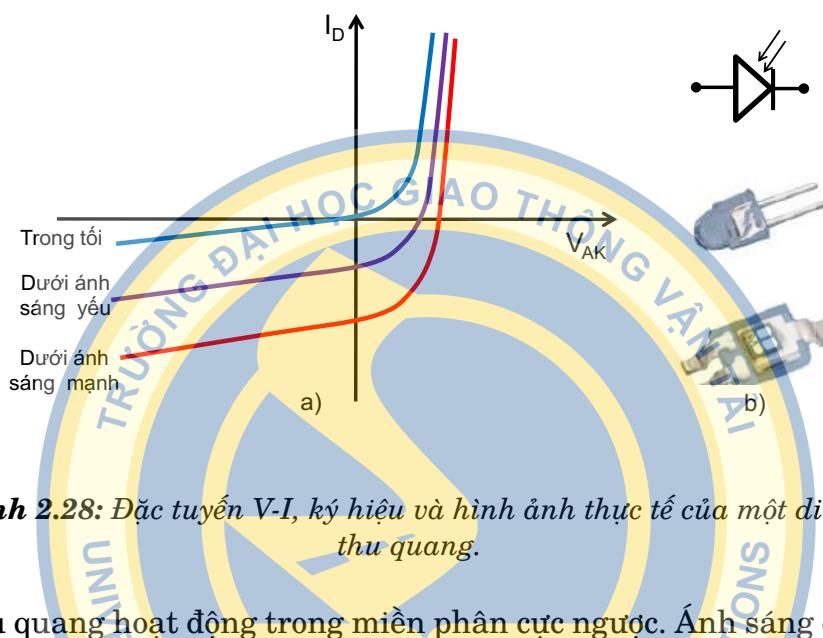
Diode biến dung thường được ứng dụng trong các mạch cộng hưởng chọn tần như mạch điều chỉnh tần số tự động - AFC (*Automatic Frequency Controller*) hay mạch tạo dao động điều khiển bởi điện áp - VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*).

¹³chính là miền nghèo của chuyển tiếp P-N, có rất ít hạt dẫn tự do

2.2.6.4 Diode thu quang

Diode thu quang (*Photodiode*) là một linh kiện biến đổi quang năng thành điện năng. Có cấu tạo giống diode chỉnh lưu nhưng vỏ bọc cách điện bên ngoài có một phần thủy tinh hoặc nhựa trong suốt để nhận ánh sáng chiếu vào chuyển tiếp P-N.

Hình 2.28 minh họa đặc tuyến V-I, ký hiệu và hình ảnh thực tế của một diode thu quang.



Hình 2.28: Đặc tuyến V-I, ký hiệu và hình ảnh thực tế của một diode thu quang.

Diode thu quang hoạt động trong miền phân cực ngược. Ánh sáng chiếu vào chuyển tiếp P-N sẽ cung cấp năng lượng cho các điện tử hóa trị để có thể bứt ra khỏi nguyên tử, làm phát sinh cặp hạt dẫn điện tử-lỗ trống tự do di chuyển về hai điện cực nối với điện áp ngoài. Cường độ dòng ngược tăng tuyến tính với cường độ ánh sáng chiếu vào.

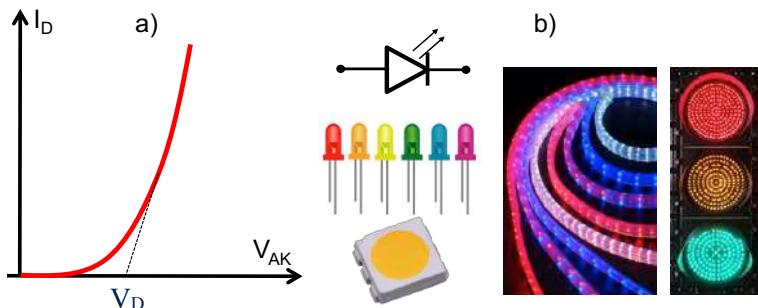
Diode thu quang được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển tự động theo cường độ ánh sáng như hệ thống đóng/mở cửa tự động, hệ thống phân loại và đếm sản phẩm ...

2.2.6.5 Diode phát quang

Diode phát quang LED (*Light Emitting Diode*) là linh kiện bán dẫn quang có khả năng phát ra ánh sáng khi có hiện tượng tái hợp xảy ra trong chuyển tiếp P-N.

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

Hình 2.29 biểu diễn đặc tuyến V-I và hình ảnh của một số loại LED.



Hình 2.29: Đặc tuyến V-I, ký hiệu và hình ảnh thực tế của một số loại LED.

Đặc tuyến V-I của LED giống như của diode thông thường nhưng điện áp mở V_D có giá trị trong khoảng $(1,6 \div 3,0)$ V. Cấu tạo của LED có vùng tích cực (thường là bán dẫn thuận) kẹp giữa miền P và N để tăng khả năng tái hợp cho điện tử và lỗ trống.Thêm nữa, nồng độ hạt dẫn của P và N rất cao nên điện trở của chúng rất nhỏ¹⁴.

LED hoạt động dựa trên hiệu ứng tạo ra photon khi có hiện tượng tái hợp điện tử và lỗ trống. Khi LED được phân cực thuận, các hạt dẫn đa số ô ạt di chuyển về phía bán dẫn bên kia; nghĩa là, điện tử từ bên N bị đẩy sang P và lỗ trống bên P bị đẩy sang N. Các hạt dẫn đa số này bị dồn về vùng tích cực và chúng sẽ tái hợp với nhau, phát ra các photon. Ánh sáng do LED phát ra là ánh sáng tự phát, tức là ánh sáng có nhiều tần số và đanding hướng.

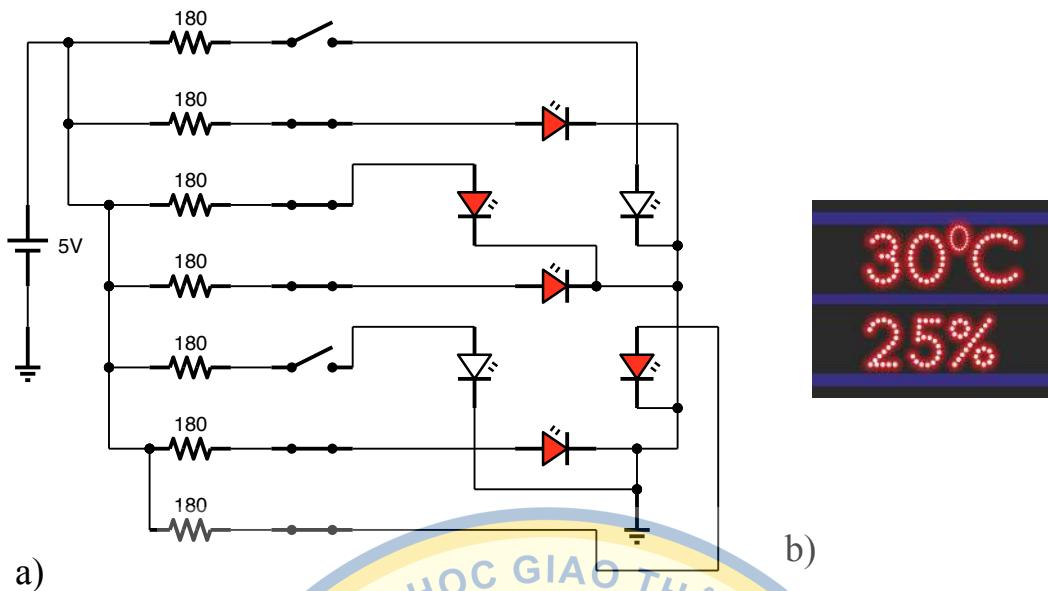
LED thường được sử dụng để chiếu sáng, hiển thị số dạng 7 vạch, màn hình ... Hình 2.30(a) minh họa một mạch hiển thị số 5 bằng LED đơn¹⁵ và hình 2.30(b) là một ma trận LED để hiển thị nhiều ký tự một cách chi tiết hơn.

Tùy theo vật liệu chế tạo mà ánh sáng bức xạ của LED có thể ở những vùng bước sóng khác nhau.

- + LED bức xạ ra ánh sáng nhìn thấy (gọi là LED màu) được sử dụng trong các hệ thống chiếu sáng, trang trí hoặc quang báo.
- + LED bức xạ hồng ngoại (gọi là LED hồng ngoại) được sử dụng trong hệ thống an ninh, sản xuất, thông tin quang....

¹⁴LED phải được mắc nối tiếp với điện trở hạn dòng khi sử dụng

¹⁵được bố trí kiểu 7 vạch để hiển thị các số từ 0 đến 9



Hình 2.30: a) Một mạch điện hiển thị số 5 bằng các đèn LED đơn và b) Một bảng hiển thị bằng ma trận LED.

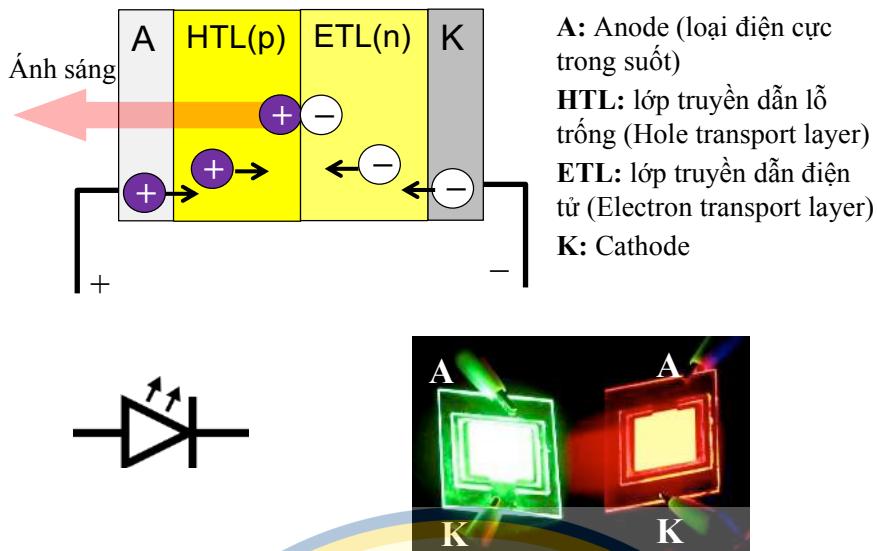
2.2.6.6 Diode phát quang hữu cơ

Diode phát quang hữu cơ (Organic Light Emitting Diode - OLED), là một loại LED, phát minh bởi GS. Ching Tang, tại Kodak, Hoa Kỳ năm 1987, hiện đã được ứng dụng trong kỹ thuật điện tử để hiển thị số liệu, chiếu sáng, màn hình cong ...

Cấu tạo, ký hiệu và hình ảnh thực tế của một số OLED được thể hiện trong hình 2.31.

* Nguyên tắc hoạt động của OLED

Nguyên tắc làm việc của OLED khá giống với LED thông thường. Đó là lỗ trống được cung cấp từ dương nguồn và đi qua lớp truyền dẫn lỗ trống HTL, đồng thời điện tử được cung cấp từ âm nguồn và đi qua lớp truyền dẫn điện tử ETL. Khi electron gặp các lỗ trống, sẽ tái hợp nhau và tạo ra một năng lượng dưới dạng photon ánh sáng. Màu của ánh sáng phụ thuộc vào kiểu phân tử hữu cơ của lớp phát quang.



Hình 2.31: Cấu tạo, nguyên tắc hoạt động và hình ảnh minh họa OLED cơ bản.

* Ưu điểm của OLED

- ▷ Các lớp bán dẫn hữu cơ mỏng hơn, nhẹ hơn và mềm dẻo hơn so với các lớp tinh thể của LED hay LCD (*Liquid Crystal Display - Màn hình tinh thể lỏng*), nên cho phép chế tạo thiết bị hiển thị uốn dẻo được (*flexible display*), dễ dàng hơn và có thể được làm thành các tấm có kích thước lớn;
- ▷ So với LED thường: OLED sáng hơn, độ tương phản cao hơn;
- ▷ So với LCD: OLED bản thân tự phát sáng, nên không cần ánh sáng ngoài như LCD;
- ▷ OLED có góc nhìn rộng, vào khoảng 170° ;
- ▷ Thân thiện với môi trường hơn, giảm thiểu ảnh hưởng của rác thải điện tử so với các sản phẩm công nghệ silic hiện nay.

* Ứng dụng của OLED

- ▷ Chiếu sáng dân dụng với công suất lớn, thẩm mỹ cao và dán được trên mọi bề mặt;

- ▷ Hiển thị bảng chữ cái, số (giống LED, LCD) với độ phân giải cực cao và màu sắc đa dạng;
- ▷ Màn hình cho điện thoại di động, đồng hồ thông minh hay các thiết bị đeo (*wearable devices*),...
- ▷ Tivi OLED với hình ảnh nịnh mắt, sắc nét; màu đen hiển thị sâu; độ sáng và độ tương phản cao; có khả năng tùy biến theo nhiều hình dạng khác nhau; góc nhìn rộng hơn; tiết kiệm năng lượng và uốn cong cả module.

Hình 2.32 minh họa một số ứng dụng điển hình của OLED đang có trên thị trường là đèn chiếu sáng, màn hình cong, ma trận hiển thị ký tự và màn hình siêu mỏng.



Hình 2.32: Một số ứng dụng của OLED: chiếu sáng và màn hình [11].

2.3 TRANSISTOR BJT

Transistor = Transfer resistor, nghĩa là điện trở truyền đạt.

Tên gọi transistor xuất phát từ công dụng cơ bản của nó là có khả năng biến đổi điện trở bản thân linh kiện (nội trở) nhờ điều khiển bằng dòng hoặc áp. Tức là, việc thay đổi giá trị điện trở của transistor được thực hiện bằng nguồn điện ngoài¹⁶.

Transistor đầu tiên trên thế giới được giới thiệu vào tháng 12 năm 1947 tại phòng thí nghiệm Bell Lab, Hoa Kỳ đã làm thay đổi đáng kể xu hướng cũng như tốc độ phát triển của lĩnh vực kỹ thuật điện tử. Vì đóng góp to lớn này, giải Nobel Vật lý đã được trao cho 3 trong số 12 nhà sáng chế ra transistor là Bardeen, Shockley và Brattain vào năm 1956.



Hình 2.33: Bardeen, Shockley và Brattain, những nhà phát minh ra transistor đầu tiên tại Bell Labs (trái) và transistor đầu tiên trên thế giới (phải) [12].

Transistor đầu tiên được chế tạo từ bán dẫn Ge với kích thước rất lớn và có kết cấu như mô tả trong hình 2.33, nó ở dạng mồi nối đơn với điện cực vàng. Sau đó, transistor chủ yếu được làm từ Si với kích thước rất nhỏ (cỡ vài mm đến cm đối với linh kiện rời rạc và từ vài trăm đến vài nm đối với vi mạch tích hợp).

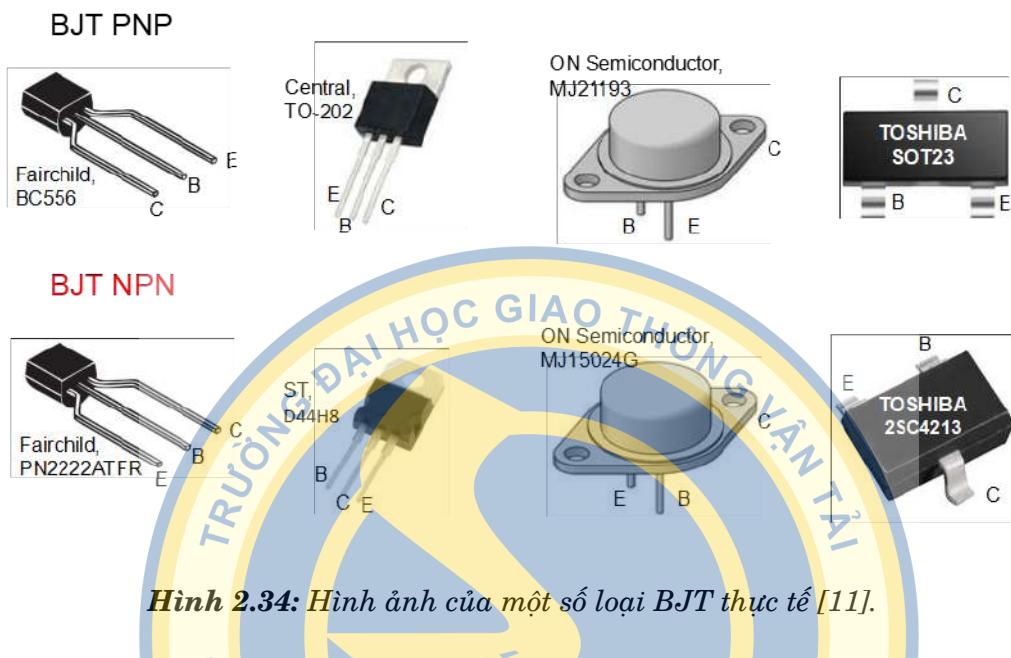
Transistor¹⁷ có hai loại chính là loại BJT (*Bipolar Junction Transistor - Transistor lưỡng cực hay transistor hai chuyển tiếp*) và loại FET (Field-Effect

¹⁶không phải tác động bằng tay như đối với biến trở thông thường

¹⁷trong sơ đồ mạch, transistor được ký hiệu là T hoặc Q

Transistor - Transistor hiệu ứng trường)¹⁸.

Hình ảnh thực tế của một số loại BJT thương mại được biểu diễn trong hình 2.34. Cũng giống như các loại linh kiện điện tử khác, BJT được đóng gói kiểu THD hoặc SMD. Trong trường hợp phải hoạt động với công suất lớn thì BJT được chế tạo thêm bộ phận tản nhiệt bằng kim loại.



Hình 2.34: Hình ảnh của một số loại BJT thực tế [11].

2.3.1 Ký hiệu và cấu tạo của BJT

Transistor BJT được cấu tạo bằng cách ghép bán dẫn N và P với nhau. Nếu ghép một bán dẫn loại N giữa hai bán dẫn loại P thì được Transistor loại PNP (còn gọi là transistor BJT loại thuận). Ngược lại, nếu ghép một bán dẫn loại P giữa hai bán dẫn loại N thì được Transistor NPN (còn gọi là transistor BJT loại ngược).

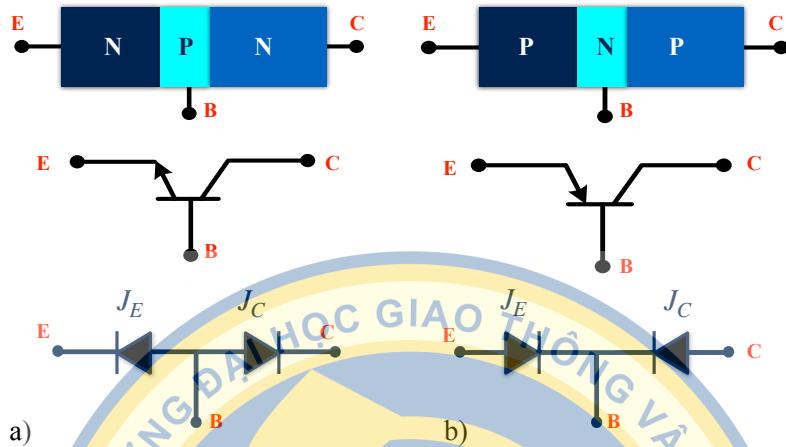
Cấu tạo và ký hiệu của BJT được minh họa trong hình 2.35 với ba miền bán dẫn được pha tạp với nồng độ khác nhau và có kích thước cũng khác nhau tùy vào nhiệm vụ của chúng. Cụ thể là:

- ▷ Miền phát Emitter (ký hiệu là miền E) có nhiệm vụ phát ra hạt dẫn nên được pha tạp với nồng độ cao nhất và kích thước trung bình;

¹⁸sẽ trình bày ở phần 2.4

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

- ▷ Miền gốc Base (ký hiệu là miền B) nằm giữa, có nhiệm vụ chuyển tiếp hạt dẫn nên được pha tạp với nồng độ nhỏ nhất và mỏng nhất;
- ▷ Miền góp Collector (ký hiệu là miền C) có nhiệm vụ thu góp hạt dẫn nên được pha tạp với nồng độ trung bình nhưng kích thước lớn nhất.



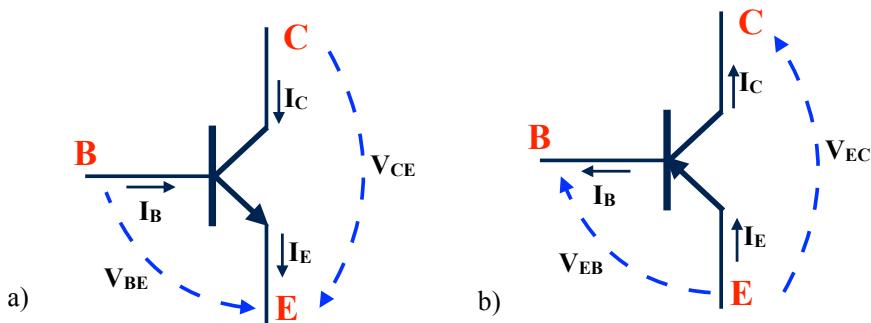
Hình 2.35: Mô tả cấu tạo, ký hiệu BJT loại a) NPN và b) PNP.

Ba lớp bán dẫn xếp đan xen nên tạo ra hai chuyển tiếp là chuyển tiếp Emitter - Base, ký hiệu là J_{B-E} hay J_E và chuyển tiếp Collector - Base, ký hiệu là J_{B-C} hay J_C . Nếu mỗi chuyển tiếp này được coi là một diode, khi đó transistor tương đương với mạch gồm hai diode mắc đối nhau. Tuy nhiên, không có nghĩa cứ mắc hai diode đối nhau có thể hoạt động giống như transistor vì khi đó không có sự tương hỗ lẫn nhau giữa hai diode như giữa J_E và J_C . Trạng thái phân cực của hai chuyển tiếp này sẽ xác định chế độ làm việc của BJT.

Do đặc điểm cấu tạo khác nhau nên mỗi cực của BJT đều được ký hiệu riêng biệt, tức là không được dùng lẫn nhau. Hình 2.36 mô tả các thành phần dòng điện¹⁹ và điện áp trên các cực của BJT loại NPN và PNP.

Trong đó dòng I_B được coi là dòng điều khiển BJT; điện áp V_{BE} là điện áp mở, có giá trị khoảng 0,3 V với loại BJT làm từ Ge và khoảng 0,7 V đối với loại làm từ Si. Trị số của các điện áp trên các cực là V_B , V_C và V_E sẽ xác định trạng thái của J_E và J_C .

¹⁹ký hiệu của mũi tên ở cực Emitter trùng với chiều của dòng điện từ cực Emitter sang cực Base



Hình 2.36: Các thành phần dòng điện và điện áp trên các cực của BJT loại a) NPN và b) PNP.

2.3.2 Nguyên tắc hoạt động của transistor BJT

Như đã đề cập ở trên, hoạt động của BJT phụ thuộc vào trạng thái phân cực của hai chuyển tiếp J_E và J_C . Do mỗi chuyển tiếp có thể phân cực thuận hoặc phân cực ngược nên có 4 khả năng phân cực tương ứng với 4 miền hoạt động: miền tích cực, miền khóa, miền bão hòa và miền tích cực ngược như thể hiện trong bảng 2.1. Bảng này cho thấy thông qua trạng thái của chuyển tiếp J_E và J_C xác định được điều kiện ràng buộc giữa các điện áp V_B , V_C và V_E . Nhờ vậy biết được miền làm việc, ứng dụng và sơ đồ tương đương tương ứng của BJT.

* Nhận xét:

- + Khi BJT đang hoạt động như một khóa điện tử (ON hoặc OFF), muốn chuyển trạng thái cho BJT cần kích thích bằng xung thích hợp.
- + Khi BJT hoạt động như một phím từ khuếch đại thì BJT được điều khiển bằng dòng điện I_B .
- + Miền tích cực ngược không được sử dụng trong các mạch điện tử do hạt dẫn xuất phát từ Collector di chuyển đến Emitter là không đáng kể²⁰.

Hình 2.37 mô tả sự di chuyển của hạt dẫn trong BJT loại N hoạt động trong miền tích cực. Hạt dẫn đa số là điện tử từ miền phát Emitter di chuyển qua miền gốc Base do J_E phân cực thuận và được thu góp tại cực góp Collector do J_C phân cực ngược.

²⁰do cấu tạo vật lý của Collector không giống như Emitter

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

Bảng 2.1: Điều kiện ràng buộc điện áp phân cực cho transistor BJT loại NPN.

Trạng thái chuyển tiếp	Điện áp phân cực	Miền làm việc (Ứng dụng)	Sơ đồ tương đương
J _E phân cực thuận J _C phân cực ngược	$V_C > V_B > V_E$	Tích cực (Khuếch đại)	
J _E phân cực thuận J _C phân cực thuận	$V_B > V_E$ $V_C < V_B$	Bão hòa (Khóa ON)	
J _E phân cực ngược J _C phân cực ngược	$V_B < V_E$ $V_C > V_B$	Ngắt (Khóa OFF)	
J _E phân cực ngược J _C phân cực thuận	$V_C < V_B < V_E$	Tích cực ngược	-

Hình 2.37: Sự di chuyển của hạt dẫn trong BJT loại NPN khi hoạt động như phần tử khuếch đại.

2.3. TRANSISTOR BJT

Trong quá trình di chuyển của hạt dẫn được mô tả trong hình 2.37, một số điện tử sẽ bị hút về cực Base tạo thành dòng cực gốc. Do vậy, số lượng điện tử sang được Collector sẽ nhỏ hơn số lượng điện tử xuất phát từ Emitter. Khi này mối quan hệ giữa các dòng điện [4] được mô tả bởi các biểu thức sau:

$$I_C = \beta I_B \quad (2.9)$$

$$I_C = \alpha I_E = \frac{\beta}{\beta + 1} I_E \quad (2.10)$$

trong đó:

β là hệ số khuếch đại dòng điện một chiều, có giá trị trong khoảng $(50 \div 400)$;

α là hệ số truyền đạt dòng điện; $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$

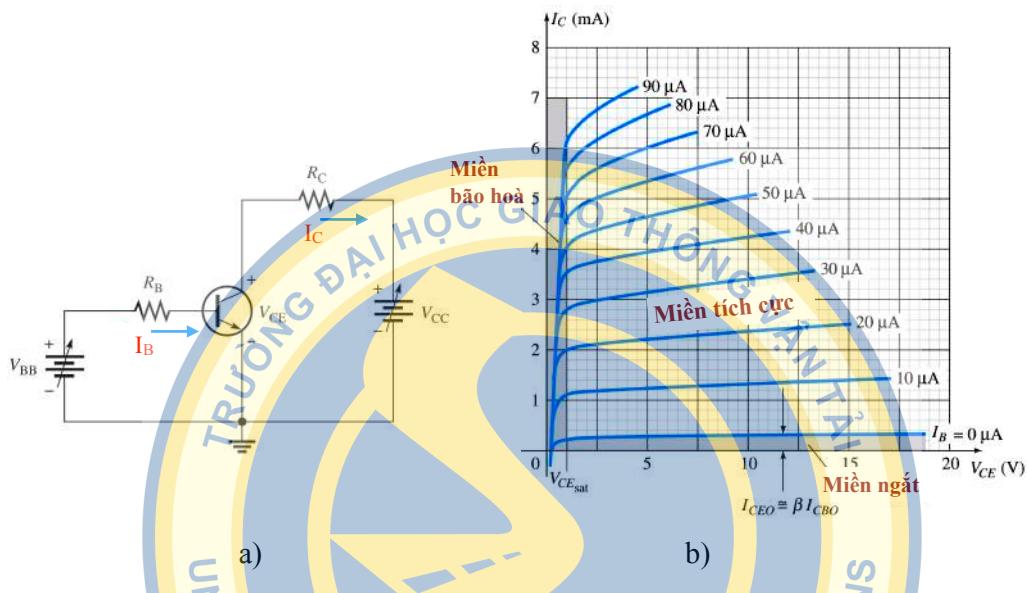
Biểu thức 2.9 là biểu thức đặc trưng cho hoạt động của BJT khi dùng dòng I_B rất nhỏ để điều khiển dòng I_C lớn hơn rất nhiều, vì lý do này mà BJT được cho là **linh kiện điều khiển bằng dòng điện**. Chỉ cần đưa dòng điện vào cực gốc của BJT thì nội trở (điện trở giữa hai cực còn lại) sẽ thay đổi ứng với các trường hợp:

- ▷ Dòng I_B đủ lớn, nội trở của BJT giảm mạnh, tức là transistor dẫn mạnh;
- ▷ Dòng I_B nhỏ, nội trở của BJT tăng, tức là transistor dẫn yếu;
- ▷ Dòng $I_B = 0$, nội trở của BJT lớn vô cùng, tức là không có dòng qua transistor.

Chú ý: BJT loại PNP có cơ chế hoạt động hoàn toàn tương tự như loại NPN đã trình bày ở trên nhưng đảo chiều điện áp và dòng điện trên các cực.

2.3.3 Đặc tuyến Volt-Ampere điền hình của BJT

Đặc tính điện của BJT có thể được xác định thông qua các đường đặc tuyến, phần 3.2.4.2 sẽ trình bày chi tiết về các đường đặc tuyến này. Trong số đó, đặc tuyến thể hiện mối quan hệ giữa dòng và áp đầu ra, gọi là đặc tuyến ra, thường được sử dụng khi phân tích mạch transistor. Hình 2.38 biểu diễn sơ đồ Emitter chung²¹ của một BJT loại NPN và họ đặc tuyến ra tương ứng. Khi này sẽ xác định được các miền làm việc của BJT.



Hình 2.38: a) Sơ đồ mạch và b) Họ đặc tuyến ra của một BJT loại NPN măc kiểu Emitter chung [4].

Trong sơ đồ hình 2.38(a), nguồn điện áp V_{BB} thay đổi để thay đổi dòng cực gốc I_B ; giá trị của V_{CE} thay đổi bằng cách thay đổi giá trị của V_{CC} . Tại mỗi giá trị I_B , xác định được dòng I_C khi V_{CE} thay đổi. Ứng các giá trị $I_{B1} < I_{B2} < I_{B3} \dots$ có họ đặc tuyến ra như hình 2.38(b).

Hình 2.38(b) cho thấy BJT có ba miền hoạt động như sau:

- + Khi dòng $I_B = 0$ thì dù tăng V_{CE} lên rất nhiều dòng I_C vẫn xấp xỉ 0, gọi là **miền ngắt** (*cut-off region*).
- + Khi $V_{CE} < V_{CE,sat}$ và dòng $I_B > 0$, dòng qua BJT là I_C tăng rất nhanh nhưng sụt áp trên nó lại thay đổi không đáng kể, gọi là **miền bão hòa** (*saturation*

²¹sẽ trình bày chi tiết trong Chương 3

region).

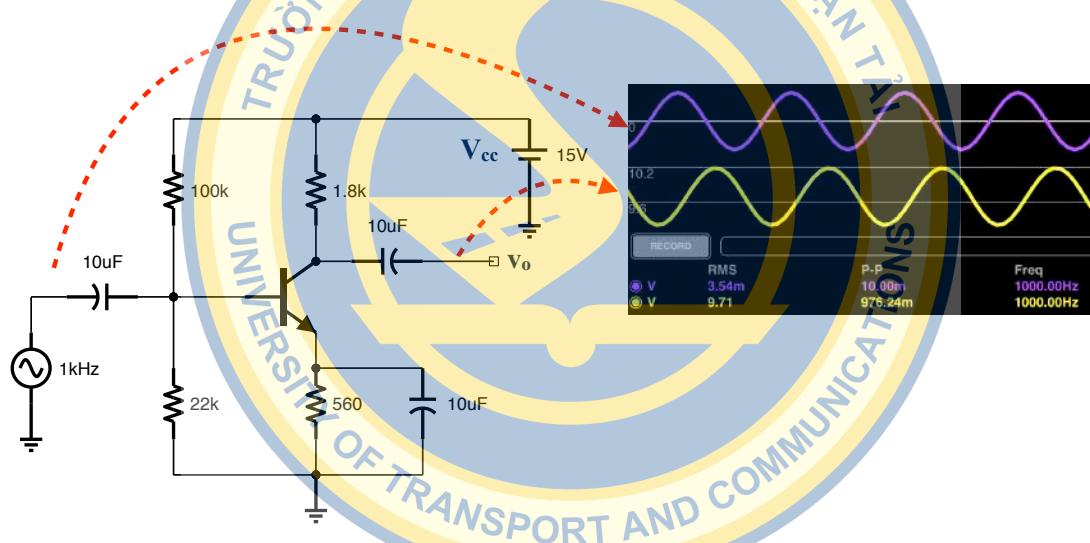
- + Tiếp tục tăng V_{CE} thì dòng I_C tăng rất ít, gọi là **miền tích cực** (*active region*).

Chú ý: Khi tăng V_{CE} tới giá trị nhất định,²² dòng I_C sẽ tăng đột biến, gọi là miền đánh thủng, nếu không có biện pháp nào để tản nhiệt hay giảm dòng này thì BJT sẽ bị quá nhiệt và hỏng.

2.3.4 Ứng dụng điển hình của BJT

- + Transistor BJT thường được sử dụng làm phần tử khuếch đại trong các mạch điện tử tương tự như mạch khuếch đại, mạch lọc tích cực, mạch tạo dao động, mạch biến đổi tần số

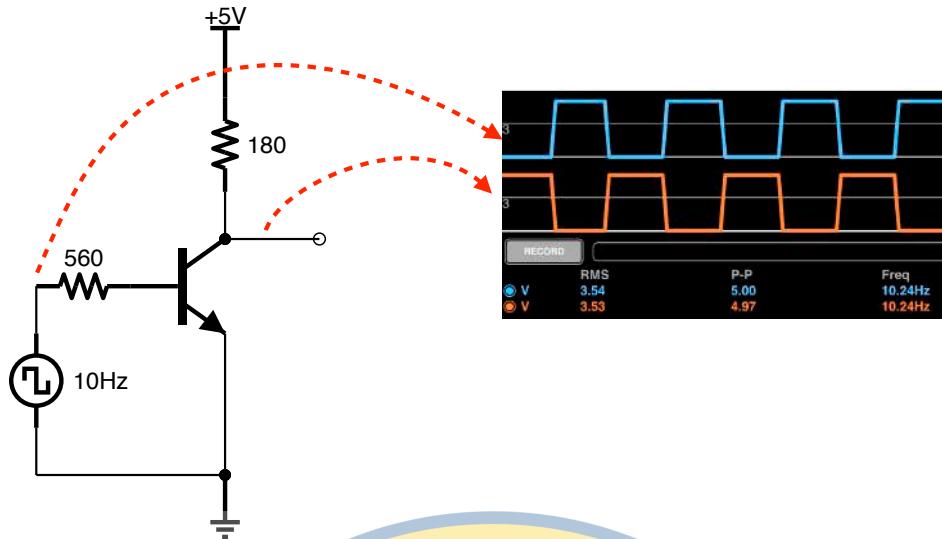
Hình 2.39 minh họa dạng điện áp vào/ra của một mạch khuếch đại sử dụng BJT. Kết quả mô phỏng cho thấy tín hiệu điện áp vào có giá trị đỉnh-đỉnh là 10 mV nhưng điện áp đầu ra lên tới 976,24 mV.



Hình 2.39: a) Một mạch khuếch đại sử dụng BJT và b) Dạng sóng vào/ra tương ứng.

- + Transistor BJT có thể được sử dụng như khóa điện tử trong các mạch điều khiển đóng ngắt linh kiện khác như đèn LED hay relay. Sơ đồ điều khiển khóa BJT loại NPN được minh họa trong hình 2.40.

²²tùy thuộc vào mỗi loại transistor



Hình 2.40: Một mạch khóa điện tử sử dụng BJT loại NPN và dạng sóng điện áp vào/ra tương ứng.

Khi không có xung đưa vào cực Base, BJT ở trạng thái OFF, dòng $I_C = 0$ và điện áp $V_{CE} = V_{CC}$, tức là đầu ra ở mức điện áp cao. Khi có xung dương tác động, BJT chuyển sang trạng thái ON, dòng $I_C = I_{C(\max)} = V_{CC}/R_C$ và điện áp $V_{CE} = 0$.

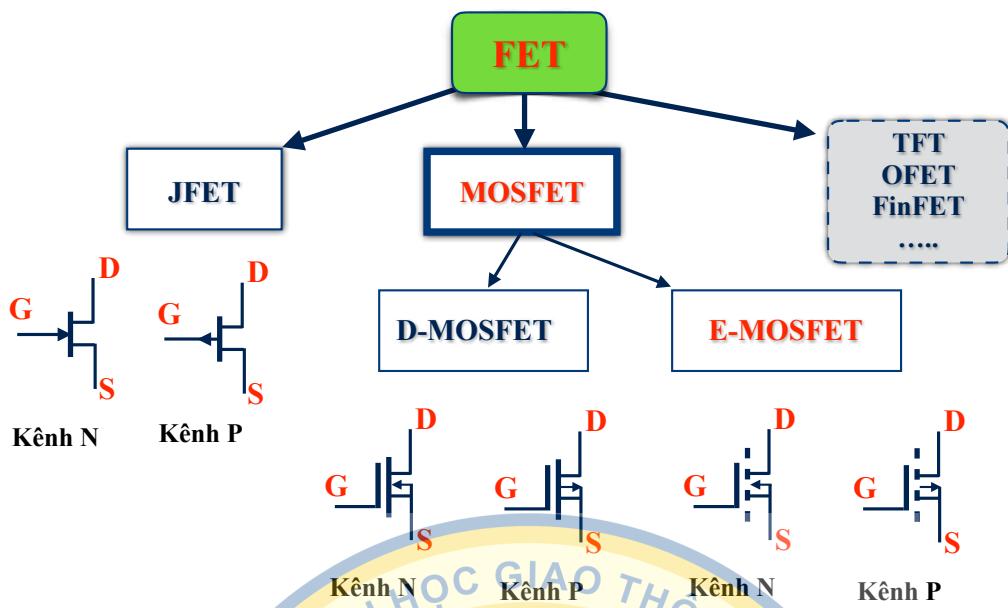
+ BJT²³ còn được sử dụng để chế tạo vi mạch tương tự là IC khuếch đại thuật toán, IC ổn áp hay IC khuếch đại âm tần ...

2.4 TRANSISTOR FET

Transistor hiệu ứng trường FET là loại transistor mà quá trình điều khiển cường độ dòng điện nhờ tác dụng của điện trường ngoài. Dòng điện chạy trong FET chỉ do một loại hạt dẫn tạo nên, hoặc là điện tử, hoặc là lỗ trống.

Hình 2.41 biểu diễn sự phân loại của FET, trong mỗi loại lại được phân chia thành loại kênh dẫn P và kênh dẫn N. Đối với FET kênh P, hạt dẫn tạo nên dòng điện trong kênh dẫn là lỗ trống; ngược lại, với FET kênh N, điện tử là hạt dẫn điện trong kênh dẫn.

²³các loại transistor được trình bày trong Giáo trình này đều là loại linh kiện rác



Hình 2.41: Phân loại và ký hiệu của transistor FET.

trong đó:

JFET (*Junction Field Effect Transistor*) là transistor FET kiểu chuyển tiếp;

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) là transistor FET kiểu kim loại - oxide - bán dẫn;

D-MOSFET (*Depletion-mode MOSFET*) là MOSFET kênh có sẵn (làm việc ở chế độ nghèo hạt dẫn);

E-MOSFET (*Enhancement-mode MOSFET*) là MOSFET kênh cảm ứng (làm việc ở chế độ giàu hạt dẫn);

Một số loại FET khác²⁴ là TFT (*Thin-Film Transistor*) có cấu trúc kiểu màng mỏng; OFET (*Organic FET*) là FET làm từ vật liệu bán dẫn hữu cơ; FinFET

G (*Gate*) là cực cửa, đóng vai trò điều khiển;

S (*Source*) là cực nguồn, đóng vai trò phát hạt dẫn;

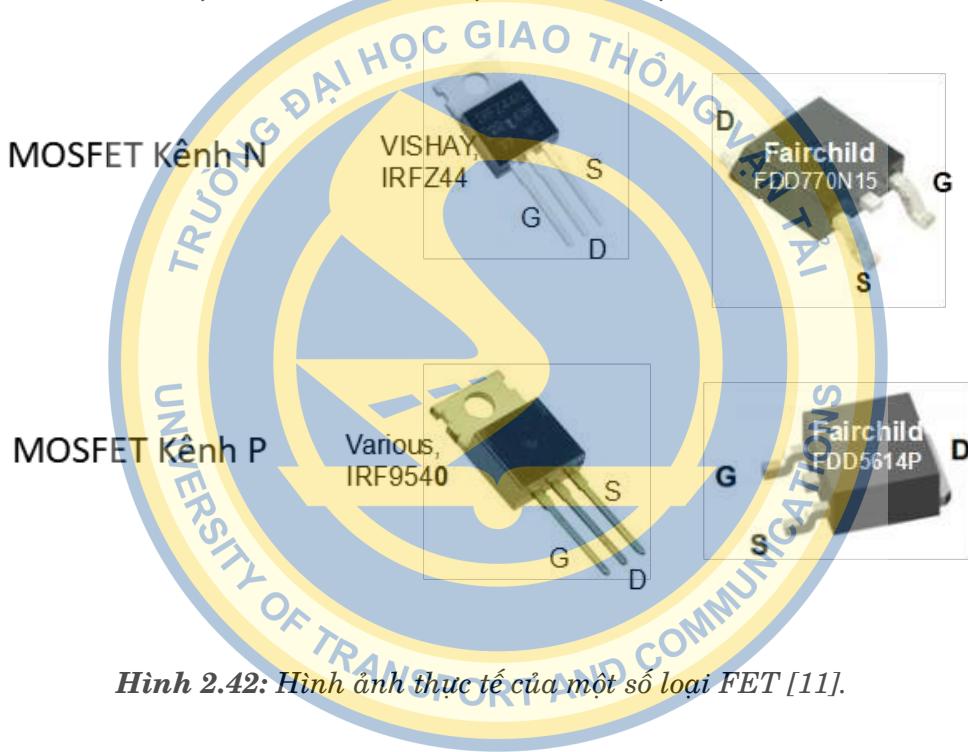
²⁴do mới xuất hiện và chưa được thương mại hóa rộng rãi nên tạm thời chưa giới thiệu trong Giáo trình này

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

D (Drain) là cực máng, đóng vai trò hút hạt dẫn từ cực Source để đưa ra mạch ngoài.

Trong các loại FET, JFET xuất hiện đầu tiên và đặc trưng cho linh kiện hiệu ứng trường. MOSFET là transistor loại hiệu ứng trường có cấu trúc MOS hình thành từ kim loại, chất cách điện oxide và chất bán dẫn. Cấu trúc MOS đảm bảo cho MOSFET không có dòng chạy trên cực cửa, nghĩa là sử dụng điện áp cực cửa để điều khiển nhưng hoàn toàn không có dòng I_G như JFET. Nhờ vậy, MOSFET tiết kiệm công suất một cách đáng kể và hiện nay hầu hết nói đến FET là ngầm định đó là MOSFET. MOSFET có hai loại là D-MOSFET (MOSFET kênh có sẵn) và E-MOSFET (MOSFET kênh cảm ứng).

Hình 2.42 minh họa hình ảnh của một số FET thực tế.



Hình 2.42: Hình ảnh thực tế của một số loại FET [11].

* Nguyên tắc hoạt động chung

Chức năng chung của transistor là làm khóa điện tử (ON/OFF) hay phần tử khuếch đại. Do vậy, khi FET làm việc cần đảm bảo xảy ra các quá trình sau:

- ▷ FET có thể hoạt động như một khóa điện tử (ON hoặc OFF), tức là kênh dẫn có lúc dẫn bão hòa và có lúc ngắt hoàn toàn;

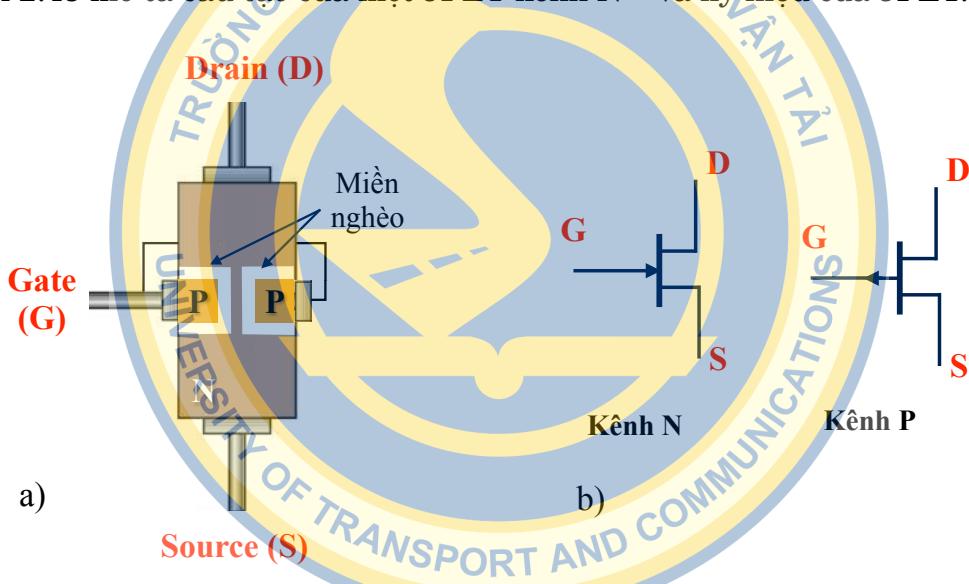
- ▷ FET có thể hoạt động như một phần tử khuếch đại, tức là nồng độ hạt dẫn trên kênh dẫn có thể điều khiển được;
- ▷ Hạt dẫn từ cực nguồn Source di chuyển sang cực máng Drain tạo ra dòng điện qua kênh dẫn.

Trong phạm vi Giáo trình này, chúng tôi chỉ trình bày về FET kênh N do tính phổ dụng của chúng còn loại kênh P bạn đọc tự suy ra vì các hiện tượng xảy ra tương tự nhưng với điện áp và dòng điện đảo chiều so với loại kênh N.

2.4.1 JFET

2.4.1.1 Cấu tạo và ký hiệu

Hình 2.43 mô tả cấu tạo của một JFET kênh N²⁵ và ký hiệu của JFET.



Hình 2.43: a) Cấu tạo của một JFET kênh N và b) Ký hiệu của loại kênh N và kênh P.

JFET kênh N gồm một phiến bán dẫn pha tạp loại N có hai bên được cấy bán dẫn loại P có nồng độ cao (P+). Hai đầu của phiến bán dẫn N gắn hai điện cực là cực máng Drain và cực nguồn Source. Điện cực thứ ba là cực cửa

²⁵cấu tạo của JFET kênh P tương tự như vậy nhưng đảo vị trí bán dẫn P và N

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

Gate nối tới hai bán dẫn loại P. Kênh dẫn loại N được hình thành nối giữa cực Drain và cực Source và cách ly với cực cửa Gate bởi lớp chuyển tiếp P-N. Cực Gate được gọi là cực điều khiển.

2.4.1.2 Nguyên tắc hoạt động của JFET

Để đảm bảo nguyên tắc hoạt động chung của FET, JFET sẽ được cấp điện áp một chiều lên các cực để xác định chế độ hoạt động sao cho hạt dẫn di chuyển từ Source tới Drain; hai chuyển tiếp P-N phải bị phân cực ngược để độ rộng kênh dẫn có thể điều khiển được và có thể bị ngắt hoàn toàn.²⁶

Bảng 2.2 thể hiện các điều kiện điện áp phân cực cho JFET để đảm bảo transistor này hoạt động được theo đúng chức năng.

Bảng 2.2: Điều kiện ràng buộc điện áp phân cực cho transistor JFET.

Thông số	Kênh N	Kênh P
Hạt dẫn	Điện tử	Lỗ trống
V_{DS}	> 0 Để điện tử từ Source bị hút về Drain	< 0 Để lỗ trống từ Source bị hút về Drain
V_{GS}	≤ 0 Để chuyển tiếp P-N phân cực ngược	> 0 Để chuyển tiếp P-N phân cực ngược

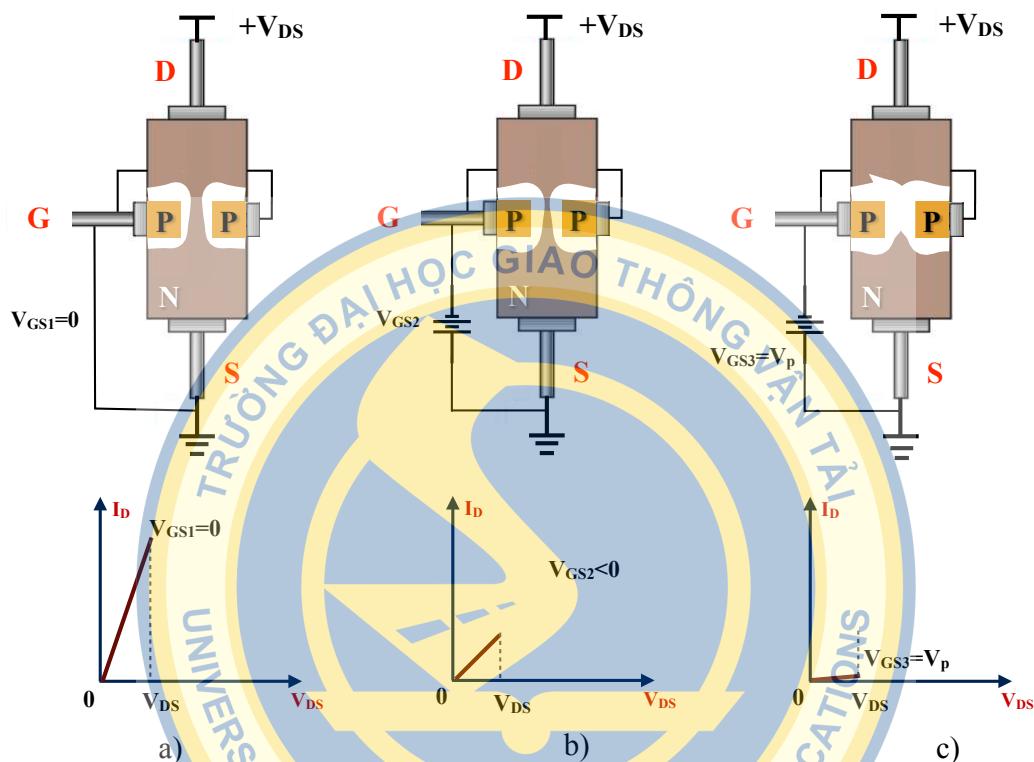
Chú ý: Khi đặt các điện áp trên lên các điện cực thì do điện áp không như nhau ở các điểm trên kênh dẫn nên chuyển tiếp P-N không được phân cực ngược với giá trị điện áp như nhau nên độ rộng kênh dẫn sẽ không đồng đều mà bị hẹp dần về phía Drain, nơi có điện áp chênh lệch với điện áp cực cửa là lớn nhất.

Xét với JFET kênh N: $V_{DS} > 0$ và $V_{GS} \leq 0$

Hình 2.44 mô tả sự thay đổi của độ rộng kênh dẫn và dòng cực máng I_D khi tăng độ lớn của V_{GS} trong điều kiện V_{DS} cố định. Khi này kênh dẫn hẹp dần về phía cực máng và làm dòng cực máng I_D giảm dần.

²⁶nếu phân cực thuận thì không thể điều khiển để làm mất dòng trong kênh dẫn

Lý do là lượng hạt dãn trong kênh bị hút về phía cực máng không thay đổi do V_{DS} cố định nên khi tăng V_{GS} làm cho kênh dãn hẹp lại thì dòng cũng giảm theo như minh họa trong hình 2.44(a), (b) và (c). Tiếp tục tăng độ lớn V_{GS} tới giá trị mà tại đó hai miền nghèo chồng lấn lên nhau làm kênh dãn biến mất hoàn toàn, dòng qua kênh dãn gần như bằng 0 (thực tế cỡ nA). Điện áp này được gọi là **điện áp thắt kênh dãn**²⁷ (*pinch-off voltage*), ký hiệu là V_P .



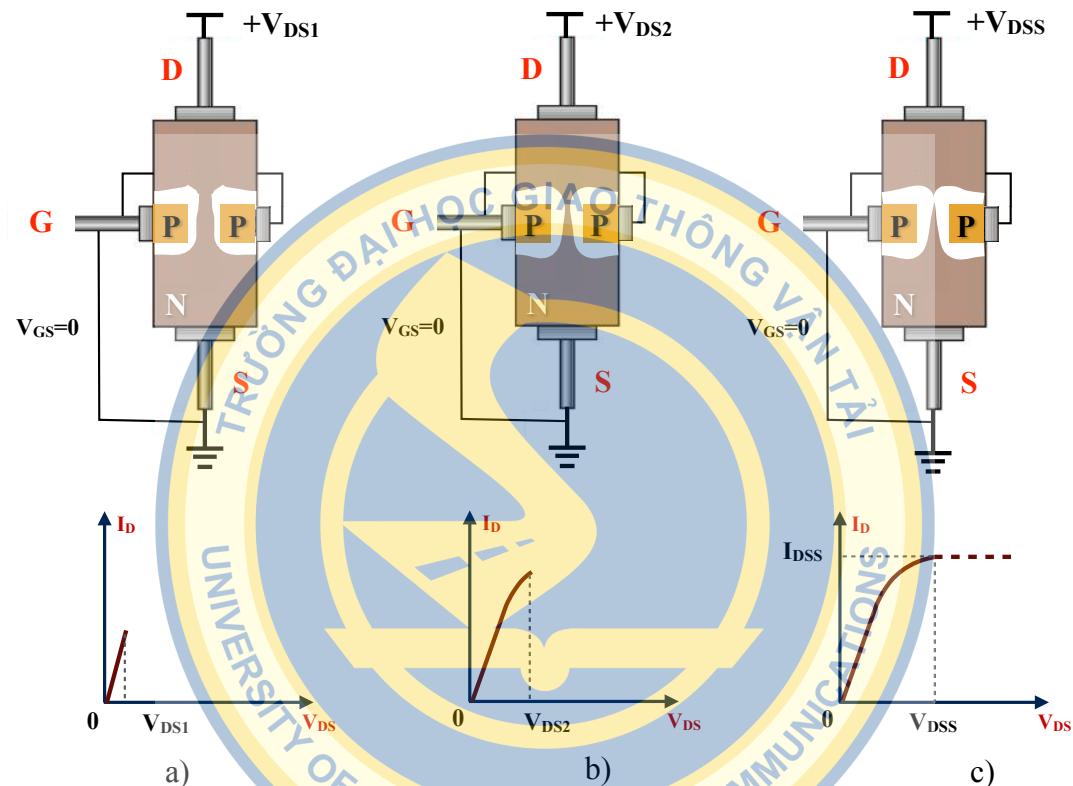
Hình 2.44: Sự thay đổi độ rộng kênh và dòng cực máng trong điều kiện V_{DS} cố định. a) $V_{GS} = 0$, b) tăng độ lớn V_{GS} và c) kênh đạt trạng thái pinch-off khi $V_{GS} = V_P$.

Hình 2.45 mô tả sự thay đổi của độ rộng kênh dãn và dòng cực máng I_D khi tăng V_{DS} trong điều kiện $V_{GS} = 0$. Kênh dãn có xu hướng hẹp lại và thắt mạnh về phía cực máng khi tăng dần giá trị của V_{DS} . Đồng thời dòng I_D tăng dần như minh họa trong hình 2.45(a) và (b) vì lượng hạt dãn tham gia vào quá trình tạo dòng tăng theo sự gia tăng của V_{DS} . Tiếp tục cho tới khi V_{DS} đạt

²⁷trong datasheet của linh kiện thường được ký hiệu là $V_{GS(off)}$

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

một giá trị nhất định thì dòng I_D không tăng nữa dù tiếp tục tăng V_{DS} . Giá trị điện áp V_{DS} để bắt đầu xảy ra hiện tượng này gọi là điện áp V_{DSS} , có độ lớn bằng đúng V_P . Điều này được giải thích là tại điện áp V_{DSS} hai miền nghèo "chạm" nhau tức là kênh dẫn bị thắt lại²⁸. Tuy nhiên, do hạt dẫn trong miền này có tốc độ rất lớn nên chúng di chuyển theo hiệu ứng trường và tới ngay cực máng. Chính vì vậy, dòng cực máng lúc này có giá trị không đổi vì tất cả hạt dẫn đều bị cuốn về phía Drain gọi là dòng bão hòa I_{DSS} .



Hình 2.45: Sự thay đổi độ rộng kênh và dòng cực máng trong điều kiện $V_{GS} = 0$.
a) V_{DS} nhỏ, b) V_{DS} lớn hơn và c) kênh đạt trạng thái pinch-off tại $V_{DS} = V_{DSS} = |V_P|$

Chú ý:

Với JFET kênh N, V_P có giá trị âm còn V_{DSS} có giá trị dương. Ngược lại, JFET kênh P có V_P có giá trị dương còn V_{DSS} có giá trị âm.

²⁸đáng ra dòng bằng 0

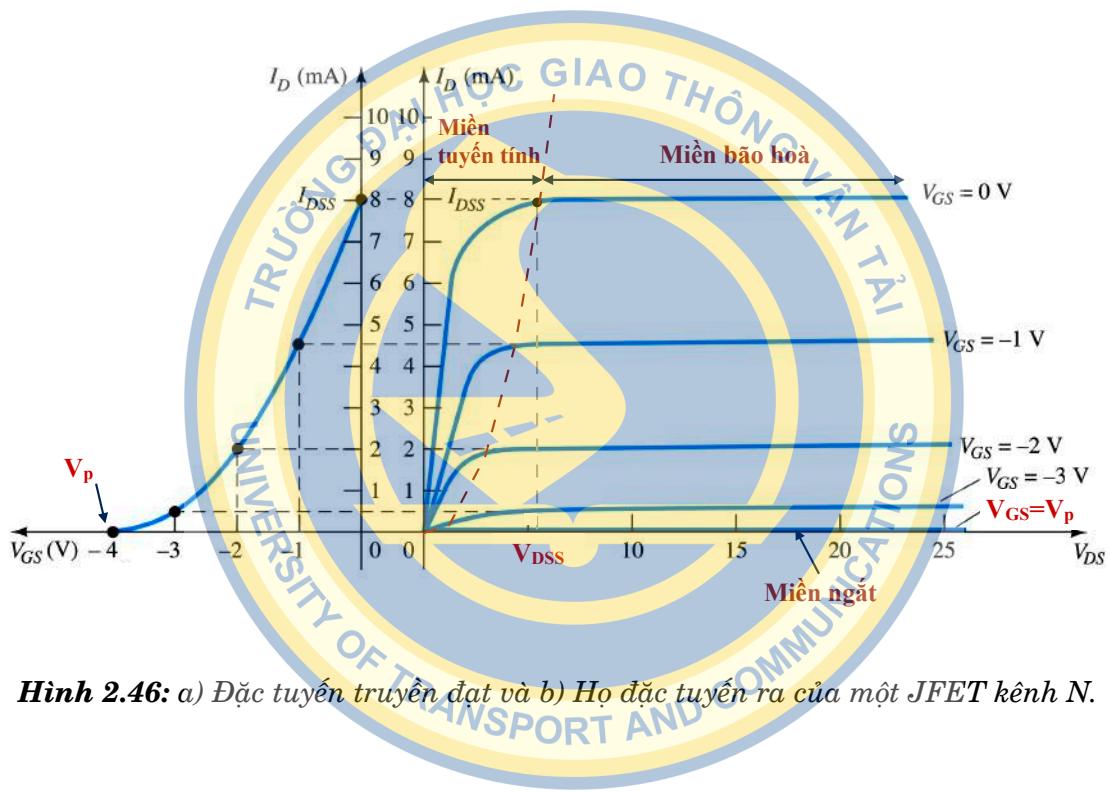
2.4.1.3 ĐẶC TUYẾN Volt-Ampere của JFET

Hai loại đặc tuyến quan trọng nhất của JFET là đặc tuyến truyền đạt và họ đặc tuyến ra.

Đặc tuyến truyền đạt biểu diễn mối quan hệ giữa dòng điện cực máng I_D và điện áp V_{GS} khi điện áp V_{DS} không đổi.

Đặc tuyến ra biểu diễn mối quan hệ giữa dòng điện cực máng I_D và điện áp V_{DS} khi điện áp V_{GS} không đổi.

Hình 2.46 biểu diễn đặc tuyến truyền đạt và họ đặc tuyến ra của một JFET kênh N với các giá trị của V_{GS} khác nhau.



Hình 2.46: a) Đặc tuyến truyền đạt và b) Họ đặc tuyến ra của một JFET kênh N.

trong đó:

I_{DSS} là dòng cực máng lớn nhất ứng với điều kiện $V_{GS} = 0$;

V_p là điện áp âm lớn nhất của V_{GS} để làm mất hoàn toàn kênh dẫn, tức là dòng $I_D = 0$;

$V_{DSS} = -V_p$ là điện áp của V_{DS} để xảy ra hiện tượng pinch-off khi $V_{GS} = 0$, tức là điện áp V_{DSS} ứng với dòng $I_D = I_{DSS}$.

* Nhận xét:

- ▷ Với đặc tuyến ra, có ba miền phân chia rõ rệt là **miền tuyến tính**²⁹ khi dòng I_D tăng tỉ lệ thuận với điện áp V_{DS} khi $V_{DS} < V_{DSS}$; **miền bão hòa** khi dòng I_D không đổi dù V_{DS} tăng; **miền ngắn** khi $|V_{GS}| \geq |V_P|$ và dòng $I_D = 0$;
- ▷ JFET kênh N hoạt động với điện áp $V_{GS} \leq 0$ và có trị số $|V_{GS}| < |V_P|$;
- ▷ Điện áp V_{GS} càng âm thì điểm xuất hiện dòng bão hòa càng xảy ra sớm nhưng dòng có giá trị càng nhỏ;
- ▷ Đặc tuyến truyền đạt có dạng một nhánh parabol.

2.4.1.4 Các biểu thức đặc trưng

Từ các đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt, xác định được biểu thức đặc trưng cho mối quan hệ giữa dòng cực máng I_D với các điện áp phân cực của JFET kênh N [5] như sau:

+ **Miền ngắn:** $V_{GS} \leq V_P < 0$

$$I_D = 0$$

+ **Miền tuyến tính:** $V_P < V_{GS} \leq 0$ và $V_{DS} < (V_{GS} - V_P)$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} [2(V_{GS} - V_P)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2.11)$$

+ **Miền bão hòa:**³⁰ $V_P < V_{GS} \leq 0$ và $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_P)$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (2.12)$$

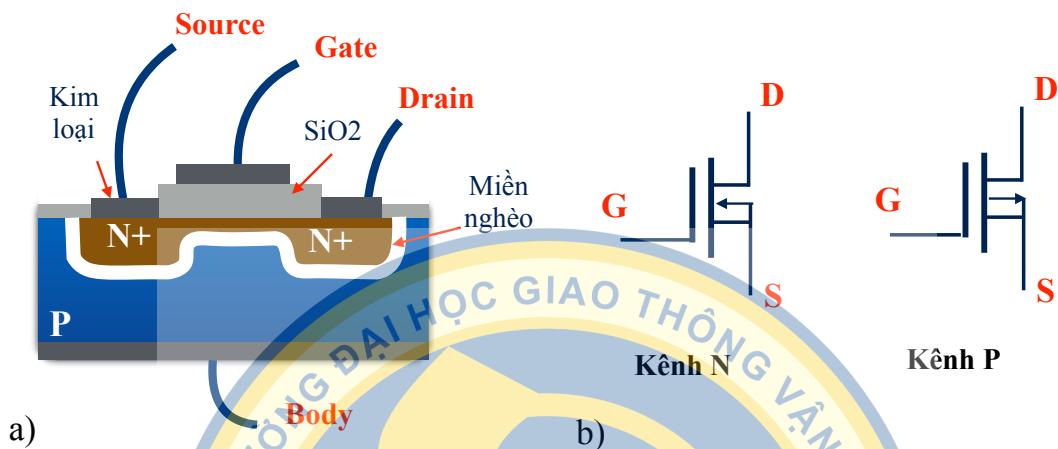
²⁹còn gọi là miền ohmic

³⁰theo phương trình Shockley cho JFET

2.4.2 D-MOSFET

2.4.2.1 Cấu tạo và ký hiệu

Hình 2.47 minh họa cấu trúc cơ bản của D-MOSFET và ký hiệu của loại kênh N và kênh P.



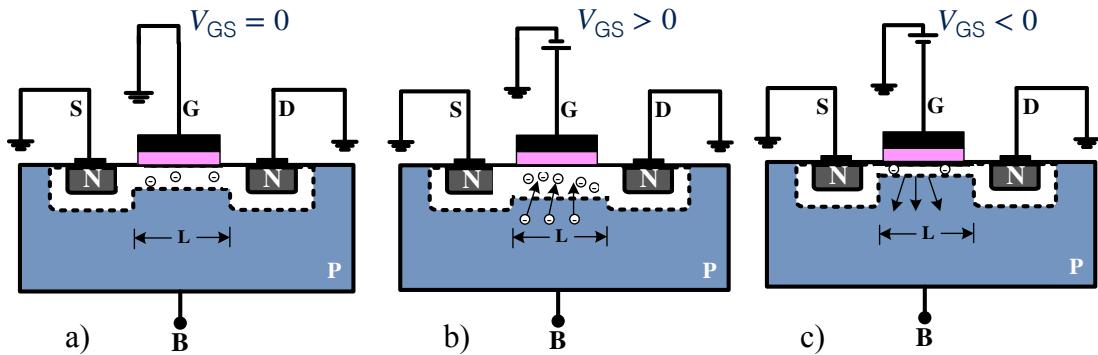
Hình 2.47: a) Mô tả cấu tạo của một D-MOSFET kênh N và b) Ký hiệu của D-MOSFET kênh N, kênh P.

Cấu trúc của D-MOSFET được mô tả là trên nền đế đơn tinh thể bán dẫn loại P, tạo nên hai miền bán dẫn tạp chất loại N+ bằng công nghệ pha tạp đặc biệt. Hai miền bán dẫn này nối với hai điện cực để tạo thành cực máng Drain và cực nguồn Source, đồng thời được nối thông với nhau nhờ một kênh dẫn điện hình thành ngay trong quá trình chế tạo nên gọi là **kênh dẫn có sẵn**. Đối diện với kênh dẫn phủ một lớp cách điện mỏng SiO₂ và gắn một điện cực kim loại được gọi là cực cửa Gate. Lớp đế cũng phủ một lớp điện cực để nối ra ngoài gọi là **cực đế B (Body)**.³¹

2.4.2.2 Nguyên tắc hoạt động của D-MOSFET

Hình 2.48 minh họa sự thay đổi của lượng hạt dẫn trong kênh dẫn ứng với các giá trị điện áp phân cực khác nhau cho D-MOSFET kênh N.

³¹khi làm việc cực này có thể được để hở, nối đất hay nối với điện cực Source



Hình 2.48: Trạng thái kênh dẫn của D-MOSFET khen N khi $V_{DS} = 0$ và tại các giá trị V_{GS} khác nhau: a) $V_{GS} = 0$, b) $V_{GS} > 0$ và c) $V_{GS} < 0$.

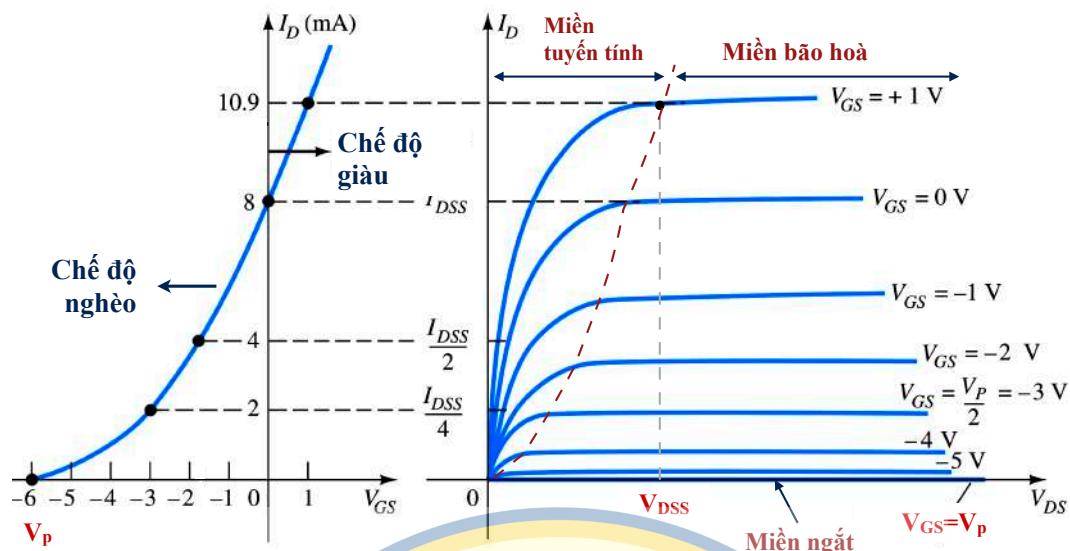
- + Kênh dẫn có hạt dãn điện tử ngay cả khi điện áp $V_{GS} = 0$ như biểu diễn trong hình 2.48(a). Điều này có được là do kênh dẫn nối giữa Source và Drain đã được tạo ngay khi chế tạo giống như loại JFET.
- + Kênh dẫn được bổ sung thêm hạt dãn do điện tử từ để bị hút về phía đối diện cực cửa Gate khi $V_{GS} > 0$ như minh họa trong hình 2.48(b). Đây được gọi là **chế độ giàu hạt dãn** hay còn gọi là chế độ tăng cường hạt dãn.
- + Kênh dẫn bị mất bớt đi hạt dãn vì điện tử bị đẩy khỏi kênh dẫn khi $V_{GS} < 0$ như thể hiện trong hình 2.48(c). Đây được gọi là **chế độ nghèo hạt dãn** của D-MOSFET.

Dòng điện cực máng trong D-MOSFET được điều khiển bởi điện trường đặt vuông góc với bề mặt của lớp bán dẫn. Vì kênh dẫn đã có sẵn nên ngay cả khi cực cửa để hở, chỉ cần thiết lập điện áp chênh lệch giữa Source và Drain là mạch ngoài sẽ có dòng. Nói một cách khác D-MOSFET giống như một khóa điện tử thường ON phải dùng điện áp phù hợp để chuyển nó từ trạng thái ON sang OFF.

Hiện tượng pinch-off xảy ra với D-MOSFET trong chế độ nghèo hạt dãn cũng tương tự như ở JFET mà đã được trình bày chi tiết trong phần 2.4.1.2.

2.4.2.3 ĐẶC TUYẾN RA VÀ ĐẶC TUYẾN TRUYỀN ĐẠT

Hình 2.49 biểu diễn đặc tuyến truyền đạt và họ đặc tuyến ra của một D-MOSFET khen N.



Hình 2.49: a) Đặc tuyến truyền đạt và b) Họ đặc tuyến ra của một D-MOSFET kênh N.

Nhận xét:

- ▷ D-MOSFET có hai chế độ hoạt động là giàu hạt dãn và nghèo hạt dãn ứng với khi $V_{GS} > 0$ và khi $V_{GS} \leq 0$. Tuy nhiên, chỉ khi ở chế độ nghèo hạt dãn thì D-MOSFET mới có các trạng thái ON, OFF và khuếch đại. Điều này có nghĩa là D-MOSFET thường không được cho hoạt động ở chế độ giàu hạt dãn do không thể thiết lập trạng thái OFF;
- ▷ Dạng đặc tuyến của D-MOSFET hoàn toàn tương đồng với đặc tuyến của JFET nhưng có thêm chế độ giàu hạt dãn.
- ▷ Dòng I_{DSS} ứng với khi $V_{GS} = 0$ không phải là giá trị dòng cực máng lớn nhất như với JFET vì ở D-MOSFET còn có thêm chế độ giàu hạt dãn khi $V_{GS} > 0$.

2.4.2.4 Các biểu thức đặc trưng

Từ các đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt, xác định được biểu thức đặc trưng cho mối quan hệ giữa dòng I_D với các điện áp phân cực của D-MOSFET giống như của JFET [5], tức là tương ứng với biểu thức 2.11 và 2.12.

Với D-MOSFET kênh N:

+ **Miền ngắt:** $V_{GS} \leq V_P < 0$

$$I_D = 0$$

+ **Miền tuyến tính:** $V_{GS} \geq V_P$ và $V_{DS} < (V_{GS} - V_P)$

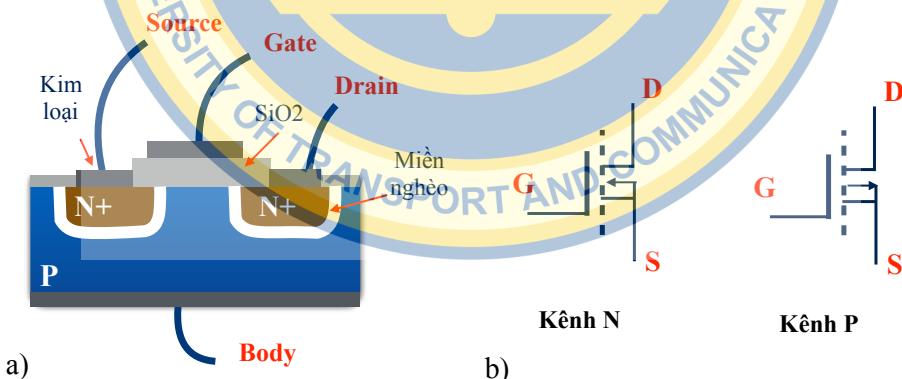
$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} [2(V_{GS} - V_P)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

+ **Miền bão hòa:** $V_{GS} \geq V_P$ và $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_P)$

2.4.3 E-MOSFET

2.4.3.1 Cấu tạo và ký hiệu

E-MOSFET có cấu tạo cơ bản được mô tả trong hình 2.50(a) còn ký hiệu của loại kênh N và kênh P được biểu diễn trong hình 2.50(b).

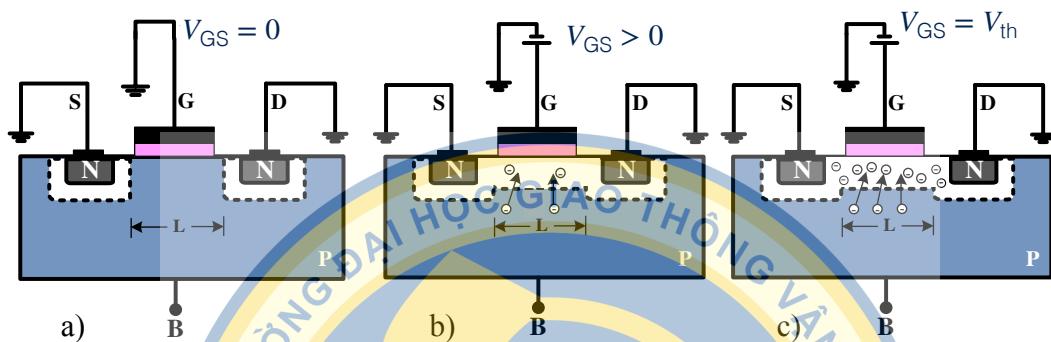


Hình 2.50: a) Mô tả cấu tạo của một E-MOSFET kênh N và b) Ký hiệu của E-MOSFET kênh N, kênh P.

2.4.3.2 Nguyên tắc hoạt động của E-MOSFET

Đối với loại E-MOSFET, do không có kênh dẫn nồng độ giữa Source và Drain nên cực cửa Gate phải có điện áp sao cho hạt dẫn từ để bị hút về phía nó và khi đạt số lượng phù hợp thì coi như kênh dẫn nối liền Source và Drain được hình thành, gọi là **kênh dẫn cảm ứng**.

Hình 2.51 minh họa sự thay đổi của lượng hạt dẫn trong kênh dẫn ứng với các giá trị điện áp phân cực khác nhau cho E-MOSFET kênh N.



Hình 2.51: Trạng thái kênh dẫn của E-MOSFET kênh N với các điều kiện phân cực khác nhau: a) $V_{GS} = 0$; b) $0 < V_{GS} < V_{th}$ và c) $V_{GS} = V_{th}$.

+ Khi điện áp ở cực cửa bằng 0, điện cực Source và Drain tách biệt nhau về điện như thể hiện trong hình 2.51(a). Nghĩa là, không thể thiết lập dòng điện nối giữa cực nguồn và cực máng.

+ Khi điện áp $V_{GS} > 0$ sẽ có điện tử bị hút về phía cực Gate như minh họa trong hình 2.51(b) nhưng lượng điện tử này còn ít. Đây chính là chế độ tăng cường hạt dẫn mà E-MOSFET cần thiết lập trong quá trình hoạt động.

+ Tiếp tục tăng điện áp V_{GS} lên thì số điện tử tập trung về phần đối diện cực Gate cũng sẽ tăng lên như biểu diễn trong hình 2.51(c). Điện áp V_{GS} đủ lớn để hình thành nên kênh dẫn khi lượng điện tử đủ nhiều gọi là **diện áp ngưỡng** V_{th} (*threshold voltage*), tức là E-MOSFET có thể dẫn dòng khi điện áp $V_{GS} = V_{th}$. Như vậy, E-MOSFET giống như một khóa điện tử luôn OFF, phải dùng điện áp phù hợp để chuyển nó từ trạng thái OFF sang ON.

Điện áp phân cực cho MOSFET kênh N được tổng kết trong bảng 2.3 cho cả loại D-MOSFET và E-MOSFET để thấy được sự khác nhau giữa hai loại transistor này.

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

Bảng 2.3: Điều kiện ràng buộc điện áp phân cực cho transistor MOSFET kênh N.

Thông số	D-MOSFET	E-MOSFET
Hạt dẫn	Điện tử	Điện tử
Kênh dẫn	Nối sǎn giữa Source và Drain	Chưa có kênh dẫn
	> 0	> 0
V_{DS}	Để điện tử từ Source bị hút về Drain	Để điện tử từ Source bị hút về D
$V_{GS} = 0$	Có dòng ở mạch ngoài (Khóa ON)	Không có dòng ở mạch ngoài (Khóa OFF)
$V_{DS} > 0$		
V_{GS}	$V_P < V_{GS} \leq 0$ Để kênh dẫn bị đẩy bớt điện tử; chế độ nghèo hạt dẫn	$V_{GS} > V_{th} > 0$ Để điện tử bị hút về cực cửa tạo nên kênh dẫn; chế độ giàu hạt dẫn

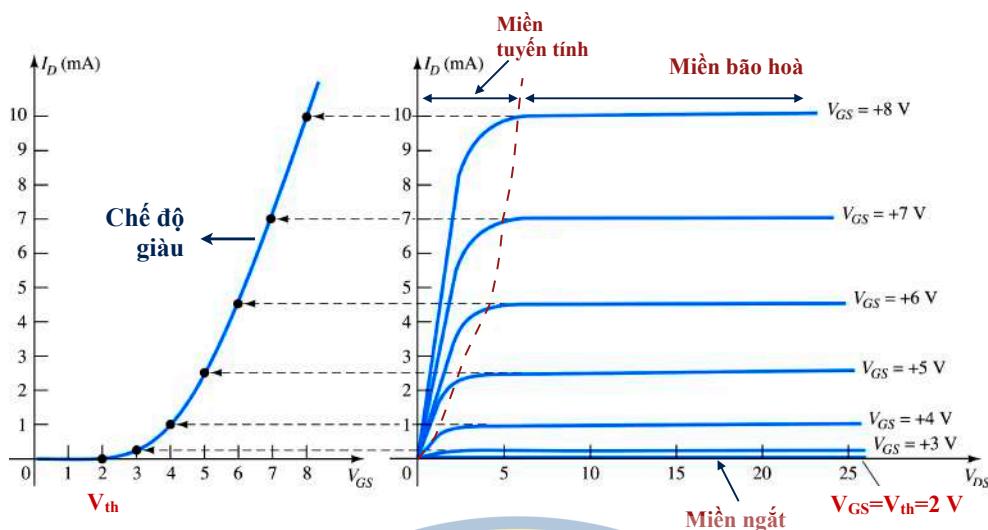
Sau khi kênh dẫn được hình thành nhờ có điện áp $V_{GS} \geq V_{th}$ dòng cực máng tăng dần theo sự gia tăng của điện áp V_{DS} và hiện tượng kênh dẫn thắt dần về phía cực Drain xảy ra ở E-MOSFET cũng giống như ở JFET hay D-MOSFET. Nghĩa là tới một giá trị V_{DS} nhất định, kênh dẫn đạt trạng thái pinch-off làm cho toàn bộ hạt dẫn bị hút ngay về cực Drain, làm cho dòng I_D không đổi (đạt giá trị bão hòa) dù tiếp tục tăng V_{DS} .

2.4.3.3 Đắc tuyến ra và đắc tuyến truyền đạt

Hình 2.52 biểu diễn đắc tuyến truyền đạt và họ đắc tuyến ra của một E-MOSFET kênh N.

Nhận xét:

- ▷ Họ đắc tuyến ra của E-MOSFET giống với họ đắc tuyến ra của hai loại FET đã trình bày là có miền tuyến tính, miền bão hòa và miền ngắn;
- ▷ E-MOSFET chỉ dẫn dòng khi điện áp $V_{GS} > V_{th}$ và hoạt động ở chế độ giàu hạt dẫn. Điện áp V_{GS} càng lớn dòng cực máng I_D càng lớn và giá trị bão hòa của nó đạt trong khoảng rất rộng của V_{DS} ;
- ▷ Đắc tuyến truyền đạt có dạng parabol, tức là dòng cực máng I_D tỉ lệ theo hàm bậc 2 với điện áp V_{GS} khi điện áp $V_{GS} > V_{th}$.



Hình 2.52: a) Đặc tuyến truyền đạt và b) Hợp đặc tuyến ra của một E-MOSFET kênh N.

2.4.3.4 Các biểu thức đặc trưng

Với E-MOSFET [5] do hiện tượng kênh dẫn chỉ hình thành ở điều kiện nhất định nên biểu thức của loại FET này khác so với hai loại JFET và D-MOSFET, cụ thể với loại kênh N như sau:

+ **Miền ngắt:** $V_{GS} < V_{th}$

$$I_D = 0$$

+ **Miền tuyên tính:** $V_{GS} > V_{th} > 0$ và $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{th})$

$$I_D = k_n [2(V_{GS} - V_p)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2.13)$$

với k_n là tham số dẫn của loại kênh N và được xác định bởi biểu thức:

$$k_n = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} \quad (2.14)$$

với:

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

μ_n là độ linh động của điện tử trong kênh dẫn cảm ứng, có đơn vị là ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$);

C_{ox} là điện dung lớp điện môi trên một đơn vị diện tích và được tính theo biểu thức: $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$

ϵ_{ox} là hằng số điện môi của lớp oxide; nếu vật liệu bán dẫn là Si, $\epsilon_{ox} = 3,9 \times (8,85 \times 10^{-14}) \text{ F/m}$;

t_{ox} là độ dày của lớp điện môi;

W là độ rộng kênh dẫn cảm ứng;

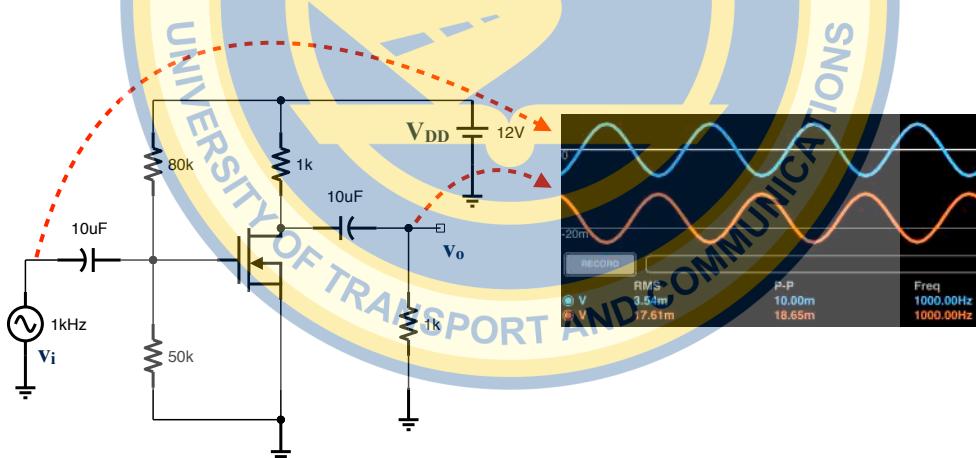
L là chiều dài kênh dẫn cảm ứng.

+ **Miền bão hoà:**³² $V_{GS} > V_{th}$ và $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{th})$

$$I_D = k_n(V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2.15)$$

2.4.4 Ứng dụng điển hình của FET

+ Transistor FET có thể được sử dụng làm phần tử khuếch đại³³ như hình minh họa 2.53.



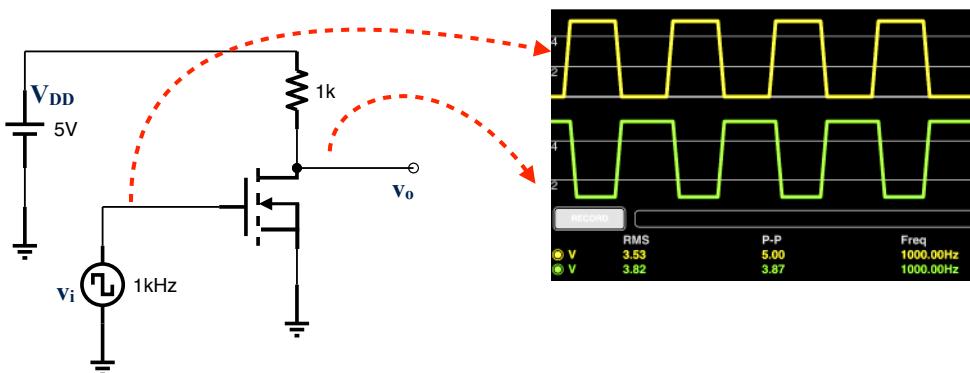
Hình 2.53: Một mạch khuếch đại sử dụng MOSFET và dạng sóng vào / ra tương ứng.

³²bỏ qua hiệu ứng điều chế độ rộng kênh

³³phần này sẽ được trình bày chi tiết trong Chương 3

2.4. TRANSISTOR FET

- + Transistor FET thường được sử dụng như khóa điện tử với sơ đồ điều khiển được mô tả trong hình 2.54.

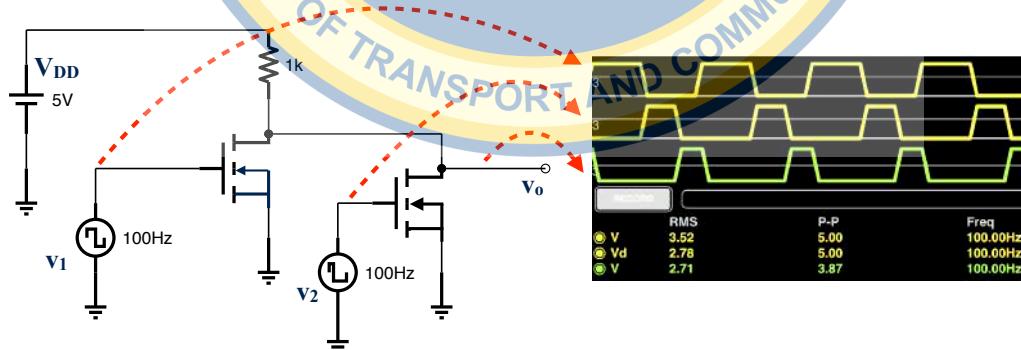


Hình 2.54: Một MOSFET kênh N hoạt động như khóa điện tử và dạng sóng vào/ra tương ứng.

Khi xung điều khiển ở mức 0, transistor bị ngắn, dòng $I_D = 0$, do vậy điện áp ra $v_o = V_{DD}$. Khi xung điều khiển ở mức logic dương ($> V_{th}$), transistor dẫn bão hòa, dòng cực máng đạt giá trị max còn điện áp ra v_o đạt giá trị min.

Dạng sóng vào/ra trong hình 2.54 cho thấy điện áp đầu ra chính là dạng đảo của điện áp đầu vào, vì vậy mạch này còn gọi là mạch đảo (inverter) hay cổng NOT trong mạch điện tử số.

- + Transistor FET cũng thường được sử dụng để tạo ra các cổng logic cơ bản như cổng NOR, NAND, AND ... xem một ví dụ trong hình 2.55.



Hình 2.55: Một mạch NOR sử dụng MOSFET và dạng sóng vào/ra tương ứng.

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

+ Ứng dụng phổ biến nữa của FET chính là làm phần tử cơ sở của mạch tích hợp IC số với mật độ rất cao và tiêu thụ điện năng cực thấp.

Ví dụ như chip Qualcomm Snapdragon 8cx / SCX8180 sản xuất với công nghệ 7 nm chứa tới 8,5 tỉ E-MOSFET trên 112 mm².

2.4.5 So sánh giữa các loại transistor

2.4.5.1 So sánh giữa BJT và FET

Bảng 2.4 thống kê một số đặc điểm quan trọng cho thấy sự khác biệt giữa BJT và FET.

Bảng 2.4: So sánh một số đặc điểm giữa BJT và FET.

Đặc điểm	BJT	FET
Loại hạt dẫn	Cả điện tử và lỗ trống	Điện tử hoặc lỗ trống
Chân cực	B, C và E	G, D, S và B
Loại	NPN và PNP	Kênh N và Kênh P
Cơ chế điều khiển	Dòng I_B	Điện áp V_{GS}
Miền làm việc như phần tử khuếch đại	Tích cực	Bão hòa
Độ ổn định dòng điện	Kém	Rất tốt
Độ ổn định nhiệt	Kém	Rất tốt
Ảnh hưởng của nhiễu	Nhiều	Ít hơn
Công suất tiêu tán	Lớn	Nhỏ
Ứng dụng chủ yếu	Mạch điện tử tương tự Khuếch đại, khóa điện tử	Mạch điện tử số Khóa điện tử, chế tạo IC

2.4.5.2 So sánh giữa JFET và MOSFET

Bảng 2.5 thống kê một số đặc điểm quan trọng cho thấy những điểm khác nhau giữa JFET và MOSFET.

2.5. MỘT SỐ LINH KIỆN BÁN DẪN KHÁC

Bảng 2.5: So sánh một số đặc điểm giữa JFET và MOSFET.

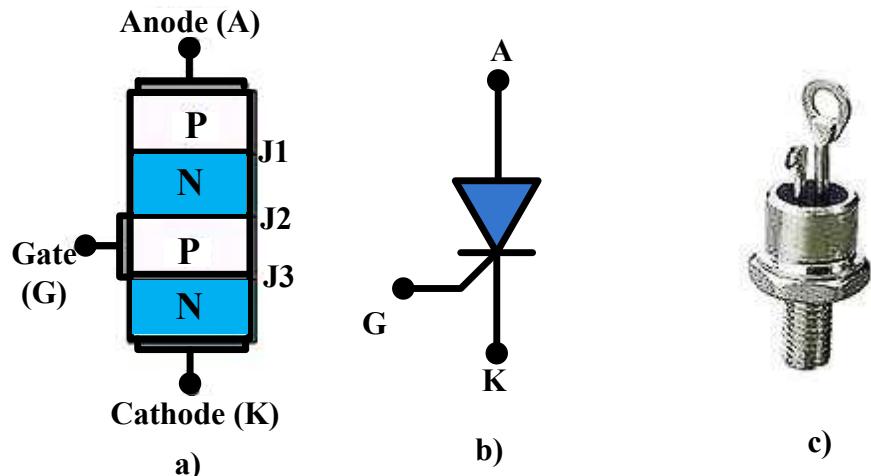
Đặc điểm	JFET	MOSFET
Chế độ hoạt động	P-N phân cực ngược Nghèo hạt dẫn	D-MOSFET: Nghèo hạt dẫn E-MOSFET: Giàu hạt dẫn
Chân cực	G, S, D	G, S, D và B
Kênh dẫn	Luôn có sẵn	D-MOSFET: Luôn có sẵn E-MOSFET: Không có sẵn
Cực cửa Gate và dòng I_G	Nối với kênh dẫn $I_G \approx nA$	Cách ly với kênh dẫn qua lớp oxide, $I_G \approx pA$ D-MOSFET: $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$
Phương trình I_D trong miền bão hòa	$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$	E-MOSFET: $I_D = k_n (V_{GS} - V_{th})^2$
Công nghệ chế tạo	Khó hơn	D-MOSFET: Khó thực hiện E-MOSFET: Dễ thực hiện
Độ phổ biến	Ít hơn	Phổ biến
Ứng dụng chính	Khuếch đại công suất	Chế tạo IC số

2.5 MỘT SỐ LINH KIỆN BÁN DẪN KHÁC

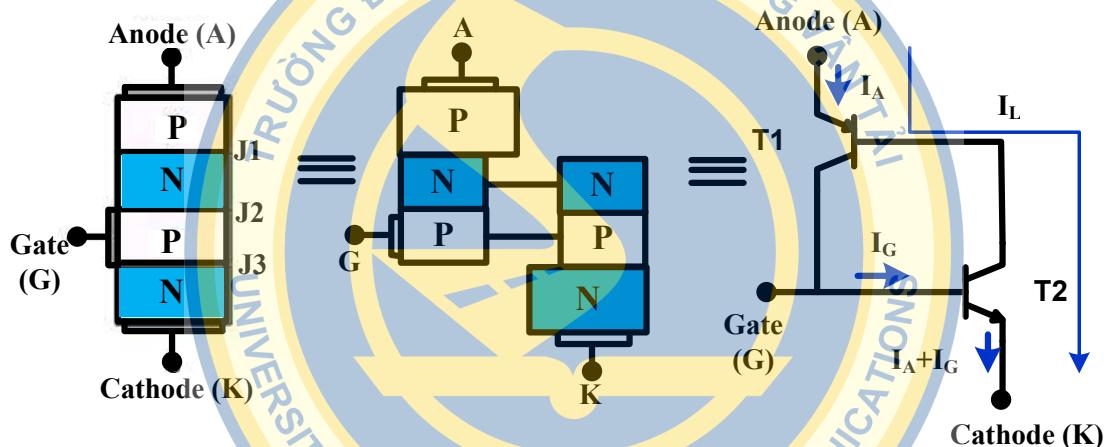
2.5.1 Thysistor

Thysistor là diode chỉnh lưu có điều khiển, vì vậy còn được gọi là SCR (*Silicon Controlled Rectifier*). Đây là linh kiện bán dẫn có tính dẫn điện một chiều giống diode chỉnh lưu, tuy nhiên góc dẫn có thể điều khiển được bằng dòng trên cực cửa I_G .

Thysistor có cấu tạo gồm 3 lớp tiếp giáp P-N (J_1 , J_2 và J_3). Các chân cực của thyristor bao gồm điện cực Anode (A), Cathode (K) và cực Gate (G) hay còn gọi là cực điều khiển như thể hiện trong hình 2.56.



Hình 2.56: Thyristor: (a) Cấu tạo, (b) Ký hiệu và c) Hình dạng thực tế.



Hình 2.57: Sơ đồ tương đương giải thích hoạt động của thyristor.

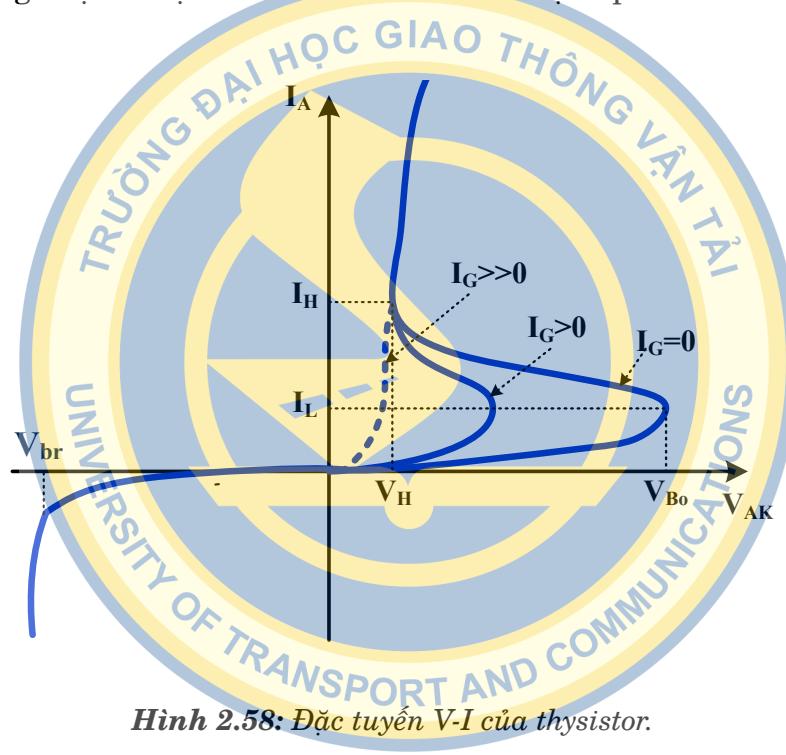
Có thể coi thyristor tương đương với kết nối của cặp transistor T₁ và T₂ như hình 2.57. Hoạt động của thyristor như sau:

- ▷ Khi $V_{AK} > 0$ tiếp giáp J₁ và J₃ phân cực thuận, J₂ phân cực ngược, do đó vẫn không có dòng thuận I_A từ Anode sang Cathode. Để thyristor chuyển từ trạng thái không dẫn ("OFF") sang dẫn ("ON") ngoài điều kiện $V_{AK} > 0$ cần cấp dòng vào cực cửa I_G . Khi I_G cấp vào cực Base của transistor T₂ sẽ tạo dòng I_{C2} cấp cho cực Base của T₁. Dòng I_{B1} lại tạo

2.5. MỘT SỐ LINH KIỆN BÁN DẪN KHÁC

I_{C_1} cấp cho transistor T_2 , làm tăng dòng I_{B2} và quá trình cứ tiếp tục như vậy. Điều này làm hai transistor T_1 và T_2 nhanh chóng dẫn bão hòa. Khi thyristor chuyển sang dẫn, điện trở thuận của thyristor rất nhỏ (nhỏ hơn 1Ω), dòng I_G sẽ mất tác dụng điều khiển. Để thyristor từ trạng thái “ON” sang trạng thái “OFF” cần giảm dòng thuận I_A của nó xuống dưới giá trị dòng duy trì I_H .

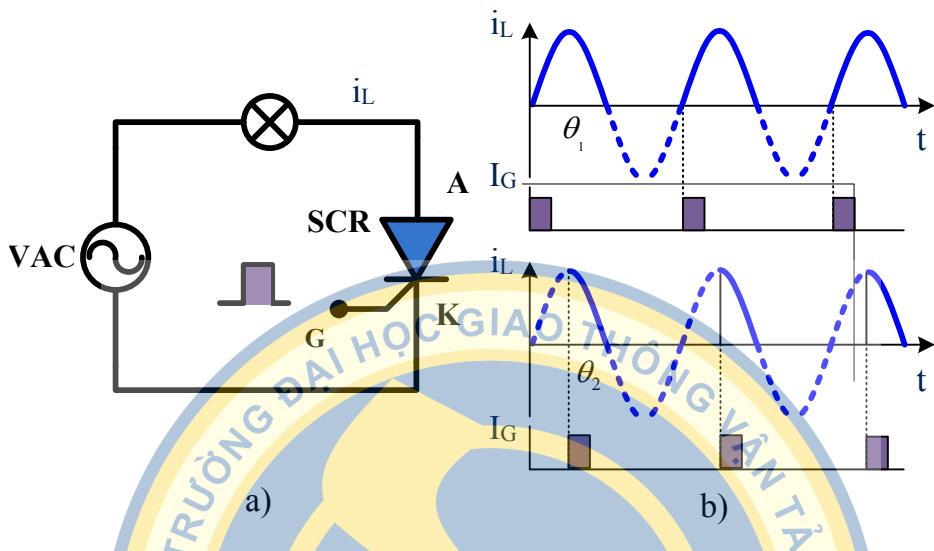
- ▷ Khi $V_{AK} \leq 0$, tiếp giáp J_2 phân cực thuận nhưng hai tiếp giáp J_1 và J_3 lại phân cực ngược, thyristor không dẫn điện. Khi có điện áp lớn bằng điện áp đánh thủng V_{br} hai tiếp giáp J_1 và J_3 thì thyristor sẽ dẫn mà không cần cực G điều khiển. Đây là nhược điểm của thyristor, làm thyristor mất tính dẫn điện một chiều của nó khi có điện áp ngược vượt ngưỡng hoặc có sự biến thiên nhanh của điện áp.



Hình 2.58: Đặc tuyến V-I của thyristor.

Đặc tuyến V-I của thyristor như hình 2.58. Giá trị V_{AK} tại thời điểm đánh thủng chuyển tiếp J_2 được gọi là điện áp ngưỡng thủng V_{Bo} . Dòng I_G sẽ quyết định giá trị điện áp ngưỡng thủng. Nếu đưa vào cực G dòng I_G càng lớn thì điện áp ngưỡng thủng càng nhỏ. Do I_G lớn sẽ cung cấp thêm các hạt dẫn thiểu số (điện tử) cho lớp bán dẫn P của tiếp giáp J_2 nên J_2 sẽ bị đánh thủng sớm hơn.

Thysistor thường được dùng trong các mạch điều khiển nguồn điện (các mạch chỉnh lưu có điều khiển), điều khiển động cơ, đèn ... Hình 2.59 là sơ đồ mạch và dạng sóng của mạch chỉnh lưu dùng thysistor. Tại nửa chu kỳ dương, xung đưa vào cực cửa G sẽ quyết định thời điểm dẫn của thysistor. Khi thysistor dẫn mới có điện áp ra trên tải.



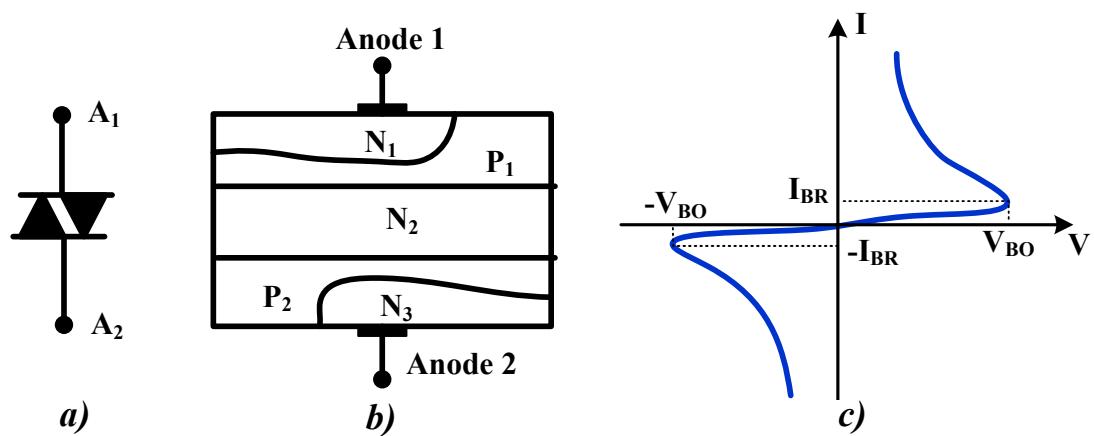
Hình 2.59: Sơ đồ mạch chỉnh lưu có điều khiển dùng thysistor.

2.5.2 Diac

Diac là linh kiện bán dẫn gồm 4 lớp bán dẫn PNPN và có 2 điện cực Anode 1 và Anode 2. Ký hiệu và cấu tạo của diac như trên hình 2.60. Nguyên lý hoạt động của diac tương tự thysistor chỉ khác là nó có khả năng dẫn một trong hai chiều tùy thuộc vào điện áp cấp V_{A1A2} .

Khi đặt hiệu điện thế một chiều theo chiều nhất định đạt đến giá trị $V_{A1A2} = V_{Bo}$ thì diac sẽ dẫn điện. Khi đặt hiệu điện thế theo chiều ngược lại đến trị $V_{A1A2} = -V_{Bo}$ thì diac cũng dẫn điện. Điện áp V_{Bo} là điện áp ngưỡng thủng của diac, có giá trị như nhau ở hai hướng và thường nằm trong khoảng từ $(\pm 25 V \div \pm 35 V)$. Khi diac dẫn điện, điện thế 2 đầu diac giảm khi dòng điện qua diac tăng như thể hiện trong hình 2.60(c). Vùng dẫn của diac có tính chất điện trở âm nên diac có khả năng chuyển sang trạng thái “ON” rất nhanh chóng khi đạt mức điện áp ngưỡng thủng. Thường diac được dùng để mở các linh kiện công suất lớn hơn như thysistor và triac (sẽ trình bày ở phần sau).

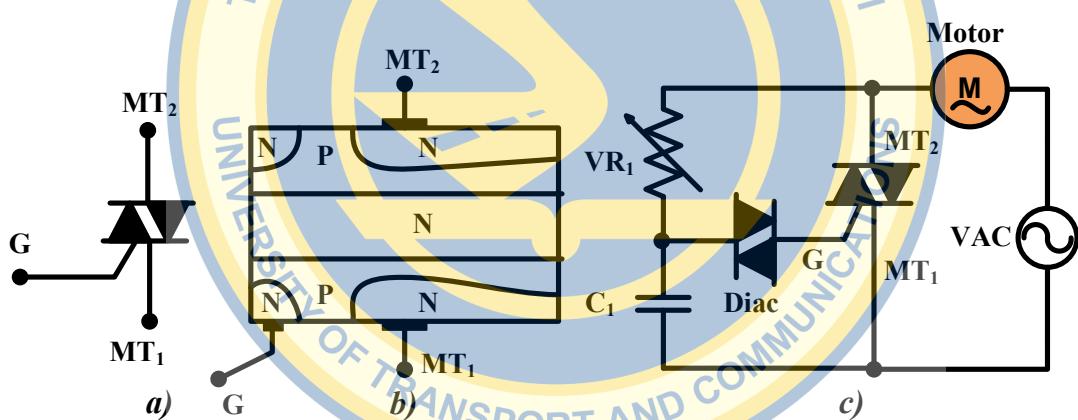
2.5. MỘT SỐ LINH KIỆN BÁN DẪN KHÁC



Hình 2.60: Diac: (a) Ký hiệu, (b) Cấu trúc và c) Đặc tuyến V-I.

2.5.3 Triac

Triac là linh kiện bán dẫn có 3 cực MT₁ (Main Terminal 1), MT₂ (Main Terminal 2) và cực cửa G. Cấu tạo và ký hiệu của triac như hình 2.61.

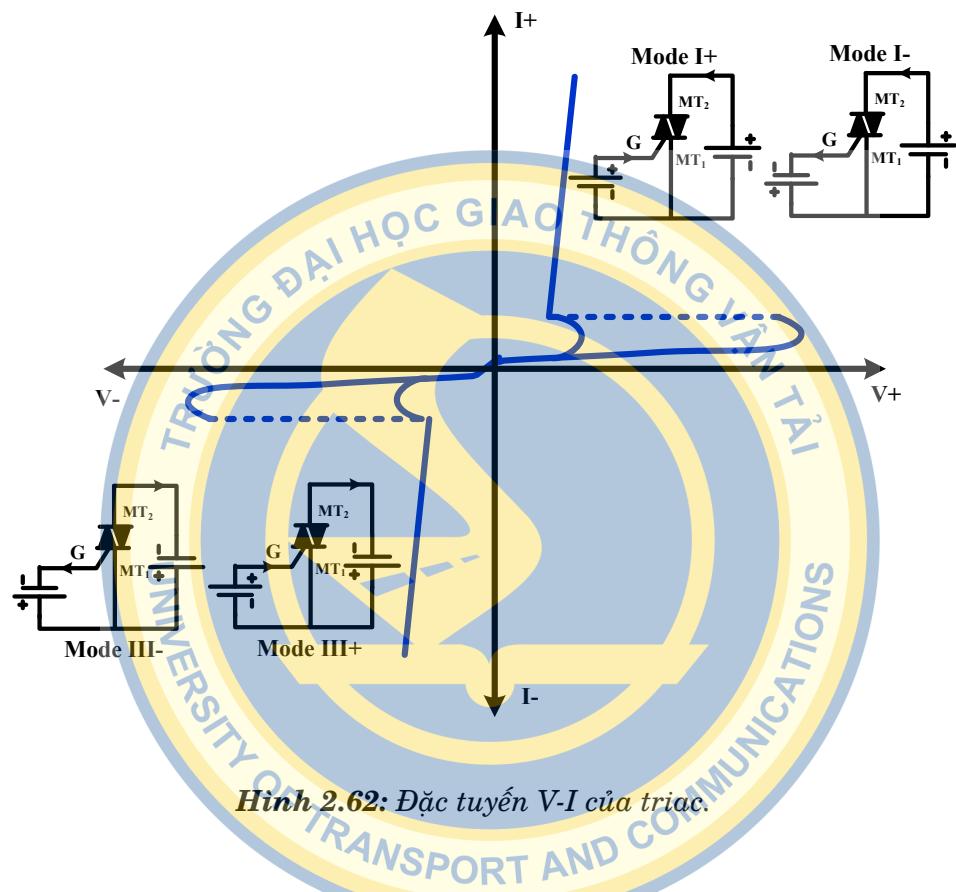


Hình 2.61: Triac: (a) Ký hiệu, (b) Cấu trúc và c) Một mạch ứng dụng.

Triac có thể dẫn một trong hai hướng tùy thuộc vào điện áp đặt vào MT₁-MT₂ tương tự như diac nhưng điện áp ngưỡng thủng của nó có thể điều khiển được bằng dòng cực cửa I_G . Triac có thể dẫn “ON” khi có xung hoặc dòng vào cực cửa I_G như SCR mà không cần cấp điện áp đặt ngưỡng thủng như diac.

Chương 2: Linh kiện điện tử bán dẫn

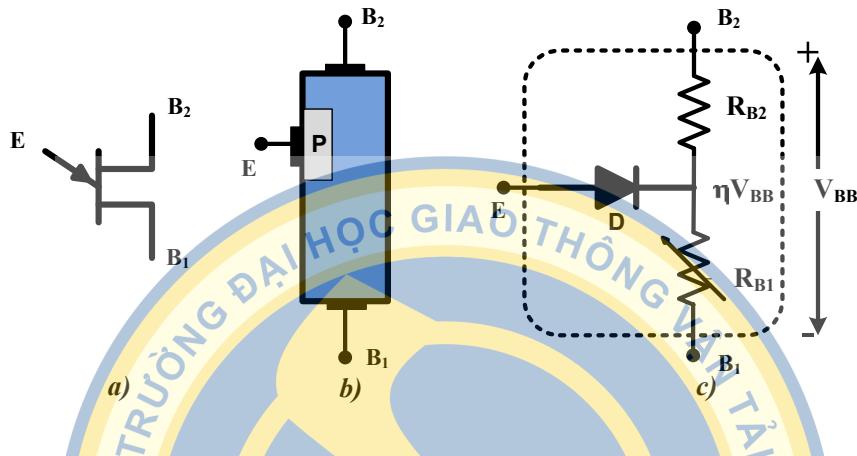
Đặc tuyến V-I của triac như hình 2.62. Triac có 4 chế độ hoạt động Mode I+, Mode I-, Mode III+ và Mode III-. Khi điện áp cực MT₂ dương hơn cực MT₁ $V_{21} \geq 0$, triac có thể dẫn khi dòng I_G dương (Mode I+) hoặc dòng I_G âm (Mode I-). Tương tự, khi điện áp cực MT₁ dương hơn cực MT₂, $V_{21} \leq 0$, triac cũng có thể dẫn khi dòng I_G dương (Mode III+) hoặc I_G âm (Mode III-). Tuy nhiên, Mode I- và III+ cần dòng mở triac I_G lớn hơn nên ít thông dụng hơn Mode I+ và III-.



Hình 2.61(c) mô tả mạch công suất dùng diac và triac đơn giản. Tại thời điểm bắt đầu mỗi nửa chu kỳ tín hiệu xoay chiều vào, tụ C₁ sẽ được nạp qua biến trở VR₁ cho đến khi điện áp trên C₁ đủ để diac dẫn, tụ C₁ sẽ phóng điện cung cấp dòng cho cực G mở triac dẫn, motor hoạt động. Tại thời điểm cuối mỗi chu kỳ, triac sẽ ngưng dẫn. Quá trình xảy ra lặp lại trong các chu kỳ tiếp theo. Chú ý rằng do dòng I_G cần để mở triac ở 2 chế độ hoạt động này (I+ và III-) khác nhau nên thời điểm mở triac ở nửa chu kỳ âm và dương sẽ khác nhau.

2.5.4 Transistor đơn nỗi (UJT)

UJT là linh kiện bán dẫn có một lớp tiếp giáp P-N và 3 điện cực: hai cực Base (B_1 và B_2) và một cực phát (E). UJT thường được dùng trong các mạch định thời, tạo xung cấp cho cực cửa G đóng mở các thysistor hoặc triac trong các mạch điều khiển công suất. Cấu tạo, ký hiệu và sơ đồ tương đương của UJT được cho trên hình 2.63.



Hình 2.63: UJT: (a) Cấu tạo, (b) Ký hiệu và c) Sơ đồ tương đương.

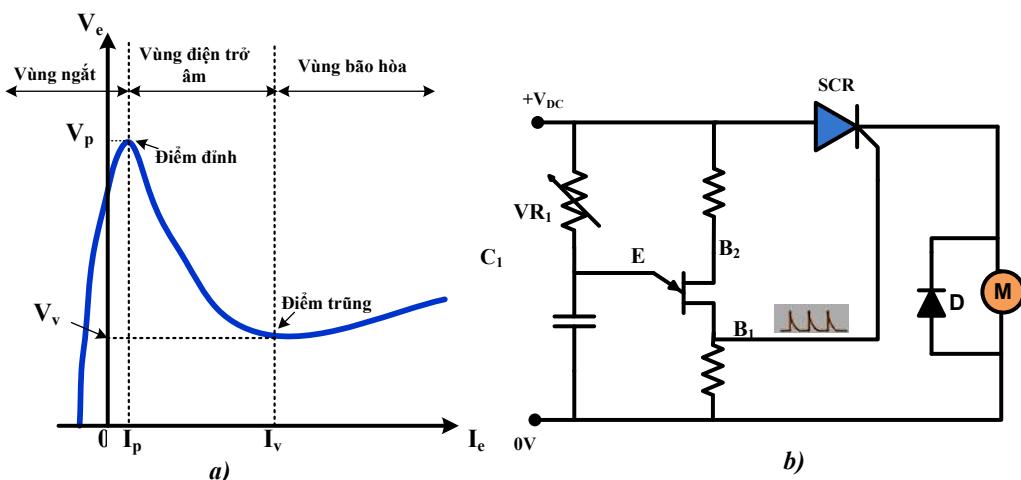
Trở kháng R_{BB} giữa hai cực Base B_1 và B_2 khi dòng Emitter bằng 0 có giá trị điển hình khoảng $(5\text{ k}\Omega \div \pm 10\text{ k}\Omega)$. Tỷ lệ cân bằng nội $\eta = R_{B1}/(R_{B1} + R_{B2})$ có giá trị trong khoảng $(0,5 \div 0,9)$.

Đặc tuyến V-I của UJT được thể hiện trên hình 2.64(a).

+ Nếu $V_E < (\eta V_{BB} + V_D)$ (V_D là điện áp ngưỡng của lớp tiếp giáp P-N để dẫn dòng thuận) thì diode D sẽ phân cực ngược, UJT chưa làm việc (khóa), qua UJT chỉ có dòng rò rất nhỏ.

+ Nếu $V_E > (\eta V_{BB} + V_D)$ diode D phân cực thuận nên có dòng I_E . Khi UJT dẫn, dòng I_E tăng và điện áp V_E giảm, ta có một vùng điện trở âm của đặc tuyến V-I.

+ Khi dòng I_E bão hòa ($I_E = I_v$), điện áp V_E đạt giá trị nhỏ nhất V_v được gọi là điện áp trũng. Sau đó muốn tăng I_E phải tăng V_E vì số lượng điện tử và lỗ trống đã đạt đến tình trạng di chuyển bão hòa, đặc tuyến chuyển sang vùng điện trở dương.



Hình 2.64: a) Đặc tuyến V - I và (b) Một mạch ứng dụng của UJT.

Mạch hình 2.64(b) thể hiện một ứng dụng UJT để tạo một dãy xung điều khiển thyristor. Biến trở có tác dụng thay đổi tần số xung răng cưa ở cực B_1 cấp dòng điều khiển SCR làm thay đổi tốc độ của motor hoặc các tải khác như đèn hoạt máy sấy.

CÂU HỎI LÝ THUYẾT

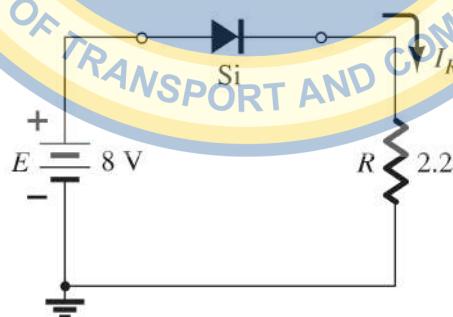
- 2.1. Hãy trình bày quá trình cân bằng nhiệt động của chuyển tiếp P-N.
- 2.2. Hãy cho biết những đặc điểm cơ bản của chuyển tiếp P-N khi không phân cực; phân cực thuận và phân cực ngược.
- 2.3. Hãy trình bày nguyên tắc hoạt động và đặc tuyến V - I của diode chỉnh lưu ?
- 2.4. Hãy cho biết điểm khác nhau giữa mô hình lý tưởng và mô hình thực tế của diode khi phân cực thuận.
- 2.5. Hãy cho biết điểm khác nhau giữa mô hình lý tưởng và mô hình thực tế của diode khi phân cực ngược.

-
- 2.6.** Hãy nêu những ứng dụng cơ bản của diode bán dẫn ?
- 2.7.** Hãy tìm hiểu và giải thích nguyên nhân vì sao điện áp làm việc của LED thường cao hơn diode chỉnh lưu.
- 2.8.** Trình bày cấu tạo, nguyên tắc hoạt động và ứng dụng của OLED.
- 2.9.** Nêu cấu tạo, ký hiệu và nguyên tắc làm việc của transistor BJT ?
- 2.10.** Nêu các chế độ làm việc của BJT, điều kiện phân cực của từng chế độ.
- 2.11.** Nêu cấu tạo, ký hiệu transistor JFET và MOSFET. Nguyên tắc làm việc của JFET và MOSFET.
- 2.12.** Trình bày các ứng dụng điển hình của BJT và FET.
- 2.13.** So sánh các đặc điểm cơ bản của BJT và FET.
- 2.14.** So sánh các đặc điểm cơ bản giữa các loại FET.

BÀI TẬP

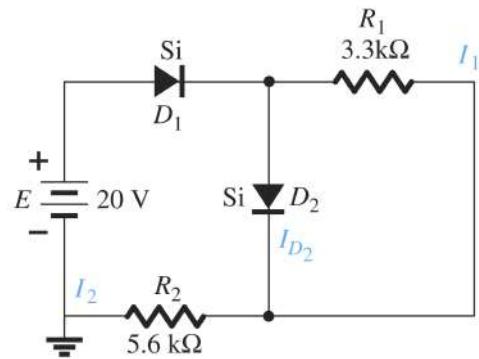
- 2.1.** Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Diode loại Si.

Hãy tính giá trị của dòng điện qua điện trở R .



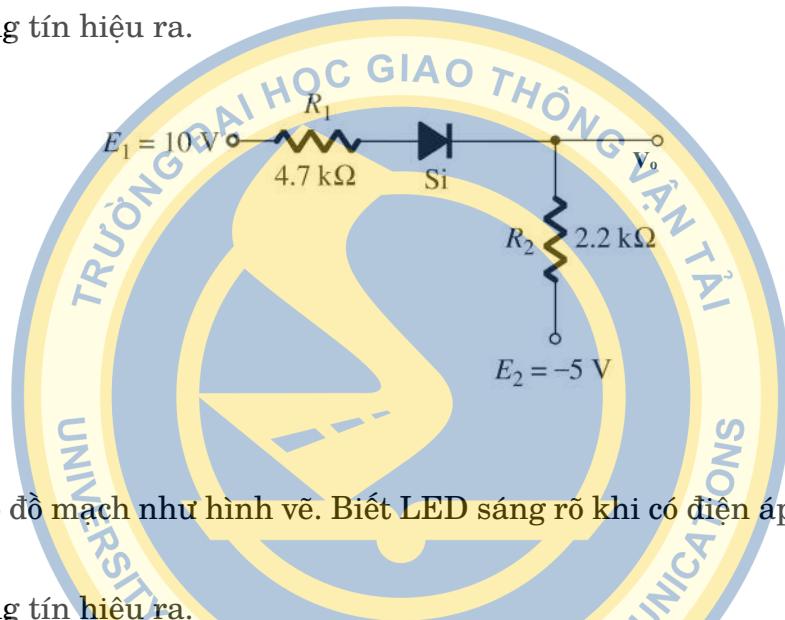
- 2.2.** Cho sơ đồ mạch như hình vẽ.

Hãy tính giá trị của dòng điện qua diode.



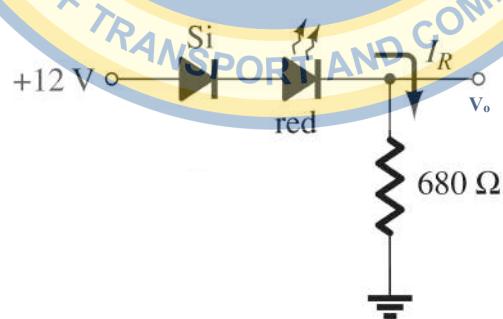
2.3. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Biết diode loại Si.

Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.

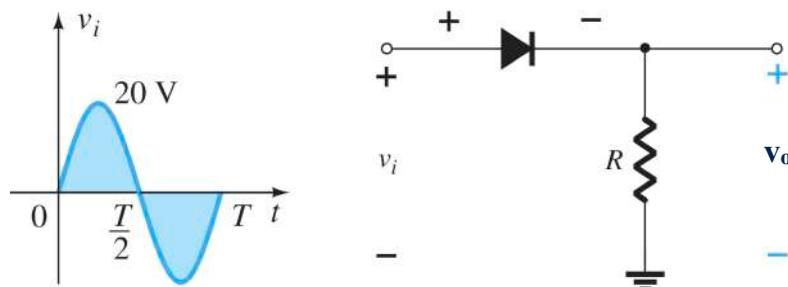


2.4. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Biết LED sáng rõ khi có điện áp phân cực 1,8V.

Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.



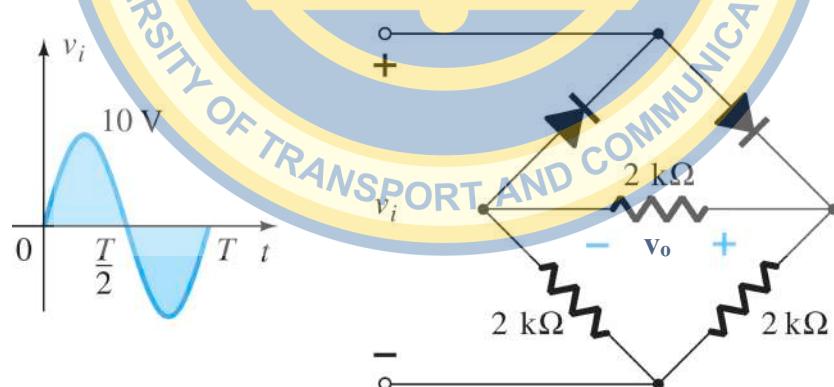
2.5. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.



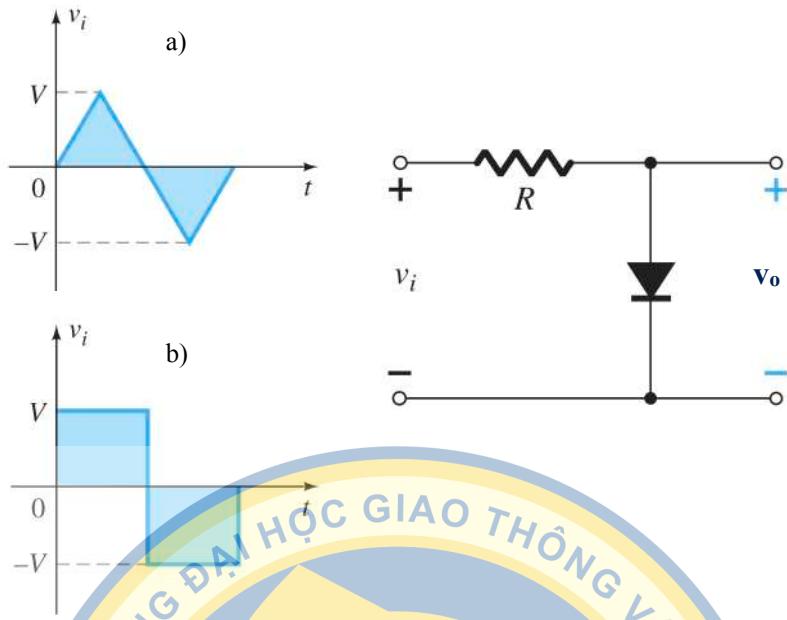
2.6. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.



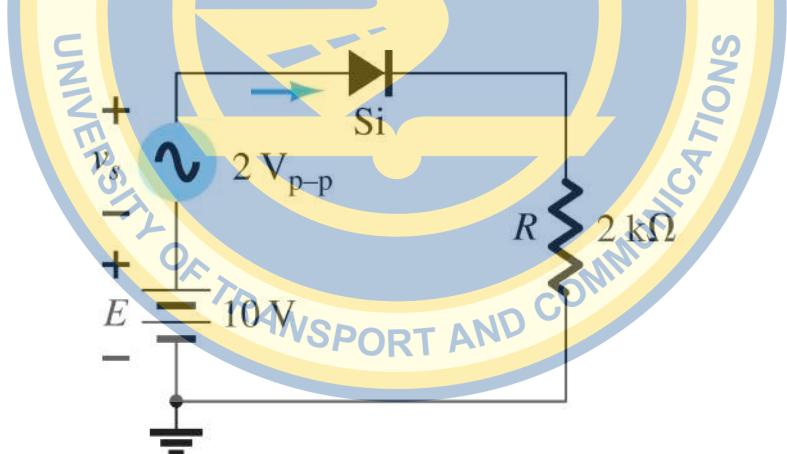
2.7. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.



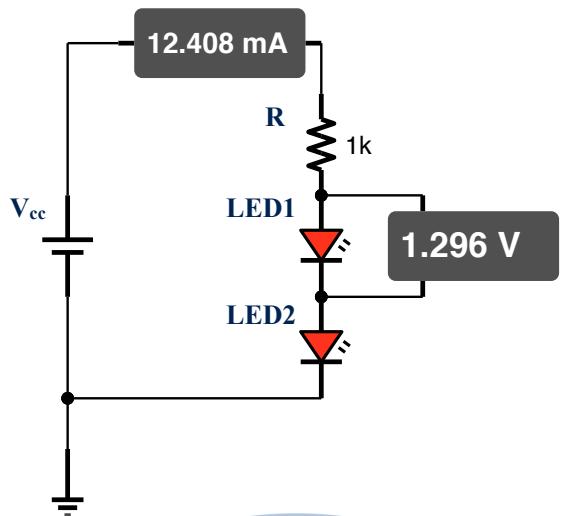
2.8. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.



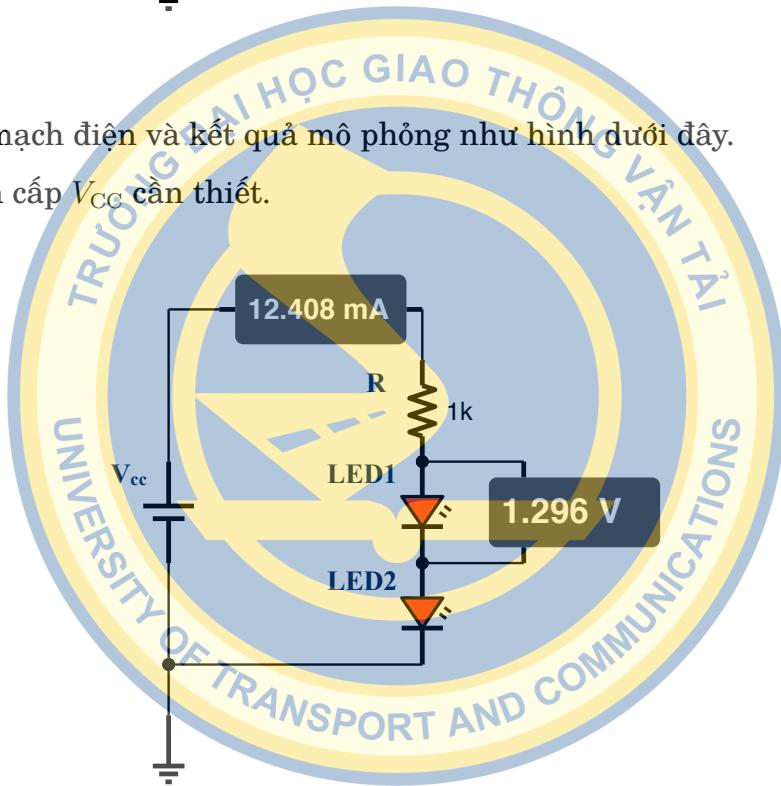
2.9. Cho sơ đồ mạch như hình vẽ. Hãy vẽ dạng tín hiệu ra.



2.10. Tính điện trở hạn dòng R với sơ đồ mạch trong hình dưới đây. Trong đó điện áp cần thiết để LED mở sáng là 1,5 V và nguồn cấp là 5 V.



2.11. Cho mạch điện và kết quả mô phỏng như hình dưới đây.
Tính nguồn cấp V_{CC} cần thiết.



Chương 3

MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Các thông số cơ bản của một mạch khuếch đại;
- ▷ Các phương pháp phân tích mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ, tần số thấp;
- ▷ Phân tích mạch ở chế độ một chiều; xác định điểm làm việc tĩnh của mạch;
- ▷ Phân tích mạch ở chế độ xoay chiều; xác định các thông số như trở kháng vào, trở kháng ra, hệ số khuếch đại.

3.1 GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI

3.1.1 Giới thiệu

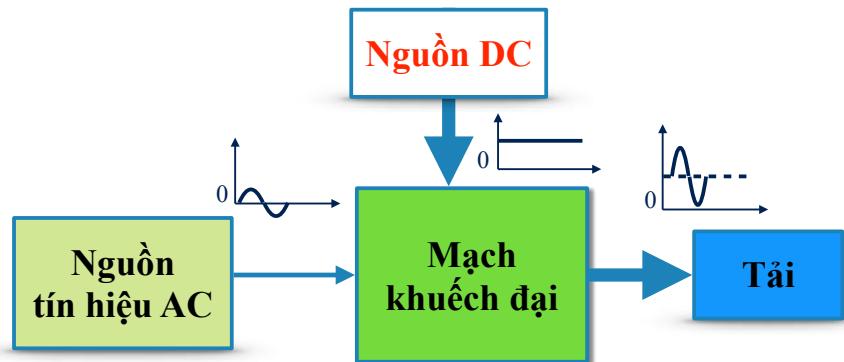
Khuếch đại là quá trình tạo ra trên tải một năng lượng biến đổi theo quy luật của nguồn tín hiệu nhưng lớn hơn về dòng điện, điện áp hoặc công suất.

Mạch khuếch đại điện tử là mạch sử dụng phần tử khuếch đại và nguồn điện một chiều để tạo ra trên tải công suất xoay chiều lớn hơn nhiều so với công suất của nguồn tín hiệu xoay chiều đưa tới đầu vào của mạch.

Sơ đồ khối của một mạch khuếch đại điện tử được biểu diễn trong hình 3.1. Nguồn DC cung cấp năng lượng một chiều cho phần tử tích cực là transistor hoặc Op-amp¹ thực hiện chức năng khuếch đại; tín hiệu xoay chiều cần khuếch đại có năng lượng rất nhỏ còn tín hiệu ra trên tải có năng lượng lớn và biến đổi theo quy luật của nguồn tín hiệu.

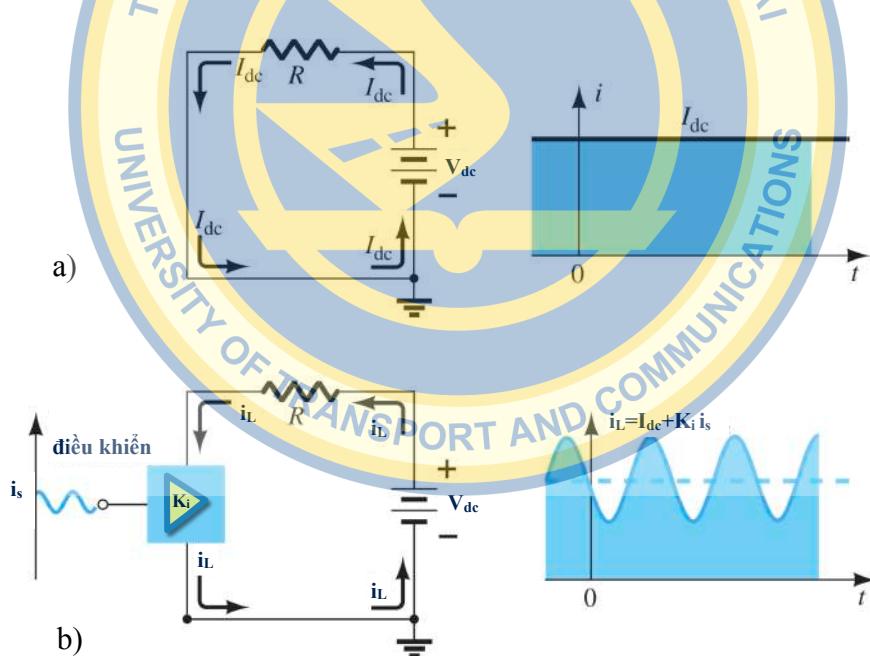
¹tên gọi tắt của mạch khuếch đại thuật toán, sẽ được trình bày trong Chương 6

3.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI



Hình 3.1: Sơ đồ khối của mạch khuếch đại.

Hình 3.2(a) minh họa việc cung cấp dòng một chiều không đổi qua điện trở R và dòng biến đổi được điều khiển bởi nguồn tín hiệu thông qua mạch khuếch đại như thể hiện trong hình 3.2(b). Do vậy cũng có thể nói rằng **khuếch đại là một quá trình biến đổi năng lượng có điều khiển**. Năng lượng của nguồn cung cấp một chiều được biến đổi thành dạng năng lượng xoay chiều lớn trên tải dưới sự điều khiển của nguồn tín hiệu xoay chiều đầu vào.



Hình 3.2: a) Mạch điện và dạng dòng một chiều không đổi; b) Mạch khuếch đại và dạng dòng biến đổi khi mạch được điều khiển.

* **Phân loại mạch khuếch đại**

+ Phân loại theo khu vực tần số hoạt động, mạch khuếch đại được chia thành 5 loại:

- ▷ Mạch khuếch đại siêu cao tần, hoạt động ở dải tần vài trăm MHz đến GHz;
- ▷ Mạch khuếch đại cao tần, hoạt động ở dải tần vài trăm kHz đến MHz;
- ▷ Mạch khuếch đại trung tần, hoạt động ở dải tần vài chục kHz;
- ▷ Mạch khuếch đại âm tần, hoạt động ở dải tần số âm thanh ($20\text{ Hz} \div 20\text{ kHz}$);
- ▷ Mạch khuếch đại hạ âm, hoạt động ở dải tần số thấp hơn tần số âm thanh.

+ Phân loại theo dạng tín hiệu, có 2 loại mạch khuếch đại:

- ▷ Mạch khuếch đại **một chiều** là mạch mà tín hiệu cần khuếch đại chỉ có một cực tính dương hoặc âm;
- ▷ Mạch khuếch đại **xoay chiều** là mạch mà tín hiệu cần khuếch đại có chiều biến thiên dương âm liên tục.

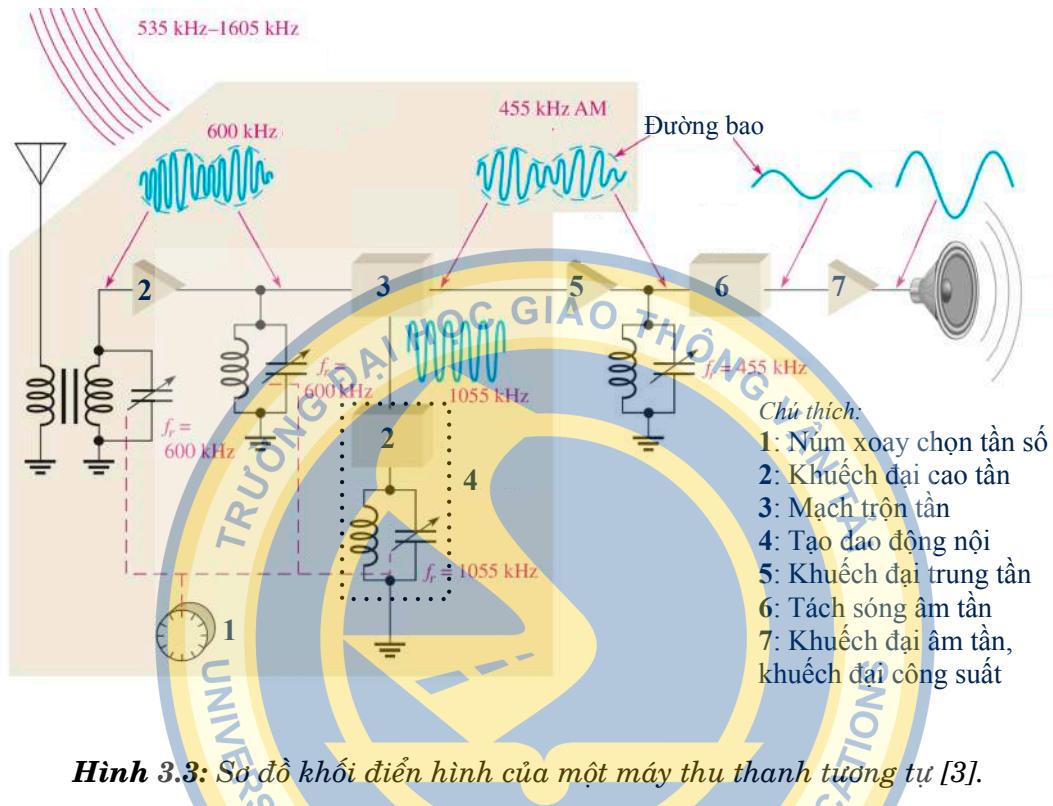
+ Phân loại theo tác động của tín hiệu xoay chiều tới mạch, mạch khuếch đại được chia thành 2 loại:

- ▷ Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ tần số thấp: khi tín hiệu vào xoay chiều được coi là những biến đổi nhỏ sao cho điểm làm việc của mạch luôn nằm trong miền tích **cực**, tức là mạch dẫn trong toàn bộ chu kỳ tín hiệu.
- ▷ Mạch khuếch đại tín hiệu lớn hay mạch khuếch đại công suất: khi tín hiệu vào xoay chiều đủ lớn và làm cho điểm làm việc có thể ra khỏi vùng tích cực, tức là mạch chỉ dẫn trong một phần của chu kỳ tín hiệu.
Trong hệ thống điện tử, mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ thường nằm ngay sau các cảm biến để khuếch đại tín hiệu rất nhỏ từ cảm biến đến giá trị đủ lớn và đưa đến tầng tiếp theo như bộ chuyển đổi tín hiệu

3.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI

tương tự sang số ADC (*Analog to Digital Converter*) hay đầu vào mạch vi điều khiển. Mạch khuếch đại công suất thường là mạch ngay trước tải: loa, động cơ, đèn chiếu sáng ...

Hình 3.3 biểu diễn sơ đồ khối của một máy thu thanh (radio) với nhiều khối khuếch đại.



Hình 3.3: Sơ đồ khối điển hình của một máy thu thanh tương tự [3].

3.1.2 Cách phân tích mạch khuếch đại

Vì các linh kiện tích cực như BJT, FET hay IC khuếch đại thuật toán cần được cung cấp điện áp một chiều để xác định điểm làm việc nên tại cùng một thời điểm mạch sẽ chịu tác động của 2 đại lượng là điện áp cung cấp DC và tín hiệu AC cần khuếch đại đưa đến. Do vậy, khi phân tích mạch khuếch đại cần chia thành hai chế độ tương ứng: chế độ một chiều (*còn gọi là chế độ tĩnh*) và chế độ xoay chiều (*còn gọi là chế độ động*). Ứng với mỗi chế độ trên là hai sơ đồ tương đương: chế độ DC và chế độ AC. Sau đó áp dụng nguyên lý xếp chồng² để xác định dạng tín hiệu tổng hợp trên tải.

²trình bày trong Phụ lục D

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

+ **Phân tích mạch ở chế độ DC** là xem xét mạch dưới tác động của nguồn DC duy nhất để xác định các thông số dòng và áp một chiều trên các cực của transistor, qua đó biết điểm làm việc tĩnh của mạch có phù hợp với ứng dụng dự kiến hay không.

+ **Phân tích mạch ở chế độ AC** là xem xét mạch dưới tác động của nguồn tín hiệu xoay chiều duy nhất để xác định các thông số của mạch như trở kháng và hệ số khuếch đại.

Bảng 3.1: Sơ đồ tương đương của các phần tử cơ bản ở chế độ DC và AC.

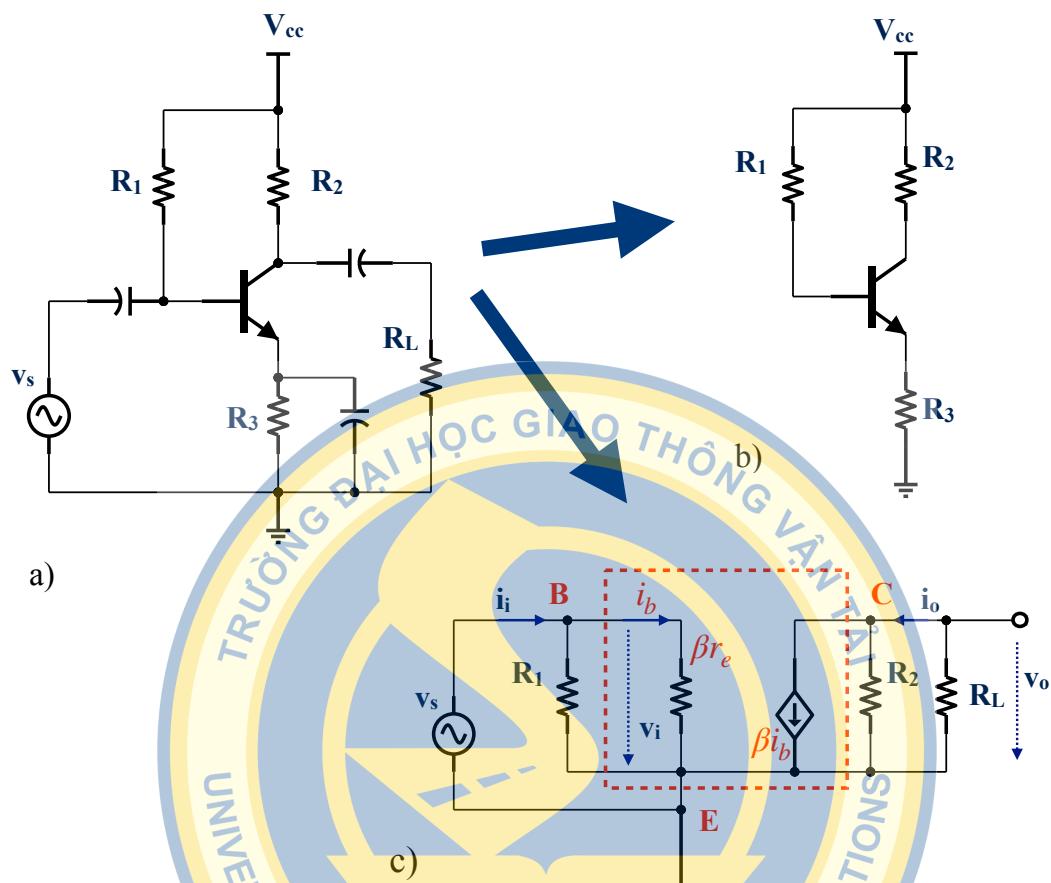
Linh kiện	Chế độ dc	Chế độ AC
Nguồn điện áp độc lập		
Nguồn dòng độc lập		
Điện trở	R	R
Tụ điện		$Z_C = 1/j\omega C$
Cuộn dây		$Z_L = j\omega L$
Diode		
BJT *		
FET		

* với BJT có thể sử dụng nhiều sơ đồ tương đương dạng khác

Do mỗi loại linh kiện chịu tác động của dòng điện một chiều và dòng điện xoay chiều khác nhau nên khi phân tích mạch ở chế độ DC hay AC thì sử dụng sơ đồ tương đương tương ứng với các phần tử trong bảng 3.1.

3.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI

Hình 3.4 biểu diễn một ví dụ về việc chuyển sang sơ đồ tương đương DC và sơ đồ tương đương AC của một mạch khuếch đại.



Hình 3.4: a) Ví dụ về một mạch khuếch đại, b) Sơ đồ tương đương DC và
c) Sơ đồ tương đương AC tương ứng.

3.1.3 Các thông số cơ bản của mạch khuếch đại

Mạch khuếch đại thường được mô hình hóa bởi mạng hai cửa hay bốn cực với các thông số như trong hình 3.5, ký hiệu “ i/o ” tương ứng với các đại lượng “vào/ra”. Các thông số quan trọng nhất của mạch khuếch đại là trở kháng vào, trở kháng ra và hệ số khuếch đại. Ngoài các thông số trên, mạch khuếch đại còn có các thông số khác là đặc tuyến biên độ – tần số và độ méo.



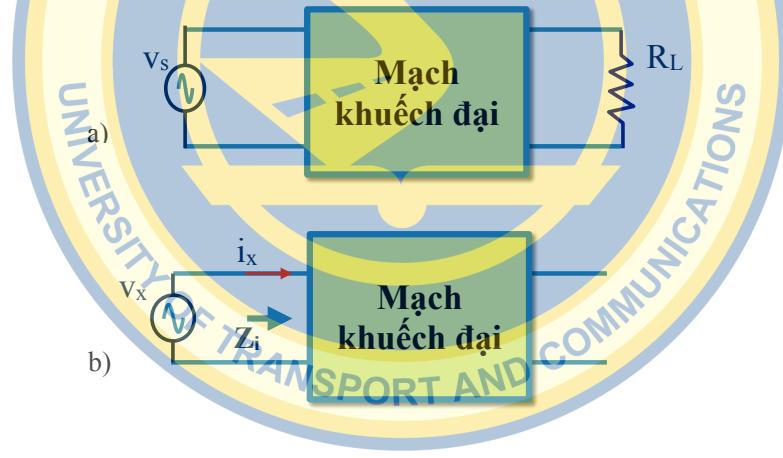
Hình 3.5: Mô hình mạng hai cửa của mạch khuếch đại.

3.1.3.1 Trở kháng vào

Trở kháng vào Z_i là tỷ số giữa điện áp và dòng đầu vào xoay chiều. Tức là trở kháng vào được xác định thông qua biểu thức:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (3.1)$$

Nguyên tắc xác định trở kháng vào được minh họa trong hình 3.6.



Hình 3.6: a) Mô hình mạch khuếch đại và b) Mô hình xác định trở kháng vào.

Các bước xác định³ trở kháng vào của một mạch khuếch đại:

- ▷ Hở mạch đầu ra (hở mạch tải);

³trong trường hợp đơn giản thì có thể nhận ra ngay mà không cần thực hiện đủ các bước

3.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI

- ▷ Nguồn áp và nguồn dòng được thay thế bởi trở kháng của nó. Nghĩa là giả sử các nguồn là lý tưởng thì ngắn mạch nguồn áp độc lập và mở mạch nguồn dòng độc lập;
- ▷ Nối nguồn v_x với hai cửa vào;
- ▷ Xác định dòng i_x .
- ▷ Tính trở kháng vào theo biểu thức:

$$Z_i = \frac{v_x}{i_x}$$

Để xét ảnh hưởng của trở kháng vào, sử dụng sơ đồ tương đương của mạch được biểu diễn trong hình 3.7 với R_s là nội trở của nguồn tín hiệu.



Từ sơ đồ hình 3.7 ta có:

$$v_i = \frac{Z_i}{R_s + Z_i} \times v_s \quad (3.2)$$

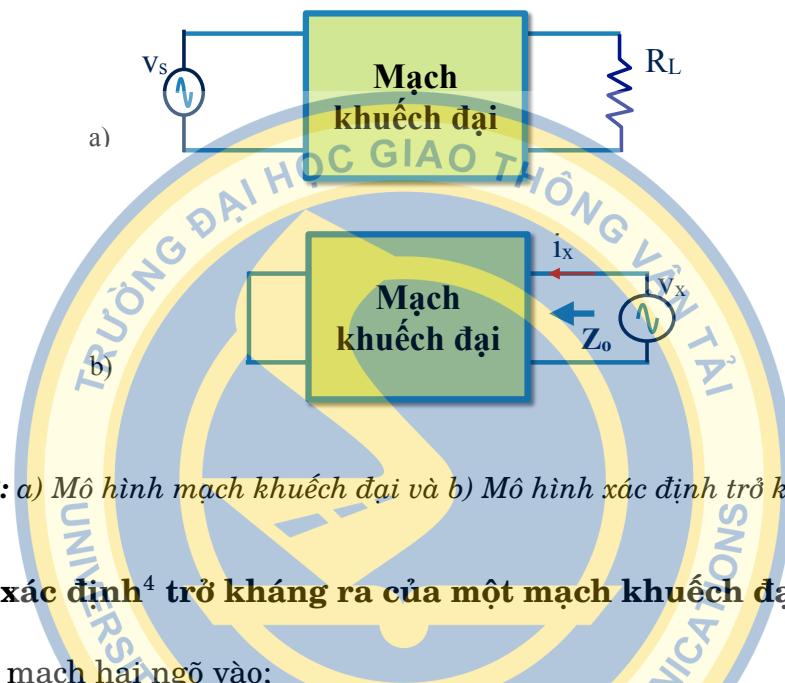
Biểu thức 3.8 cho thấy nội trở của nguồn tín hiệu làm cho tín hiệu chỉ đưa một phần tới bộ khuếch đại. Vì vậy, mạch khuếch đại cần có **trở kháng vào càng lớn càng tốt** để giảm thiểu ảnh hưởng của nội trở nguồn tín hiệu. Lý tưởng là mạch khuếch đại có trở kháng vào bằng ∞ để tín hiệu từ nguồn AC đặt hoàn toàn lên đầu vào mạch khuếch đại.

3.1.3.2 Trở kháng ra

Trở kháng ra Z_o là tỷ số giữa điện áp và dòng đầu ra. Tức là trở kháng ra được xác định thông qua biểu thức:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} \quad (3.3)$$

Nguyên tắc xác định trở kháng ra được minh họa trong hình 3.8.



Hình 3.8: a) Mô hình mạch khuếch đại và b) Mô hình xác định trở kháng ra.

Các bước xác định⁴ trở kháng ra của một mạch khuếch đại:

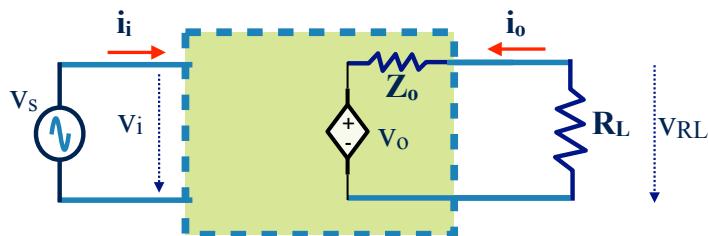
- ▷ Ngắn mạch hai ngõ vào;
- ▷ Nguồn áp và nguồn dòng được thay thế bởi trở kháng của nó. Nghĩa là giả sử các nguồn là lý tưởng thì ngắn mạch nguồn áp độc lập và hở mạch nguồn dòng độc lập;
- ▷ Nối nguồn v_x với hai cửa ra;
- ▷ Xác định dòng i_x ;
- ▷ Tính trở kháng ra theo công thức:

$$Z_o = \frac{v_x}{i_x}$$

⁴trong trường hợp đơn giản thì có thể nhận ra ngay mà không cần thực hiện đủ các bước

3.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI

Để xét ảnh hưởng của trở kháng ra, sử dụng sơ đồ tương đương của mạch được biểu diễn trong hình 3.9 với R_L là tải của mạch khuếch đại.



Hình 3.9: Sơ đồ xét ảnh hưởng của trở kháng ra.

Từ sơ đồ hình 3.9 ta có:

$$v_{RL} = \frac{R_L}{Z_o + R_L} \times v_o \quad (3.4)$$

Biểu thức 3.4 cho thấy mạch khuếch đại cần có **trở kháng ra càng nhỏ càng tốt** để tín hiệu lấy ra trên tải lớn nhất có thể. Lý tưởng là mạch khuếch đại có trở kháng ra bằng 0 để tín hiệu ra của mạch khuếch đại đặt lên tải hoàn toàn.

3.1.3.3 Hệ số khuếch đại

Hệ số khuếch đại được định nghĩa là tỷ số giữa đại lượng đầu ra và đầu vào. Đối với các mạch khuếch đại thường đề cập tới 3 hệ số khuếch đại: Hệ số khuếch đại điện áp, hệ số khuếch đại dòng điện và hệ số khuếch đại công suất. Hệ số khuếch đại là đại lượng không thứ nguyên và có thể được đổi sang đơn vị Decibel (dB).

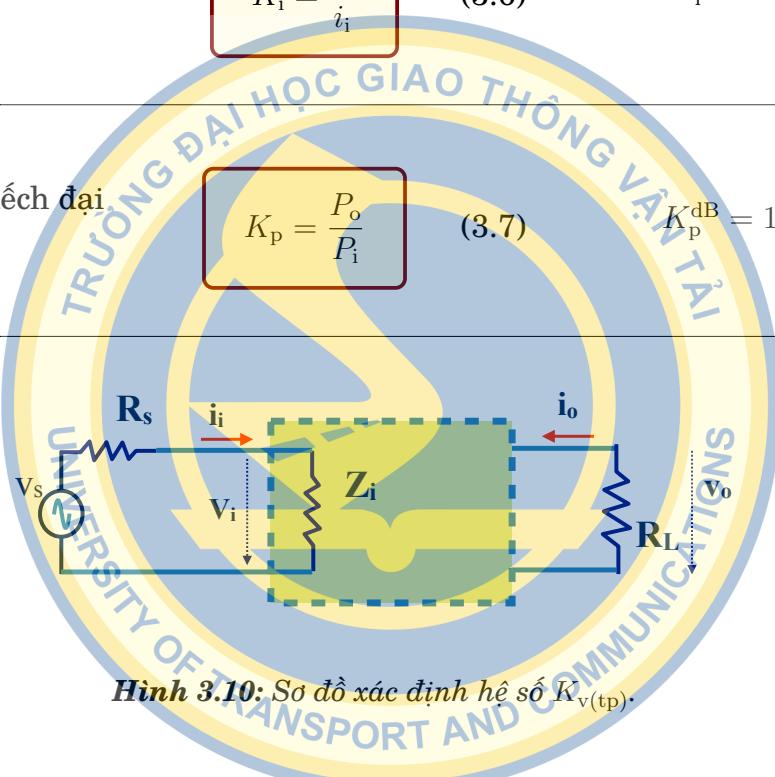
Bảng 3.2 thể hiện công thức tính toán các hệ số khuếch đại.

+ **Hệ số khuếch đại điện áp toàn phần:** thông số này thể hiện mối quan hệ giữa tín hiệu điện áp đầu ra của mạch khuếch đại với tín hiệu điện áp của nguồn AC và được xác định bằng cách sử dụng sơ đồ tương đương được biểu diễn trong hình 3.10.

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

Bảng 3.2: Các hệ số khuếch đại điển hình của mạch khuếch đại.

Hệ số khuếch đại	Công thức tính	Tính theo (dB)
Hệ số khuếch đại điện áp	$K_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (3.5)$	$K_v^{\text{dB}} = 20 \log K_v $
Hệ số khuếch đại dòng điện	$K_i = \frac{i_o}{i_i} \quad (3.6)$	$K_i^{\text{dB}} = 20 \log K_i $
Hệ số khuếch đại công suất	$K_p = \frac{P_o}{P_i} \quad (3.7)$	$K_p^{\text{dB}} = 10 \log K_p $



Từ sơ đồ hình 3.10 xác định được hệ số khuếch đại áp toàn phần của mạch theo biểu thức:

$$K_{v(\text{tp})} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \times \frac{v_i}{v_s}$$

Vậy:

$$K_{v(\text{tp})} = K_v \times \frac{Z_i}{R_s + Z_i} \quad (3.8)$$

3.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ MẠCH KHUẾCH ĐẠI

3.1.3.4 Hiệu suất

Hiệu suất của mạch khuếch đại là tỷ số của công suất ra P_o và công suất tiêu thụ nguồn một chiều P_{dc} như biểu diễn trong biểu thức sau:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{dc}} \times 100 \% \quad (3.9)$$

3.1.3.5 Đặc tuyến biên độ - tần số

Thông thường, mạch khuếch đại chứa các phần tử tụ điện hoặc cuộn cảm nên hệ số khuếch đại K là một số phức⁵:

$$K = |K| e^{j\varphi} \quad (3.10)$$

trong đó:

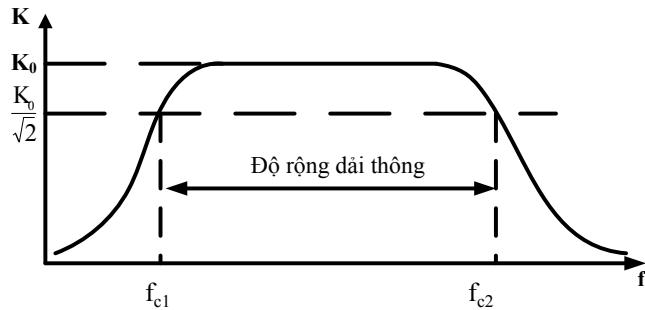
- ▷ $|K|$ là argument, độ lớn của hệ số khuếch đại;
- ▷ φ là góc pha, thể hiện độ dịch pha giữa hai thành phần đầu vào và đầu ra.

Hình 3.11 biểu diễn đặc tuyến biên tần của một mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ. Tại các tần số cắt f_{c1} và f_{c2} , hệ số khuếch đại suy giảm còn $K_0/\sqrt{2}$ với K_0 là hệ số khuếch đại tại dải tần trung tâm. Nếu tính theo đơn vị dB thì tại các tần số cắt f_{c1} và f_{c2} hệ số khuếch đại trung tâm của mạch giảm 3 dB.

Dải tần ($f_{c1} \div f_{c2}$) được gọi là băng thông BW (Bandwidth) của mạch khuếch đại. Bên ngoài dải thông thì hệ số khuếch đại giảm mạnh làm cho tín hiệu đầu ra cũng suy giảm.

$$BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (3.11)$$

⁵nếu mạch thuận trở thì K là một số thực



Hình 3.11: Đặc tuyến biên độ tần số của mạch khuếch đại.

3.1.3.6 Méo phi tuyến

Méo phi tuyến là hiện tượng xuất hiện thêm các thành phần tần số mới trong tín hiệu đầu ra do tính chất phi tuyến của các phần tử tích cực gây nên.

Nếu tín hiệu đầu vào chỉ có thành phần tần số ω , thì tại đầu ra xuất hiện các thành phần tần số $n\omega$ (với $n = 1, 2, 3, \dots$), biên độ tương ứng là V_{nm} , khi đó hệ số méo phi tuyến được định nghĩa bởi biểu thức 3.12.

$$\gamma = \frac{\sqrt{V_{2m}^2 + V_{3m}^2 + \dots + V_{nm}^2}}{V_{1m}^2} \times 100 \% \quad (3.12)$$

với ω là thành phần tần số chính (gọi là hài cơ bản, hài bậc 1) còn $2\omega, 3\omega \dots$ là thành phần tần số phụ (gọi là hài bậc cao).

3.2 MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

3.2.1 Phân tích các sơ đồ cấp nguồn một chiều cho BJT

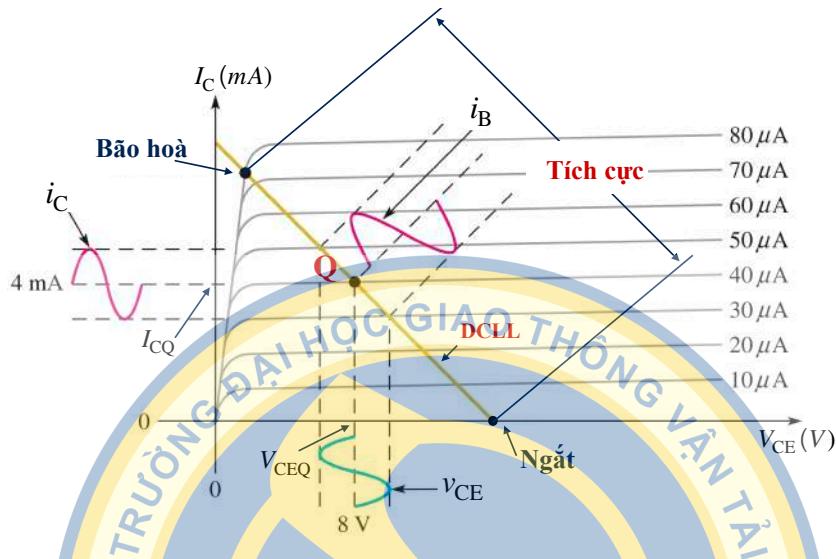
Việc cấp điện áp một chiều cho các điện cực của transistor là để xác định chế độ làm việc của transistor. Mục tiêu cuối cùng là xác định được điểm làm việc tĩnh Q của mạch trên đường tải tĩnh.

Đường tải tĩnh (*Direct Current Load Line - DCLL*) là đường thể hiện mối quan hệ giữa dòng và áp đầu ra ở chế độ DC của một mạch khuếch đại. Khi

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

này, vị trí của điểm làm việc tinh Q chính là giao giữa đường tải tinh và đặc tuyến ra.

Hình 3.12 biểu diễn điểm làm việc tinh Q trên đường tải tinh và đặc tuyến ra của một mạch khuếch đại mắc Emitter chung. Toạ độ của điểm Q thể hiện qua hai thông số là I_{CQ} , V_{CEQ} .



Hình 3.12: Ví dụ minh họa về điểm Q và dạng tín hiệu vào / ra khi mạch khuếch đại hoạt động trong miền tích cực.

Hình 3.12 cho thấy với điểm Q nằm giữa đường tải tinh, dạng tín hiệu đầu ra là dòng i_C và điện áp v_{CE} sẽ đồng dạng với tín hiệu vào là dòng điều khiển i_B .

Cách vẽ sơ đồ tương đương một chiều⁶ của mạch khuếch đại được thực hiện theo trình tự sau:

1. Hỗn mạch nhánh có chứa tụ điện; ngắn mạch nhánh có chứa cuộn dây;
2. Nối đất nguồn AC;
3. Vẽ lại mạch.

⁶sử dụng sơ đồ tương đương của các linh kiện ở chế độ DC mà đã cho trong bảng 3.1

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

Để thực hiện việc phân tích sơ đồ phân cực của BJT cần sử dụng các biểu thức đặc trưng cho BJT mà đã trình bày trong Chương 2, bao gồm:

$$\text{NPN: } V_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$\text{PNP: } V_{BE} = -0,7 \text{ V}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = \alpha I_E = \frac{\beta}{\beta + 1} I_E$$

và các định luật Kirchhoff về dòng (KCL), Kirchoff về áp (KVL) cũng như định lý Thevenin được trình bày chi tiết trong Phụ lục D.

Trình tự thực hiện việc **phân tích sơ đồ DC** như sau:

1. Viết phương trình KVL cho vòng xuất phát từ V_{CC} và có chứa V_{BE} , từ đó xác định được I_B ;
2. Viết phương trình KVL cho vòng xuất phát từ V_{CC} và có chứa V_{CE} , từ đó xác định được V_{CE} ;
3. Từ hai thông số trên xác định được toàn bộ các đại lượng dòng và áp trên các cực của transistor; xác định được thông số của điểm làm việc tĩnh $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$.

Các sơ đồ phân cực cơ bản của BJT bao gồm:

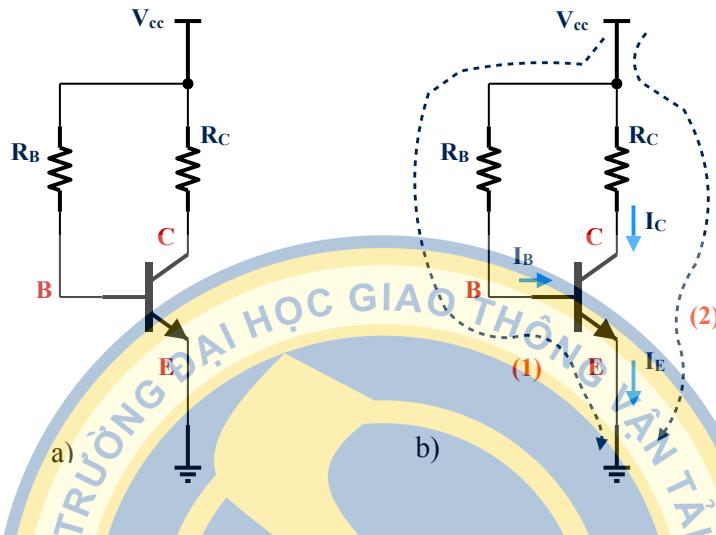
- + Phân dòng cố định
- + Tự phân cực
- + Hồi tiếp Collector
- + Mạch phân áp

Chú ý: trên thực tế có thể sử dụng sơ đồ phân cực là sự kết hợp của các sơ đồ phân dòng cố định, hồi tiếp Collector và sơ đồ mạch phân áp với sơ đồ tự phân cực.

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

3.2.1.1 Sơ đồ phân dòng cố định

Sơ đồ mạch như hình 3.13 được gọi là sơ đồ phân dòng cố định vì trong sơ đồ này dòng I_B có giá trị không đổi. Các thông số đã biết trước của mạch bao gồm: nguồn điện áp một chiều V_{CC} , các điện trở R_B và R_C , thông số của BJT là điện áp mở V_{BE} và hệ số khuếch đại dòng một chiều β .



Hình 3.13: Phân cực bằng dòng cố định: a) Sơ đồ mạch và b) Sơ đồ phân tích DC.

Phân tích mạch để xác định giá trị dòng và áp trên các cực của BJT:

- + Cực Emitter nối đất nên $V_E = 0$, suy ra $V_B = V_{BE}$.
- + Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE}$$

- + Từ đó xác định được dòng cực gốc I_B theo biểu thức⁷:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (3.13)$$

- + Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

⁷giá trị này gần như không đổi trong quá trình BJT làm việc vì V_{BE} thay đổi không đáng kể so với V_{CC}

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Phương trình thể hiện mối quan hệ giữa dòng cực góp I_C và điện áp V_{CE} được gọi là **phương trình đường tải tĩnh** như sau:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (3.14)$$

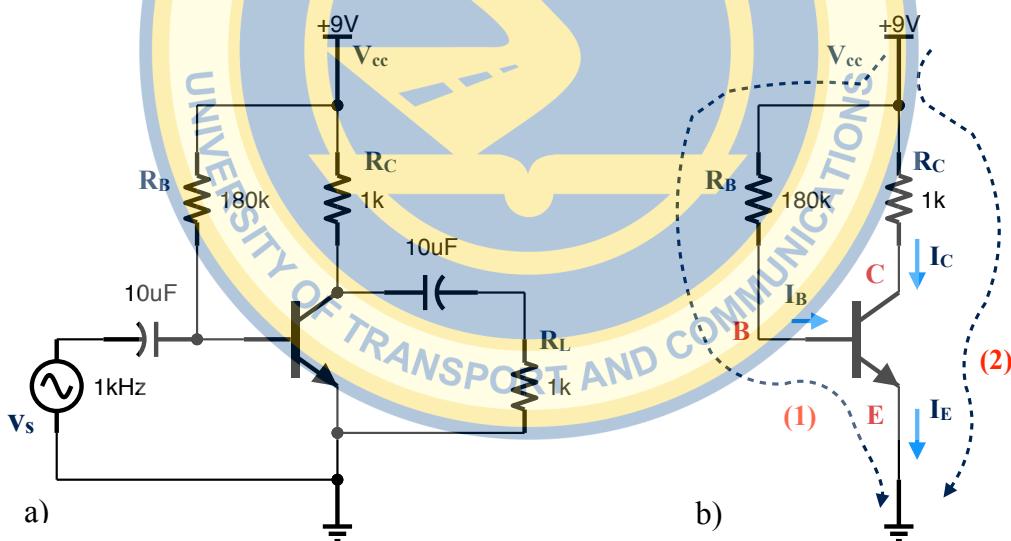
+ Từ đó xác định được điện áp trên cực Collector theo biểu thức:

$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Ví dụ 3.1. Cho một mạch khuếch đại có sơ đồ như hình 3.14(a). Biết transistor có hệ số khuếch đại dòng DC $\beta = 100$, điện áp mở $V_{BE} = 0,7\text{V}$.

+ Hãy xác định các giá trị dòng và áp một chiều trên các cực của BJT.

+ Hãy vẽ điểm làm việc tĩnh Q trên đường tải tĩnh.



Hình 3.14: a) Sơ đồ mạch khuếch đại và b) Sơ đồ phân cực DC.

Bài giải:

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

+ Xét sơ đồ phân cực DC của mạch bằng cách bỏ mạch các tụ điện, khi đó mạch trở thành hình 3.14(b).

+ Cực Emitter nối đất nên $V_E = 0 \text{ V}$ và $V_B = V_{BE} = 0,7 \text{ V}$.

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_B R_B + V_{BE} \\ \Rightarrow I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \\ &= \frac{9 - 0,7}{180} = 0,046 \text{ mA} \end{aligned}$$

+ Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B = 100 \times 0,046 = 4,6 \text{ mA} \\ I_E &= (\beta + 1) I_B \approx 4,6 \text{ mA} \end{aligned}$$

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

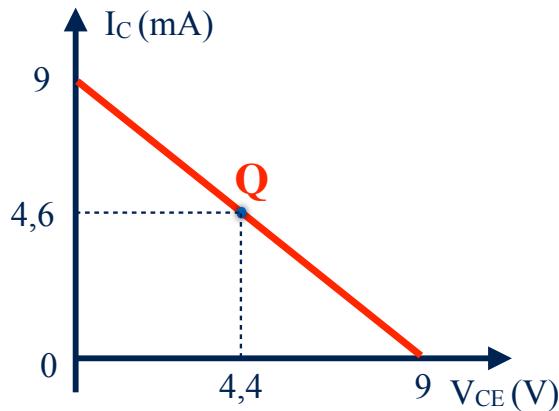
$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_C R_C + V_{CE} \\ \Rightarrow V_C &= V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 9 - 4,6 \times 1 = 4,4 \text{ V} \end{aligned}$$

+ Biểu thức 3.14 chính là phương trình của đường tải tĩnh của sơ đồ này.

Với $V_{CC} = 9 \text{ V}$ và $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, suy ra:

$$V_{CE} = 9 - I_C$$

Từ đó vẽ được đường tải tĩnh và điểm Q của mạch như hình 3.15.



Hình 3.15: Biểu diễn Q trên đường tải tĩnh của sơ đồ hình 3.14.

3.2.1.2 Sơ đồ tự phân cực

Sơ đồ mạch như hình 3.16 được gọi là sơ đồ tự phân cực. Điểm khác biệt của sơ đồ này so với sơ đồ phân dòng cố định là sử dụng điện trở R_E . Điện áp trên cực Emitter được xác định tùy thuộc vào dòng qua nó, tức là nhờ có R_E mà cực Emitter tự phân cực.

Các thông số đã biết trước của mạch bao gồm: nguồn điện áp một chiều V_{CC} , các điện trở R_B và R_C , thông số của BJT là điện áp mở V_{BE} và hệ số khuếch đại dòng một chiều β .

Phân tích mạch để xác định giá trị dòng và áp trên các cực của BJT được thực hiện như sau:

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

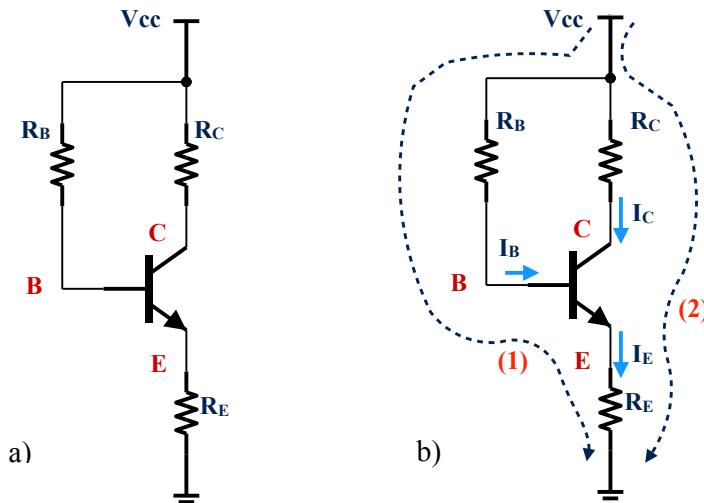
+ Do dòng $I_E = (\beta + 1)I_B$ nên suy ra:

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1)I_B R_E$$

+ Từ đó xác định được dòng cực I_B theo biểu thức:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (3.15)$$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT



Hình 3.16: Tự phân cực; a) Sơ đồ mạch và b) Sơ đồ phân tích DC.

+ Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E \\ \Rightarrow V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \end{aligned}$$

Vì dòng $I_C \approx I_E$ nên suy ra **phương trình đường tải tĩnh** là:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \quad (3.16)$$

+ Từ đó xác định được điện áp trên cực Collector và Emitter theo biểu thức:

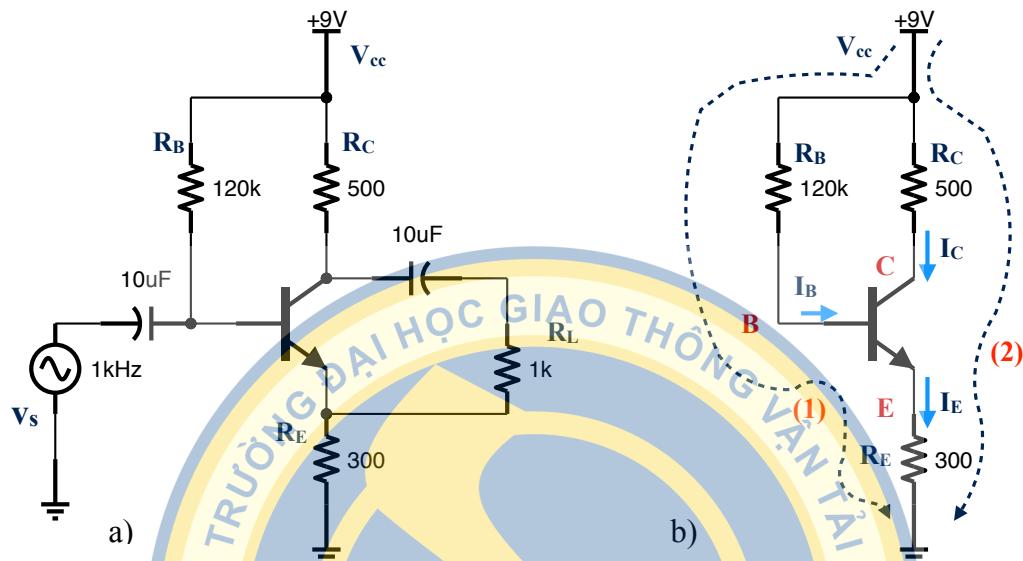
$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$V_E = I_E R_E$$

$$= V_C - V_{CE}$$

Ví dụ 3.2. Cho một mạch khuếch đại có sơ đồ như hình 3.17(a). Biết transistor có hệ số khuếch đại dòng $\beta = 100$, điện áp mở $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.

Hãy xác định các giá trị dòng và áp một chiều trên các cực của BJT.



Hình 3.17: a) Sơ đồ một mạch khuếch đại và b) Sơ đồ phân cực DC kiểu tự phân cực.

Bài giải:

- + Xét sơ đồ phân cực DC của mạch bằng cách bỏ mạch các tụ điện, khi đó mạch trở thành hình 3.17(b).
- + Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$\begin{aligned}
 V_{CC} &= I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \\
 \Rightarrow V_{CC} &= I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E \\
 \Rightarrow I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E} \\
 \Rightarrow I_B &= \frac{9 - 0,7}{120 + (100 + 1)0,3} = 0,055 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

+ Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0,055 = 5,5 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \approx 5,5 \text{ mA}$$

+ Điện áp trên Base và Emitter khi đó được xác định là:

$$V_E = I_E R_E = 5,5 \times 0,3 = 1,65 \text{ V}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 1,65 + 0,7 = 2,35 \text{ V}$$

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E$$

$$\Rightarrow V_{CE} \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$= 9 - 5,5 \times (0,5 + 0,3) = 4,6 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_C = V_{CC} - I_C R_C = 9 - 5,5 \times 0,5 = 6,25 \text{ V}$$

3.2.1.3 Sơ đồ hồi tiếp Collector

Sơ đồ mạch như hình 3.18 được gọi là sơ đồ hồi tiếp Collector vì điện trở R_B đưa điện áp Collector về phân cực cho cực Base. Các thông số đã biết trước của mạch bao gồm: nguồn điện áp một chiều V_{CC} , các điện trở R_B và R_C ; thông số của BJT là điện áp mở V_{BE} và hệ số khuếch đại dòng một chiều β .

Phân tích mạch để xác định giá trị dòng và áp trên các cực của BJT được thực hiện như sau:

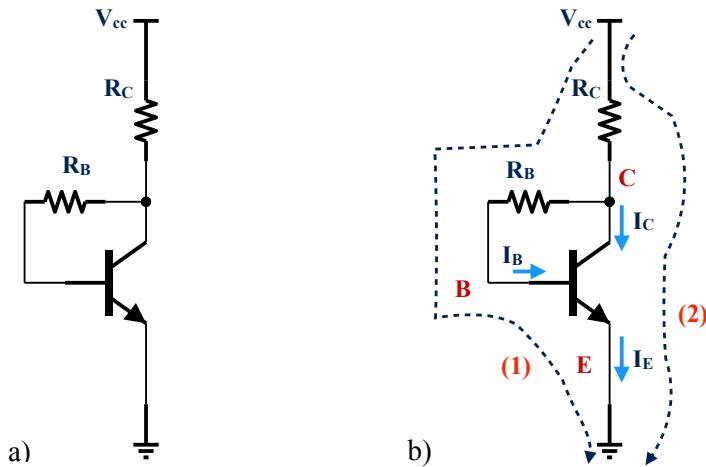
- + Cực Emitter nối đất nên $V_E = 0$, suy ra $V_B = V_{BE}$.
- + Do dòng Collector I_C là dòng đi vào cực Collector, dòng Base I_B là dòng vào cực Base và đi qua R_B nên dòng đi qua R_C là dòng $(I_B + I_C)$.

+ Áp dụng KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{CC} = (I_B + I_C)R_C + I_B R_B + V_{BE}$$

+ Do dòng $I_C = \beta I_B$ nên suy ra:

$$V_{CC} = (\beta + 1)I_B R_C + I_B R_B + V_{BE}$$



Hình 3.18: Hồi tiếp Collector: a) Sơ đồ mạch và b) Sơ đồ phân tích DC.

+ Từ đó xác định được dòng cực gốc I_B theo biểu thức:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_C} \quad (3.17)$$

+ Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B \\ I_E &= (\beta + 1) I_B \end{aligned}$$

+ Áp dụng KVL cho vòng (2) ta có:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= (I_B + I_C)R_C + V_{CE} = (\beta + 1)I_B R_C + V_{CE} \\ \Rightarrow V_{CE} &= V_{CC} - (\beta + 1)I_B R_C \end{aligned}$$

Vì dòng $I_C = \beta I_B$ nên suy ra **phương trình đường tải tĩnh** là:

$$V_{CE} = V_{CC} - \frac{\beta + 1}{\beta} I_C R_C \quad (3.18)$$

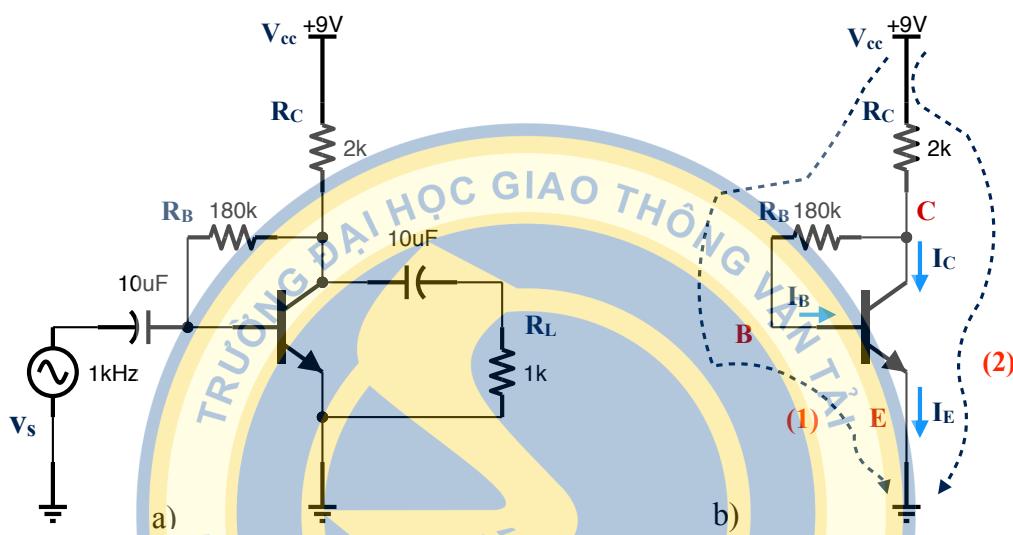
+ Từ đó xác định được điện áp trên cực Collector theo biểu thức:

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

$$V_C = V_{CE} \approx V_{CC} - \beta I_B R_C$$

Ví dụ 3.3. Cho một mạch khuếch đại có sơ đồ như hình 3.19(a). Biết transistor có hệ số khuếch đại dòng DC là $\beta = 100$, điện áp mở $V_{BE} = 0,7\text{V}$.

Hãy xác định các giá trị dòng và áp áp một chiều trên các cực của BJT.



Hình 3.19: a) Sơ đồ một mạch khuếch đại và b) Sơ đồ phân cực DC kiểu hồi tiếp Collector.

Bài giải:

- + Xét sơ đồ phân cực DC của mạch bằng cách bỏ mạch các tụ điện, khi đó mạch trở thành hình 3.19(b).
- + Cực Emitter nối đất nên $V_E = 0$, suy ra $V_B = V_{BE} = 0,7\text{V}$.
- + Do dòng Collector I_C là dòng đi vào cực Collector, dòng Base I_B là dòng vào cực Base và đi qua R_B nên dòng đi qua R_C là dòng $(I_B + I_C)$.
- + Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{CC} = (I_B + I_C)R_C + I_B R_B + V_{BE}$$

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

+ Do dòng $I_C = \beta I_B$ nên suy ra:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= (\beta + 1)I_B R_C + I_B R_B + V_{BE} \\ \Rightarrow I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_C} \\ &= \frac{9 - 0,7}{180 + (100 + 1)2} = 0,022 \text{ mA} \end{aligned}$$

+ Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B = 100 \times 0,022 = 2,2 \text{ mA} \\ I_E &= (\beta + 1)I_B \approx 2,2 \text{ mA} \end{aligned}$$

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= (I_B + I_C)R_C + V_{CE} \approx I_C R_C + V_{CE} \\ \Rightarrow V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C \\ &\approx 9 - 2,2 \times 2 \approx 4,6 \text{ V} \end{aligned}$$

+ Từ đó xác định được điện áp trên cực Collector theo biểu thức:

$$V_C = V_{CE} \approx 4,6 \text{ V}$$

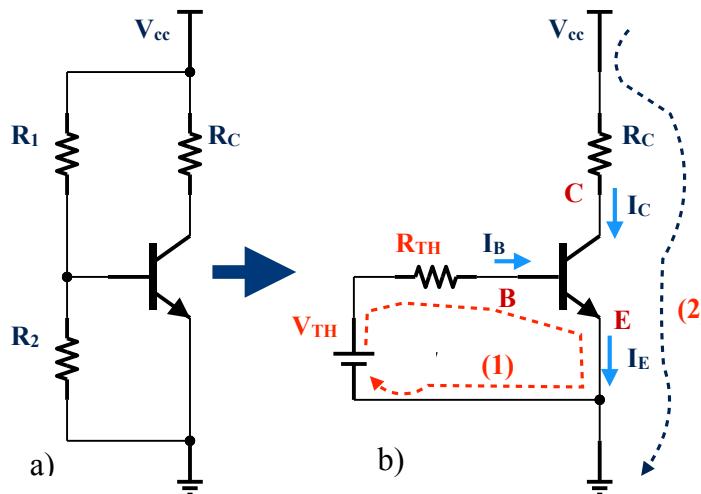
3.2.1.4 Sơ đồ mạch phân áp

Sơ đồ mạch như hình 3.20 được gọi là sơ đồ phân áp vì điện trở R_1 và điện trở R_2 tạo thành mạch phân áp cho cực Base. Các thông số đã biết trước của mạch bao gồm: nguồn điện áp một chiều V_{CC} , các điện trở R_1 , R_2 và R_C ; thông số của BJT là điện áp mở V_{BE} và hệ số khuếch đại dòng một chiều β .

Phân tích mạch để xác định giá trị dòng và áp trên các cực của BJT được thực hiện như sau:

+ Do có dòng trên cực Base nên đoạn mạch (R_1, R_2) không nối tiếp cũng không song song với nhau và vì vậy cần thay thế bằng mạch đơn giản hơn để tiện cho việc tính toán. Áp dụng định lý Thevenin cho đoạn mạch (R_1, R_2) , khi đó đoạn mạch này bị thay bởi đoạn mạch gồm điện trở R_{TH} và nguồn điện áp V_{TH} như biểu diễn trong hình 3.20(b).

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT



Hình 3.20: Mạch phân áp: a) Sơ đồ mạch và b) Sơ đồ tương đương Thevenin

trong đó:

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC}$$
(3.19)

- + Cực Emitter nối đất nên \$V_E = 0\$, suy ra \$V_B = V_{BE}\$.
- + Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE}$$

- + Từ đó xác định được dòng cực gốc \$I_B\$ theo biểu thức:

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH}}$$
(3.20)

- + Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

- + Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

Vậy **phương trình đường tải tĩnh** như sau:

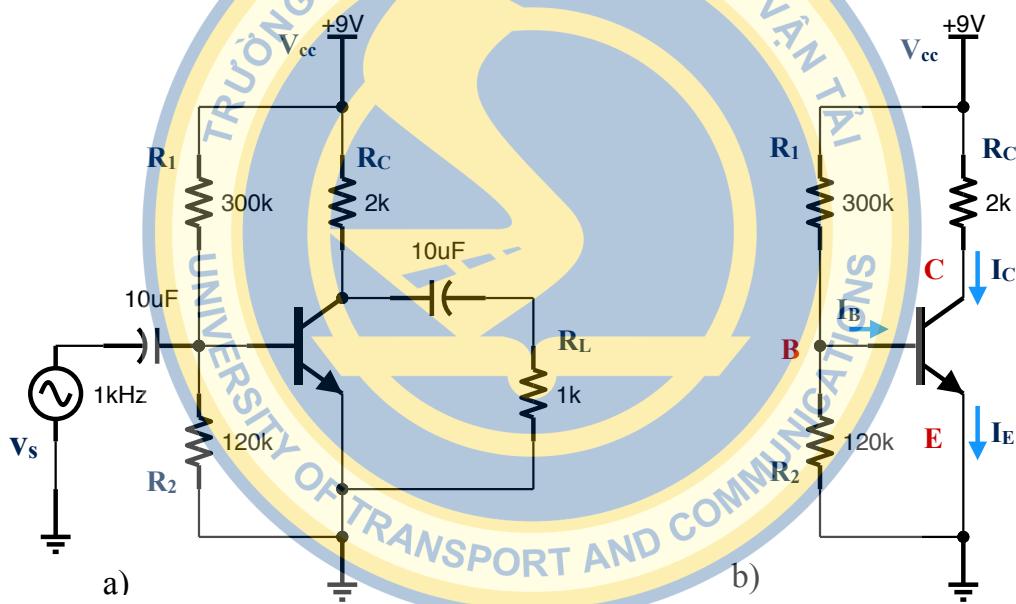
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (3.21)$$

+ Từ đó xác định được điện áp trên cực Collector theo biểu thức:

$$V_C = V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Ví dụ 3.4. Cho một mạch khuếch đại có sơ đồ như hình 3.21(a). Biết transistor có hệ số khuếch đại dòng DC là $\beta = 100$, điện áp mờ $V_{BE} = 0,7\text{V}$.

Hãy xác định các giá trị dòng và áp một chiều trên các cực của BJT.



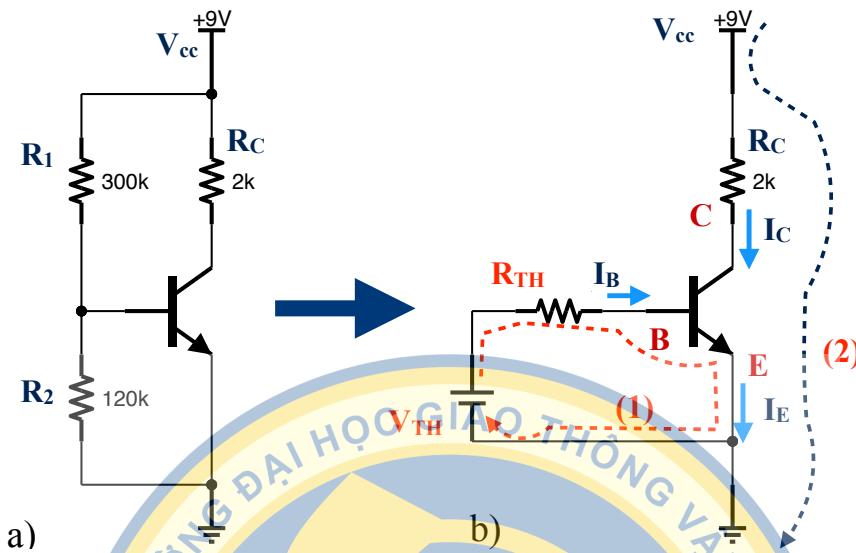
Hình 3.21: a) Sơ đồ một mạch khuếch đại và b) Sơ đồ phân cực DC.

Bài giải:

+ Xét sơ đồ phân cực DC của mạch bằng cách bỏ mạch các tụ điện, khi đó mạch trở thành hình 3.21(b).

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

+ Áp dụng định lý Thevenin cho đoạn mạch R_1 và R_2 , khi đó đoạn mạch này bị thay bởi đoạn mạch gồm điện trở R_{TH} và nguồn điện áp V_{TH} như biểu diễn trong hình 3.22(b).



Hình 3.22: a) Sơ đồ phân cực DC và b) Sơ đồ tương đương Thevenin của mạch 3.21.

trong đó:

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 85,71 \text{ k}\Omega$$

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = 2,57 \text{ V}$$

+ Cực Emitter nối đất nên $V_E = 0$, suy ra $V_B = V_{BE} = 0,7 \text{ V}$.

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE}$$

+ Từ đó xác định được dòng cực I_B theo biểu thức:

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH}} \\ &= \frac{2,57 - 0,7}{85,71} = 0,0218 \text{ mA} \end{aligned}$$

+ Dòng Collector và Emitter khi đó được xác định là:

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0,0218 = 2,18 \text{ mA}$$

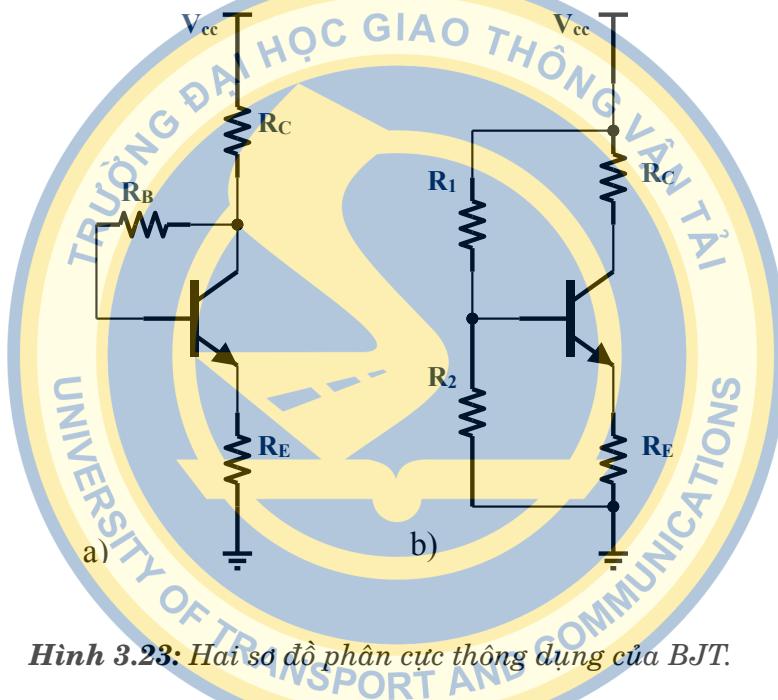
$$I_E = (\beta + 1)I_B \approx 2,18 \text{ mA}$$

+ Áp dụng định luật KVL cho vòng (2) ta có:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_C R_C + V_{CE} \\ \Rightarrow V_C &= V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 9 - 2,18 \times 2 = 4,64 \text{ V} \end{aligned}$$

3.2.1.5 Các sơ đồ phân cực khác

Dưới đây là hai sơ đồ phân cực khác cho BJT, đây là sự kết hợp của sơ đồ hồi tiếp điện áp Collector và sơ đồ phân áp với sơ đồ tự phân cực 3.23.



Với hai sơ đồ này, bạn đọc tự xác định các thành phần dòng, áp một chiều trên các cực của transistor và xác định điểm làm việc tĩnh trên DCLL và đặc tuyến ra giống như đã làm với các sơ đồ trên.

3.2.2 Đánh giá sơ đồ phân cực

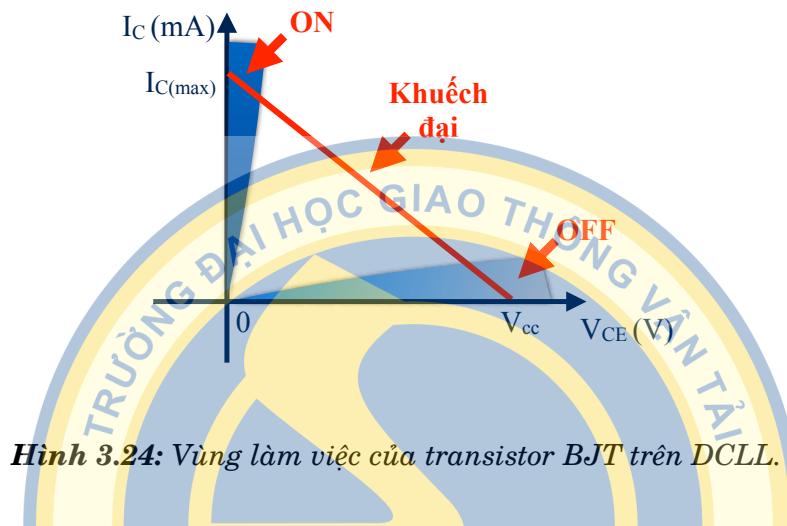
Để đánh giá sơ đồ phân cực có tốt hay không cần dựa vào hai yếu tố là vị trí của điểm làm việc trên đường tải tĩnh có trong vùng làm việc tương ứng với

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

ứng dụng dự kiến hay không và độ ổn định của điểm làm việc này trong quá trình mạch hoạt động.

3.2.2.1 Nhận xét vị trí điểm làm việc và điều chỉnh tới giá trị tối ưu

Vị trí của điểm Q cho biết hiện tại transistor đang sẵn sàng cho chế độ làm việc nào như thể hiện trong hình 3.24.



Hình 3.24: Vùng làm việc của transistor BJT trên DCLL.

Ví dụ hình 3.15 biểu diễn điểm Q của mạch 3.14 trên đường tải tĩnh của nó. Vị trí này của điểm Q cho thấy mạch đang hoạt động như một phần tử khuếch đại.

Bảng 3.3 cho biết cách xác định ứng dụng của BJT thông qua điểm làm việc tĩnh Q và các giá trị tối ưu⁸ đối với từng ứng dụng.

Chú ý:

- + Nếu thấy Q nằm lệch nhiều so với vị trí tối ưu thì nên điều chỉnh lại giá trị của các linh kiện.
- + Với mạch khuếch đại, vị trí tối ưu của điểm làm việc tĩnh Q là nằm chính giữa đường tải tĩnh là vì khi đó cho phép đưa tín hiệu vào với biên độ lớn nhất mà đầu ra không méo (điểm Q vẫn di chuyển trong miền tích cực như thể hiện trong hình 3.12).

⁸các giá trị này được sử dụng trong bài toán thiết kế

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

Bảng 3.3: Xác định ứng dụng tương ứng của BJT dựa vào giá trị của $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$.

Điểm làm việc tĩnh Q	Miền làm việc (Ứng dụng)	Giá trị tối ưu
$I_{CQ} < I_{Cmax}$ $V_{CEQ} < V_{CC}$	Tích cực (Khuếch đại)	$I_{CQ} = \frac{1}{2}I_{Cmax}$ $V_{CEQ} = \frac{1}{2}V_{CC}$
$I_{CQ} \approx I_{Cmax}$ $V_{CEQ} \approx 0$	Bão hòa (Khóa ON)	$I_{CQ} = I_{Cmax}$ $V_{CEQ} = 0$
$I_{CQ} \approx 0$ $V_{CEQ} \approx V_{CC}$	Ngắt (Khóa OFF)	$I_{CQ} = 0$ $V_{CEQ} = V_{CC}$

3.2.2.2 Đánh giá độ ổn định nhiệt của sơ đồ

Transistor BJT là một linh kiện rất nhạy cảm với nhiệt độ, trong đó hai thông số chịu ảnh hưởng nhiều nhất là cường độ dòng ngược bão hòa I_{CB0} và điện áp V_{BE} . Nếu dòng I_{CB0} tăng, làm cho dòng I_C tăng, số lượng hạt dẫn qua chuyển tiếp J_C tăng nên sự va chạm giữa các hạt dẫn với mạng tinh thể tăng, khi đó nhiệt độ **tăng** và tiếp tục làm I_{CB0} tăng, cứ thế nhiệt độ của transistor tiếp tục tăng. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng quá nhiệt. Hiệu ứng quá nhiệt làm thay đổi điểm công tác tĩnh và nếu không có biện pháp hạn chế sẽ làm hỏng transistor. Tương tự, khi nhiệt độ thay đổi điện áp V_{BE} cũng thay đổi và do đó cũng làm điểm công tác tĩnh thay đổi. Tuy nhiên, trong điều kiện bình thường ảnh hưởng của điện áp V_{BE} nên khi nói đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến điểm công tác tĩnh thường nói đến ảnh hưởng của dòng bão hòa I_{CB0} và đưa ra khái niệm hệ số ổn định nhiệt theo biểu thức:

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} = \frac{1 + \beta}{1 - \beta \frac{\Delta I_B}{\Delta I_C}} \quad (3.22)$$

vì $I_C = \beta I_B + (1 + \beta)I_{CB0}$

Hệ số S càng nhỏ, tính ổn định đối với nhiệt độ của sơ đồ càng cao.

* **Ví dụ:**

+ Với sơ đồ phân dòng cố định, phần 3.2.1.1, ta có I_B cố định nên suy ra:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} = \frac{\beta(\Delta I_B)}{\Delta I_{CB0}} = 0$$

tức là mạch không có khả năng ổn định nhiệt độ.

+ Với sơ đồ tự phân cực, phần 3.2.1.2, vi phân hai về của biểu thức 3.2.1.2 ta có:

$$\begin{aligned} 0 &= \Delta I_B R_B + \Delta I_E R_E \\ \Rightarrow \frac{\Delta I_B}{\Delta I_C} &\approx \frac{\Delta I_B}{\Delta I_E} = -\frac{R_E}{R_B} \\ \Rightarrow S &= \frac{1 + \beta}{1 - \beta \frac{\Delta I_B}{\Delta I_C}} = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \frac{R_E}{R_B}} \end{aligned}$$

Biểu thức trên cho thấy mạch có khả năng ổn định nhiệt độ. Ngoài ra, để giảm hệ số S cần tăng R_E hoặc giảm R_B . Tuy nhiên, khi điều chỉnh hai giá trị này sẽ làm dịch chuyển điểm làm việc tĩnh của mạch về hướng miền ngắn. Do vậy, cần cân nhắc lựa chọn các giá trị sao cho phù hợp.

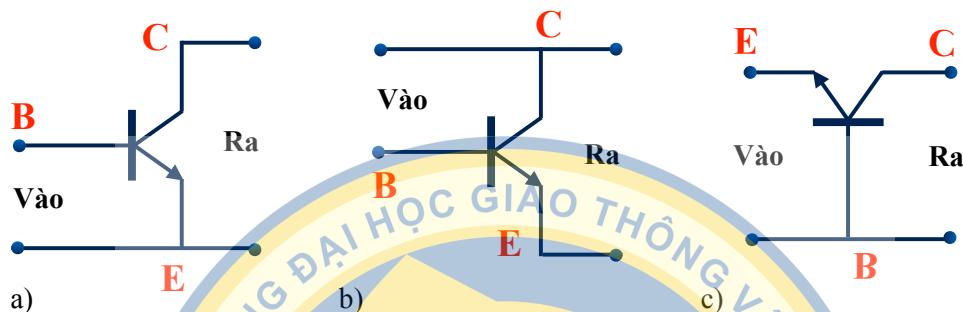
3.2.3 Phân tích các sơ đồ mạch khuếch đại BJT

Cách đưa tín hiệu vào và lấy tín hiệu ra trên các chân của BJT gọi là các sơ đồ mắc BJT. Do chỉ có ba chân nên khi transistor BJT được mắc vào mạng bốn cực thì phải có một chân được dùng chung cho cả đầu vào và đầu ra. Thêm nữa, vì đặc điểm cấu tạo của các miền Emitter, Base và Collector là khác nhau nên trong thực tế chỉ có ba cách⁹ mắc như biểu diễn trong hình

⁹ba cách mắc khả dụng trong 6 cách có thể

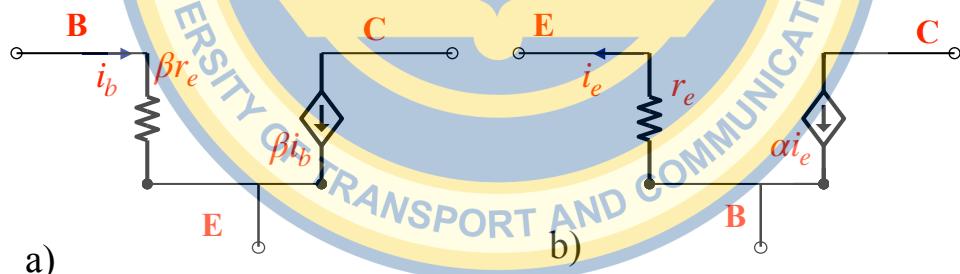
3.25 là được sử dụng, bao gồm:

- + Cực phát chung - CE (*Common Emitter configuration*): tín hiệu vào giữa B và E, tín hiệu ra lấy giữa C và E;
- + Cực gom chung - CC (*Common Collector configuration*): tín hiệu vào giữa B và C, tín hiệu ra lấy giữa E và C;
- + Cực gốc chung - CB (*Common Base configuration*): tín hiệu vào giữa E và B, tín hiệu ra lấy giữa C và B.



Hình 3.25: Các cách măc transistor BJT: a) CE, b) CC và c) CB.

Ứng với mỗi cách măc trên transistor BJT loại NPN sẽ có sơ đồ tương đương xoay chiều trong miền tín hiệu nhỏ, tần số thấp như thể hiện trong hình 3.26.



Hình 3.26: Sơ đồ tương đương AC [4]-[5] cho mạch a) CE và CC và b) CB.

trong đó:

β là hệ số khuếch đại dòng một chiều ; $\beta = I_C/I_B$;

α là hệ số truyền đạt dòng một chiều; $\alpha = I_C/I_E$;

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

r_e là điện trở xoay chiều cực phát, được xác định theo biểu thức:

$$r_e = \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx \frac{V_T}{I_{CQ}} \quad (3.23)$$

V_T được gọi là điện thế nhiệt, $V_T = 26$ mV ở nhiệt độ phòng 300 K;

I_{EQ}, I_{CQ} là dòng cực phát, dòng cực góp tương ứng với vị trí của điểm làm việc tĩnh Q .

Nguồn dòng βi_b và αi_e là các nguồn dòng phụ thuộc vào dòng vào i_b hay i_e .

Cách vẽ sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại được thực hiện theo trình tự sau:

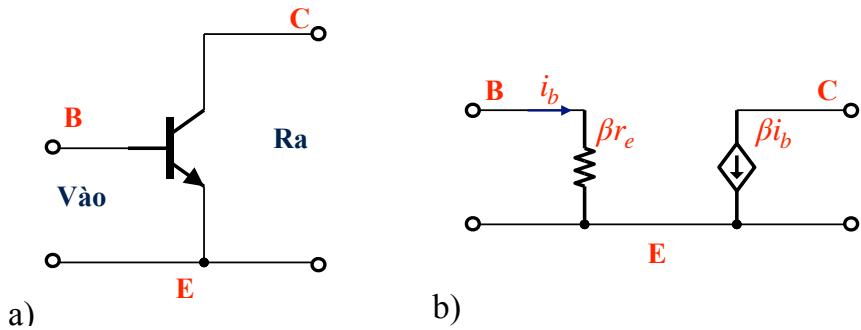
1. Ngắn mạch tụ điện¹⁰;
2. Nối đất nguồn DC;
3. Vẽ sơ đồ tương đương AC của BJT;
4. Kết nối các phần tử còn lại trong mạch với BJT.

Sau khi có sơ đồ tương đương xoay chiều, các thông số của mạch khuếch đại được xác định như trình bày trong phần 3.1.3.

3.2.3.1 Phân tích mạch khuếch đại CE

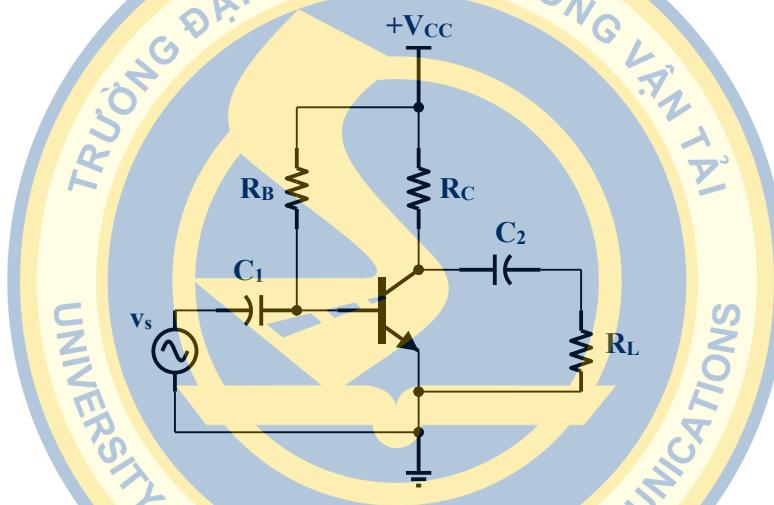
Với sơ đồ mắc kiểu CE, tín hiệu vào giữa cực Base và cực Emitter, tín hiệu ra lấy giữa cực Collector và Emitter. Dấu hiệu nhận biết sơ đồ này thường là cực Emitter nối đất hoặc nối qua tụ xuống đất.

Transistor BJT loại NPN mắc kiểu CE để khuếch đại tín hiệu nhỏ, tần số thấp được mô hình hóa thành sơ đồ tương đương như biểu diễn trong hình 3.27.



Hình 3.27: a) Sơ đồ BJT măc kiểu CE và b) Sơ đồ tương đương ở chế độ tín hiệu nhỏ, tần số thấp tương ứng.

Cho mạch khuếch đại có sơ đồ mạch như hình 3.28.



Hình 3.28: Một mạch khuếch đại BJT măc kiểu CE.

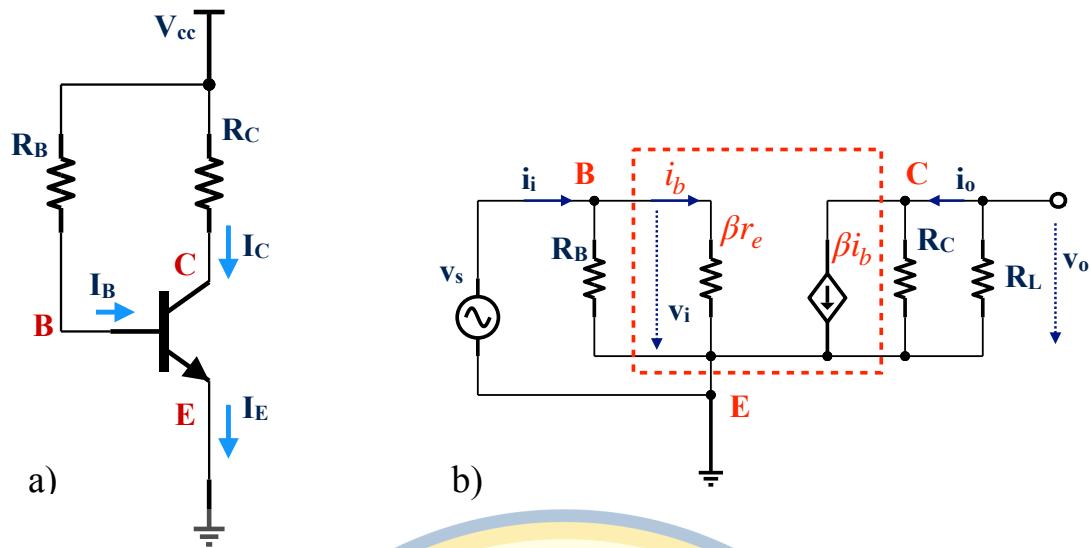
+ Sơ đồ mạch tương đương ở chế độ một chiều của mạch có dạng sơ đồ phân cực bằng dòng cố định như trong hình 3.29(a).

Từ sơ đồ phân cực xác định các thông số của điểm làm việc Q như sau:

$$V_{CC} = I_B + V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT



Hình 3.29: a) Sơ đồ tương đương DC và b) Sơ đồ tương đương AC của mạch 3.28.

$$\Rightarrow I_{EQ} \approx I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CC} = I_{CQ} R_C + V_{CE}$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

+ Vì transistor được mắc kiểu Emitter chung nên sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch có dạng như trong hình 3.29(b). Trong đó, điện trở xoay chiều r_e được tính theo biểu thức 3.23, ở điều kiện nhiệt độ phòng được tính như sau:

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_{EQ}}$$

+ **Trở kháng vào** Z_i được xác định bằng cách nhìn từ phía đầu vào khi bỏ mạch tải như đã mô tả trong phần 3.1.3.1, chính là $(R_B // \beta r_e)$. Suy ra:

$$Z_i = \frac{R_B \beta r_e}{R_B + \beta r_e} \quad (3.24)$$

+ **Trở kháng ra** Z_o được xác định bằng cách nhìn từ phía đầu ra khi không có tải, trong điều kiện ngắn mạch đầu vào như đã mô tả trong phần 3.1.3.2. Từ sơ đồ mạch ta thấy:

$$Z_o = R_C$$

(3.25)

+ **Hệ số khuếch đại điện áp:**

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_C / R_L)}{i_b \beta r_e}$$

Vậy:

$$K_v = -\frac{(R_C / R_L)}{r_e} \quad (3.26)$$

Chú ý: Khi mạch không có điện trở tải R_L thì biểu thức 3.26 trở thành:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_C}{r_e}$$

+ **Hệ số khuếch đại điện áp toàn phần:** áp dụng biểu thức 3.8 ta có:

$$K_{v(tp)} = \frac{Z_i}{R_s + Z_i} \times K_v$$

+ **Hệ số khuếch đại dòng điện:**

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-v_o / R_L}{v_i / Z_i} = -K_v \frac{Z_i}{R_L} \quad (3.27)$$

Chú ý: Khi mạch không có điện trở tải thì biểu thức 3.27 trở thành:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = -K_v \frac{Z_i}{R_C}$$

+ **Hệ số khuếch đại công suất:**

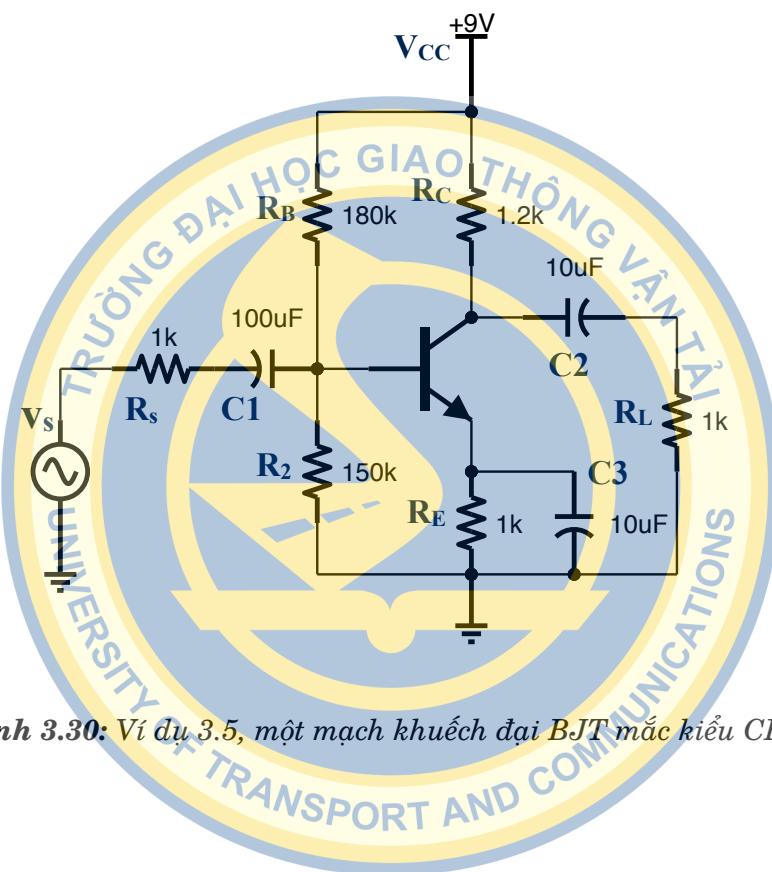
$$K_p = K_v \times K_i$$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

Ví dụ 3.5. Cho mạch khuếch đại có sơ đồ mạch như hình dưới đây. Biết transistor có $V_{BE} = 0,7\text{ V}$ và hệ số khuếch đại dòng một chiều $\beta = 100$.

Hãy xác định các thông số xoay chiều của mạch trong trường hợp:

- a) Có tụ C_3
- b) Không có tụ C_3



Hình 3.30: Ví dụ 3.5, một mạch khuếch đại BJT măc kiểu CE.

Bài giải:

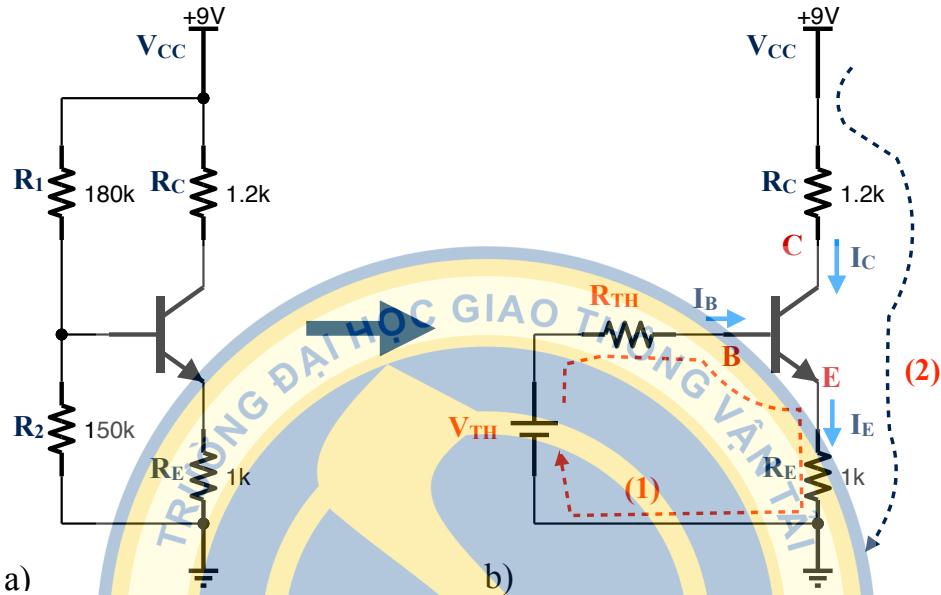
* Xét mạch ở chế độ một chiều

Với dòng một chiều, các nhánh có tụ bị hở mạch nên việc có hay không tụ C_3 không khác nhau. Sơ đồ tương đương DC của mạch có dạng như hình 3.31(a). Vì đây là mạch phân áp nên áp dụng định lý Thevenin cho đoạn mạch R_1, R_2 . Khi đó mạch trở thành như hình 3.31(b).

trong đó:

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = \frac{150}{180 + 150} \times 9 = 4,09 \text{ V}$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{180 \times 150}{180 + 150} = 81,82 \text{ k}\Omega$$



Hình 3.31: a) Sơ đồ tương đương DC và b) Sơ đồ tương đương Thevenin của hình 3.30.

Áp dụng định luật KVL cho vòng (1) ta có:

$$V_{TH} = R_{TH} I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

vì \$I_E = (\beta + 1) I_B\$ nên suy ra:

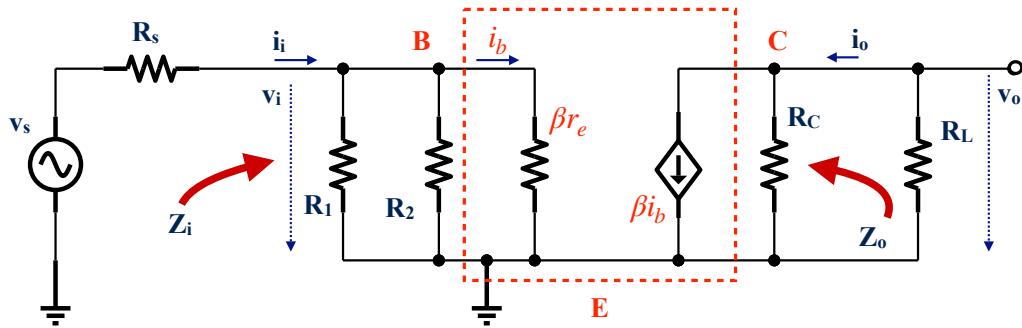
$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{TH}}{\beta+1}} = \frac{4,09 - 0,7}{1 + \frac{81,82}{100+1}} = 1,86 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_{EQ}} = \frac{26}{1,86} = 13,98 \Omega$$

* Xét mạch ở chế độ xoay chiều

a) Khi có tụ \$C_3\$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT



Hình 3.32: Sơ đồ tương đương AC của hình 3.30 khi có tụ C_3 .

+ Vì transistor BJT được mắc kiểu Emitter chung nên sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch có dạng như trong hình 3.32 do các tụ điện bị ngắn mạch và nguồn DC bị nối đất ở chế độ AC. Tụ điện C_3 làm ngắn mạch điện trở R_E nên điện trở này không xuất hiện trong mạch AC.

+ Trở kháng vào Z_i , áp dụng biểu thức 3.24 từ sơ đồ mạch ta có:

$$Z_i = R_1 // R_2 // \beta r_e = R_{TH} // \beta r_e \\ = \frac{R_{TH} \beta r_e}{R_1 + \beta r_e} = \frac{81,82 \times 100 \times 13,98 \times 10^{-3}}{81,82 + 100 \times 13,98 \times 10^{-3}} = 1,37 \text{ k}\Omega$$

+ Trở kháng ra Z_o : từ sơ đồ mạch áp dụng biểu thức 3.25 ta có:

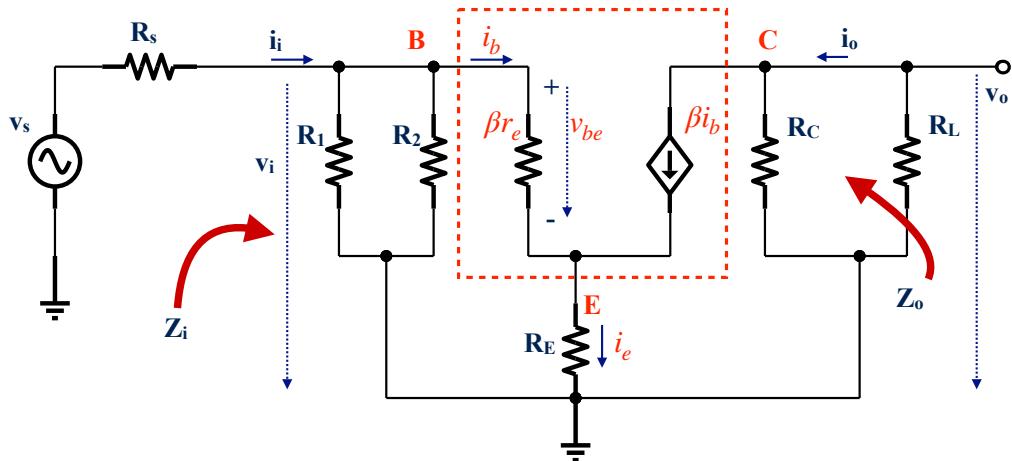
$$Z_o = R_C = 1,2 \text{ k}\Omega$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp: áp dụng biểu thức 3.26 ta được:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_C // R_L)}{i_b \beta r_e} \\ = -\frac{(R_C // R_L)}{r_e} = -39,02$$

+ Hệ số khuếch đại dòng điện: áp dụng biểu thức 3.27 ta được:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-v_o / R_L}{v_i / Z_i} \\ = -K_v \frac{Z_i}{R_L} = 53,45$$



Hình 3.33: Sơ đồ tương đương AC của hình 3.30 khi không có tụ C_3 .

b) Không có tụ C_3

Khi không có tụ điện C_3 , điện trở R_E nối giữa Emitter với đất như thể hiện trong hình 3.33.

+ Trở kháng vào Z_i được xác định khi hở mạch tải. Do đặc tính của transistor BJT là sụt áp giữa Base và Emitter gần như không thay đổi trong quá trình hoạt động nên có thể coi như sau:

$$v_{be} = i_b \beta r_e = \beta i_b r_e \approx i_e r_e$$

nghĩa là coi điện trở r_e nối tiếp với điện trở R_E vì hai điện trở này có một điểm chung và dòng qua chúng cùng là i_e . Từ đó xác định được trở kháng vào theo biểu thức:

$$\begin{aligned} Z_i &= R_1 // R_2 // (r_e + R_E) = R_{TH} // (r_e + R_E) \\ &\approx (R_{TH} // R_E) = \frac{81,82 \times 1}{81,82 + 1} = 0,988 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

+ Trở kháng ra Z_o : từ sơ đồ mạch áp dụng biểu thức 3.25 ta có:

$$Z_o = R_C = 1,2 \text{ k}\Omega$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp: từ sơ đồ mạch ta có:

$$\begin{aligned} K_v &= \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta i_b (R_C / R_L)}{i_b \beta r_e + i_e R_E} = -\frac{(R_C / R_L)}{r_e + R_E} \\ &\approx -\frac{(R_C / R_L)}{R_E} = -0,54 \end{aligned}$$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

+ Hệ số khuếch đại dòng điện: áp dụng biểu thức 3.27 ta được:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-v_o/R_L}{v_i/Z_i} = -K_v \frac{Z_i}{R_L} = 0,53$$

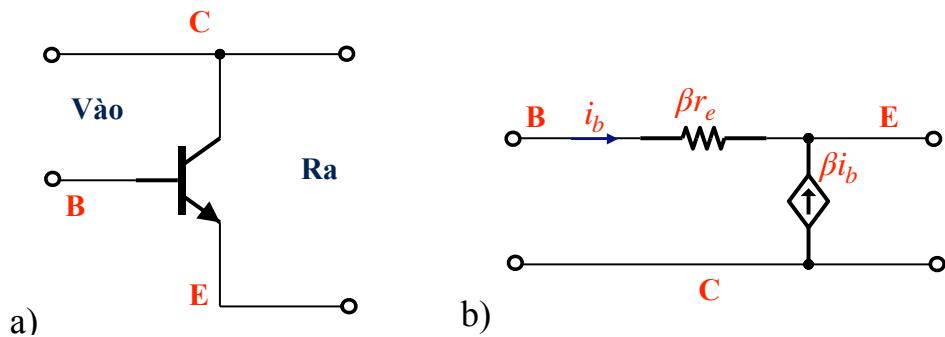
Nhận xét: Từ các biểu thức tính các thông số của mạch khuếch đại CE và kết quả tính toán ở các ví dụ trên rút ra một số nhận xét về đặc điểm của mạch khuếch đại BJT mắc kiểu CE như sau:

- ▷ Trở kháng vào thấp, trở kháng ra cao;
- ▷ Biểu thức tính hệ số khuếch đại áp K_v có chứa dấu “-”, tức là tín hiệu điện áp ra đảo pha so với tín hiệu điện áp vào, vì vậy mạch này được gọi là mạch khuếch đại đảo;
- ▷ Hệ số khuếch đại điện áp lớn, hệ số khuếch đại dòng lớn;
- ▷ Có thể được sử dụng để khuếch đại công suất tín hiệu nhưng cần đảm bảo mạch luôn làm việc trong miền tích cực để tín hiệu ra không bị méo;
- ▷ Khi sử dụng điện trở nối giữa Emitter và đất sẽ làm tăng độ ổn định của mạch nhưng lại làm giảm hệ số khuếch đại của mạch. Vì vậy nên sử dụng tụ nối giữa Emitter và đất để loại bỏ điện trở tự phân cực Emitter ở chế độ AC, qua đó cải thiện hệ số khuếch đại của mạch.

3.2.3.2 Phân tích mạch khuếch đại CC

Với sơ đồ mắc kiểu CC, tín hiệu vào giữa cực Base và cực Collector, tín hiệu ra lấy giữa cực Emitter và Collector. Dấu hiệu nhận biết sơ đồ này thường là cực Collector nối trực tiếp với nguồn DC hoặc nối qua một điện trở có trị số rất nhỏ tới nguồn DC.

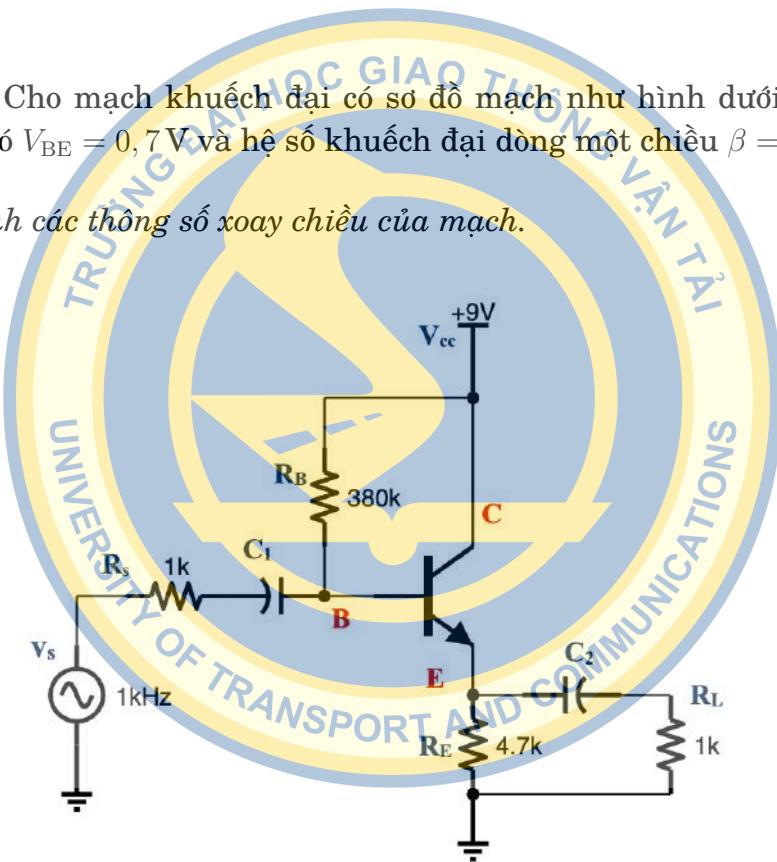
Transistor mắc kiểu CC để khuếch đại tín hiệu nhỏ, tần số thấp được mô hình hóa thành sơ đồ tương đương như biểu diễn trong hình 3.34.



Hình 3.34: a) Sơ đồ BJT mắc kiểu CC và b) Sơ đồ tương đương đương ở chế độ tín hiệu nhỏ, tần số thấp tương ứng.

Ví dụ 3.6. Cho mạch khuếch đại có sơ đồ mạch như hình dưới đây. Biết transistor có $V_{BE} = 0,7\text{V}$ và hệ số khuếch đại dòng một chiều $\beta = 100$.

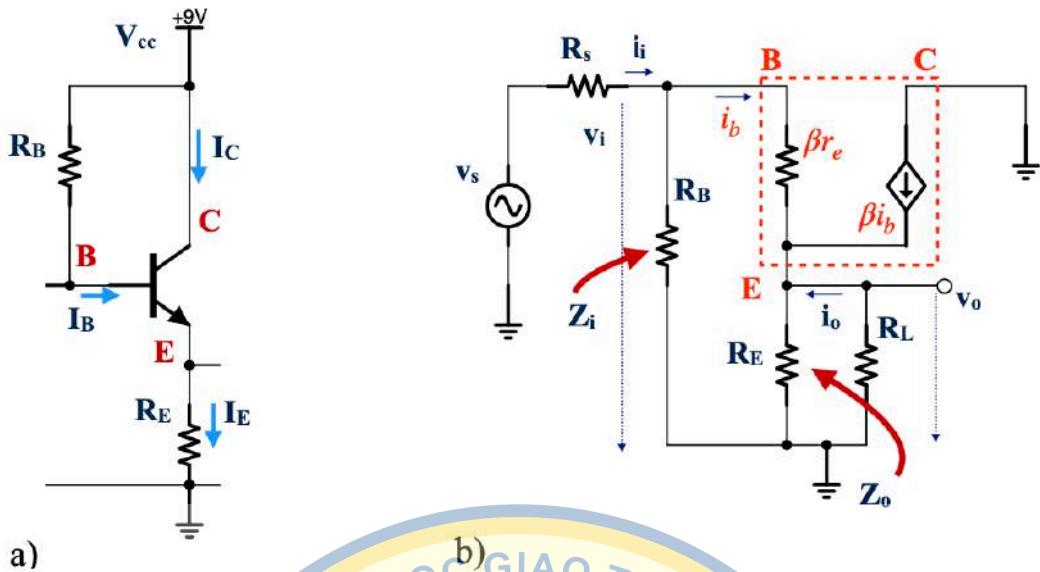
Hãy xác định các thông số xoay chiều của mạch.



Hình 3.35: Một mạch khuếch đại BJT mắc kiểu CC.

* **Bài giải:**

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT



Hình 3.36: a) Sơ đồ tương đương DC và b) Sơ đồ tương đương AC của mạch 3.35.

* **Xét mạch ở chế độ một chiều:** Sơ đồ tương đương một chiều của mạch đã cho được xác định bằng cách bỏ mạch các nhánh có tụ điện, khi đó ta có mạch 3.36(a).

Vì $I_E = (\beta + 1)I_B \approx 100I_B$ nên từ sơ đồ mạch này ta xác định được:

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta}$$

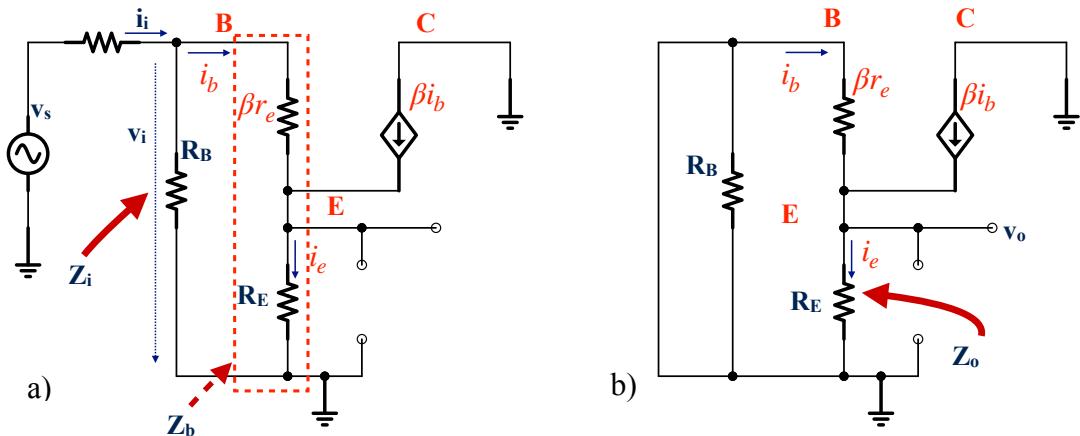
$$\Rightarrow r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

* **Xét mạch ở chế độ xoay chiều:** bằng cách ngắn mạch tụ điện, ngắn mạch nguồn DC với đất và sử dụng sơ đồ tương đương AC của các phần tử ta có mạch 3.36(b).

Sơ đồ xác định trở kháng vào và trở kháng ra được biểu diễn trong hình 3.37.

+ Trở kháng vào được xác định giữa hai cửa vào khi bỏ mạch tải R_L như biểu diễn trong hình 3.37(a) và được biểu diễn theo biểu thức:

$$Z_i = R_B // Z_b$$



Hình 3.37: a) Sơ đồ xác định trở kháng vào và b) Sơ đồ xác định trở kháng ra của mạch 3.36(b).

trong đó:

$$Z_b = \frac{v_i}{i_b} = \frac{i_b \beta r_e + i_e R_E}{i_b} = \beta(r_e + R_E)$$

vì $i_e \approx \beta i_b$.

Suy ra:

$$Z_i = R_B // \beta(r_e + R_E) = \frac{R_B \cdot \beta(r_e + R_E)}{R_B + \beta(r_e + R_E)} \quad (3.28)$$

+ Trở kháng ra được xác định giữa hai cửa ra khi ngắn mạch nguồn tín hiệu. Sơ đồ xác định trở kháng ra được biểu diễn trong hình 3.37(b) và biểu diễn theo biểu thức:

$$Z_o = R_E // r_e = \frac{R_E r_e}{R_E + r_e} \quad (3.29)$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp: Từ sơ đồ tương đương xoay chiều trong hình 3.37(b) ta xác định được:

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{i_b \beta r_e + v_o} \\ = \frac{(i_b + \beta i_b)(R_E // R_L)}{i_b \beta r_e + (i_b + \beta i_b)(R_E // R_L)}$$

Do β rất lớn và $(r_e \ll R_E)$ nên:

$$K_v \approx \frac{(R_E // R_L)}{r_e + (R_E // R_L)} \approx 1 \quad (3.30)$$

Chú ý: nếu mạch không có tải thì:

$$K_v = \frac{R_E}{R_E + r_e} \approx 1$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp toàn phần: áp dụng biểu thức 3.8 ta xác định được:

$$K_{v(tp)} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \times \frac{v_i}{v_s} \\ = K_v \times \frac{Z_i}{R_s + Z_i}$$

+ Hệ số khuếch đại dòng điện: Từ sơ đồ 3.37 ta có:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / R_L}{v_i / Z_i} = K_v \times \frac{Z_i}{R_L} \quad (3.31)$$

Chú ý: nếu mạch không có tải R_L thì:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / R_E}{v_i / Z_i} = K_v \times \frac{Z_i}{R_E}$$

+ Hệ số khuếch đại công suất:

$$K_p = K_v \times K_i \approx K_i$$

Thay giá trị của linh kiện vào các biểu thức trên ta xác định được các thông số xoay chiều của mạch đã cho như sau:

$$r_e = 26,64 \Omega$$

$$K_v = 0,97$$

$$Z_i = 21,01 \text{ k}\Omega$$

$$K_{v(tp)} = 0,93$$

$$Z_o = 26,49 \Omega$$

$$K_i = 20,38$$

$$K_p = 19,77$$

$$K_p = 19,77$$

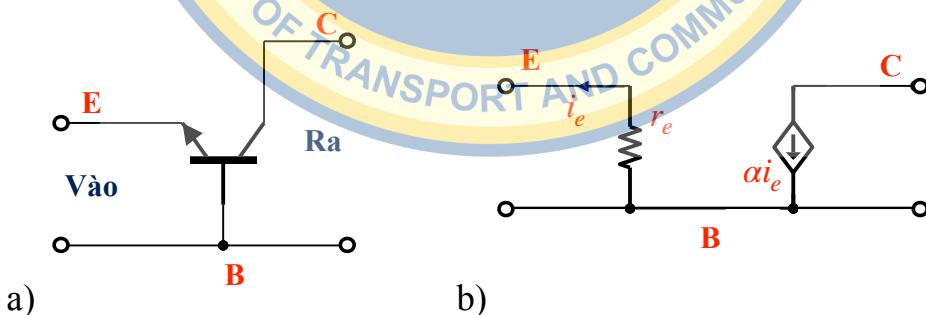
Nhận xét: Từ các biểu thức tính các thông số của mạch khuếch đại CC và kết quả tính toán ở các ví dụ trên rút ra một số nhận xét về đặc điểm của mạch khuếch đại BJT mắc kiểu CC như sau:

- ▷ Trở kháng vào cao, trở kháng ra thấp nên thường được sử dụng để phối hợp trở kháng giữa các tầng CE;
- ▷ $K_v \approx 1$ thể hiện rằng tín hiệu ra đồng pha và có độ lớn xấp xỉ tín hiệu vào, tức là tín hiệu điện áp đầu ra trên cực Emitter có dạng lặp lại của tín hiệu vào. Chính vì vậy sơ đồ CC còn gọi là sơ đồ lặp Emitter.
- ▷ Hệ số khuếch đại dòng lớn trong khi tín hiệu điện áp lại gần như không đổi.

3.2.3.3 Phân tích mạch khuếch đại CB

Với sơ đồ mắc kiểu Base chung (CB), tín hiệu vào giữa cực Emitter và cực Base, tín hiệu ra lấy giữa cực Collector và cực Base. Dấu hiệu nhận biết sơ đồ này thường là cực Base nối đất hoặc nối qua một tụ điện xuống đất.

Transistor BJT mắc kiểu CB để khuếch đại tín hiệu nhỏ, tần số thấp được mô hình hóa thành sơ đồ tương đương như biểu diễn trong hình 3.38.

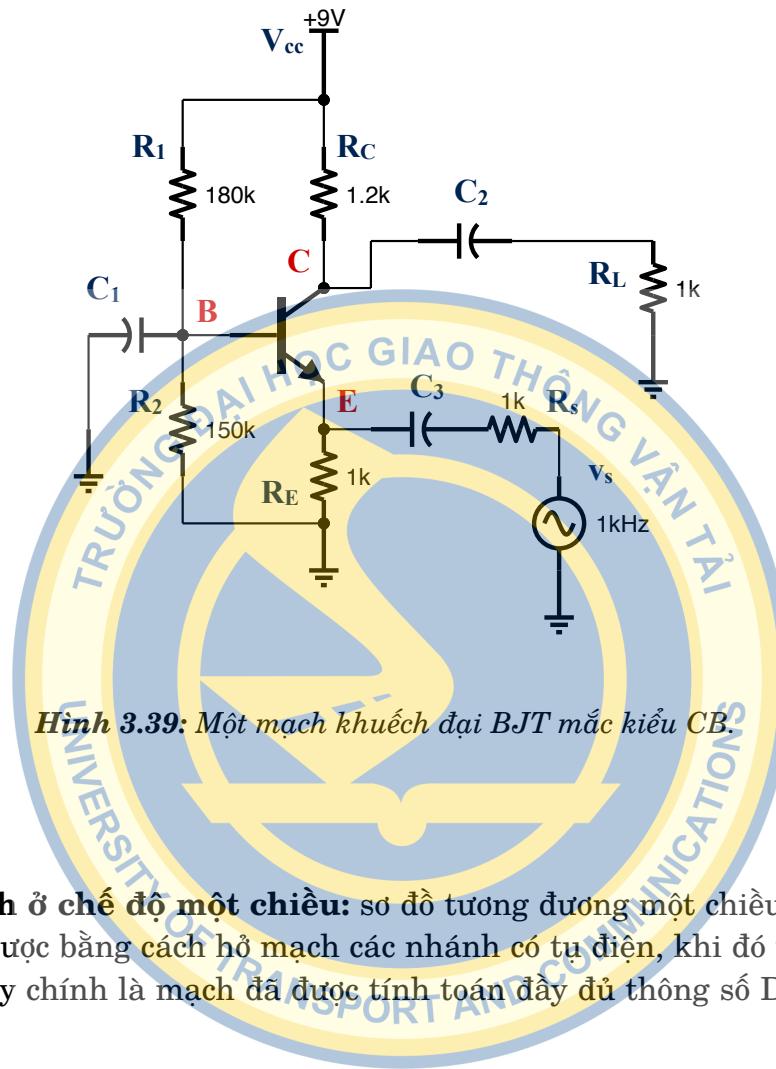


Hình 3.38: a) Sơ đồ BJT mắc kiểu CB và b) Sơ đồ tương đương ở chế độ tín hiệu nhỏ, tần số thấp tương ứng.

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

Ví dụ 3.7. Cho mạch khuếch đại có sơ đồ mạch như hình 3.39. Biết transistor có $V_{BE} = 0,7V$ và hệ số khuếch đại dòng một chiều $\beta = 100$.

Hãy xác định các thông số xoay chiều của mạch:

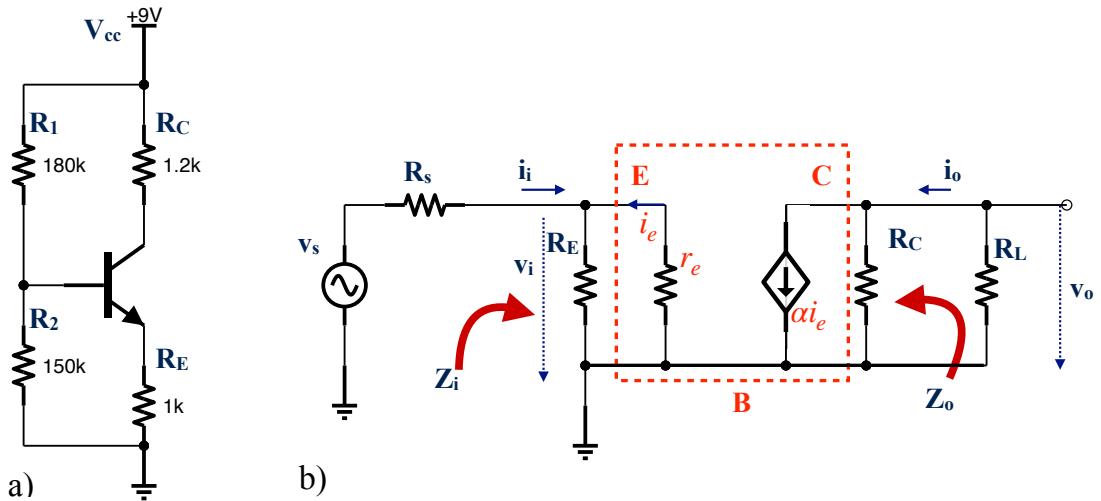


* **Bài giải:**

* **Xét mạch ở chế độ một chiều:** sơ đồ tương đương một chiều của mạch đã cho có được bằng cách bỏ mạch các nhánh có tụ điện, khi đó ta có mạch 3.40(a). Đây chính là mạch đã được tính toán đầy đủ thông số DC trong ví dụ 3.5.

* **Xét mạch ở chế độ xoay chiều:** bằng cách ngắn mạch tụ điện và sử dụng sơ đồ tương đương mắc kiểu CB của BJT như trong hình 3.38 ta được sơ đồ tương đương AC của mạch đã cho như hình 3.40(b). Trong sơ đồ này không có điện trở R_1, R_2 vì hai điện trở này bị nối tắt do có tụ C_1 nối từ Base xuống đất.

+ Trở kháng vào Z_i . Từ sơ đồ mạch ta xác định được Z_i khi bỏ mạch tải chính là đoạn mạch ($R_E // r_e$) nên được tính theo biểu thức như sau:



Hình 3.40: a) Sơ đồ tương đương DC và b) Sơ đồ tương đương AC của mạch 3.39.

$$Z_i = \frac{R_E r_e}{R_E + r_e} \quad (3.32)$$

Do điện trở xoay chiều r_e thường có giá trị rất nhỏ so với điện trở phân cực R_E nên có thể coi:

$$Z_i \approx r_e$$

+ Trở kháng ra Z_o được xác định khi ngắn mạch đầu vào nên từ sơ đồ mạch ta có:

$$Z_o = R_C \quad (3.33)$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp: từ sơ đồ mạch tương đương AC ta xác định được K_v theo biểu thức sau:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\alpha i_e (R_C // R_L)}{-i_e r_e}$$

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

Suy ra:

$$K_v = \frac{\alpha(R_C//R_L)}{r_e} \quad (3.34)$$

Khi hệ số truyền đạt dòng $\alpha \approx 1$ thì:

$$K_v \approx \frac{(R_C//R_L)}{r_e}$$

Chú ý: nếu mạch không có tải thì:

$$K_v = \frac{R_C}{r_e}$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp toàn phần: áp dụng biểu thức 3.8 ta xác định được:

$$\begin{aligned} K_{v(tp)} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \times \frac{v_i}{v_s} \\ &= K_v \times \frac{Z_i}{R_s + Z_i} \end{aligned}$$

+ Hệ số khuếch đại dòng điện: Từ sơ đồ 3.40(b) ta có:

$$\begin{aligned} K_i &= \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/R_L}{v_i/Z_i} \\ &= K_v \times \frac{Z_i}{R_L} = \frac{R_C//R_L}{r_e} \times \frac{Z_i}{R_L} \\ &= \frac{1}{r_e} \times \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \times \frac{r_e}{R_L} \end{aligned}$$

Suy ra:

$$K_i = \frac{R_C}{R_C + R_L} \quad (3.35)$$

Chú ý: nếu mạch không có tải R_L thì:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/R_C}{v_i/Z_i} = K_v \times \frac{Z_i}{R_C} = \frac{R_C}{r_e} \times \frac{r_e}{R_C} = 1$$

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

+ Hệ số khuếch đại công suất: được xác định theo biểu thức:

$$K_p = K_v \times K_i$$

Thay các giá trị của linh kiện theo sơ đồ đã cho ta tính được các thông số AC của mạch như sau:

$$r_e = 13,98 \Omega$$

$$K_v = 39,02$$

$$Z_i = 13,98 \text{ k}\Omega$$

$$K_{v(tp)} = 5,38$$

$$Z_o = 1,2 \Omega$$

$$K_i = 0,54$$

$$K_p = 21,07$$

Nhận xét: Từ các biểu thức tính các thông số của mạch khuếch đại CB và kết quả tính toán ở các ví dụ trên rút ra một số nhận xét về đặc điểm của mạch khuếch đại BJT mắc kiểu CB như sau:

- ▷ Trở kháng vào rất thấp, trở kháng ra cao;
- ▷ Hệ số khuếch đại điện áp lớn, hệ số khuếch đại dòng nhỏ (≈ 1 nếu không tải);
- ▷ Trở kháng vào thấp nên hệ số khuếch đại áp toàn phần bị giảm mạnh;
- ▷ Thường được sử dụng ở đầu vào mạch khuếch đại cao tần vì hệ số khuếch đại áp lớn và trở kháng vào thấp phù hợp với trở kháng của anten thu.

3.2.4 Đánh giá các sơ đồ khuếch đại BJT

Để đánh giá ưu nhược điểm của từng loại sơ đồ mắc ở trên có thể dựa trên hai khía cạnh, thứ nhất là so sánh thông số xoay chiều của mỗi sơ đồ và thứ hai là so sánh họ đặc tuyến Volt-Ampere của chúng.

3.2.4.1 So sánh thông số giữa các mạch khuếch đại

Từ những phân tích chi tiết các sơ đồ đã trình bày ở trên, bảng 3.4 tổng kết đặc điểm của từng sơ đồ như sau:

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

Bảng 3.4: So sánh các thông số của mạch CE, CC và CB.

Sơ đồ	Z_i	Z_o	K	Pha giữa tín hiệu vào/ra
Emitter chung (CE)	Trung bình	Trung bình - Cao	$K_v >> K_i >> K_p$ lớn	Đảo pha
Collector chung (CC)	Cao	Thấp	$K_v \approx 1$ $K_i > 1$ K_p thấp nhất	Đồng pha
Base chung (CB)	Thấp	Trung bình - Cao	$K_v > 1$ $K_i \approx 1$ K_p trung bình	Đồng pha

3.2.4.2 Các họ đặc tuyến Volt-Ampere của BJT

Đặc tuyến Volt-Ampere cho biết mối quan hệ giữa dòng và áp vì vậy nó phản ánh cách thức mà mỗi linh kiện hoạt động. Với BJT, đặc tuyến quan trọng nhất là đặc tuyến vào và ra, vì vậy nó tùy thuộc vào từng cách măc của BJT là Emitter chung - CE, Collector chung - CC hay Base chung - CB mà dạng đặc tuyến khác nhau và qua đó phản ánh đặc điểm của linh kiện.

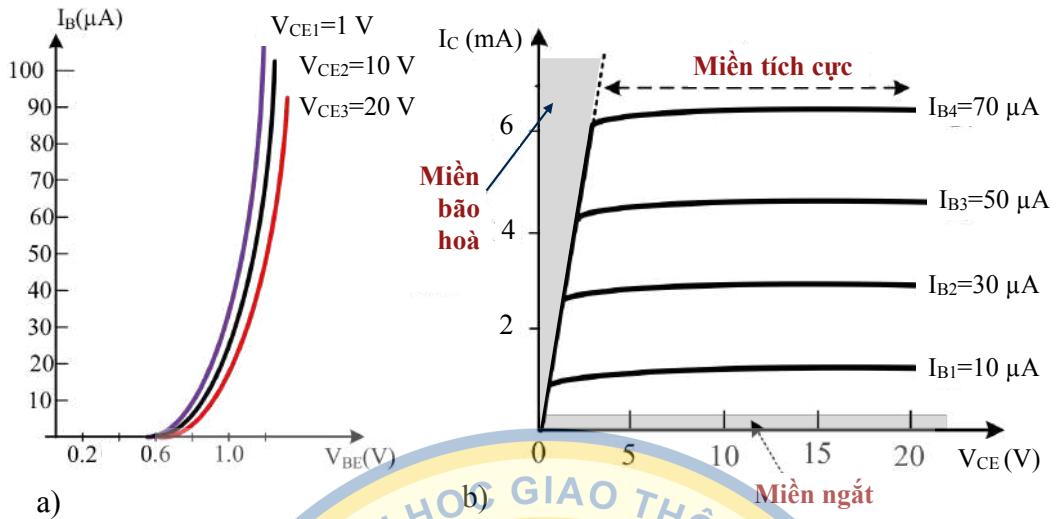
* Họ đặc tuyến vào / ra của sơ đồ măc CE

Trong sơ đồ măc BJT kiểu CE, tín hiệu vào được cho giữa cực Base và Emitter còn tín hiệu ra được lấy ra giữa cực Collector và Emitter. Đây là sơ đồ măc transistor BJT phổ biến nhất.

+ Đặc tuyến vào được xác định bằng cách cho V_{CE} cố định, thay đổi điện áp V_{BE} và ghi lại các giá trị của I_B . Tập hợp các đường đặc tuyến vào tại các giá trị V_{CE} khác nhau gọi là họ đặc tuyến vào, xem ví dụ minh họa trong hình 3.41(a).

+ Đặc tuyến ra được xác định bằng cách cho dòng I_B cố định, thay đổi điện áp V_{CE} và ghi lại các giá trị của dòng I_C . Tập hợp các đường đặc tuyến ra tại các giá trị I_B khác nhau gọi là họ đặc tuyến ra, xem ví dụ minh họa trong

hình 3.41(b).



Hình 3.41: Ví dụ về a) Hợp đặc tuyển vào và b) Hợp đặc tuyển ra của một BJT mắc kiểu sơ đồ CE.

Nhận xét:

- ▷ Đặc tuyển vào của sơ đồ mắc CE giống với đặc tuyển của chuyển tiếp P-N khi phân cực thuận; dòng I_B tăng theo sự gia tăng của V_{BE} nhưng với mức độ khác nhau theo đường cong phi tuyến (hàm mũ) của biểu thức Shockley 2.2 và ít phụ thuộc vào các giá trị khác nhau của V_{CE} .
- ▷ Đặc tuyển ra có ba miền rõ rệt là miền ngắt, miền tích cực và miền bão hòa¹¹. Trong miền tích cực, dòng I_C gần như không đổi khi V_{CE} thay đổi. Giá trị của dòng ra I_C lớn hơn nhiều lần so với dòng vào I_B .

* Hợp đặc tuyển vào / ra của sơ đồ mắc CC

Trong sơ đồ mắc BJT kiểu CC, tín hiệu vào được cho giữa cực Base và Collector còn tín hiệu ra được lấy ra giữa cực Emitter và Collector.

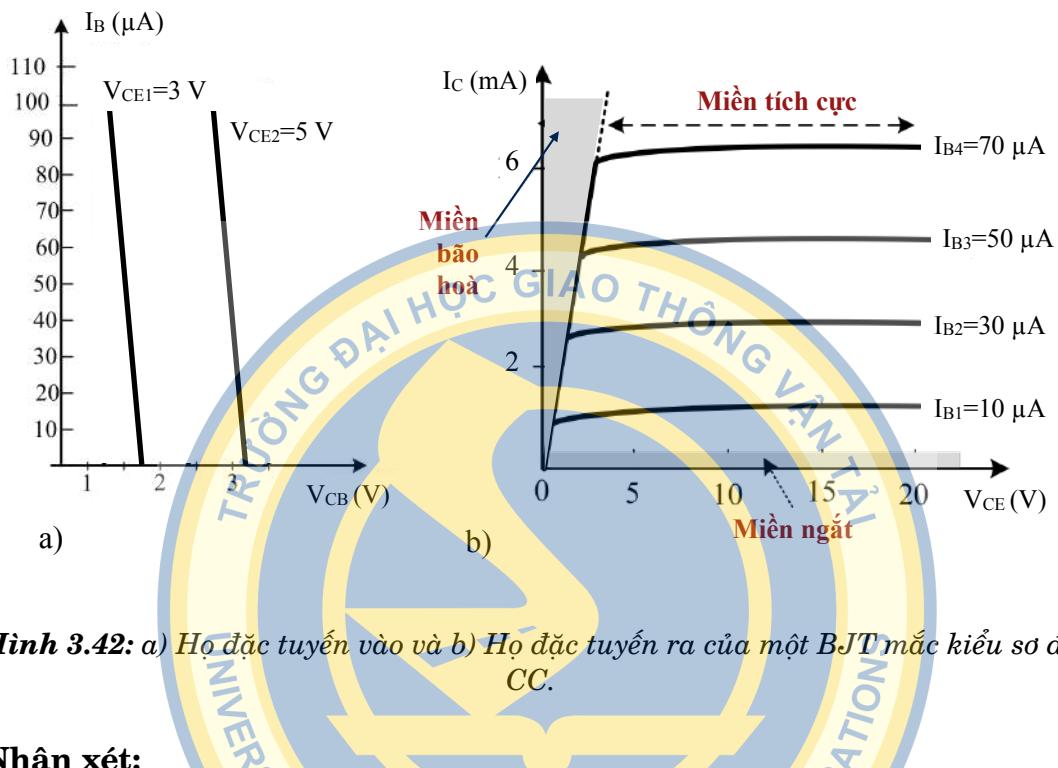
- + Đặc tuyển vào được xác định bằng cách cho V_{CE} cố định, thay đổi điện áp V_{CB} và ghi lại các giá trị của I_B . Tập hợp các đường đặc tuyển vào tại các giá

¹¹khái niệm về các miền này đã được trình bày trong phần 2.3.3

3.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG BJT

trị V_{CB} khác nhau gọi là họ đặc tuyến vào, xem ví dụ minh họa trong hình 3.42(a).

+ Đặc tuyến ra được xác định bằng cách cho dòng I_B cố định, thay đổi điện áp V_{CE} và ghi lại các giá trị của dòng I_E . Tập hợp các đường đặc tuyến ra tại các giá trị I_B khác nhau gọi là họ đặc tuyến ra, xem ví dụ minh họa trong hình 3.42(b).



Hình 3.42: a) Họ đặc tuyến vào và b) Họ đặc tuyến ra của một BJT măc kiểu sơ đồ CC.

Nhận xét:

- ▷ Đặc tuyến vào của sơ đồ măc CC có dạng gần như song song tại các giá trị khác nhau của V_{CE} . Thêm nữa, độ dốc của các đường đặc tuyến này rất lớn, tức là dòng I_C tăng rất nhanh theo V_{CB} .
- ▷ Đặc tuyến ra của sơ đồ CC có dạng giống như trong sơ đồ CE, tức là dòng ra I_E lớn hơn nhiều lần và gần như không đổi với mỗi giá trị của dòng vào I_E .

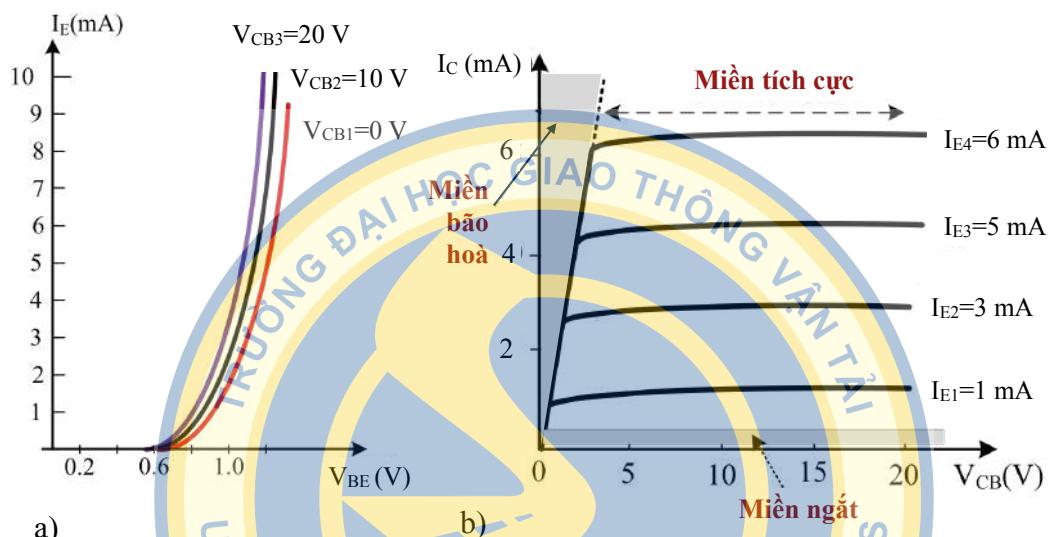
* Họ đặc tuyến vào / ra của sơ đồ măc CB

Trong sơ đồ măc BJT kiểu CB, tín hiệu vào được cho giữa cực Emitter và Base còn tín hiệu ra được lấy ra giữa cực Collector và Base.

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

+ Đặc tuyến vào được xác định bằng cách cho V_{CB} cố định, thay đổi điện áp V_{BE} và ghi lại các giá trị của I_E . Tập hợp các đường đặc tuyến vào tại các giá trị V_{CB} khác nhau gọi là họ đặc tuyến vào, xem ví dụ minh họa trong hình 3.43(a).

+ Đặc tuyến ra được xác định bằng cách cho dòng I_E cố định, thay đổi điện áp V_{CB} và ghi lại các giá trị của dòng I_C . Tập hợp các đường đặc tuyến ra tại các giá trị I_E khác nhau gọi là họ đặc tuyến ra, xem ví dụ minh họa trong hình 3.43(b).



Hình 3.43: a) Họ đặc tuyến vào và b) Họ đặc tuyến ra của một BJT măc kiểu sơ đồ CB.

Nhận xét: Hình dạng của họ đặc tuyến vào và ra giống như trong sơ đồ CE nhưng giá trị của dòng ra I_C xấp xỉ bằng dòng vào I_E .

3.3 MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

Việc phân tích sơ đồ mạch khuếch đại sử dụng FET hoàn toàn tương tự như các bước đã thực hiện đối với BJT. Đó là phân tích sơ đồ cấp nguồn một chiều để xác định điểm làm việc sau đó xác định thông số xoay chiều từ sơ đồ tương đương AC.

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

3.3.1 Các sơ đồ cấp nguồn một chiều cho FET

Cũng giống như BJT, FET cần được phân cực một cách thích hợp để có thể hoạt động như một phần tử khuếch đại. Có ba loại FET là JFET, D-MOSFET và E-MOSFET như đã trình bày 2.4 và các sơ đồ phân cực cơ bản đều có thể áp dụng cho cả ba loại này. Khi xác định các thông số của mạch cần sử dụng phương trình đặc trưng cho FET trong miền bão hòa vì khi FET hoạt động ở chế độ khuếch đại thì đây chính là miền làm việc.

Với tất cả các FET, dòng cực cửa $I_G = 0$ còn dòng cực máng I_D trong miền bão hòa có biểu thức được ghi trong bảng 3.5.

Bảng 3.5: Phương trình đặc trưng của FET trong miền bão hòa.

Loại FET	Kênh N	Kênh P
JFET D-MOSFET	$V_P < V_{GS} < 0$ $I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2$	$V_{GS} > V_P > 0$ $I_D = I_{DSS}(\frac{V_{GS}}{V_P} - 1)^2$
E-MOSFET	$V_{GS} > V_{th} > 0$ $I_D = k_n(V_{GS} - V_{th})^2$	$V_{GS} < V_{th} < 0$ $I_D = k_n(V_{SG} + V_{th})^2$

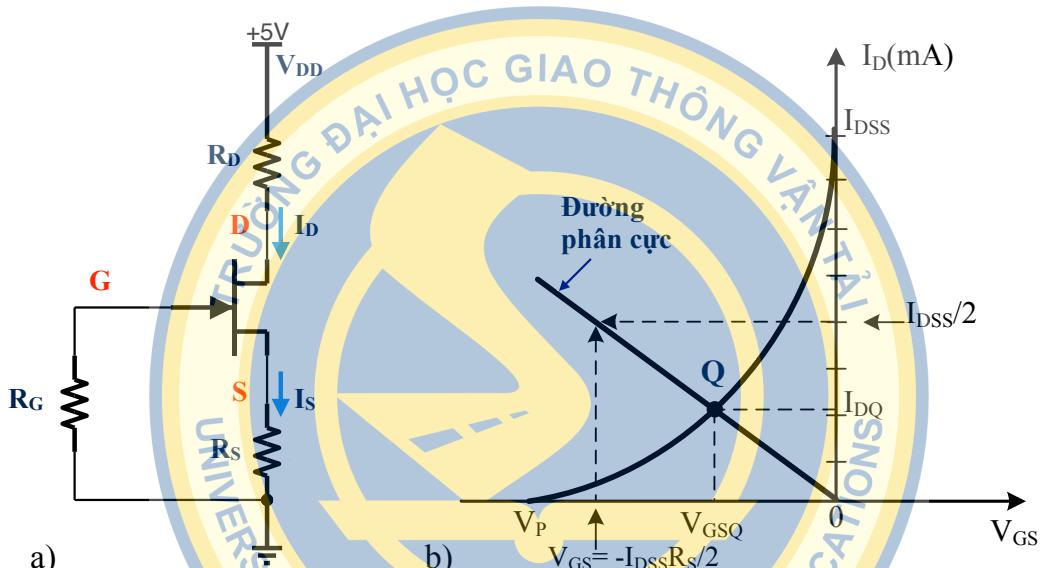
Việc xác định được dòng I_D là dựa vào phương trình đặc trưng đã cho trong bảng 3.5 và phương trình thể hiện mối quan hệ giữa I_D và V_{GS} có được từ sơ đồ phân cực. Khi này có thể tính được I_D bằng một trong hai phương pháp:

- ▷ Phương pháp đồ thị: Vẽ đặc tuyến truyền đạt và vẽ đường phân cực đầu vào. Hai đường này cắt nhau tại đâu thì sẽ xác định được điểm làm việc tĩnh Q có tọa độ I_{DQ} và V_{GS} .

- Phương pháp đại số: Giải hệ phương trình gồm hai biểu thức trên để xác định giá trị của I_D . Do dòng cực máng bão hòa là dòng lớn nhất nên chỉ lấy nghiệm có giá trị lớn hơn 0 và nhỏ hơn I_{DSS} .

3.3.1.1 Sơ đồ tự phân cực

Trong sơ đồ này điện cực nguồn có điện áp tùy thuộc vào giá trị của dòng cực máng, nên được gọi là tự phân cực. Sơ đồ thường được sử dụng để phân cực cho JFET hoặc D-MOSFET như biểu diễn trong hình 3.44(a). Trong đó thông số của JFET sẽ được cho trước là điện áp thắt V_P và dòng cực máng bão hòa I_{DSS} .



Hình 3.44: a) Ví dụ sơ đồ phân cực kiểu tự phân cực cho JFET và b) Xác định Q bằng phương pháp đồ thị.

Từ sơ đồ mạch 3.44 ta có:

$$I_G R_G + V_{GS} + I_S R_S = 0$$

suy ra:

$$V_{GS} = -I_D R_S \quad (3.36)$$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

gọi là **đường phân cực**.

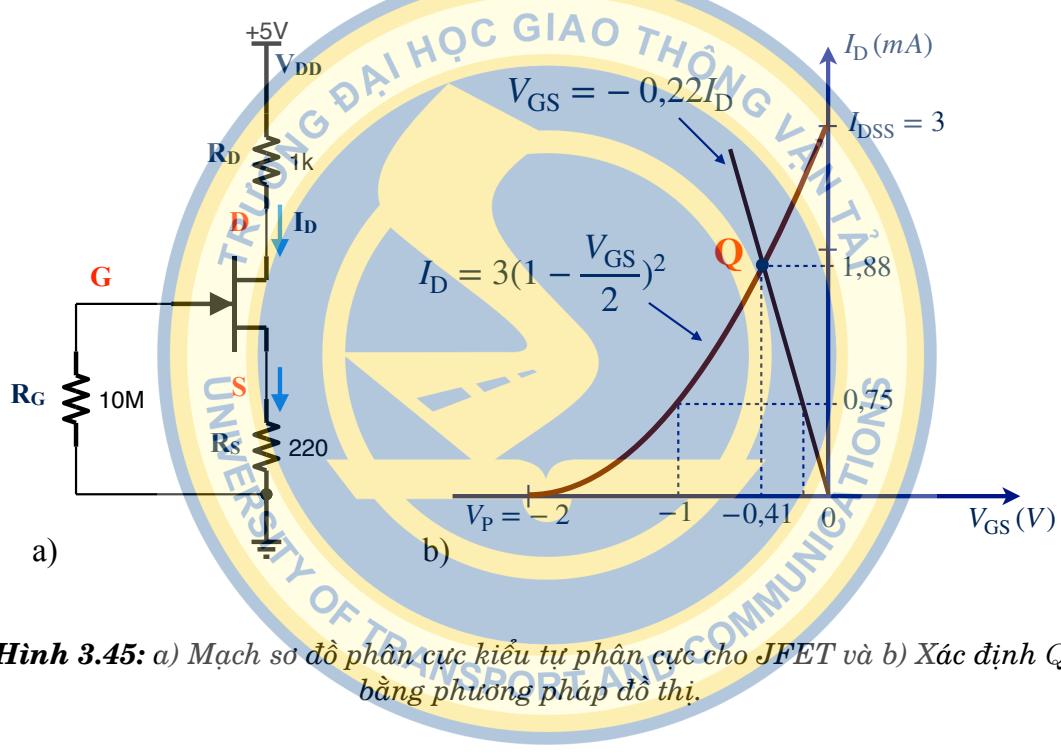
Vì FET loại D-MOSFET nên hàm truyền đạt có dạng biểu thức:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Từ hai biểu thức trên xác định được I_D và V_{GS} bằng cách giải phương trình hoặc theo cách đồ thị như biểu diễn trong hình 3.44(b).

Ví dụ 3.8. Cho mạch phân cực cho JFET như trong hình 3.45(a), biết JFET có điện áp thắt $V_P = -2$ V; dòng cực máng bão hòa $I_{DSS} = 3$ mA.

Hãy xác định điểm làm việc tĩnh $Q(I_{DQ}; V_{GSQ}; V_{DSQ})$ của mạch.



Hình 3.45: a) Mạch sơ đồ phân cực kiểu tự phân cực cho JFET và b) Xác định Q bằng phương pháp đồ thị.

* **Bài giải:**

+ **Cách 1:** Giải hệ phương trình

Do dòng cực cửa $I_G = 0$, từ sơ đồ mạch ta có:

$$V_{GS} = -I_D R_S = -0,22 I_D$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

mà phương trình đặc trưng của JFET trong miền bão hòa là:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

suy ra:

$$I_D = 3 \left(1 - \frac{0,22I_D}{2}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_D = 1,88 \text{ mA}; 43,85 \text{ mA}$$

Trong hai nghiệm trên, giá trị 43,85, mA bị loại vì lớn hơn giá trị dòng bão hòa 3 mA, do vậy chọn giá trị dòng $I_D = 1,88 \text{ mA}$. Từ đó xác định được điện áp $V_{GS} = -0,41 \text{ V}$ và $V_{DS} = 2,7 \text{ V}$.

Vậy điểm làm việc tĩnh của mạch là $Q(1,88 \text{ mA}; -0,41 \text{ V}; 2,7 \text{ V})$.

+ **Cách 2:** Dùng phương pháp đồ thị

Vẽ đồ thị của hàm truyền đạt:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 3 \left(1 - \frac{V_{GS}}{2}\right)^2$$

đây một phần của đường parabol đi qua ba điểm có tọa độ:

$$\begin{cases} V_{GS} = 0 \text{ V} \\ I_D = I_{DSS} = 3 \text{ mA} \end{cases} \quad \begin{cases} I_D = 0 \text{ mA} \\ V_{GS} = V_P = -2 \text{ V} \end{cases} \quad \begin{cases} V_{GS} = V_P/2 = -1 \text{ V} \\ I_D = I_{DSS}/4 = 0,75 \text{ mA} \end{cases}$$

Vẽ đường phân cực:

$$V_{GS} = -I_D R_S = -0,22I_D$$

đường thẳng này đi qua hai điểm có tọa độ:

$$\begin{cases} V_{GS} = 0 \text{ V} \\ I_D = 0 \text{ mA} \end{cases} \quad \begin{cases} I_D = 0,75 \text{ mA} \\ V_{GS} = -0,165 \text{ V} \end{cases}$$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

Xác định điểm làm việc tĩnh của mạch chính là giao của hai đồ thị trên như thể hiện trong hình 3.45. Do đó xác định được ($I_{DQ} = 1,88 \text{ mA}$; $V_{GSQ} = -0,41 \text{ mV}$).

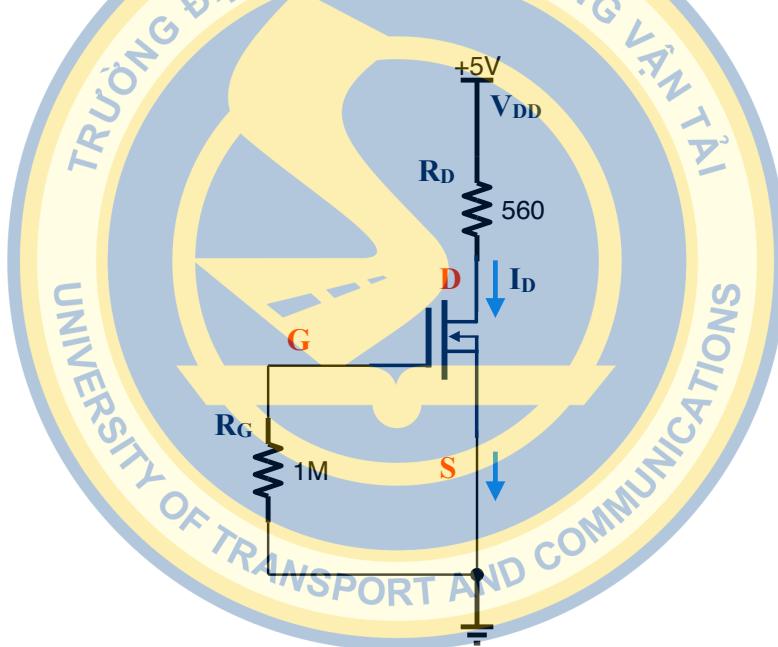
Từ sơ đồ mạch ta lại có:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S) = 5 - 1,88 \times 1,22 = 2,7 \text{ V}$$

Vậy điểm làm việc tĩnh của mạch là $Q(1,88 \text{ mA}; -0,41 \text{ V}; 2,7 \text{ V})$.

3.3.1.2 Sơ đồ phân cực zero

Trong sơ đồ này cả điện cực cửa và cực nguồn đều có điện áp bằng 0, nên gọi là phân cực zero và thường được áp dụng cho D-MOSFET như biểu diễn trong hình 3.46.



Hình 3.46: Sơ đồ phân cực cho D-MOSFET kiểu phân cực zero.

Từ sơ đồ mạch 3.46 ta có:

$$V_{GS} = 0 \text{ V}$$

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

Vì dòng cực máng I_D của D-MOSFET được biểu diễn dưới dạng biểu thức:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_D = I_{DSS}$$

Vậy xác định được :

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Ví dụ 3.9. Cho mạch phân cực zero như trong hình 3.46 biết D-MOSFET có $V_P = -2$ V và $I_{DSS} = 3$ mA.

Hãy xác định giá trị dòng cực máng và điện áp giữa cực máng và cực nguồn.

* **Bài giải:**

Do điện áp $V_{GS} = 0$ nên từ biểu thức 2.12 suy ra dòng cực máng chính là dòng cực máng bão hòa:

$$I_D = I_{DSS} = 3 \text{ mA}$$

Từ đó xác định được điện áp V_{DS} như sau:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_{DSS} R_D = 5 - 3 \times 0,56 = 3,32 \text{ V}$$

3.3.1.3 Sơ đồ phân cực kiểu hồi tiếp điện áp

Sơ đồ này thường được áp dụng cho D-MOSFET hoặc E-MOSFET như biểu diễn trong hình 3.47.

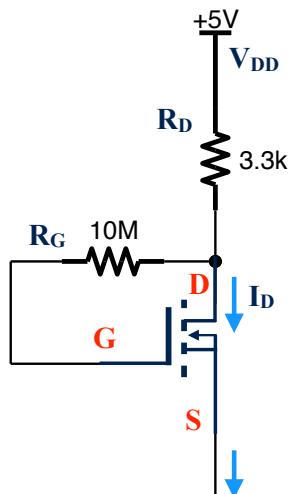
Vì dòng cực cửa $I_G = 0$ nên từ sơ đồ mạch 3.47 ta có:

$$V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

với dòng cực máng I_D của E-MOSFET được biểu diễn dưới dạng biểu thức 2.15:

$$I_D = k_n (V_{GS} - V_{th})^2$$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET



Hình 3.47: Sơ đồ phân cực cho E-MOSFET kiểu hồi tiếp điện áp.

Từ hai biểu thức trên xác định được I_D và V_{GS} theo cách đồ thị hoặc giải phương trình.

Ví dụ 3.10. Cho mạch phân cực kiểu hồi tiếp điện áp cho E-MOSFET như hình 3.47, biết transistor có $V_{th} = 1\text{ V}$. Biết khi dòng $I_D = 2\text{ mA}$ tại điện áp $V_{GS} = 3\text{ V}$.

Hãy xác định điểm làm việc tĩnh $Q(I_{DQ}; V_{GSQ}; V_{DSQ})$.

* **Bài giải:**

Từ sơ đồ mạch ta thấy $V_G = V_D$ do dòng cực của $I_G = 0$.

Suy ra: $V_{GS} = V_{DS}$

Ta lại có:

$$\begin{aligned} V_{DD} &= I_D R_D + V_{DS} \\ \Rightarrow V_{GS} &= V_{DD} - I_D R_D = 5 - 3,3I_D \end{aligned}$$

với dòng cực máng I_D của E-MOSFET được biểu diễn dưới dạng biểu thức 2.15:

$$I_D = k_n(V_{GS} - V_{th})^2$$

Khi dòng $I_D = 2 \text{ mA}$ thì điện áp $V_{GS} = 3 \text{ V}$, suy ra hệ số k_n như sau:

$$\begin{aligned} 2 &= k_n(3 - 1)^2 \\ \Rightarrow k_n &= 0,5 \text{ mA/V}^2 \end{aligned}$$

Vậy dòng I_D được tính theo biểu thức:

$$I_D = 0,5(V_{GS} - 1)^2$$

Giải hệ phương trình sau để tìm giá trị của I_D và V_{GS} :

$$\begin{cases} V_{GS} = 5 - 3,3I_D \\ I_D = 0,5(V_{GS} - 1)^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{D1} = 0,82 \\ I_{D2} = 1,78 \end{cases}$$

Ung với các giá trị trên của I_D thì điện áp V_{GS} là:

$$\begin{cases} V_{GS1} = 2,29 \\ V_{GS2} = -0,87 \end{cases}$$

Với E-MOSFER kênh N, cần có điều kiện $V_{GS} > V_{th} > 0$ nên nghiệm được chọn là:

$$\begin{cases} I_{D1} = 0,82 \text{ mA} \\ V_{GS1} = 2,29 \text{ V} \end{cases}$$

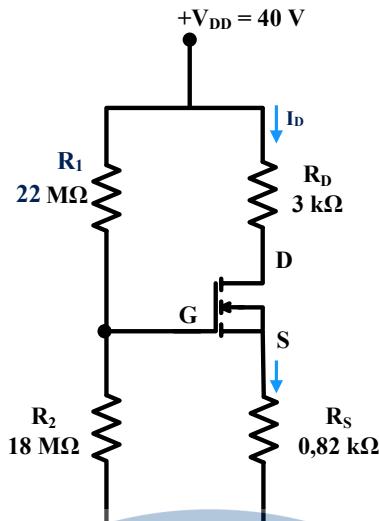
Do vậy, điểm làm việc tĩnh của mạch là $Q(0,82 \text{ mA}; 2,29 \text{ V}; 2,29 \text{ V})$.

3.3.1.4 Sơ đồ phân cực kiểu mạch phân áp

Sơ đồ này sử dụng mạch phân áp R_1, R_2 và có thể áp dụng cho tất cả các loại FET như một ví dụ được cho trong hình 3.48.

Do dòng cực của $I_G = 0$ nên từ sơ đồ mạch 3.48 ta có:

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET



Hình 3.48: Sơ đồ phân cực cho E-MOSFET kiểu mạch phân áp.

$$V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD}$$

Vì dòng cực máng I_D của E-MOSFET được biểu diễn dưới dạng biểu thức 2.15:

$$I_D = k_n(V_{GS} - V_{th})^2$$

hai biểu thức trên xác định được I_D và V_{GS} theo cách đồ thị hoặc giải phương trình.

Ví dụ 3.11. Cho sơ đồ phân cực như hình 3.48, với $V_{th} = 5 \text{ V}$; $I_D = 3 \text{ mA}$ tại $V_{GS} = 10 \text{ V}$.

Hãy xác định điểm công tác tĩnh $Q(I_{DQ}; V_{GSQ}; V_{DSQ})$.

* **Bài giải:**

Khi dòng $I_D = 3 \text{ mA}$ thì điện áp $V_{GS} = 10 \text{ V}$, suy ra hệ số k_n như sau:

$$3 = k_n(10 - 5)^2 \\ \Rightarrow k_n = 0,12 \text{ mA/V}^2$$

Vậy dòng I_D được tính theo biểu thức:

$$I_D = 0,12(V_{GS} - 5)^2$$

Vì dòng cực cửa bằng 0 nên điện áp cực cửa được tính theo biểu thức:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} = \frac{18}{18 + 22} \times 40 = 18 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - I_D R_S = 18 - 0,82 I_D$$

$$\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S) = 40 - 3,82 I_D$$

Giải hệ phương trình sau để tìm giá trị¹² của I_D và V_{GS} :

$$\begin{cases} V_{GS} = 18 - 0,82 I_D \\ I_D = 0,12(V_{GS} - 5)^2 \end{cases}$$

Vậy điểm làm việc tinh của mạch là $Q(I_{DQ}; V_{GSQ}; V_{DSQ}) = Q(6,72 \text{ mA}; 12,49 \text{ V}; 14,33 \text{ V})$.

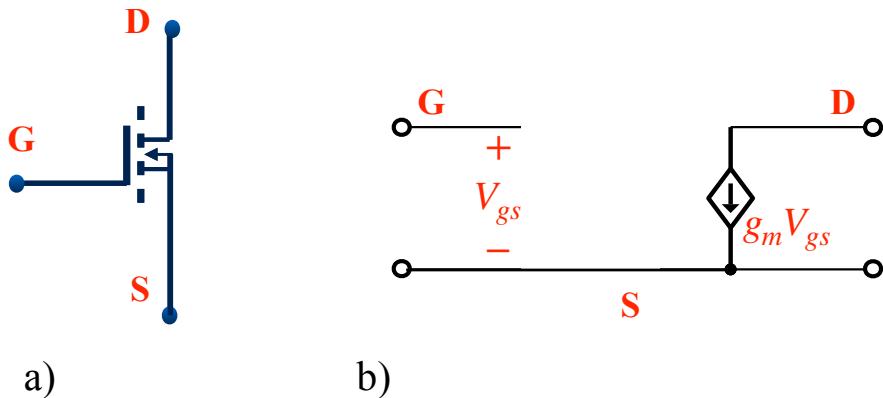
3.3.2 Các sơ đồ mắc FET

Khi FET hoạt động ở chế độ xoay chiều sẽ được biểu diễn bằng sơ đồ tương đương như hình 3.49. Với g_m là độ hổ dẫn [5] của kênh dẫn, biểu thị sự thay đổi của dòng i_d theo v_{gs} tại điểm làm việc tinh Q , được xác định theo biểu thức:

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}}|_{v_{DSQ}} \quad (3.37)$$

¹²sao cho $I_D > 0$ và $V_{GS} > V_{th}$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET



Hình 3.49: a) FET và b) Sơ đồ tương đương AC [5].

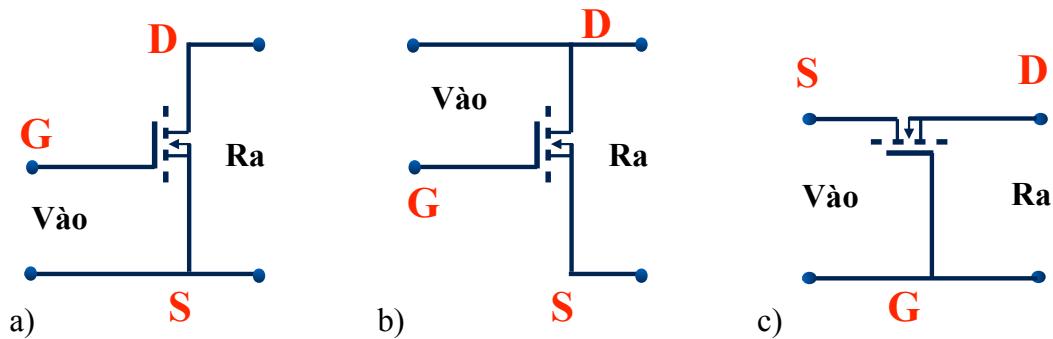
Vì vậy, với mỗi loại FET giá trị g_m sẽ được xác định theo biểu thức riêng như thể hiện trong bảng 3.6.

Bảng 3.6: Phương trình xác định độ hổ dãn của FET kênh N trong miền tích cực.

Loại FET	Dòng cực máng	Độ hổ dãn
JFET D-MOSFET	$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$	$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right)$
E-MOSFET	$I_D = k_n (V_{GS} - V_{th})^2$	$g_m = 2k_n (V_{GSQ} - V_{th})$

Sơ đồ mắc FET là sơ đồ thể hiện cách đưa tín hiệu vào và lấy tín hiệu ra trên các cực của FET. Có ba cách mắc transistor FET như minh họa trong hình 3.50:

- + Cực nguồn chung - CS (*Common Source configuration*): tín hiệu vào giữa cực Gate và cực Source, tín hiệu ra lấy giữa cực Drain và cực Source.
- + Cực máng chung - CD (*Common Drain configuration*): tín hiệu vào giữa cực Gate và cực Drain, tín hiệu ra lấy giữa cực Source và cực Drain.
- + Cực cửa chung - CG (*Common Gate configuration*): tín hiệu vào giữa cực Source và cực Gate, tín hiệu ra lấy giữa cực Drain và cực Gate.

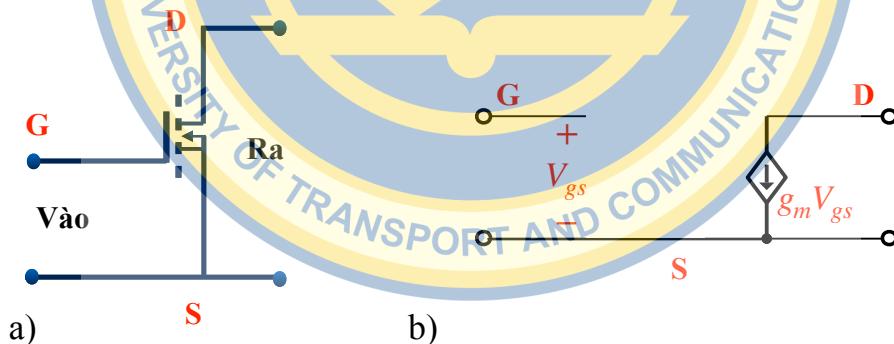


Hình 3.50: Các cách mắc FET: a) CS, b) CD và c) CG.

Cách xác định thông số xoay chiều của mạch khuếch đại FET được thực hiện theo nguyên tắc chung đã trình bày trong phần 3.1.3. Tuy nhiên, do tính chất của FET là dòng cực cửa $I_G = 0$ nên các sơ đồ CS và CD không có hệ số khuếch đại dòng điện vì dòng cực cửa là dòng vào của các sơ đồ này. Chỉ có sơ đồ CG mới có cả hệ số khuếch đại điện áp và dòng điện.

3.3.2.1 Phân tích mạch khuếch đại CS

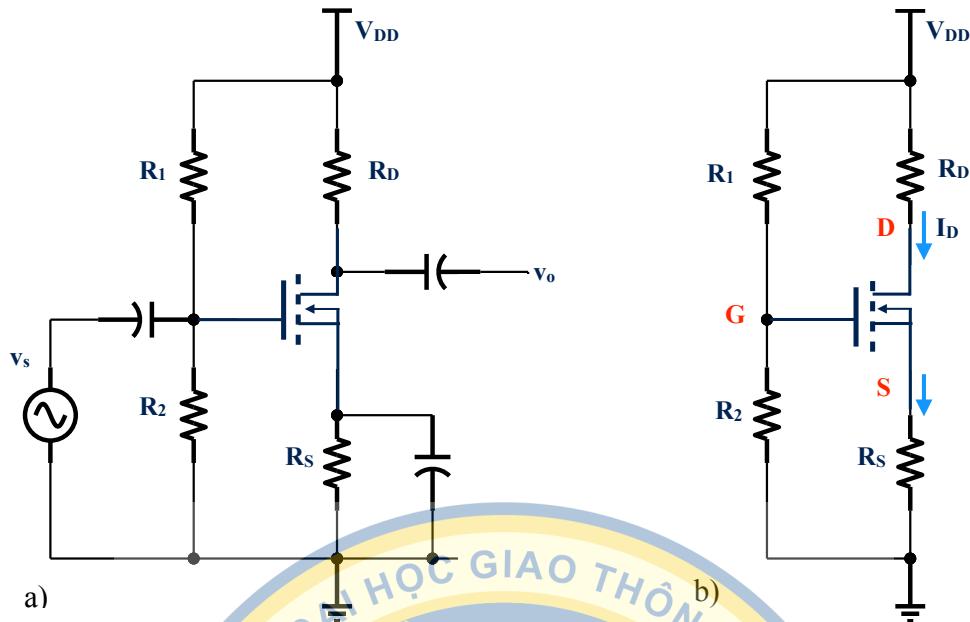
Mạch khuếch đại kiểu nguồn chung - CS có tín hiệu vào giữa cực cửa G và cực nguồn S, tín hiệu ra lấy giữa cực máng D và cực nguồn S. Khi này sơ đồ tương đương AC của FET mắc kiểu CS được biểu diễn như hình 3.51(b).



Hình 3.51: a) FET mắc kiểu CS và b) Sơ đồ tương đương AC.

Hình 3.52 biểu diễn một mạch khuếch đại kiểu nguồn chung sử dụng E-MOSFET kênh N. Các thông số cho trước của mạch là V_{DD} , R_1 , R_2 , R_D , R_S và thông số của E-MOSFET là hệ số k_n và V_{th} .

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET



Hình 3.52: Một mạch khuếch đại kiểu cực nguồn chung - CS.

* Xét mạch ở chế độ một chiều bằng cách bỏ mạch các nhánh có tụ điện, từ sơ đồ mạch 3.52(b) ta có:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD}$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - I_D R_S = \frac{V_{DD} R_2}{R_1 + R_2} - I_D R_S$$

Vì FET loại E-MOSFET nên dòng cực máng I_D được biểu diễn dưới dạng biểu thức 2.15:

$$I_D = k_n (V_{GS} - V_{th})^2$$

với k_n là hệ số phụ thuộc vào kênh dẫn và đã được cho trước¹³.

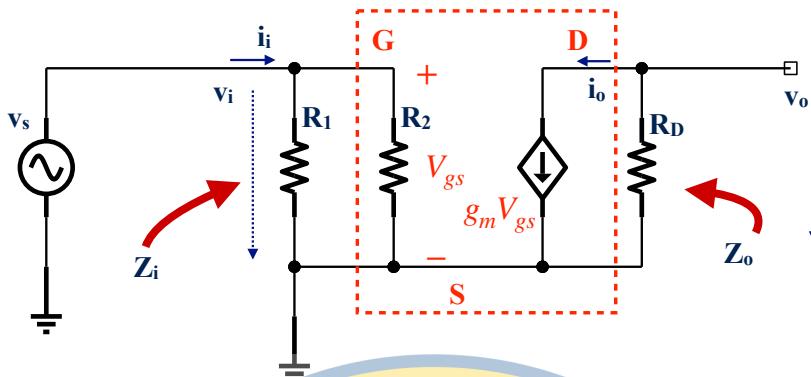
Từ hai biểu thức trên xác định được I_D và V_{GS} theo cách đồ thị hoặc giải phương trình. Vì vậy xác định được độ hổ dẫn:

$$g_m = 2k_n(V_{GSQ} - V_{th})$$

¹³hoặc xác định được nhờ một cặp giá trị V_{GS} và I_D tương ứng

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

* Xét mạch ở chế độ xoay chiều, sử dụng sơ đồ tương đương của các linh kiện ở chế độ AC như đã cho trong bảng 3.1, ta có sơ đồ tương ứng như trong hình 3.53.



Hình 3.53: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch hình 3.52.

Từ sơ đồ mạch xác định các thông số xoay chiều như sau:

+ Trở kháng vào:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1 // R_2$$

suy ra:

$$Z_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.38)$$

+ Trở kháng ra:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = R_D \quad (3.39)$$

+ Hệ số khuếch đại áp:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_o R_D}{V_{gs}} = \frac{-g_m V_{gs} R_D}{V_{gs}}$$

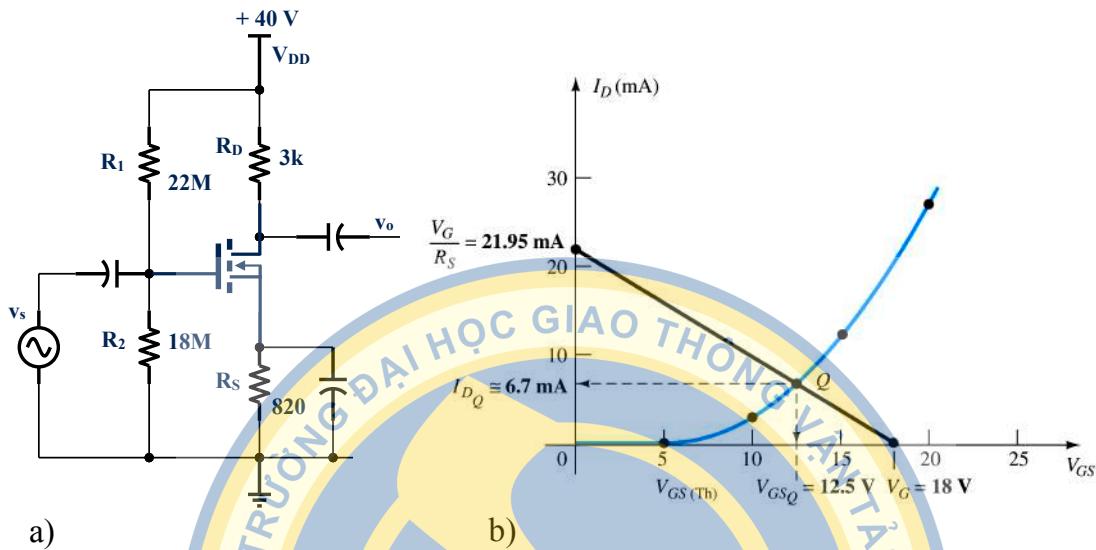
suy ra:

$$K_v = -g_m R_D \quad (3.40)$$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

Ví dụ 3.12. Cho mạch khuếch đại có các thông số được thể hiện trong hình 3.54(a) biết transistor có $V_{th} = 5$ V; dòng cực máng $I_{D(on)} = 3$ mA tại $V_{GS(on)} = 10$ V.

Hãy xác định các thông số xoay chiều của mạch.



Hình 3.54: a) Sơ đồ một mạch khuếch đại và b) Xác định điểm Q bằng đồ thị.

Bài giải:

* Xét mạch ở chế độ một chiều:

Từ sơ đồ mạch xác định được điện áp tại cực G như sau:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} = \frac{18}{18 + 22} \times 40 = 18 \text{ V}$$

Mà ta lại có:

$$V_G = V_{GS} + V_S = V_{GS} + I_D R_S$$

suy ra đường phân cực như sau:

$$V_{GS} = 18 - 0,82I_D$$

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

Do transistor loại E-MOSFET kênh N nên hàm truyền đạt như sau:

$$I_D = k_n(V_{GS} - V_{th})^2$$

Vì dòng cực máng $I_{D(on)} = 3 \text{ mA}$ tại $V_{GS(on)} = 10 \text{ V}$ nên xác định được thông số k_n như sau:

$$k_n = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{th})^2} = \frac{3}{(10 - 5)^2} = 0,12 \text{ mA/V}^2$$

Vậy hàm truyền đạt của transistor là:

$$I_D = 0,12(V_{GS} - V_{th})^2$$

Vẽ đồ thị của hàm truyền đạt và đường phân cực như thể hiện trong hình 3.54(b) xác định được giao điểm chính là điểm làm việc tĩnh Q có tọa độ ($I_{DQ} = 6,7 \text{ mA}$; $V_{GSQ} = 12,5 \text{ V}$).

Suy ra độ hô hấp g_m như sau:

$$g_m = 2k_n(V_{GSQ} - V_{th}) = 2(12,5 - 5) = 15 \text{ mS}$$

* Xét mạch ở chế độ xoay chiều:

Ở chế độ xoay chiều mạch được mắc kiểu cực nguồn chung nên sơ đồ tương đương có dạng như đã thể hiện trong hình 3.53.

Từ sơ đồ mạch xác định được các thông số cơ bản như sau:

+ Trở kháng vào:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{22 \times 18}{22 + 18} = 9,9 \text{ k}\Omega$$

+ Trở kháng ra:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = R_D = 3 \text{ k}\Omega$$

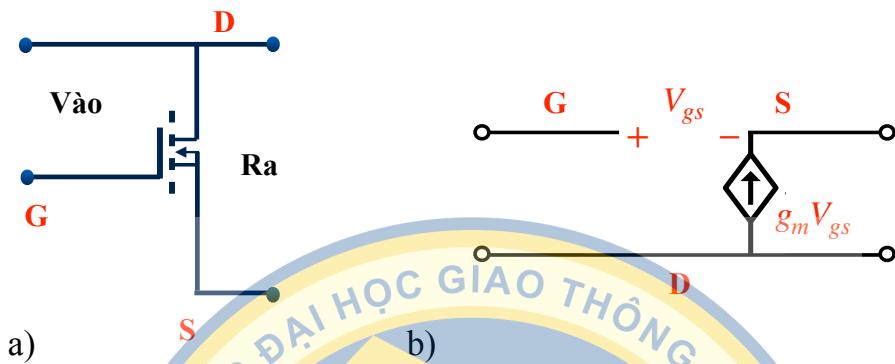
+ Hệ số khuếch đại áp:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_D = -15 \times 3 = -45$$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

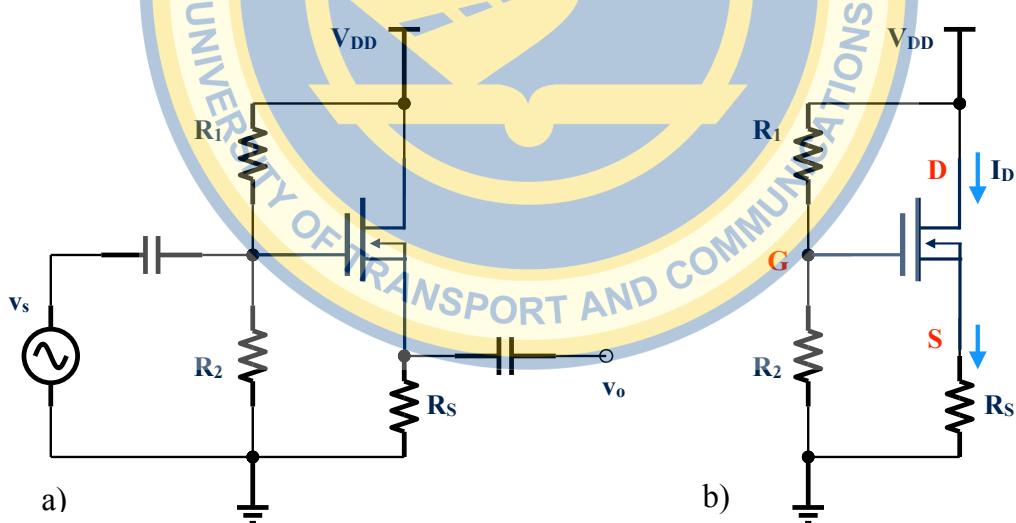
3.3.2.2 Phân tích mạch khuếch đại CD

Mạch khuếch đại kiểu cực máng chung - CD có tín hiệu vào giữa cực cửa G và cực máng D, tín hiệu ra lấy giữa cực nguồn S và cực máng D như biểu diễn trong hình 3.55(a). Khi này có thể biểu diễn FET tương đương như sơ đồ hình 3.55(b).



Hình 3.55: a) FET măc kiểu CD và b) Sơ đồ tương đương AC.

Hình 3.56 biểu diễn một mạch khuếch đại kiểu cực máng chung của một D-MOSFET.



Hình 3.56: a) Một mạch khuếch đại kiểu cực máng chung - CD và b) Sơ đồ tương đương một chiều.

Chương 3: Mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ

* **Xét mạch ở chế độ một chiều:** ta có sơ đồ tương đương một chiều bằng cách bỏ mạch các nhánh có tụ điện, khi đó mạch trở thành như trong hình 3.56(b). Từ sơ đồ này xác định được thông số một chiều như sau:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD}$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - I_D R_S = \frac{V_{DD} R_2}{R_1 + R_2} - I_D R_S$$

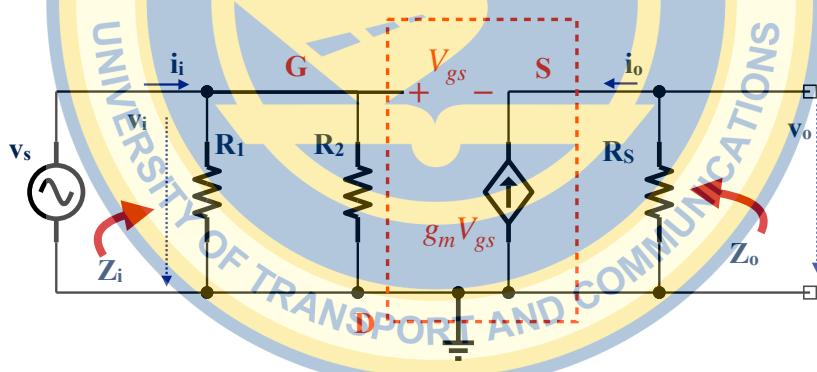
Vì dòng cực mảng I_D của D-MOSFET được biểu diễn dưới dạng biểu thức:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Từ hai phương trình trên xác định được V_{GSQ} . Vì vậy xác định được độ hõ dẫn:

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right)$$

* **Xét mạch ở chế độ xoay chiều:** sử dụng sơ đồ tương đương của các linh kiện ở chế độ AC như đã cho trong bảng 3.1, ta có sơ đồ AC tương ứng như trong hình 3.57.



Hình 3.57: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch hình 3.56, mạch CD.

Từ sơ đồ mạch xác định các thông số xoay chiều như sau:

+ Trở kháng vào được xác định khi bỏ mạch tải nên ta có:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1 // R_2$$

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

suy ra:

$$Z_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.41)$$

+ Trở kháng ra được xác định khi ngắn mạch đầu vào, vì vậy ta có:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = R_S // \frac{1}{g_m}$$

suy ra:

$$Z_o = \frac{R_s}{1 + g_m R_s} \quad (3.42)$$

+ Hệ số khuếch đại áp:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o R_S}{V_{gs}} = \frac{g_m V_{gs} R_S}{V_{gs} + g_m V_{gs} R_S}$$

suy ra:

$$K_v = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \quad (3.43)$$

Ví dụ 3.13. Cho mạch điện như hình 3.58(a), biết JFET có dòng cực máng bão hòa $I_{DSS} = 16 \text{ mA}$ và điện áp thắt $V_P = -4 \text{ V}$.

Hãy xác định các thông số xoay chiều của mạch.

Bài giải:

* Xét mạch ở chế độ một chiều:

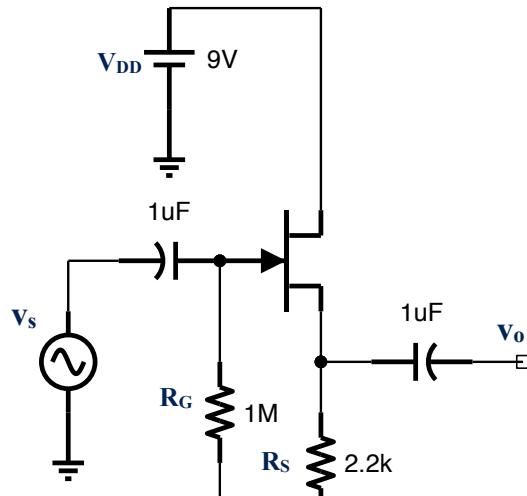
Từ sơ đồ tương đương một chiều có được bằng cách bỏ các nhánh có tụ điện ta xác định được thông số một chiều như sau:

+ Đường phân cực như sau:

$$V_{GS} = -I_D R_S = -2,2 I_D$$

+ Hàm truyền đạt của JFET có phương trình như sau:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 16 \left(1 - \frac{-2,2 I_D}{-4}\right)^2 = 16 \left(1 - 0,55 I_D\right)^2$$



Hình 3.58: Một mạch khuếch đại JFET mắc kiểu cực máng chung - CD.

Giải phương trình bậc hai trên và xác định được điểm làm tinh Q có tọa độ ($I_{DQ} = 4,56 \text{ mA}$; $V_{GSQ} = -2,86 \text{ V}$).

Từ đó xác định được độ hổ dãn:

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right) = -\frac{2 \times 16}{-4} \left(1 - \frac{-2,86}{-4}\right) = 2,28 \text{ mS}$$

* **Xét mạch ở chế độ xoay chiều:** sử dụng sơ đồ tương đương của các linh kiện ở chế độ AC như đã cho trong bảng 3.1, ta có sơ đồ AC tương ứng như trong hình 3.59.

Từ sơ đồ mạch xác định các thông số xoay chiều như sau:

+ Trở kháng vào được xác định khi bỏ mạch tải nên ta có:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = R_S = 2,2 \text{ k}\Omega$$

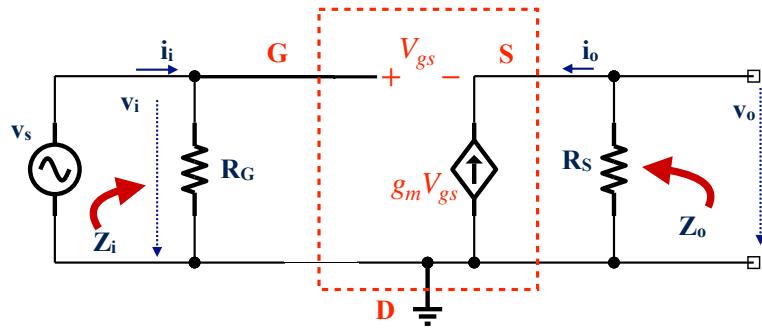
+ Trở kháng ra được xác định khi ngắn mạch đầu vào, vì vậy ta có:

$$Z_o = \frac{R_s}{1 + g_m R_s} = \frac{2,2}{1 + 2,28 \times 2,2} = 365,69 \Omega$$

+ Hệ số khuếch đại áp:

$$K_v = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = \frac{2,28 \times 2,2}{1 + 2,28 \times 2,2} = 0,83$$

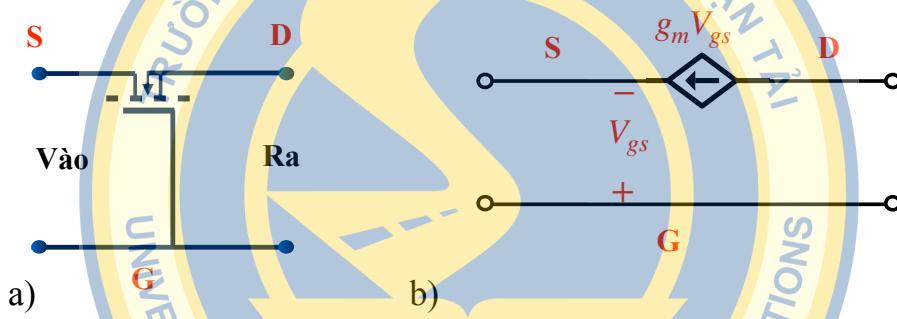
3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET



Hình 3.59: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch 3.58.

3.3.2.3 Phân tích mạch khuếch đại CG

Mạch khuếch đại kiểu cực cửa chung CG có tín hiệu vào giữa cực nguồn S và cửa G, tín hiệu ra lấy giữa cực máng D và cực cửa G. Khi đó sơ đồ tương đương như thể hiện trong hình 3.60.



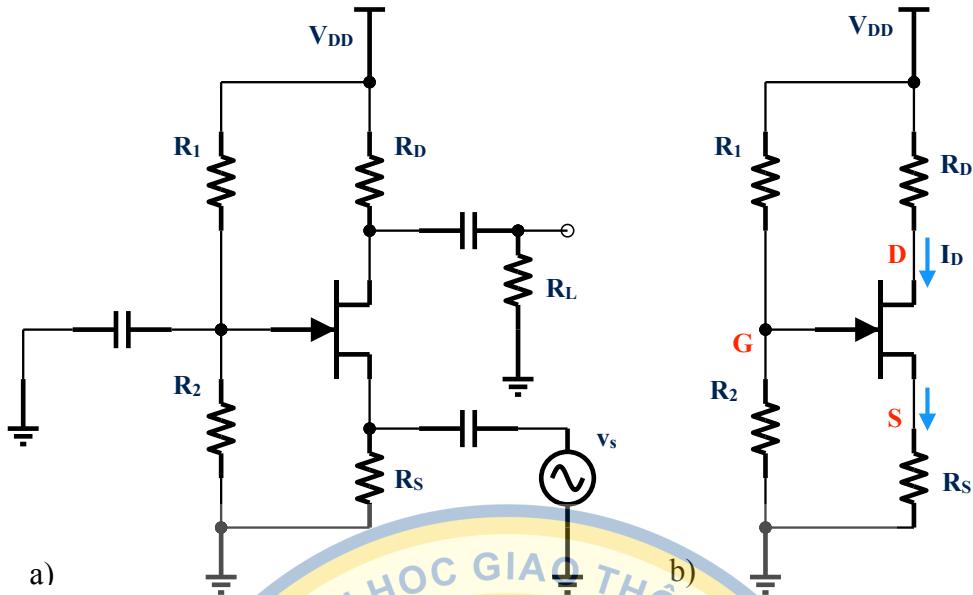
Hình 3.60: a) FET mắc kiểu CG và b) Sơ đồ tương đương AC.

Hình 3.61(a) biểu diễn một mạch khuếch đại kiểu nguồn chung và sơ đồ tương đương DC ở hình 3.61(b) có được bằng cách bỏ mạch các nhánh có tụ điện.

* **Xét mạch ở chế độ một chiều:** từ sơ đồ tương đương một chiều xác định được như sau:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD}$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - I_D(R_D + R_S) = \frac{V_{DD}R_2}{R_1 + R_2} - I_D(R_D + R_S)$$



Hình 3.61: a) Một mạch khuếch đại kiểu cực cửa chung - CG và b) Sơ đồ tương đương một chiều.

Dòng cực máng I_D của JFET được biểu diễn dưới dạng biểu thức:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Từ hai phương trình trên xác định được V_{GSQ} . Vì vậy xác định được độ hõ dãn:

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right)$$

* **Xét mạch ở chế độ xoay chiều:** sử dụng sơ đồ tương đương của các linh kiện ở chế độ AC như đã cho trong bảng 3.1, ta có sơ đồ AC tương ứng như trong hình 3.62.

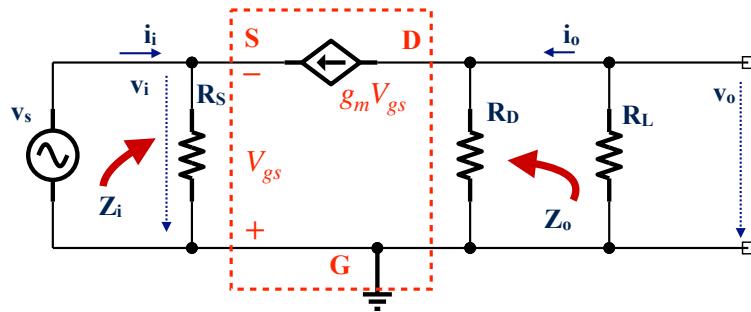
Từ sơ đồ mạch xác định các thông số xoay chiều như sau:

+ Trở kháng vào: được xác định khi hở mạch tải, vì vậy ta xác định được như sau:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{V_{gs}}{\frac{V_{gs}}{R_S} + g_m V_{gs}} = \frac{1}{1/R_S + g_m}$$

suy ra:

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET



Hình 3.62: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch hình 3.61, mạch CG.

$$Z_i = \frac{R_S}{1 + g_m R_S} \quad (3.44)$$

+ Trở kháng ra: được xác định khi ngắn mạch nguồn tín hiệu, do vậy nguồn dòng $g_m V_{gs} = 0$, từ đó suy ra:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = R_D \quad (3.45)$$

+ Hệ số khuếch đại áp:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m V_{gs} (R_D // R_L)}{-V_{gs}} = g_m (R_D // R_L)$$

suy ra:

$$K_v = g_m \times \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} \quad (3.46)$$

trong trường hợp không có tải, hệ số khuếch đại được tính bằng biểu thức:

$$K_v = g_m R_D$$

+ Hệ số khuếch đại dòng điện: Từ sơ đồ mạch ta thấy nhánh R_D song song với nhánh R_L và dòng tổng của cả hai nhánh này là $g_m V_{gs}$, vì vậy theo biểu thức chia dòng 1.7 ta có:

$$i_o = g_m V_{gs} \times \frac{R_D}{R_D + R_L}$$

mà ta lại có:

$$i_i = \frac{V_{gs}}{R_S} + g_m V_{gs}$$

vậy hệ số khuếch đại dòng K_i được tính như sau:

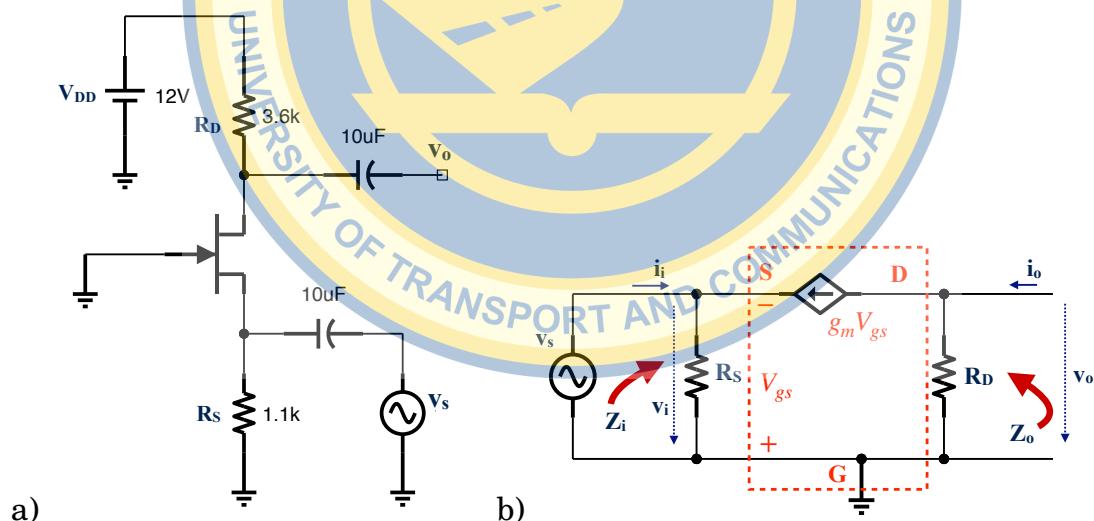
$$K_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{g_m R_D / (R_D + R_L)}{g_m + 1/R_S} \quad (3.47)$$

+ Hệ số khuếch đại công suất được xác định từ hệ số khuếch đại điện áp và hệ số khuếch đại dòng điện như sau:

$$K_p = K_v K_i$$

Ví dụ 3.14. Cho mạch điện như hình 3.63(a), biết JFET có dòng cực máng bão hòa $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ và điện áp thắt $V_P = -4 \text{ V}$.

Hãy xác định điểm làm việc tĩnh Q , các thông số xoay chiều của mạch và giá trị điện áp đầu ra khi điện áp vào là 40 mV .



Hình 3.63: a) Một mạch khuếch đại kiểu cực cửa chung - CG và b) Sơ đồ tương đương xoay chiều.

3.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI TÍN HIỆU NHỎ SỬ DỤNG FET

Bài giải:

* **Tìm điểm làm việc tĩnh Q của mạch:**

Từ sơ đồ mạch có:

$$V_{GS} = -I_D R_S = -1,1 I_D$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) = 12 - 4,7 I_D$$

Do transistor loại JFET nên hàm truyền đạt như sau:

$$\begin{aligned} I_D &= I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \\ \Rightarrow I_D &= 10 \left(1 - \frac{V_{GS}}{-4}\right)^2 \end{aligned}$$

Từ các phương trình trên xác định được tọa độ điểm làm việc tĩnh:

$$Q(I_{DQ} = 2,03 \text{ mA}; V_{GSQ} = -2,23 \text{ V}; V_{DSQ} = -2,46 \text{ V})$$

* **Xác định các thông số xoay chiều của mạch:**

Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch được biểu diễn trong hình 3.63(b).

Trong đó độ hô hấp được xác định bởi biểu thức 3.37 như sau:

$$g_m = \frac{-2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 10}{-4} \times \left(1 - \frac{-2,2}{-4}\right) = 2,25 \text{ mS}$$

Các thông số xoay chiều của mạch được xác định từ sơ đồ tương đương xoay chiều bao gồm:

+ Trở kháng vào tính theo biểu thức 3.44:

$$Z_i = \frac{R_S}{1 + g_m R_S} = 0,31 \text{ k}\Omega$$

+ Trở kháng ra tính theo biểu thức 3.45:

$$Z_o = R_D = 3,6 \text{ k}\Omega$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp:

$$K_v = g_m R_D = 2,25 \times 3,6 = 8,1$$

* **Điện áp đầu ra** được xác định theo điện áp vào theo biểu thức:

$$v_o = K_v v_i = 8,1 \times 40 = 324 \text{ mV}$$

3.3.3 Đánh giá các sơ đồ mắc FET

Từ những phân tích thông số một chiều và xoay chiều trong các mạch khuếch đại sử dụng FET được trình bày ở trên có thể rút ra một số nhận xét như sau:

- ▷ Sơ đồ CS cũng giống như sơ đồ CE ở chỗ có hệ số khuếch đại áp lớn và mang dấu "-", nghĩa là điện áp đầu ra đảo pha so với điện áp đầu vào;
- ▷ Các sơ đồ CS và CD không có hệ số khuếch đại dòng điện vì dòng vào ở các sơ đồ này là dòng cực gốc $I_G = 0$;
- ▷ Trở kháng vào của các sơ đồ CS, CD rất lớn trong khi trở kháng vào của sơ đồ CS lại khá nhỏ;
- ▷ FET có trở kháng vào cao nhưng hệ số khuếch đại nhỏ nên thường được sử dụng làm mạch vào của mạch khuếch đại;
- ▷ Do hoạt động trong miền bão hòa nên các mạch khuếch đại FET có độ ổn định dòng điện rất tốt..

Ôn tập chương 3

CÂU HỎI LÝ THUYẾT

3.1. Khuếch đại tín hiệu là gì? vai trò của khuếch đại tín hiệu trong kỹ thuật điện tử ?

3.2. Hãy phân loại mạch khuếch đại và nêu các thông số chính của mạch khuếch đại.

3.3. Hãy trình bày cách xác định thông số xoay chiều của một mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ.

3.4. Hãy cho biết vai trò của việc phân tích sơ đồ tương đương tĩnh của một mạch khuếch đại.

3.5. Hãy vẽ các cách đưa tín hiệu vào và lấy tín hiệu ra trên BJT khi nó hoạt động như một phần tử khuếch đại.

3.6. Hãy phân tích đặc điểm của mạch khuếch đại BJT măc kiểu CE.

3.7. Hãy phân tích đặc điểm của mạch khuếch đại BJT măc kiểu CC.

3.8. Hãy phân tích đặc điểm của mạch khuếch đại BJT măc kiểu CB.

3.9. Hãy vẽ các cách đưa tín hiệu vào và lấy tín hiệu ra trên FET khi nó hoạt động như một phần tử khuếch đại.

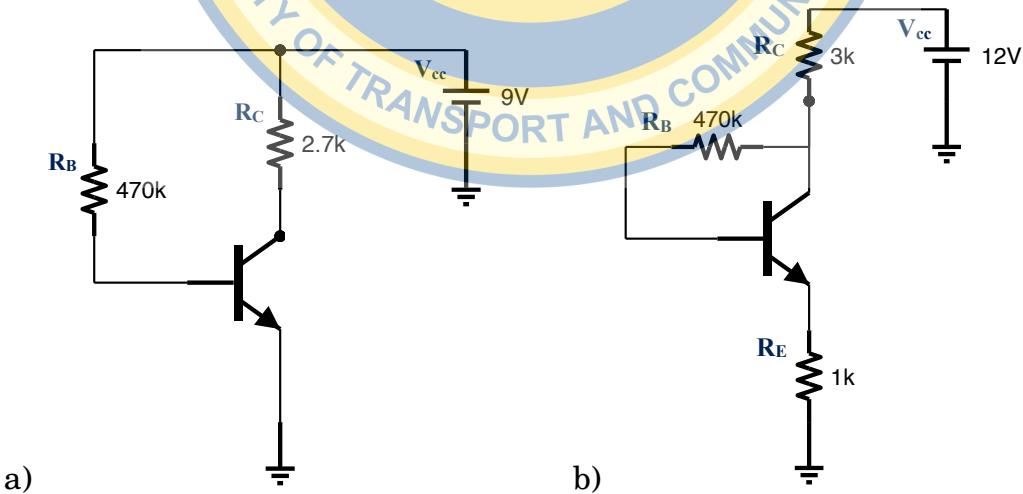
3.10. Hãy phân tích đặc điểm của mạch khuếch đại FET măc kiểu CS.

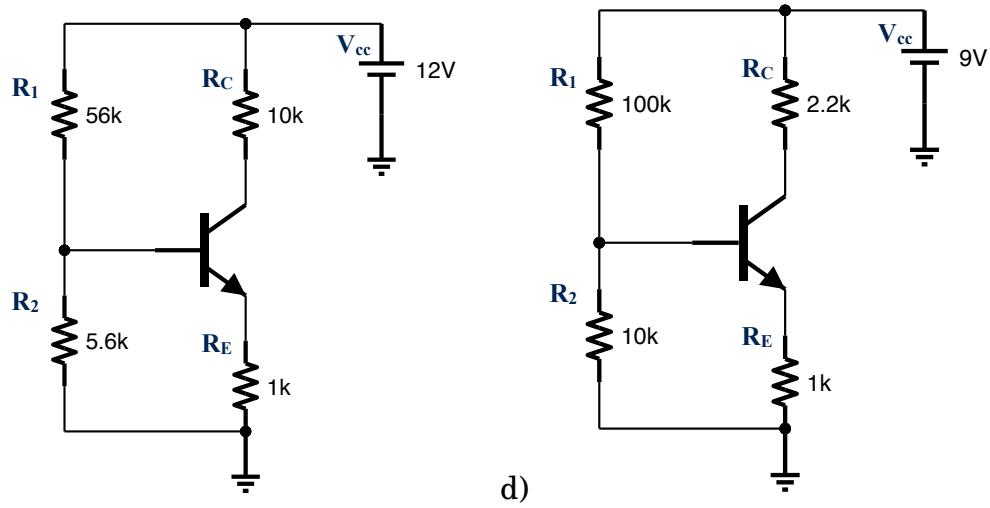
3.11. Hãy phân tích đặc điểm của mạch khuếch đại FET măc kiểu CD.

3.12. Hãy phân tích đặc điểm của mạch khuếch đại FET măc kiểu CG.

BÀI TẬP

3.1. Hãy xác định điểm làm việc tĩnh của các mạch dưới đây.



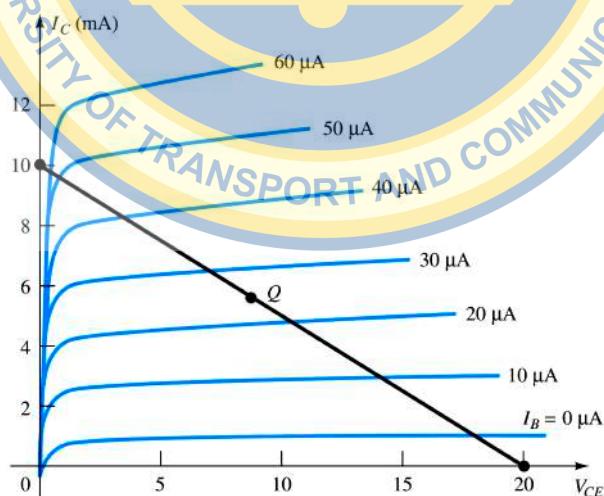


3.2. Hãy nhận xét vị trí của điểm Q trong sơ đồ của bài 3.1(d).

Hãy xác định các giá trị của linh kiện sao cho mạch ở chế độ tối ưu cho sơ đồ phân cực của một mạch khuếch đại.

3.3. Một BJT loại NPN được phân cực kiểu phân dòng cố định có đường tản tinh và họ đặc tuyến ra như hình dưới đây. Biết BJT có $V_{BE} = 0,7\text{ V}$ và $\beta = 120$.

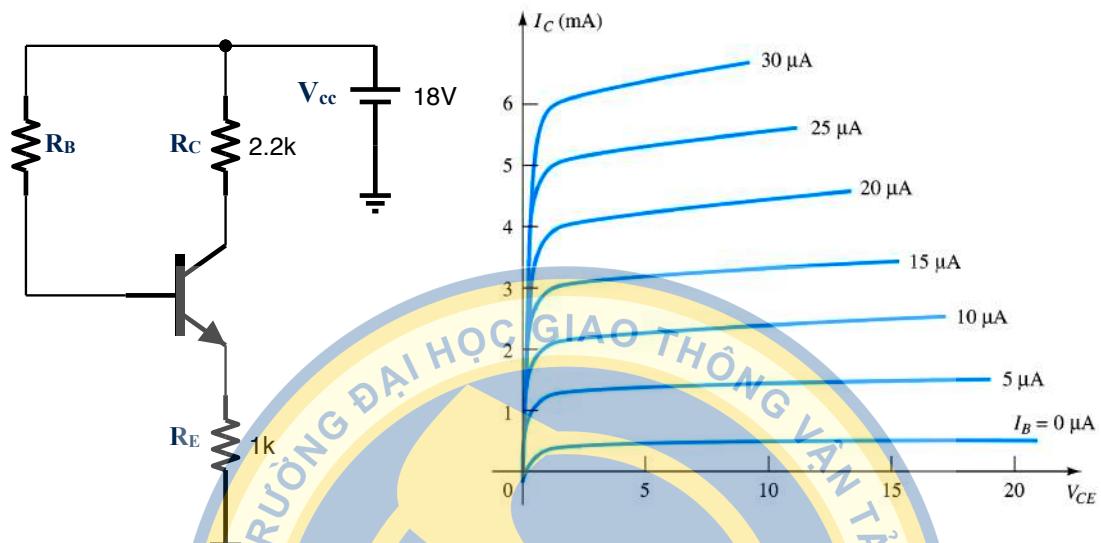
Hãy xác định giá trị của V_{CC} , R_C , R_B .



3.4. Cho mạch điện như hình vẽ và họ đặc tuyến ra tương ứng. Biết dòng $I_B = 15 \mu\text{A}$.

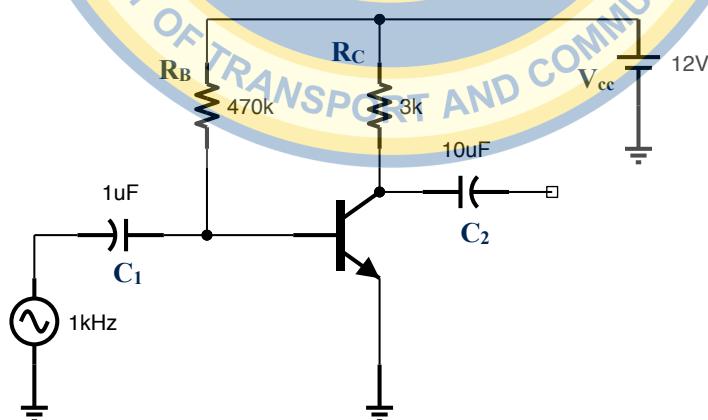
Hãy xác định điểm làm việc tĩnh Q trên đường tải tĩnh và đặc tuyến ra.

Hãy xác định giá trị của R_B .



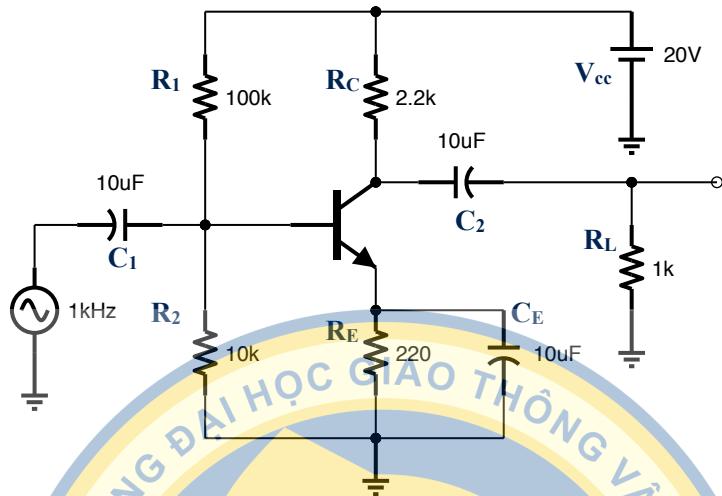
3.5. Biết transistor có $V_{BE} = 0,7\text{V}$ và $\beta = 100$.

Hãy xác định thông số xoay chiều cho mạch khuếch đại dưới đây.



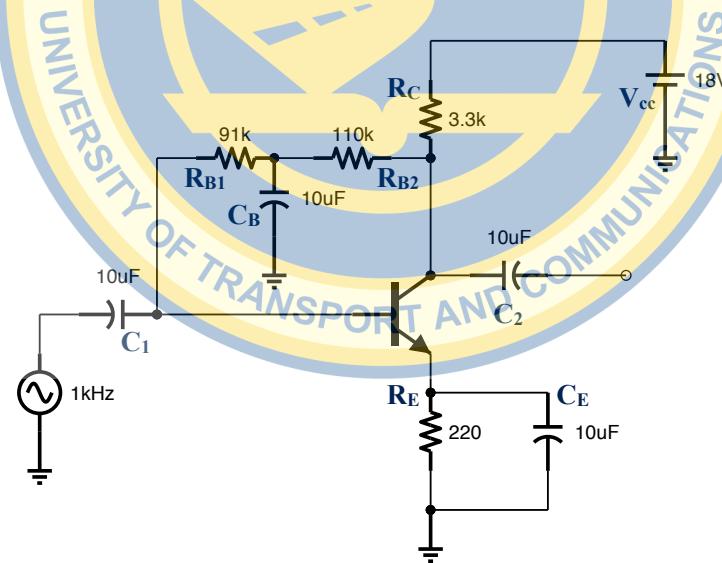
3.6. Cho mạch điện như hình dưới đây. Biết transistor có $V_{BE} = 0,7V$ và $\beta = 200$.

Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch trong trường hợp có và không có tụ C_E .



3.7. Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch khuếch đại dưới đây.

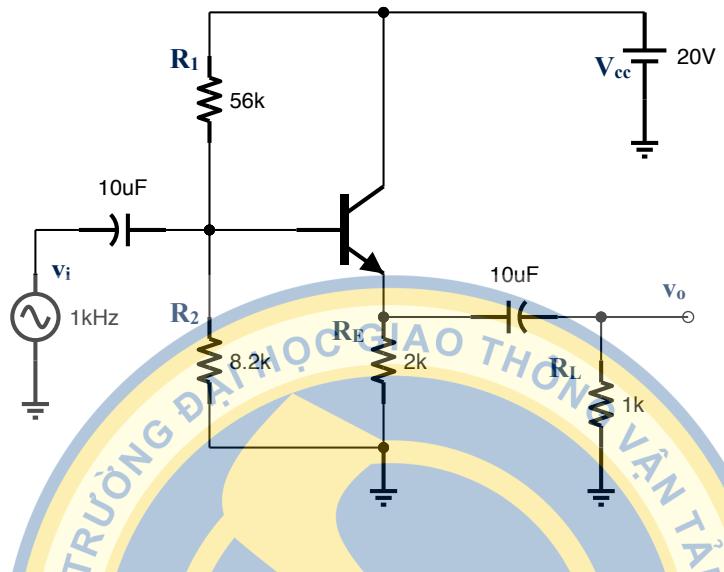
Biết transistor có $V_{BE} = 0,7V$ và $\beta = 150$.



3.8. Cho mạch điện như hình dưới đây. Biết transistor có $V_{BE} = 0,7V$ và $\beta = 120$.

Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch.

Hãy xác định giá trị của điện áp ra khi điện áp vào có biên độ đỉnh là $50\mu V$.

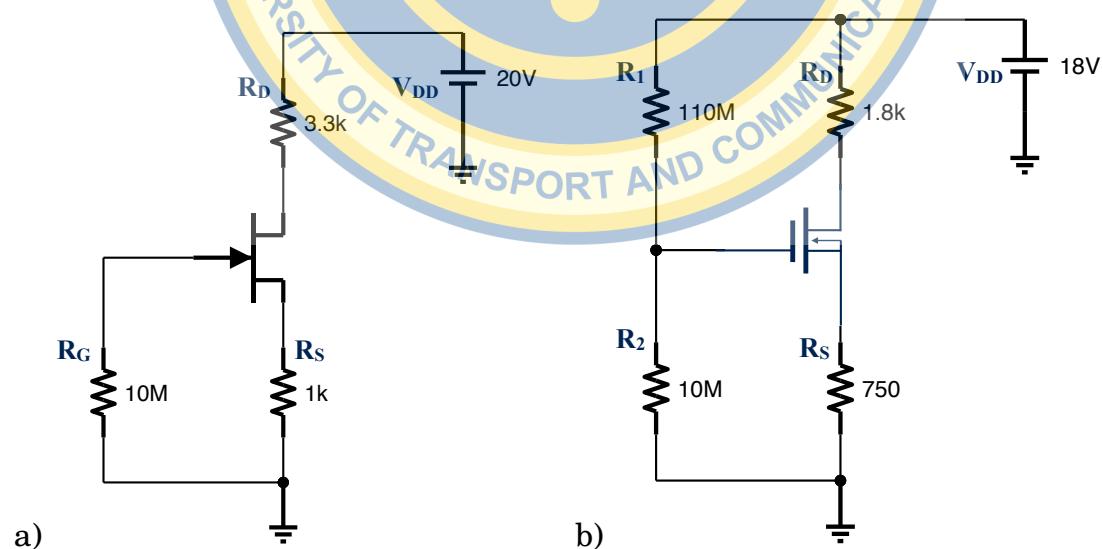


3.9. Hãy xác định điểm làm việc tĩnh của các mạch dưới đây.

Biết rằng thông số của của mõi sơ đồ như sau:

Sơ đồ a) $I_{DSS} = 8\text{ mA}$; $V_P = -6\text{ V}$

Sơ đồ b) $I_{DSS} = 6\text{ mA}$; $V_P = -3\text{ V}$

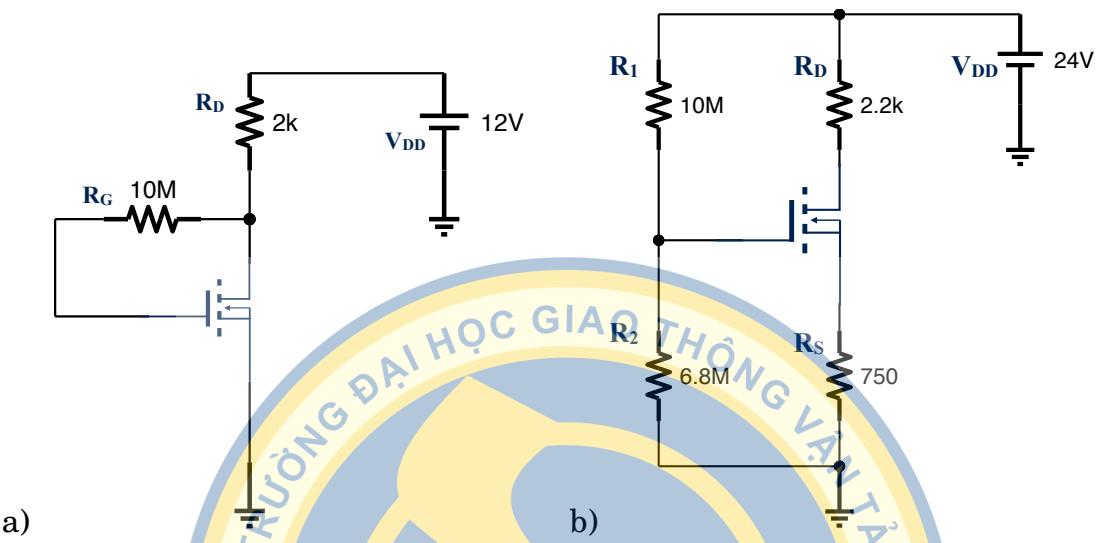


3.10. Hãy xác định điểm làm việc tĩnh của các mạch dưới đây.

Biết rằng thông số của của mỗi sơ đồ như sau:

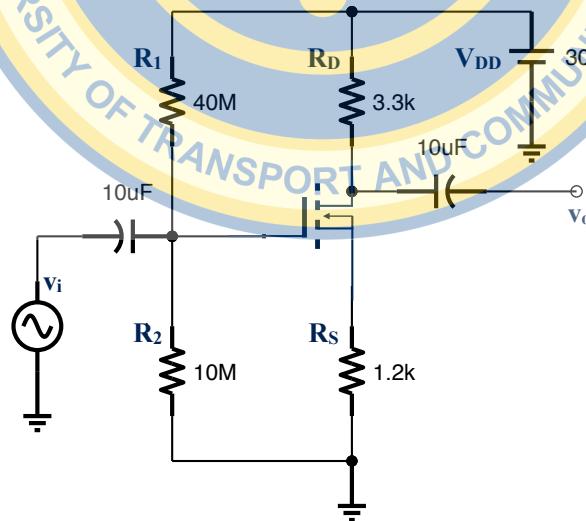
Sơ đồ a) Dòng $I_D = 6 \text{ mA}$ tại $V_{GS} = 8 \text{ V}$; $V_{th} = 3 \text{ V}$

Sơ đồ b) Dòng $I_D = 5 \text{ mA}$ tại $V_{GS} = 6 \text{ V}$; $V_{th} = 3 \text{ V}$



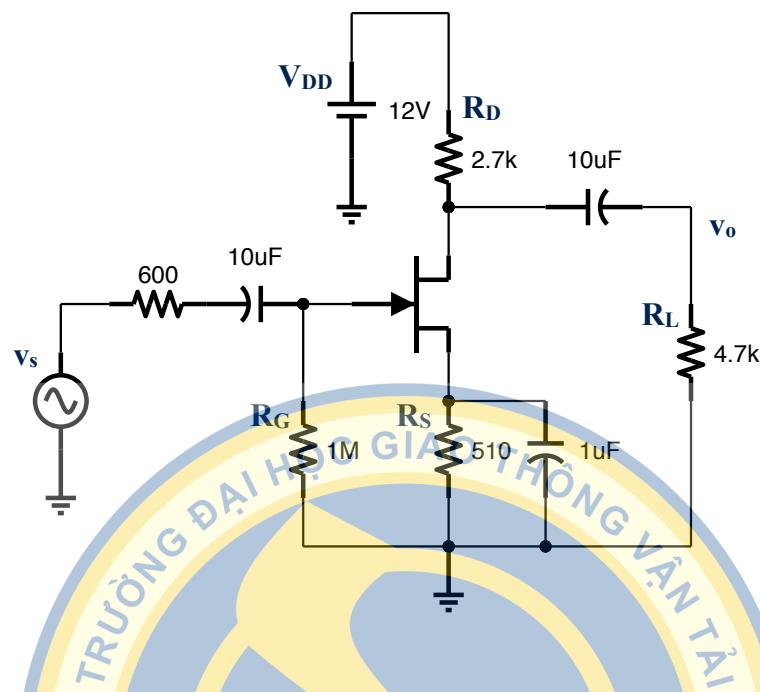
3.11. Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch khuếch đại dưới đây.

Biết transistor có $V_{th} = 3 \text{ V}$ và $k_n = 0,4 \text{ mA/V}^2$.



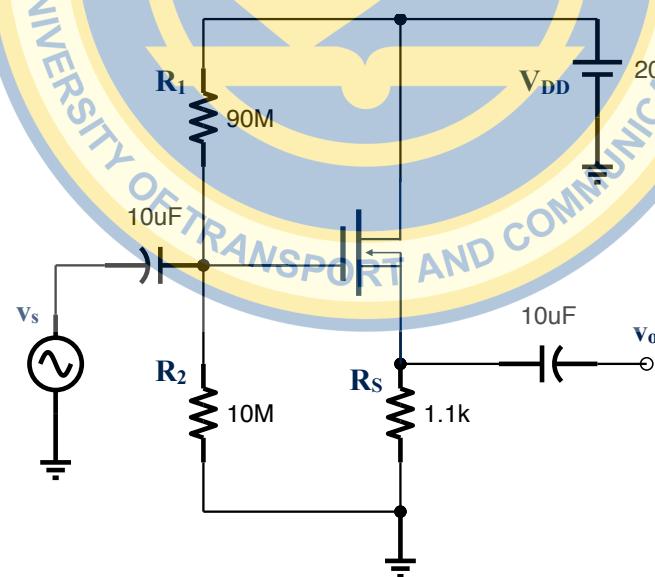
3.12. Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch khuếch đại dưới đây.

Biết transistor có $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ và $V_P = -6 \text{ V}$.



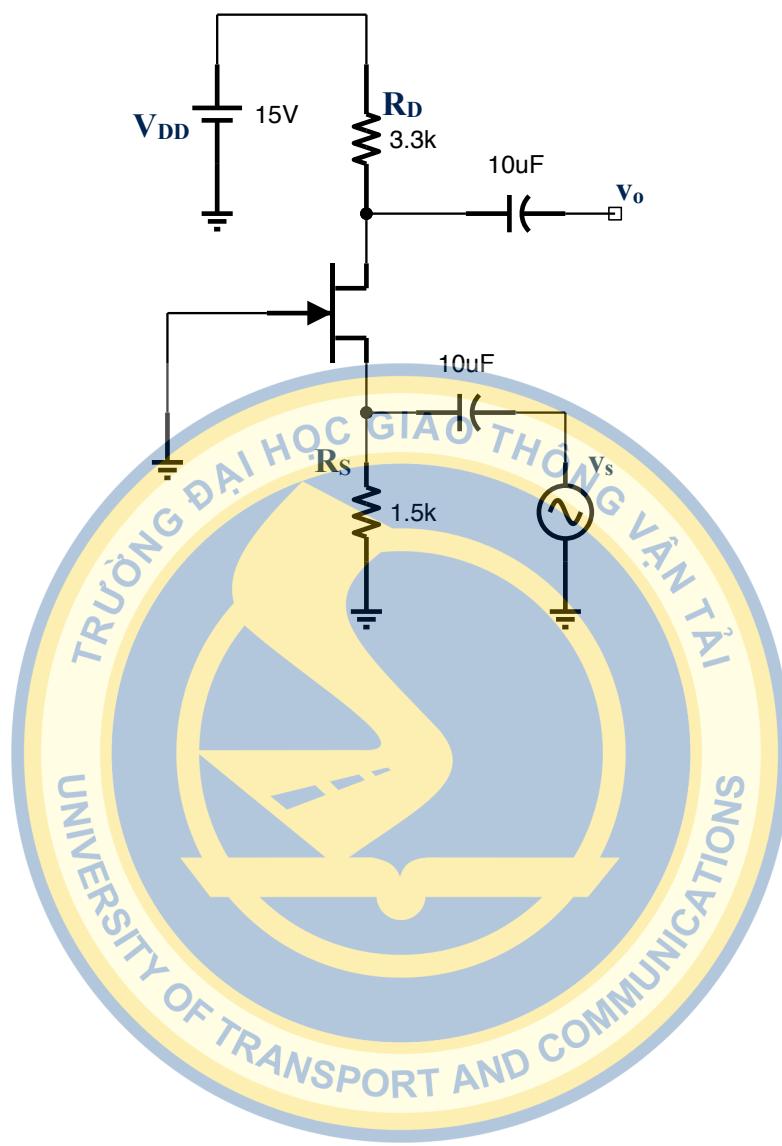
3.13. Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch khuếch đại dưới đây.

Biết transistor có $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$ và $V_P = -3 \text{ V}$.



3.14. Hãy xác định thông số xoay chiều của mạch khuếch đại dưới đây.

Biết transistor có $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ và $V_P = -2,8 \text{ V}$.



Chương 4

GHÉP TẦNG MẠCH KHUẾCH ĐẠI

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Giới thiệu chung về ghép tầng khuếch đại;
- ▷ Một số sơ đồ ghép thông dụng;
- ▷ Tính toán thông số của mạch ghép tầng khuếch đại và xét sự ảnh hưởng giữa các tầng.

4.1 GIỚI THIỆU CHUNG

Các yêu cầu cơ bản đối với một mạch khuếch đại thường là trở kháng vào cao, trở kháng đầu ra thấp, hệ số khuếch đại lớn và có độ ổn định. Tuy nhiên, nếu chỉ sử dụng tầng khuếch đại đơn sẽ không đáp ứng được các yêu cầu trên. Do vậy, trong các mạch điện-điện tử thực tế, một bộ khuếch đại gồm các tầng khuếch đại đơn được ghép nối với nhau với mục đích là tăng hệ số khuếch đại và biến đổi trở kháng. Việc ghép các tầng khuếch đại có thể được thực hiện bằng cách sử dụng tụ điện, biến áp, hoặc có thể ghép trực tiếp.

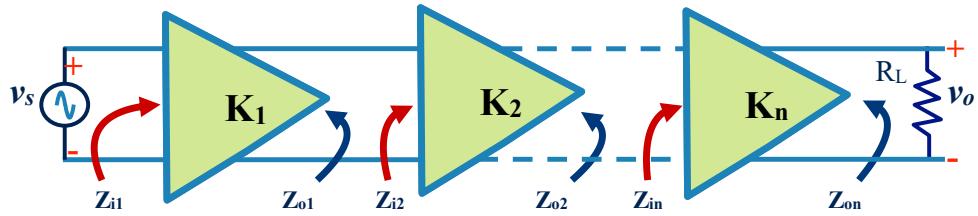
Hình 4.1 minh họa một bộ khuếch đại gồm n tầng khuếch đại được ghép nối với nhau.

Một số đặc điểm của mạch ghép tầng khuếch đại:

- ▷ Tín hiệu ra của tầng trước chính là tín hiệu vào của tầng sau;
- ▷ Trở kháng vào của toàn mạch bằng tổng trở kháng vào của tầng đầu tiên;

$$Z_i = Z_{i1}$$

(4.1)



Hình 4.1: Sơ đồ khối của một bộ khuếch đại nhiều tầng.

- ▷ Trở kháng vào của tầng sau chính là tải của tầng trước nó;

$$R_{L(n-1)} = Z_{in} \quad (4.2)$$

- ▷ Trở kháng ra của toàn mạch bằng trở kháng ra của tầng cuối cùng;

$$Z_o = Z_{on} \quad (4.3)$$

- ▷ Hệ số khuếch đại toàn mạch bằng tích số của các hệ số khuếch đại của từng tầng hoặc bằng tổng các hệ số khuếch đại nếu các thông số này tính theo decibel (dB).

$$K = K_1 K_2 \dots K_n$$

$$K(\text{dB}) = K_1(\text{dB}) + K_2(\text{dB}) + \dots + K_n(\text{dB}) \quad (4.4)$$

Khi ghép tầng khuếch đại cần chú ý tới các vấn đề sau:

- ▷ Phân cực và ổn định điểm công tác tĩnh cho từng tầng khuếch đại;
- ▷ Phối hợp trở kháng giữa các tầng;
- ▷ Đáp ứng tần số của toàn mạch đối với tín hiệu vào.

4.2 CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI

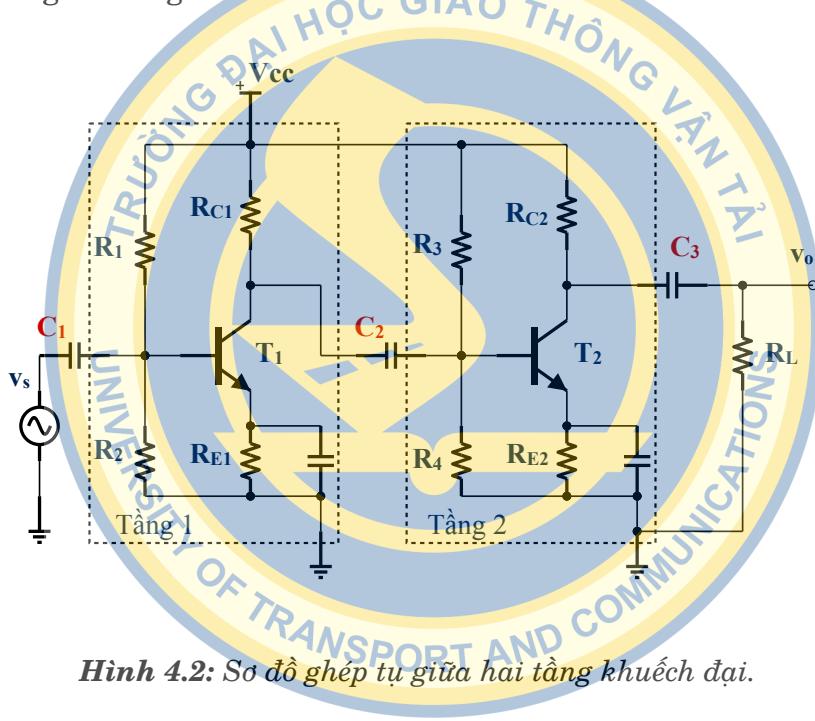
Phần này trình bày một số mạch ghép tầng khuếch đại hay được sử dụng trong các mạch điện tử, bao gồm:

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI

- ▷ Ghép tầng sử dụng tụ điện;
- ▷ Ghép tầng sử dụng biến áp;
- ▷ Ghép trực tiếp.

4.2.1 Ghép tầng sử dụng tụ điện

Hình 4.2 minh họa một mạch khuếch đại gồm hai tầng khuếch đại được ghép với nhau thông qua tụ điện C_2 . Trong ví dụ này, hai tầng khuếch đại là tầng khuếch đại Emiter chung (CE), việc tính toán các tham số trong chế độ một chiều hay xoay chiều của mỗi tầng khuếch đại đơn đã được trình bày chi tiết trong Chương 3.



* **Tính toán các thông số một chiều của mạch ghép tầng qua tụ điện**

Trong chế độ một chiều, tụ điện ghép tầng được coi là hở mạch. Do vậy, hai tầng khuếch đại đơn hoàn toàn độc lập với nhau về mặt một chiều.

+ Xét tầng khuếch đại thứ nhất:

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại

Do đây là sơ đồ phân cực kiểu mạch phân áp nên dòng điện cực Base được tính theo biểu thức:

$$I_{B1} = \frac{V_{TH1} - V_{BE1}}{R_{B1} + (1 + \beta_1)R_{E1}}$$

trong đó:

$$V_{TH1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC}$$

$$R_{TH1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Suy ra dòng cực phát $I_{E1} = (\beta_1 + 1)I_{B1}$. Vậy điện trở xoay chiều cực phát của tầng 1 được xác định là:

+ Xét tầng khuếch đại thứ hai:

Tầng này cũng được phân cực kiểu phân áp như tầng 1 nên dòng điện cực Base:

$$I_{B2} = \frac{V_{B2} - V_{BE2}}{R_{B2} + (1 + \beta_2)R_{E2}}$$

trong đó:

$$V_{TH2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times V_{CC}$$

$$R_{TH2} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

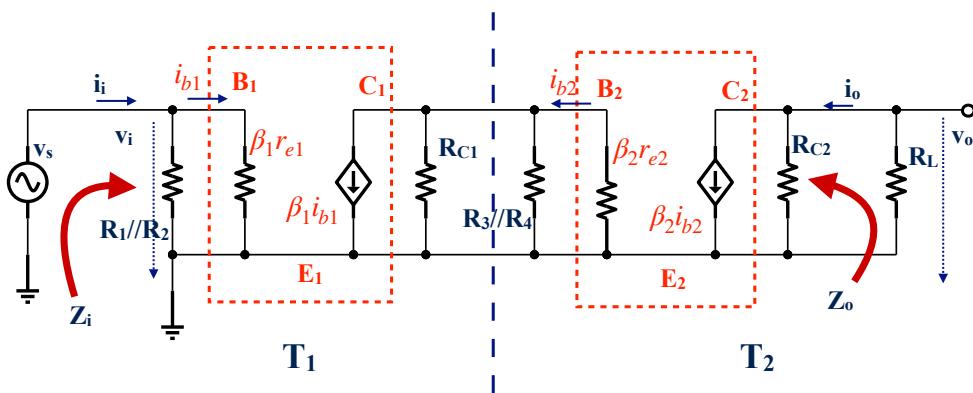
Suy ra dòng cực phát $I_{E2} = (\beta_2 + 1)I_{B2}$. Vậy điện trở xoay chiều cực phát của tầng 2 được xác định là:

$$r_{e2} = \frac{26 \text{ mV}}{I_{E2}}$$

* **Tính toán các thông số xoay chiều của mạch ghép tầng qua tụ điện**

Hình 4.3 biểu diễn sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại trong hình 4.2. Các tụ ghép tầng có điện dung đủ lớn và được coi là ngắn mạch trong chế độ xoay chiều.

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI



Hình 4.3: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch 4.2.

Các thông số xoay chiều của mạch được xác định như sau:

+ Trở kháng vào của mạch bằng trở kháng vào của tầng đầu:

$$Z_i = Z_{i1} = R_1 // R_2 // \beta_1 r_{e1}$$

+ Trở kháng ra của mạch bằng trở kháng ra của tầng thứ hai:

$$Z_o = K = R_{C2}$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2}$$

trong đó:

K_{v1} là hệ số khuếch đại điện áp của tầng khuếch đại thứ nhất măc kiểu CE.

$$K_{v1} = -\frac{R_{C1} // R_{L1}}{r_{e1}}$$

R_{L1} là tải của tầng thứ nhất, chính là trở kháng vào của tầng thứ hai.

$$R_{L1} = Z_{i2} = R_3 // R_4 // \beta_2 r_{e2}$$

K_{v2} là hệ số khuếch đại điện áp của tầng khuếch đại thứ hai cũng măc kiểu CE.

$$K_{v2} = -\frac{R_{C2} // R_L}{r_{e2}}$$

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại

Suy ra hệ số khuếch đại áp toàn mạch là:

$$K_v = \frac{R_{C1}/R_{L1}}{r_{e1}} \times \frac{R_{C2}/R_L}{r_{e2}}$$

* Nhận xét:

▷ Ưu điểm:

- Các tầng được cách ly ở chế độ một chiều, tức là sơ đồ phân cực được tính độc lập;
- Hệ số khuếch đại lớn.

▷ Nhược điểm:

- Vì tụ ghép tầng có thể gián tiếp kết hợp với các thành phần điện trở, điện cảm trong mạch để tạo thành mạch lọc, dẫn tới băng thông của mạch giảm;
- Làm méo pha tín hiệu tại đầu ra.

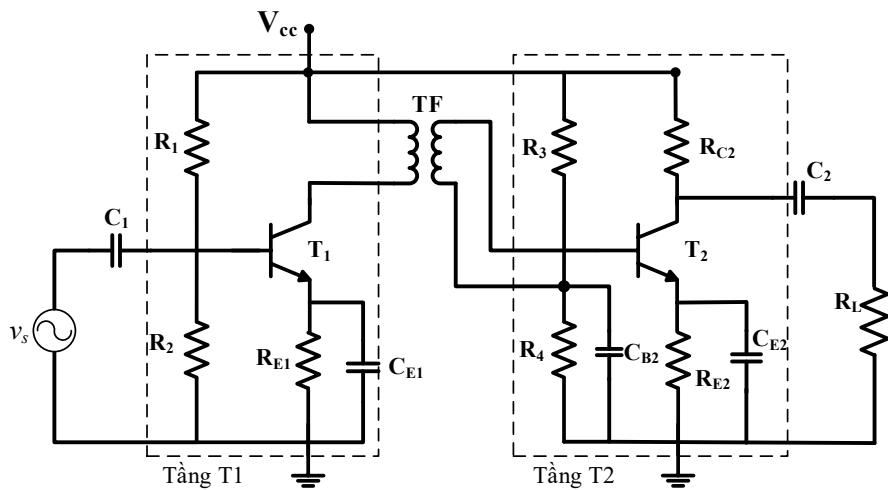
4.2.2 Ghép tầng bằng biến áp

Biến áp được sử dụng để đưa tín hiệu ra từ tầng trước đến tầng sau như một ví dụ trong hình 4.4. Mạch khuếch đại gồm hai tầng khuếch đại đơn, mỗi tầng được mắc theo kiểu Emitter chung (CE).

* Tính toán các thông số một chiều của mạch ghép tầng biến áp

Trong chế độ một chiều, hai tầng khuếch đại đơn được cách ly hoàn toàn với nhau vì biến áp không hoạt động với thành phần DC. Cuộn sơ cấp của biến áp đóng vai trò là điện trở R_{C1} (có giá trị nhỏ) của tầng thứ nhất. Sơ đồ phân cực của mỗi tầng khuếch đại đơn sử dụng mạch phân áp, điểm công tác tĩnh của từng tầng được xác định theo cách đã trình bày chi tiết trong phần 3.2.1.4.

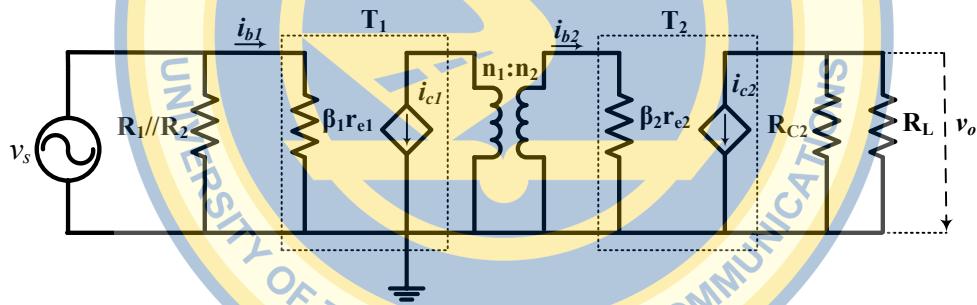
4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI



Hình 4.4: Một mạch ghép tầng khuếch đại sử dụng biến áp.

* Tính toán các thông số xoay chiều của mạch ghép tầng biến áp

Hình 4.5 biểu diễn sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch trong hình 4.4 với linh kiện ghép tầng là biến áp có tỉ số vòng dây $n_1 : n_2$.



Hình 4.5: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại trong hình 4.4

+ Trở kháng vào của mạch chính là trở kháng vào của tầng thứ nhất:

$$Z_i = Z_{i1} = R_1 // R_2 // \beta_1 r_{e1}$$

+ Trở kháng ra của mạch bằng trở kháng ra của tầng thứ hai:

$$Z_o = Z_{o2} = R_{C2}$$

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại

+ Hệ số khuếch đại điện áp toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2}$$

trong đó:

K_{v1} là hệ số khuếch đại điện áp của tầng khuếch đại thứ nhất.

$$K_{v1} = -\frac{R_{L1}}{r_{e1}}$$

với tầng T_1 , điện trở phản ánh về cuộn sơ cấp của biến áp đóng vai trò là tải. Biến áp có cuộn thứ cấp nối với điện trở $\beta_2 r_{e2}$ nên khi đó bên sơ cấp sẽ có điện trở phản ánh. Do vậy, R_{L1} là tải của tầng thứ nhất sẽ được xác định theo biểu thức:

$$R_{L1} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \beta_2 r_{e2}$$

K_{v2} là hệ số khuếch đại điện áp của tầng khuếch đại thứ hai.

$$K_{v2} = -\frac{R_{C2}/R_L}{r_{e2}}$$

* **Nhận xét:**

▷ Ưu điểm:

- Các tầng được cách ly ở chế độ một chiều;
- Dễ phối hợp trở kháng giữa các tầng bằng cách điều chỉnh tỉ số biến áp.

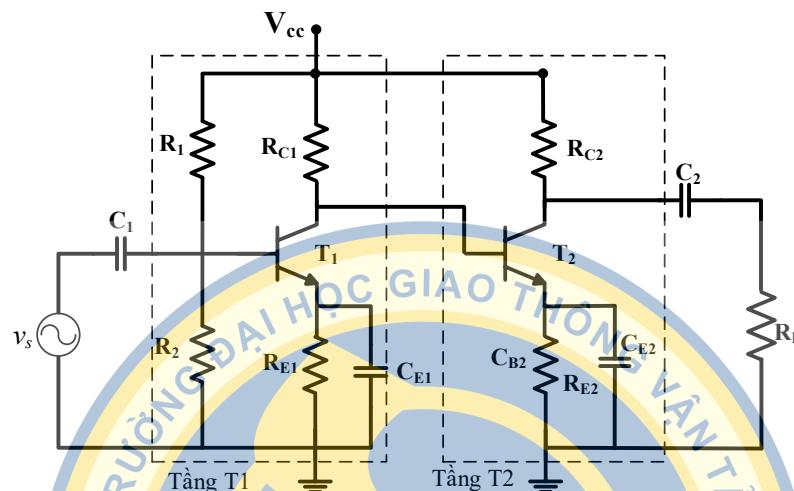
▷ Nhược điểm:

- Kích thước của mạch lớn, do đó giá thành có thể cao hơn;
- Băng thông của mạch giảm do biến áp có thể kết hợp với các thành phần điện trở, điện dung trong mạch tạo nên các mạch lọc kỹ sinh.

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI

4.2.3 Ghép tầng trực tiếp

Hình 4.6 minh họa mạch ghép tầng khuếch đại theo phương pháp trực tiếp. Tín hiệu từ tầng trước được đưa trực tiếp tới tầng sau. Trong ví dụ này, mạch khuếch đại được ghép bởi hai tầng khuếch đại đơn măc theo kiểu Emitter chung (CE).



Hình 4.6: Một sơ đồ ghép tầng trực tiếp.

* **Tính toán các thông số một chiều của mạch ghép tầng trực tiếp**

Mạch khuếch đại ghép tầng trực tiếp ở hình 4.6 có sơ đồ tương đương một chiều biểu diễn trong hình 4.7(a) và sơ đồ tương đương Thevenin ở hình 4.7(b).

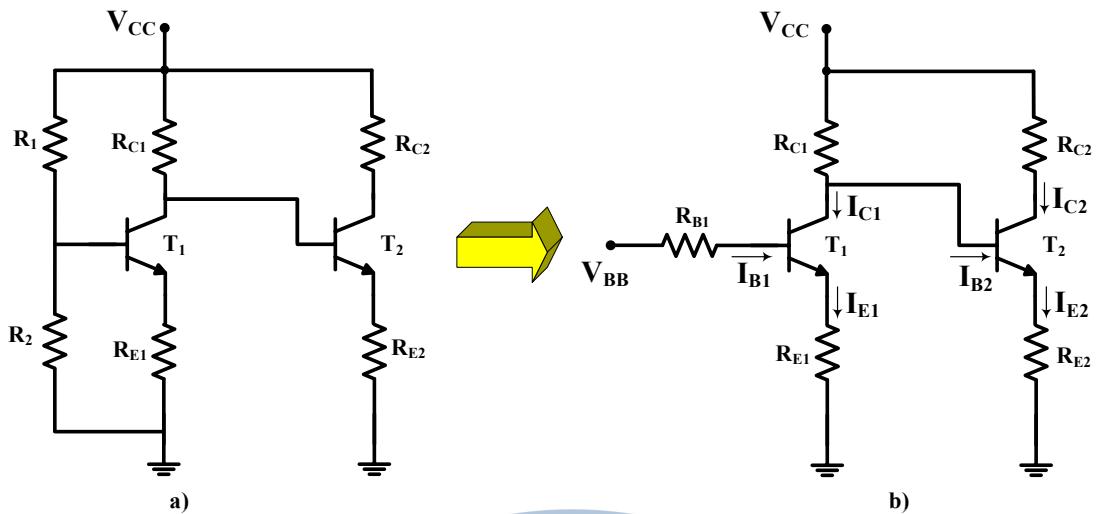
trong đó:

$$R_{BB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC}$$

Áp dụng định luật KVL cho vòng đầu vào của tầng khuếch đại thứ nhất:

$$V_{BB} - V_{BE1} = I_{B1} R_{B1} + I_{E1} R_{E1}$$



Hình 4.7: a) Sơ đồ phân cực một chiều và b) Sơ đồ tương đương Thevenin.

Dòng điện tại cực Base của T₁:

$$I_{B1} = \frac{V_{BB} - V_{BE1}}{R_{B1} + (1 + \beta_1) R_{E1}}$$

Dòng điện tại cực Collector của T₁:

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$$

Áp dụng định luật KVL cho vòng đầu vào của tầng khuếch đại thứ hai:

$$V_{CC} - V_{BE2} = (I_{C1} + I_{B2}) R_{C1} + I_{E2} R_{E2}$$

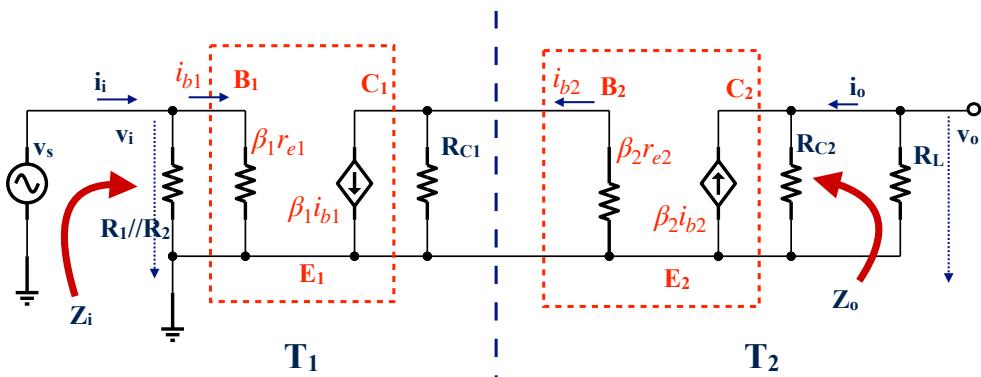
Dòng điện tại cực Base của T₂:

$$I_{B2} = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - I_{C1} R_{C1}}{R_{C1} + (1 + \beta_2) R_{E2}}$$

* **Tính toán các thông số xoay chiều của mạch ghép tầng trực tiếp**

Hình 4.8 mô tả sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại ghép trực tiếp ở hình 4.6. Các thông số trong chế độ xoay chiều dựa trên những tính toán đã được mô tả chi tiết trong phần 3.2.3.1.

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI



Hình 4.8: Sơ đồ tương đương xoay chiều của hình 4.6.

+ Trở kháng vào của mạch bằng trở kháng vào của tầng đầu:

$$Z_i = Z_{i1} = R_1 // R_2 // \beta_1 r_{e1}$$

+ Trở kháng ra của mạch bằng trở kháng ra của tầng thứ hai:

$$Z_o = Z_{o2} = R_{C2}$$

+ Hệ số khuếch đại điện áp toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2}$$

trong đó:

K_{v1} là hệ số khuếch đại điện áp của tầng khuếch đại thứ nhất.

$$K_{v1} = -\frac{R_{C1} // R_{L1}}{r_{e1}}$$

R_{L1} là tải của tầng thứ nhất.

$$R_{L1} = \beta_2 r_{e2}$$

K_{v2} là hệ số khuếch đại điện áp của tầng khuếch đại thứ hai.

$$K_{v2} = -\frac{R_{C2} // R_L}{r_{e2}}$$

* Nhận xét:

▷ Ưu điểm:

- Ít linh kiện hơn, giá thành và công suất tiêu thụ thấp hơn;
- Băng thông không bị ảnh hưởng như hai phương pháp trên.

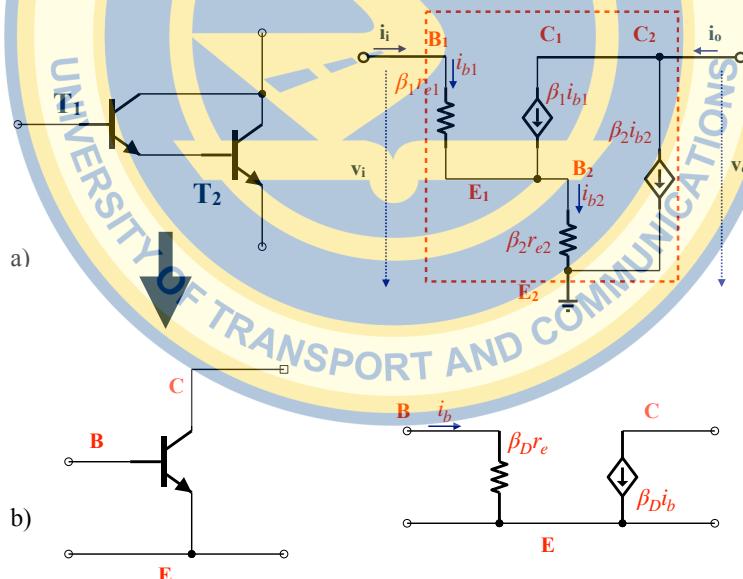
▷ Nhược điểm

- Các tầng không được cách ly ở chế độ một chiều, vì vậy khó ổn định điểm công tác tĩnh;
- Hiệu suất không cao bằng các phương pháp trên.

4.2.4 Một số kiểu ghép đặc biệt

4.2.4.1 Ghép kiểu Darlington

Hình 4.9 biểu diễn sơ đồ kết nối và sơ đồ tương đương xoay chiều của một cặp transistor Darlington.



Hình 4.9: a) Sơ đồ ghép kiểu Darlington và sơ đồ tương đương xoay chiều; b) Sơ đồ tương đương xoay chiều của một transistor Darlington.

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI

Mạch khuếch đại Darlington gồm hai tầng khuếch đại đơn, trong đó, hai cực Collector được ghép nối trực tiếp với nhau. Đặc điểm của mạch khuếch đại Darlington là mạch khuếch đại dòng (có hệ số khuếch đại dòng điện rất cao). Tầng khuếch đại thứ nhất được mắc theo kiểu Collector chung, tầng khuếch đại thứ hai có thể là Emitter chung hoặc Collector chung.

Coi cặp Darlington như một transistor tương đương, khi đó thông số xoay chiều tương ứng trong hình 4.9(b) được xác định từ thông số trong hình 4.9(a) của cặp Darlington như sau:

+ Trở kháng vào:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_{b1}} = \beta_1 r_{e1} + (1 + \beta_1)\beta_2 r_{e2}$$

+ Hệ số khuếch đại dòng của cặp Darlington:

$$\begin{aligned} K_i &= \beta_D = \frac{i_o}{i_i} \\ \Rightarrow \beta_D &= \frac{\beta_1 i_{b1} + \beta_2 i_{b2}}{i_{b1}} = \frac{\beta_1 i_{b1} + \beta_2(\beta_1 + 1)i_{b1}}{i_{b1}} \end{aligned}$$

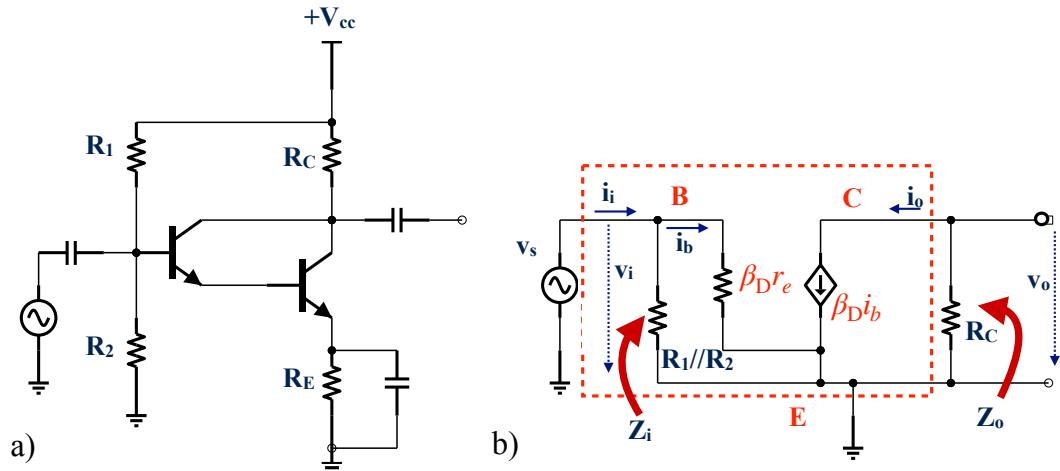
Suy ra:

$$\boxed{\beta_D = \beta_1 + (\beta_1 + 1)\beta_2 \approx \beta_1\beta_2} \quad (4.5)$$

Có thể thấy trong biểu thức (4.5), hệ số khuếch đại dòng của transistor Darlington bằng tích của hệ số khuếch đại dòng của mỗi transistor thành phần. Do đó, mạch khuếch đại Darlington còn được gọi là mạch khuếch đại dòng.

Hình 4.10(a) biêt diêt một sơ đồ mạch khuếch đại Darlington, khi đó ta có thể thay thế cặp transistor bởi một transistor Darlington tương đương, và bài toán đưa về một mạch khuếch đại Emitter chung¹ có hệ số khuếch đại dòng $\beta_D = \beta_1\beta_2$.

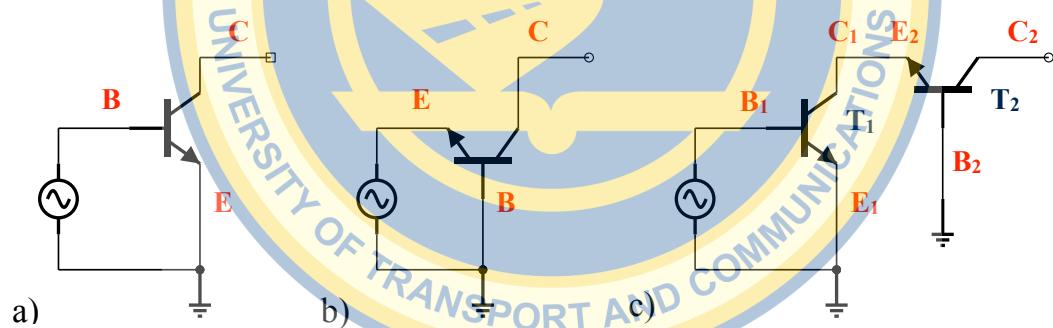
¹bạn đọc tự tìm thông số của mạch như cách đã thực hiện trong Chương 3



Hình 4.10: a) Mạch khuếch đại sử dụng cặp Darlington và b) Sơ đồ tương đương xoay chiều.

4.2.4.2 Ghép kiểu Cascode

Mạch Cascode là một mạch ghép của hai mạch khuếch đại CE và CB như sơ đồ nguyên tắc trong hình 4.11.

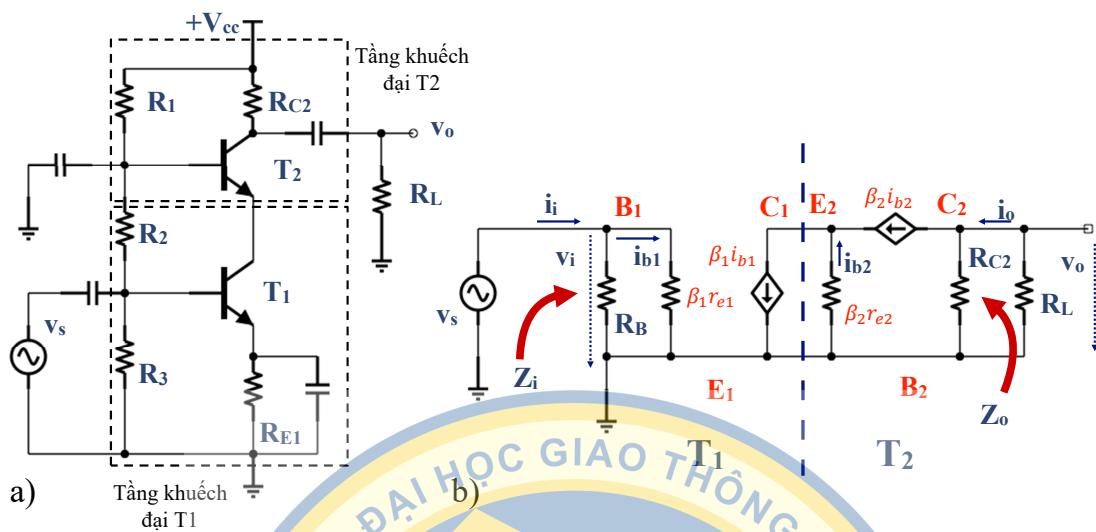


Hình 4.11: a) Sơ đồ khuếch đại CE, b) Sơ đồ khuếch đại CB và c) Mạch ghép Cascode.

Mạch khuếch đại làm việc ở khu vực tần số cao thường được mắc kiểu cực gốc chung CB. Tuy nhiên, tầng khuếch đại này có trở kháng vào nhỏ nên hệ số khuếch đại toàn phần thấp. Mạch khuếch đại Cascode chính là giải pháp khắc phục nhược điểm này.

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI

Hình 4.12 biểu diễn một mạch khuếch đại Cascode và sơ đồ tương đương xoay chiều tương ứng.



Hình 4.12: a) Mạch khuếch đại Cascode và b) Sơ đồ tương đương xoay chiều.

Từ sơ đồ tương đương xoay chiều ta tính được các thông số xoay chiều của mạch như sau:

+ Trở kháng vào:

$$R_B = R_2 // R_3 \\ \Rightarrow Z_i = (R_B // \beta_1 r_{e1})$$

+ Trở kháng ra:

$$Z_o = R_{C2}$$

+ Hệ số khuếch đại áp: Do tầng sau là tầng khuếch đại măc kiểu CB nên trở kháng đầu vào của tầng này được xác định theo biểu thức 3.32.

$$Z_{i2} \approx r_{e2}$$

Z_{i2} chính là tải của tầng đầu măc kiểu CE nên hệ số khuếch đại K_{v1} được tính theo biểu thức 3.26:

$$K_{v1} = -\frac{r_{e2}}{r_{e1}}$$

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại

Tầng thứ hai măc kiểu CB có hệ số khuếch đại K_{v2} được tính theo biểu thức 3.34:

$$K_{v2} = \frac{(R_{C2}/R_L)}{r_{e2}}$$

Vậy hệ số khuếch đại áp của cả mạch được xác định theo biểu thức:

$$K_v = K_{v1}K_{v2} = -\frac{r_{e2}}{r_{e1}} \times \frac{(R_{C2}/R_L)}{r_{e2}} = -\frac{(R_{C2}/R_L)}{r_{e1}}$$

+ Hệ số khuếch đại dòng điện:

$$K_i = \frac{i_o}{i_i}$$

$$\Rightarrow K_i = \frac{v_o/R_L}{v_i/Z_i} = K_v \times \frac{Z_i}{R_L}$$

* Nhận xét:

- ▷ Trở kháng vào lớn (bằng trở kháng vào của mạch khuếch đại CE);
- ▷ Hệ số khuếch đại áp nhỏ, hệ số khuếch đại dòng và hệ số khuếch đại áp toàn phần lớn do trở kháng vào lớn;
- ▷ Tần số làm việc cao (bằng tần số giới hạn của mạch CB).

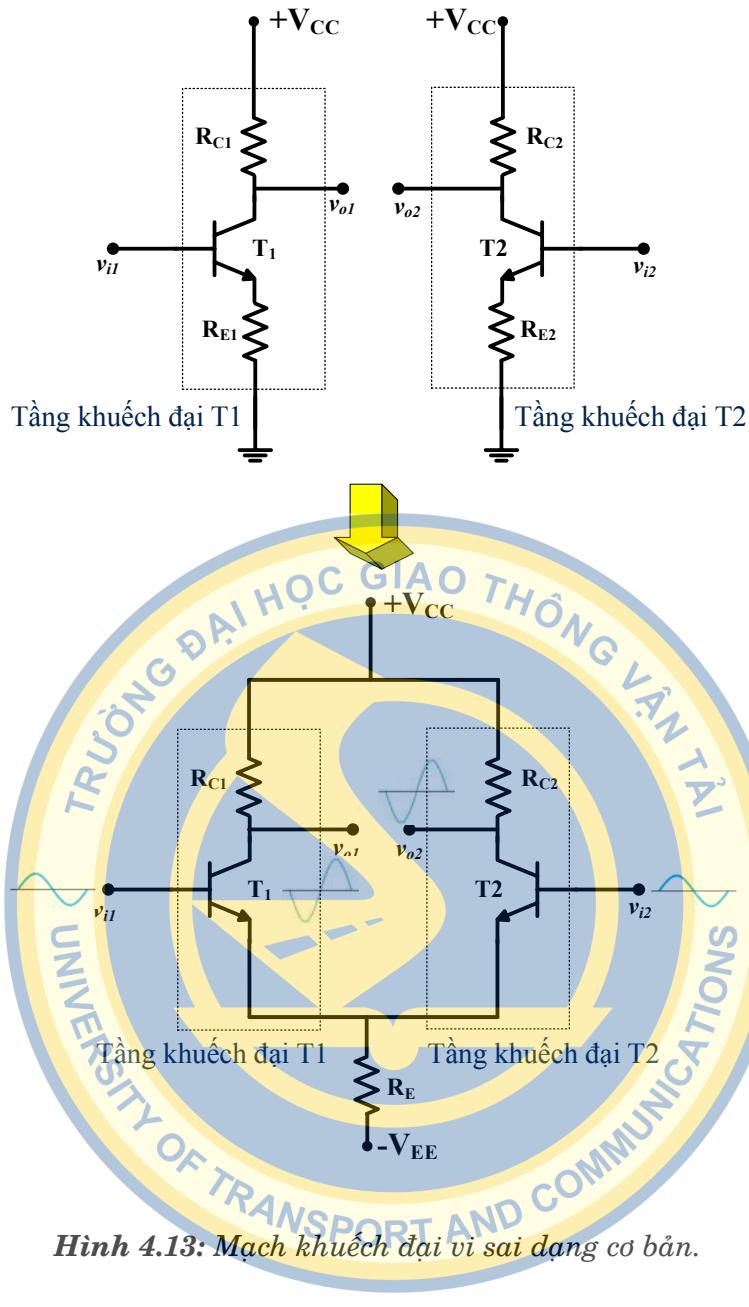
4.2.4.3 Ghép tầng vi sai

Nhiệm vụ của tầng mạch khuếch đại vi sai là khuếch đại độ chênh lệch điện áp đầu vào của hai tầng khuếch đại đơn. Về bản chất, mạch khuếch đại vi sai khuếch đại tín hiệu biến thiên chậm (tần số thấp).

Hình 4.13 mô tả một dạng cơ bản của mạch khuếch đại vi sai, gồm hai tầng khuếch đại Emitter chung ghép trực tiếp với nhau.

Mạch được phân cực bởi hai nguồn đối đối xứng: V_{CC} và $-V_{EE}$, $R_{C1} = R_{C2} = R_C$, T_1 và T_2 giống nhau về mọi đặc tính, điện trở R_E được dùng chung cho cả hai tầng khuếch đại đơn.

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI



Có 2 phương pháp lấy tín hiệu ra:

- ▷ **Đầu ra vi sai:** Tín hiệu được lấy giữa 2 cực Collector là

$$v_o = v_{o1} - v_{o2}$$

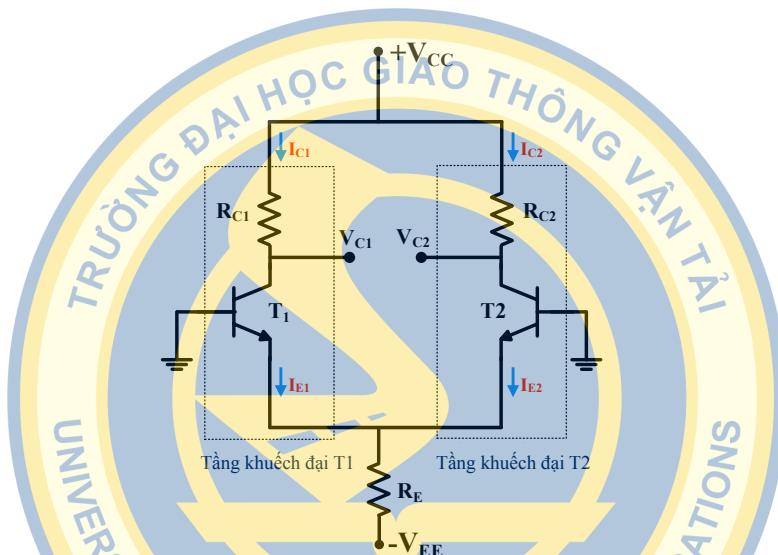
- ▷ **Đầu ra đơn cực:** Tín hiệu được lấy giữa một cực Collector và đất;

Chế độ hoạt động của mạch khuếch đại vi sai:

- ▷ *Chế độ đơn*: đưa một tín hiệu vào (v_{i1} hoặc v_{i2}) còn tín hiệu vào còn lại nối đất;
- ▷ *Chế độ vi sai*: đưa 2 tín hiệu vào v_{i1} và v_{i2} ;
- ▷ *Chế độ đồng pha*: đưa 2 tín hiệu vào bằng nhau $v_{i1} = v_{i2}$.

* Tính toán các thông số một chiều

Khi xét mạch ở chế độ một chiều thì các đầu vào xoay chiều coi như nối đất nên mạch có dạng như hình 4.14.



Hình 4.14: Sơ đồ phân cực tĩnh mạch khuếch đại vi sai.

Do mạch có tính chất đối xứng nên ta có các dòng phân cực tĩnh qua 2 transistor là như nhau:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E \approx I_C$$

Vì vậy, dòng qua điện trở R_E sẽ là $2I_E$. Áp dụng định luật KVL cho đầu vào ta có:

4.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP GHÉP TẦNG KHUẾCH ĐẠI

$$V_{EE} - V_{BE} = 2I_E R_E$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{2R_E}$$

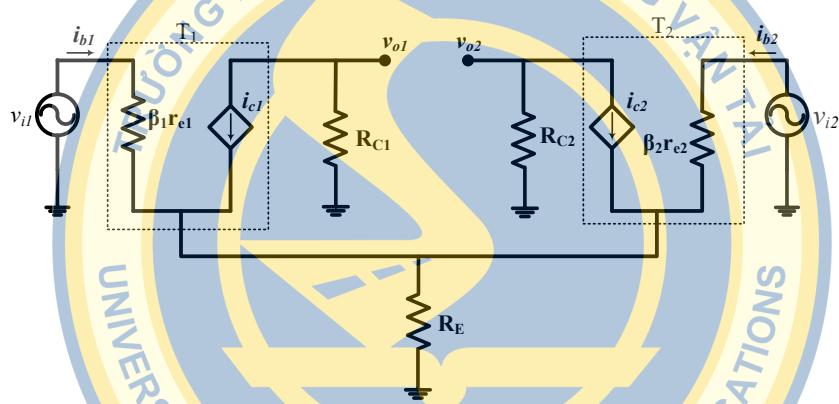
Phương trình đường tải tĩnh:

$$V_{CC} + V_{EE} = R_C I_C + V_{CE} + 2R_E I_E$$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - (R_C + 2R_E) I_C$$

* Khảo sát thông số xoay chiều của mạch

Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại vi sai được biểu diễn trong hình 4.15.



Hình 4.15: Sơ đồ tương đương xoay chiều mạch khuếch đại vi sai 4.13.

▷ Chế độ đồng pha (Common Mode):

Mỗi tầng khuếch đại đơn là tầng khuếch đại Emitter chung và hoàn toàn đối xứng:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta; r_{e1} = r_{e2} = r_e; i_{b1} = i_{b2} = i_b; R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

Điện áp đầu vào:

$$v_{i1} = v_{i2} = i_b \beta r_e + 2i_e R_E = 2 [\beta r_e + (1 + \beta) R_E] i_b$$

Điện áp ra:

$$v_{o1} = v_{o2} = -i_c R_C$$

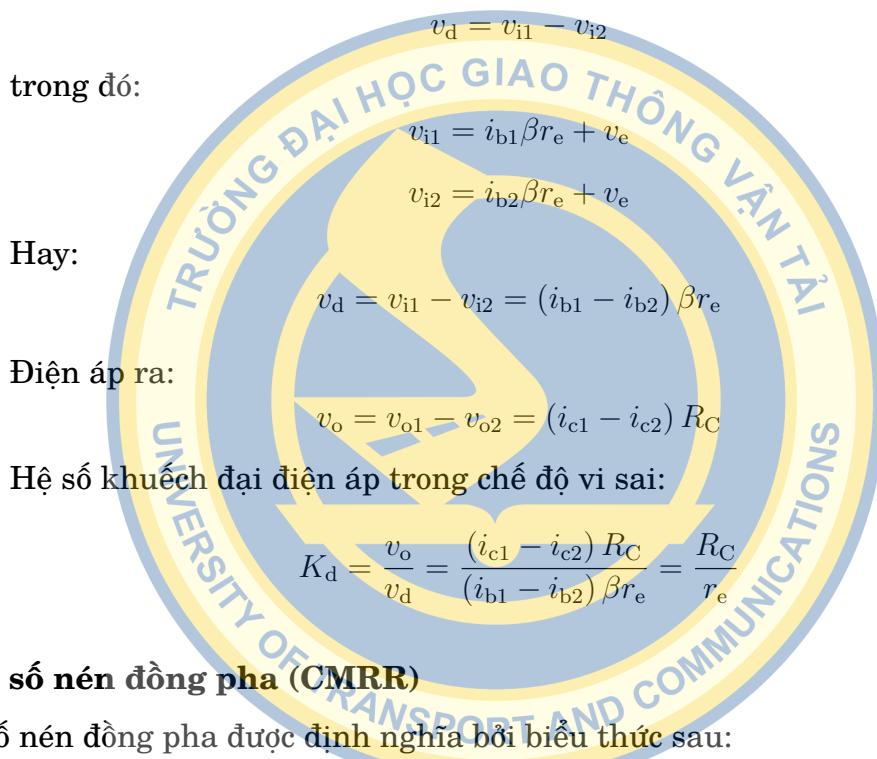
Hệ số khuếch đại đồng pha:

$$K_{cm} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = \frac{v_{o2}}{v_{i2}} = -\frac{i_c R_C}{2i_b [\beta r_e + (1 + \beta) R_E]} \approx -\frac{R_C}{r_e + R_E}$$

▷ **Chế độ vi sai (Differential mode)**

Trong chế độ vi sai, hai đầu vào của mạch được nối với các tín hiệu khác nhau: $v_1 \neq v_2$.

Điện áp vào:

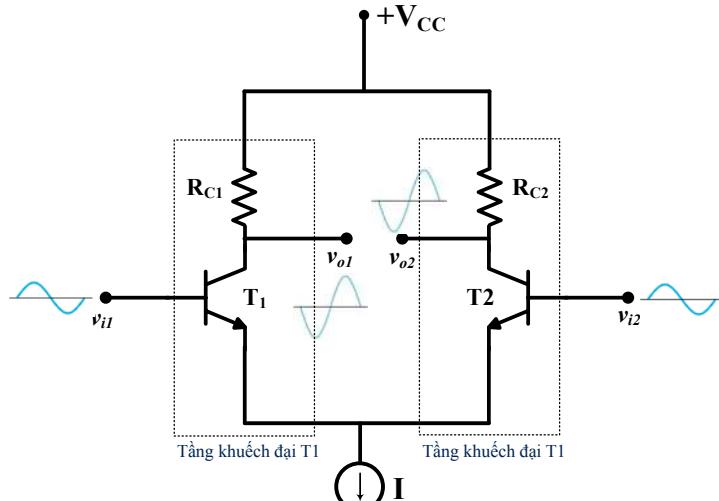


* **Tỷ số nén đồng pha (CMRR)**

Tỷ số nén đồng pha được định nghĩa bởi biểu thức sau:

$$CMRR = \frac{K_d}{K_{cm}}$$

Một mạch khuếch đại vi sai lý tưởng khi tỷ số nén đồng pha rất lớn, khi đó thành phần tín hiệu chung không ảnh hưởng tới tín hiệu ra, tức là K_{cm} càng nhỏ càng tốt. Để $K_{cm} \rightarrow 0$ thì $R_E \rightarrow \infty$, điều này yêu cầu nguồn cấp V_{CC} và V_{EE} có giá trị rất lớn. Do đó, một giải pháp được đưa ra đó là thay R_E bằng một nguồn dòng không đổi như biểu diễn trong hình 4.16.



Hình 4.16: Mạch khuếch đại vi sai sử dụng nguồn dòng.

4.3 MỘT SỐ VÍ DỤ

Ví dụ 4.1. Cho sơ đồ mạch như hình 4.17.

- + Tính các thông số của mạch trong chế độ một chiều và xoay chiều ?
- + Xác định điện áp ra khi điện áp vào là $25 \mu\text{V}$.

Bài giải:

* Tính toán các thông số trong chế độ một chiều

Mạch trên gồm hai tầng khuếch đại CE giống nhau được ghép thông qua tụ C_2 . Hình 4.18 biểu diễn sơ đồ tương đương một chiều của mỗi tầng (các tụ hở mạch).

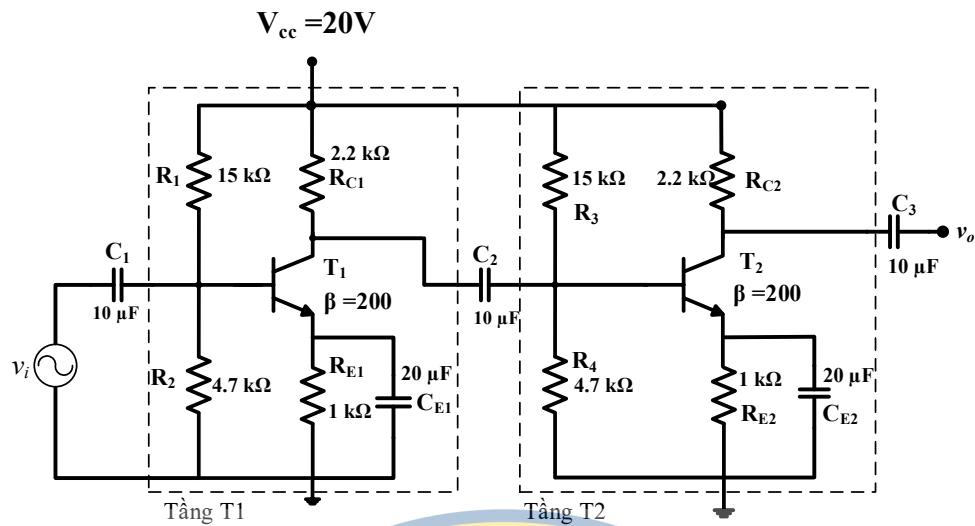
$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = \frac{4,7}{15 + 4,7} \times 20 = 4,77\text{V}$$

$$R_{B1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{15 \times 4,7}{15 + 4,7} = 3,58\text{k}\Omega$$

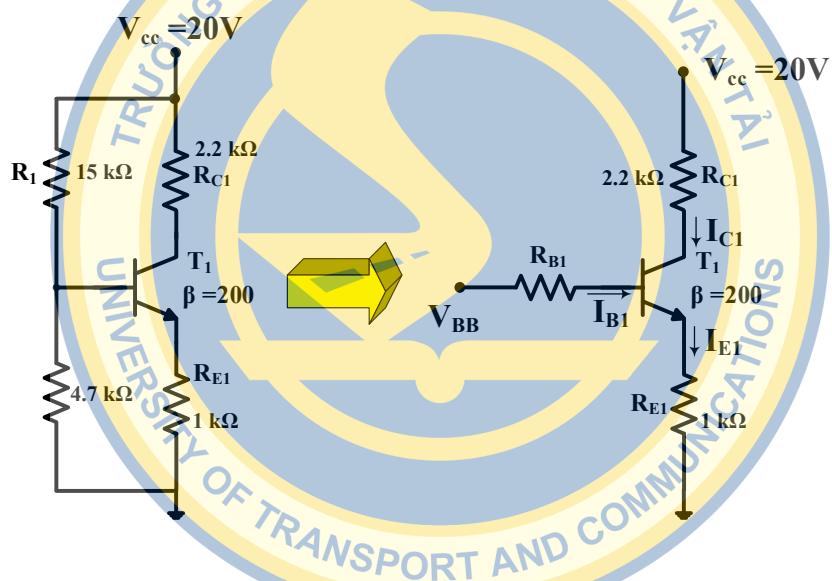
Áp dụng định luật KVL cho vòng đầu vào:

$$V_{BB} - V_{BE} = I_{B1} R_{B1} + I_{E1} R_{E1}$$

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại



Hình 4.17: Một mạch khuếch đại hai tầng ghép kiểu tụ điện.



Hình 4.18: Sơ đồ tương đương một chiều của một tầng khuếch đại trong mạch 4.17.

$$V_{BB} - V_{BE} = [R_{B1} + (1 + \beta) R_{E1}] \times I_{B1}$$

Dòng tại cực Base của T_1 :

$$I_{B1} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{B1} + (1 + \beta) R_{E1}} = \frac{4,77 - 0,7}{3,58 + (1 + 200) \times 1} = 0,02 \text{ mA} = 20 \mu\text{A}$$

4.3. MỘT SỐ VÍ DỤ

Dòng tại cực Collector của T₁:

$$I_{C1} = \beta I_{B1} = 200 \times 0,02 = 4 \text{ mA}$$

Dòng tại cực Emitter của T₁:

$$I_{E1} = (1 + \beta) I_{B1} = (1 + 200) \times 0,02 = 4,02 \text{ mA}$$

Áp dụng định luật KVL tại vòng đầu ra:

$$V_{CC} - V_{C1E1} = I_{C1}R_{C1} + I_{E1}R_{E1} \approx (R_{C1} + R_{E1}) I_{C1}$$

Hay:

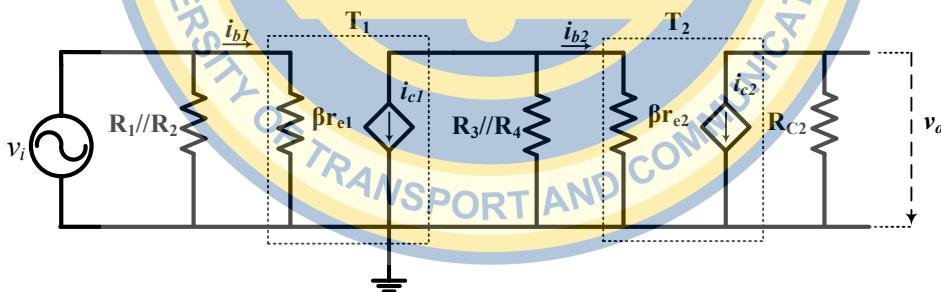
$$V_{C1E1} = V_{CC} - (R_{C1} + R_{E1}) I_{C1} = 20 - (2,2 + 1) \times 4 = 7,2 \text{ V}$$

Hai tầng khuếch đại giống nhau nên các thông số tính toán có giá trị là như nhau.

* **Tính toán các thông số trong chế độ xoay chiều**

$$r_{e1} = r_{e2} = \frac{V_T}{I_{E1}} = \frac{26}{4,02} = 6,47 \Omega$$

Hình 4.19 biểu diễn sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại cho trên hình 4.17.



Hình 4.19: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch 4.17.

+ Trở kháng vào của mạch chính là trở kháng vào của tầng thứ nhất:

$$Z_i = Z_{i1} = R_1//R_2//\beta r_{e1} = 0,95 \text{ k}\Omega$$

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại

+ Trở kháng ra của mạch chính là trở kháng ra của tầng thứ hai:

$$Z_o = R_{C2} = 2,2 \text{ k}\Omega$$

+ Hệ số khuếch đại áp toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2}$$

trong đó:

Hệ số khuếch đại điện áp của tầng thứ nhất:

$$K_{v1} = -\frac{R_{C1}/R_{L1}}{r_{e1}}$$

R_{L1} là tải của tầng thứ nhất, hay cũng chính là trở kháng vào của tầng thứ hai:

$$R_{L1} \equiv Z_{i2} = R_3//R_4//\beta r_{e2} = 0,95 \text{ k}\Omega$$

Vậy:

$$K_{v1} = -\frac{R_{C1}/R_{L1}}{r_{e1}} = -102,5$$

Hệ số khuếch đại của tầng thứ hai (hỗn mạch tải):

$$K_{v2} = -\frac{R_{C2}}{r_{e2}} = -340,0$$

$$\Rightarrow K_v = K_{v1} \times K_{v2} = (-102,5) \times (-340,0) = 34,869$$

+ Giá trị điện áp tại đầu ra khi điện áp đầu vào là $25 \mu V$:

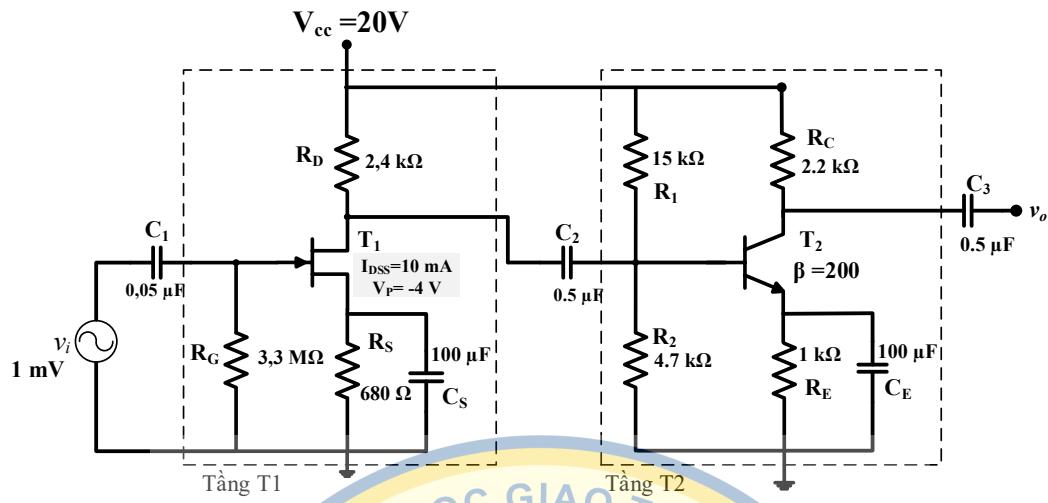
$$v_o = K_v \times v_i = 34,869 \times 25 \mu V = 0,871 V$$

Ví dụ 4.2. Cho sơ đồ mạch như hình 4.20.

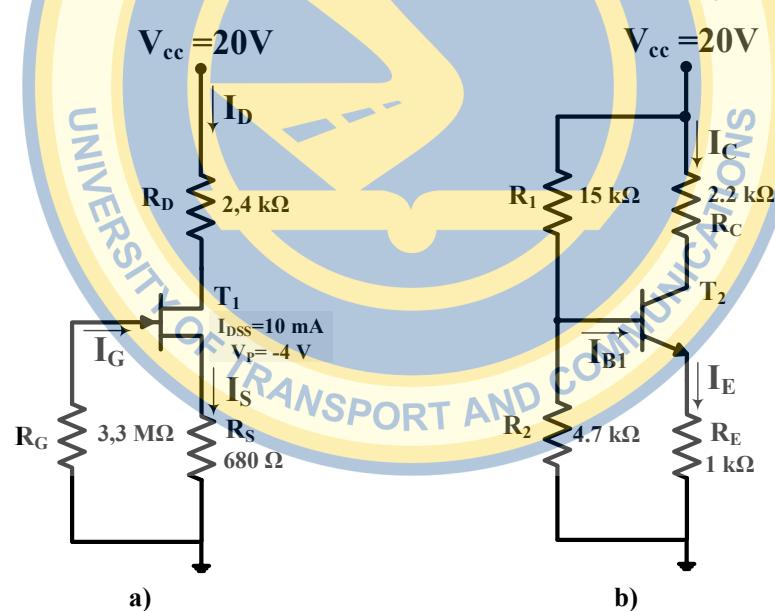
Hãy tính các thông số trong chế độ một chiều và xoay chiều.

* Tính toán thông số trong chế độ một chiều

Hình 4.21 biểu diễn sơ đồ tương đương một chiều của hai tầng khuếch đại. Tầng thứ nhất là sơ đồ kiểu tự phân cực cho JFET, tầng thứ hai là sơ đồ kiểu mạch phân áp cho BJT.



Hình 4.20: Một mạch khuếch hai tầng sử dụng FET và BJT.



Hình 4.21: Sơ đồ tương đương một chiều của mạch 4.20: a) Tầng 1 và b) Tầng 2.

Chương 4: Ghép tầng mạch khuếch đại

▷ Xét sơ đồ phân cực cho tầng thứ nhất:

Áp dụng định luật KVL cho vòng đầu vào:

$$-V_{GS} = I_G R_G + I_S R_S$$

Do R_G rất lớn, nên $I_G \approx 0$, do đó:

$$V_{GS} = -I_S R_S = -I_D R_S$$

Phương trình truyền đạt:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$

Từ các phương trình trên, ta có:

$$V_{GS} = -1,89 \text{ V}$$

$$I_D = 2,78 \text{ mA}$$

Áp dụng định luật KVL cho vòng đầu ra:

$$V_{CC} - V_{DS} = I_D (R_D + R_S)$$

$$V_{DS} = V_{CC} - I_D (R_D + R_S) = 11,44 \text{ V}$$

▷ Xét sơ đồ phân cực cho tầng thứ hai:

Các thông số về dòng và áp phân cực của tầng thứ hai được tính giống như ví dụ 4.1.

* Tính toán thông số trong chế độ xoay chiều

Tầng thứ nhất là mạch khuếch đại CS và tầng thứ hai là mạch khuếch đại CE, ghép tầng qua tụ điện nên sơ đồ tương đương như hình 4.22.

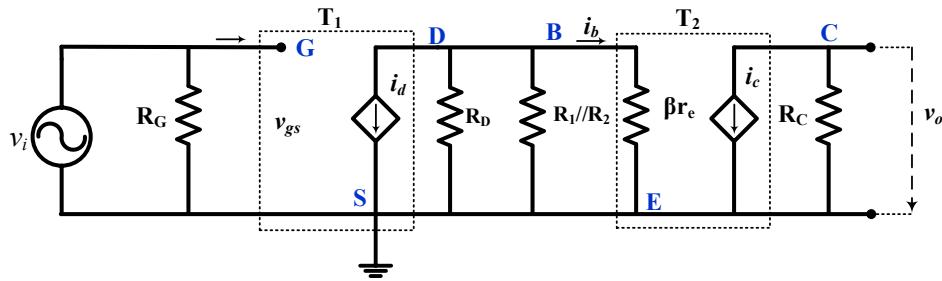
Trở kháng vào của mạch là trở kháng vào của tầng đầu tiên:

$$Z_i = Z_{i1} = R_G = 3,3 \text{ M}\Omega$$

Trở kháng ra của mạch là trở kháng ra của tầng thứ hai:

$$Z_o = Z_{o2} = R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$$

4.3. MỘT SỐ VÍ DỤ



Hình 4.22: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch 4.20.

Hệ số khuếch đại điện áp của tầng thứ nhất:

$$K_{v1} = -\frac{-i_d (R_D // R_{L1})}{v_{gs}} = -g_m (R_D // R_{L1})$$

trong đó:

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_p} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right) = -\frac{2 \times 10}{-4} \left(1 - \frac{-1,89}{-4}\right) = 2,64 \text{ mS}$$

R_{L1} là tải của tầng thứ nhất, cũng chính là trở kháng vào của tầng thứ hai:

$$R_{L1} = R_1 // R_2 // \beta r_e = 0,95 \text{ k}\Omega$$

Vậy:

$$K_{v1} = -g_m (R_D // R_{L1}) = 1,8$$

Hệ số khuếch đại điện áp của tầng thứ hai:

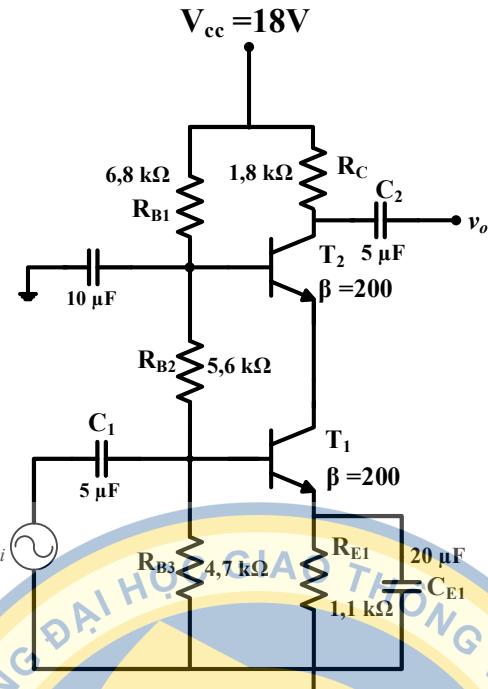
$$K_{v2} = -\frac{R_C}{r_e} = -340,0$$

Hệ số khuếch đại điện áp toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2} = -612$$

Ví dụ 4.3. Cho sơ đồ mạch khuếch đại Cascode như hình 4.23.

Xác định các thông số một chiều và xoay chiều của mạch.



Hình 4.23: Một mạch khuếch đại Cascode.

* **Tính toán các thông số trong chế độ một chiều**

Trong sơ đồ tương đương một chiều, các tụ làm hở mạch nhánh có chứa nó. Giả thiết dòng đi qua các điện trở R_1 , R_2 và R_3 lớn hơn nhiều dòng trên các cực Base của transistor. Vì vậy, điện áp tại cực B₁:

$$V_{B1} = \frac{R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} \times V_{CC} = \frac{4,7}{6,8 + 5,6 + 4,7} \times 18 = 4,95 \text{ V}$$

Điện áp tại cực B₂:

$$V_{B2} = \frac{R_{B2} + R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} \times V_{CC} = \frac{5,6 + 4,7}{6,8 + 5,6 + 4,7} \times 18 = 10,84 \text{ V}$$

Dòng điện tại cực Emitter của T₁:

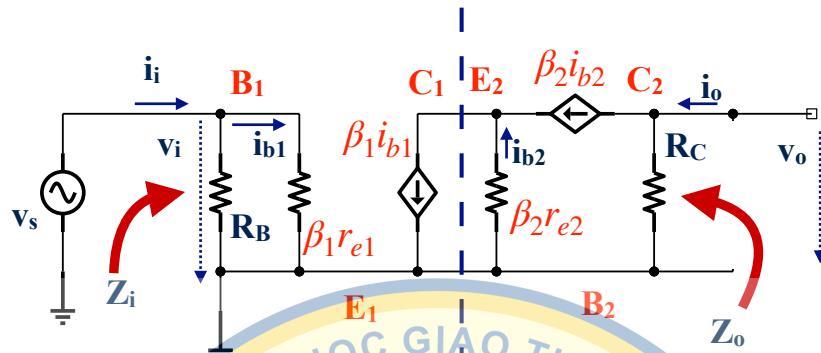
$$I_{E1} = \frac{V_{TH1} - V_{BE1}}{R_E} = \frac{4,95 - 0,7}{1,1} = 3,86 \text{ mA}$$

$$I_{E1} = I_{C1} = I_{E2} = I_{C2}$$

Suy ra:

$$r_{e1} = r_{e2} = \frac{V_T}{I_{E1}} = \frac{26}{3,86} = 6,74 \Omega$$

* Tính toán các thông số trong chế độ xoay chiều



Hình 4.24: Sơ đồ tương đương xoay chiều của mạch 4.23.

Trở kháng vào của mạch:

$$Z_i = Z_{i1} = R_{B2} // R_{B3} // \beta r_e = 0,88 k\Omega$$

Trở kháng ra của mạch:

$$Z_o = Z_{o2} = R_C = 1,8 k\Omega$$

Hệ số khuếch đại điện áp của tầng thứ nhất:

$$K_{v1} = -\frac{r_{e2}}{r_{e1}} = -1$$

Hệ số khuếch đại toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2} = -267,23$$

Hệ số khuếch đại toàn mạch:

$$K_v = K_{v1} \times K_{v2} = -267,23$$

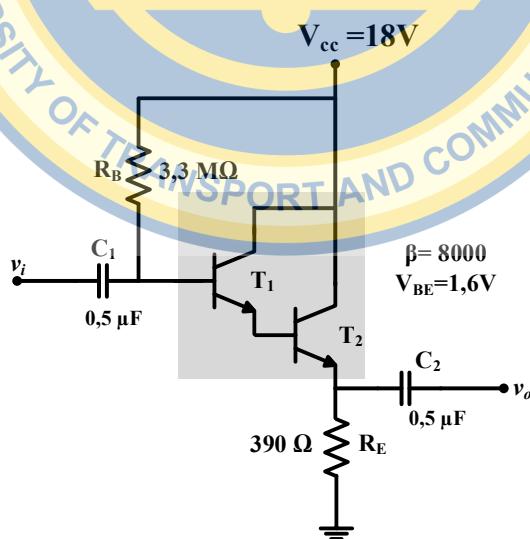
Ôn tập chương 4

CÂU HỎI LÝ THUYẾT

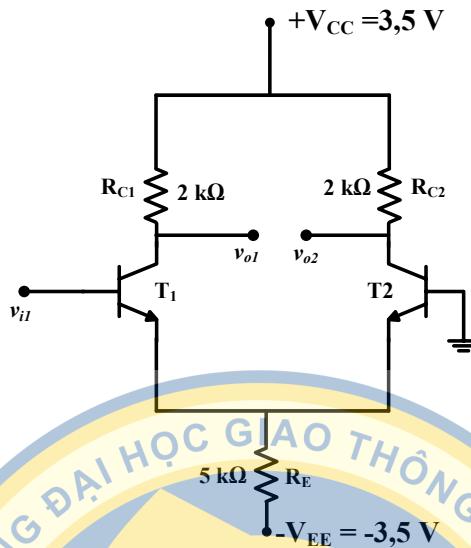
- 4.1. Tại sao phải ghép tầng khuếch đại ?
- 4.2. Để có mạch có hệ số khuếch đại từ vài trăm đến hàng nghìn thường phải làm như thế nào ?
- 4.3. Hãy cho biết có bao nhiêu kiểu ghép tầng khuếch đại cơ bản ? Phân tích đặc điểm của từng kiểu mạch đó.
- 4.4. Cần sử dụng mạch nào để khuếch đại tín hiệu một chiều ?
- 4.5. Hãy cho biết có bao nhiêu kiểu ghép tầng khuếch đại cơ bản ? Phân tích đặc điểm của từng kiểu mạch đó.

BÀI TẬP

- 4.1. Cho sơ đồ mạch như hình dưới đây.
Xác định các thông số của mạch trong chế độ một chiều và xoay chiều.

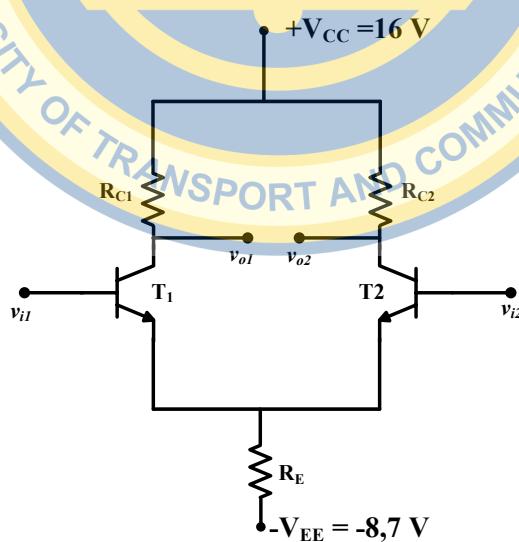


4.2. Cho sơ đồ mạch như hình dưới đây. Hệ số khuếch đại dòng $\beta = 150$. Xác định dòng i_E , v_{o1} và v_{o2} nếu $v_{i1} = -2,7 \text{ V}$.



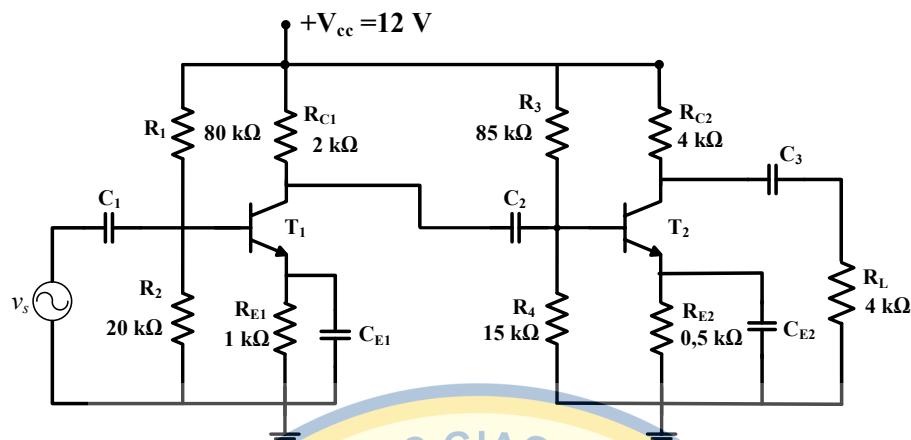
4.3. Cho sơ đồ mạch như hình dưới đây. Hệ số khuếch đại dòng $\beta = 200$, $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$.

- Thiết kế mạch sao cho: $I_{C1} = I_{C2} = 2 \text{ mA}$ và $V_{O2} = 8 \text{ V}$ nếu $v_{i1} = v_{i2} = 0$.
- Vẽ đường tải một chiều và điểm công tác tĩnh của transistor T₂.
- Xác định giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của tín hiệu đầu vào trong chế độ đồng pha.



4.4. Cho sơ đồ mạch như hình dưới đây.

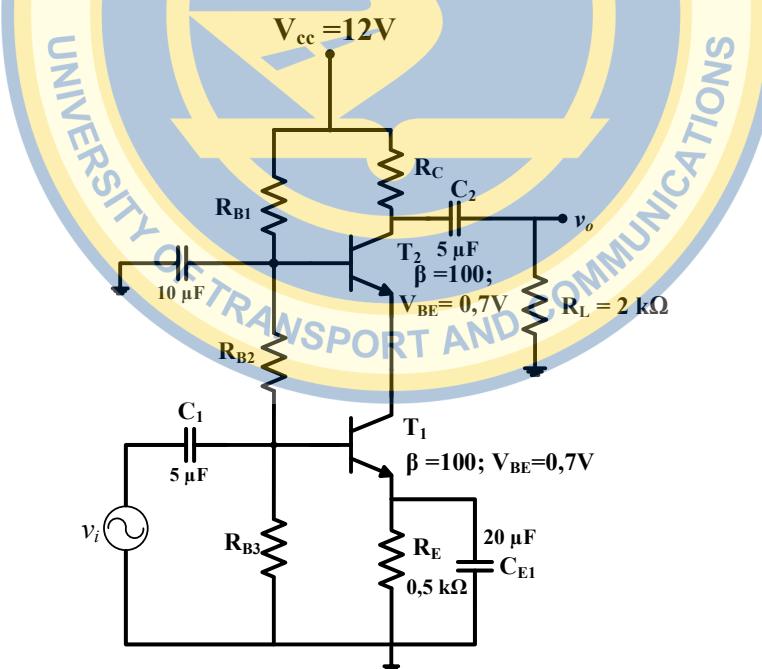
Xác định các thông số của mạch trong chế độ một chiều và xoay chiều.



4.5. Cho sơ đồ mạch như hình dưới đây.

a) Tính giá trị của R_C , R_1 , R_2 , và R_3 sao cho: $I_{C2} = 0,5 \text{ mA}$ và $V_{CE1} = V_{CE2} = 4 \text{ V}$ biết $R_{B1} + R_{B2} + R_{B3} = 100 \text{ k}\Omega$ (Bỏ qua dòng tại cực Base và dòng tại cực Collector và Emitter bằng nhau trên cả hai transistor).

b) Xác định hệ số khuếch đại điện áp của toàn mạch.



Chương 5

MẠCH KHUẾCH ĐẠI CÔNG SUẤT

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Khái niệm cơ bản về mạch khuếch đại công suất;
- ▷ Các chế độ hoạt động mạch khuếch đại công suất;
- ▷ Phương pháp phân tích mạch khuếch đại công suất;
- ▷ transistor công suất và IC khuếch đại công suất.

5.1 GIỚI THIỆU CHUNG

5.1.1 Định nghĩa và phân loại

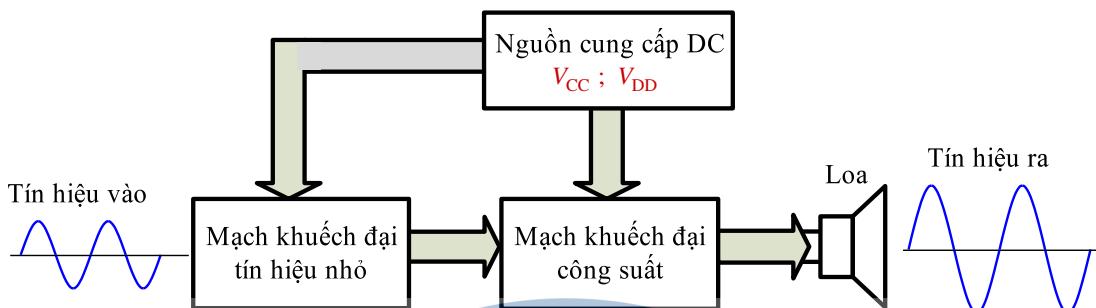
Tầng khuếch đại công suất có nhiệm vụ nâng cao công suất tín hiệu trước khi đưa ra tải như loa, cuộn lái tia (trong tivi), mô tơ... Trong thực tế, hệ thống khuếch đại gồm nhiều tầng khuếch đại ghép với nhau như mô tả trong hình 5.1 và tầng cuối cùng thường là tầng khuếch đại công suất. Tín hiệu vào hệ thống có mức điện áp thấp được khuếch đại thông qua các mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ rồi mới đưa vào tầng khuếch đại công suất.

Trong tầng khuếch đại công suất, **hiệu suất** là tham số được sử dụng để đánh giá chất lượng của một mạch khuếch đại công suất. Hiệu suất được tính như sau:

$$\eta = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100 \% \quad (5.1)$$

trong đó, $P_{o(ac)}$ là công suất tín hiệu ra xoay chiều trên tải và $P_{i(dc)}$ là công suất nguồn cấp một chiều.

Mạch khuếch đại công suất lý tưởng đạt được hiệu suất 100 %, nghĩa là toàn bộ năng lượng của nguồn DC cung cấp cho mạch được chuyển đổi thành năng lượng AC trên tải. Tuy nhiên, trên thực tế do năng lượng một phần bị tiêu tán trên các linh kiện nên hiệu suất của mạch luôn nhỏ hơn 100 %.



Hình 5.1: Các thành phần cơ bản của mạch khuếch đại công suất.

5.1.2 Phân loại mạch khuếch đại công suất

Mạch khuếch đại công suất được phân loại theo khoảng thời gian dẫn của transistor trong một chu kỳ tín hiệu. Phân cực tinh của mạch khuếch đại sẽ quyết định chế độ làm việc của mạch. Với mạch khuếch đại công suất, tín hiệu đưa vào mạch có biên độ đủ lớn so với điện áp cung cấp, kết quả là làm cho điểm làm việc thay đổi theo sự thay đổi của tín hiệu. Trên cơ sở đó, mạch khuếch đại công suất được chia thành các loại chính như sau:

- ▷ **Chế độ A:** Điểm công tác tĩnh Q của transistor nằm trong miền tuyến tính và transistor sẽ dẫn trong toàn bộ chu kỳ của tín hiệu xoay chiều đầu vào.
- ▷ **Chế độ B:** Điểm công tác tĩnh Q của transistor nằm trong miền ngắn, do đó transistor chỉ dẫn trong một nửa chu kỳ của tín hiệu xoay chiều đầu vào.
- ▷ **Chế độ AB:** Điểm công tác tĩnh Q của transistor nằm trong miền tuyến tính, sát với miền ngắn, do đó transistor sẽ dẫn trong khoảng thời gian lớn hơn một nửa chu kỳ và nhỏ hơn một chu kỳ của tín hiệu xoay chiều đầu vào.

5.1. GIỚI THIỆU CHUNG

- ▷ **Chế độ C:** Điểm công tác tĩnh Q của transistor nằm sâu trong miền ngắn, do đó transistor sẽ dẫn trong khoảng thời gian nhỏ hơn một nửa chu kỳ của tín hiệu đầu vào.
- ▷ **Chế độ D:** Mạch có hiệu suất cao, thường được sử dụng trong chế độ xung.

Trong thực tế, có nhiều dạng mạch khuếch đại công suất khác: G, H, S,... là những biến thể của chế độ AB. Những mạch này thường có hiệu suất rất cao và được sử dụng cho những thiết kế có công suất đầu ra cao. Dạng sóng với tín hiệu vào hình sin trong một số chế độ của tầng khuếch đại công suất được mô tả như hình 5.2 (trong đó I_C là dòng phân cực).

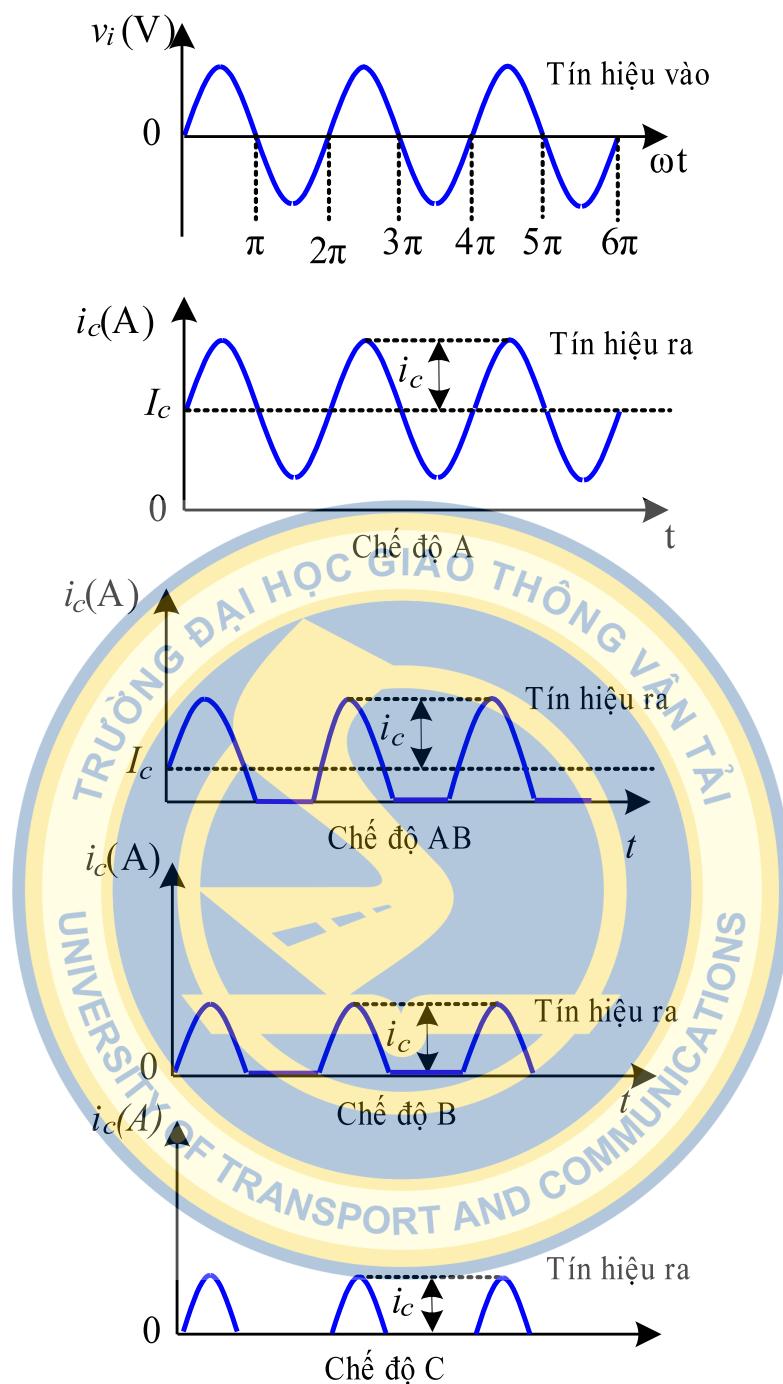
5.1.3 Transistor công suất

Transistor công suất thường hoạt động với dòng và áp lớn, dòng cực góp (I_C) với BJT hoặc dòng cực máng (I_D) với FET có thể lên tới hàng Ampe. Transistor công suất phải có trở kháng ra thấp để có thể cấp dòng lớn đến tải, có độ cách ly tiếp xúc tốt để chịu được điện áp lớn, có khả năng tản nhiệt nhanh. Phần lớn nhiệt phát sinh từ tiếp giáp Collector-Base (J_C) nên tiếp xúc này sẽ được chế tạo có tiết diện lớn nhất có thể. Transistor công suất thường có kích thước lớn như minh họa trong hình 5.3(a) và mật độ pha tạp khác với transistor khuếch đại tín hiệu nhỏ.

Bảng 5.1 so sánh thông số của transistor công suất 2N3055 với transistor khuếch đại tín hiệu nhỏ 2N2222A.

Bảng 5.1: So sánh thông số của hai transistor khuếch đại tín hiệu nhỏ và transistor công suất thông dụng.

Thông số	Transistor khuếch đại tín hiệu nhỏ (2N2222A)	Transistor công suất (2N3055)
$V_{CE(\max)}$ (V)	40	60
$I_{C(\max)}$ (A)	0,8	15
$P_T(\max)$ (W) tại 25°C	1,2	115
β	35 ÷ 100	5 ÷ 20
f_T (MHz)	300	0,8



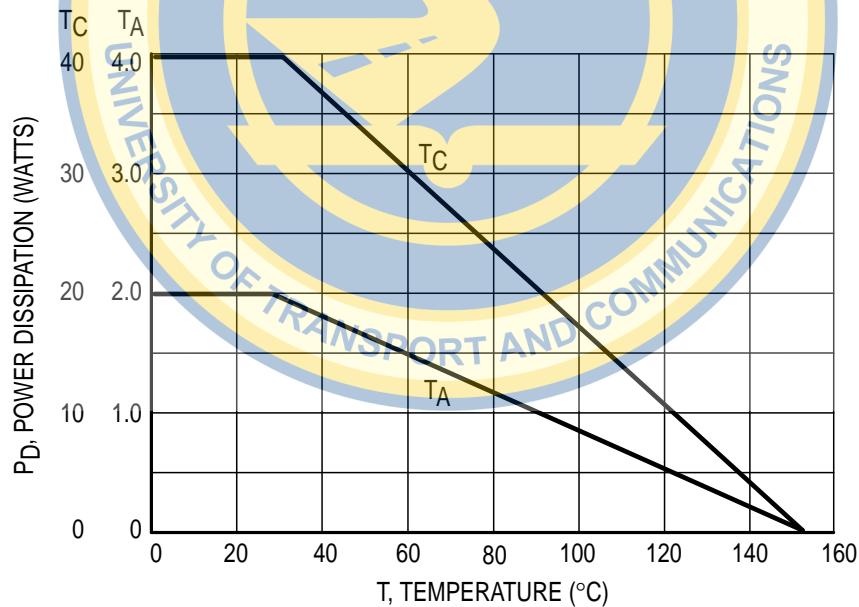
Hình 5.2: Dạng sóng tín hiệu vào/ra của mạch khuếch đại công suất.

5.1. GIỚI THIỆU CHUNG



Hình 5.3: Một số a) Transistor công suất và b) Phiên bản nhiệt thực tế.

Hình 5.4 là đường đặc tuyến công suất tối đa P_D của transistor TIP31A/C của hãng Motorola với nhiệt độ T của tiếp giáp J_C . Khi công suất tiêu tán quá lớn, lớp tiếp giáp sẽ nóng lên và làm hỏng transistor, nhiệt độ tối đa thông thường vào khoảng 100°C đến 150°C .



Hình 5.4: Đặc tuyến công suất tối đa của transistor TIP31A/C hãng Motorola.

Đặc tính của transistor công suất phụ thuộc chặt chẽ vào khả năng tiêu tán nhiệt do tiếp giáp Collector tạo ra. Có hai phương pháp chính để giảm thiểu ảnh hưởng của nhiệt:

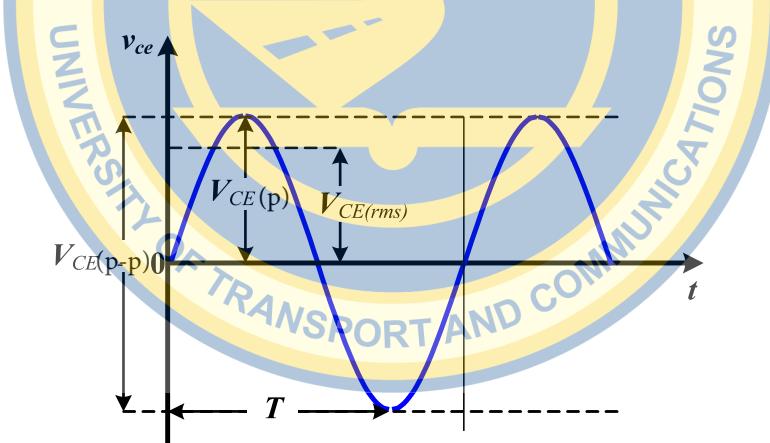
- + Phân cực để transistor làm việc ở chế độ có hiệu suất cao, giảm thiểu công suất tiêu tán trên transistor.
- + Dùng phiến tản nhiệt, như minh họa trên hình 5.3(b), gắn vào transistor để loại bỏ và tản nhanh nhiệt phát xạ từ transistor ra không khí. Thông số đặc trưng cho phiến tản nhiệt là điện trở nhiệt (R_T) đơn vị là $^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$, giá trị này càng nhỏ thì tản nhiệt càng nhanh.

5.1.4 Biểu diễn và tính toán các thông số cơ bản của mạch khuếch đại công suất

▷ **Điện áp xoay chiều**

$$v_{ce} = V_{CE(p)} \sin(\omega t)$$

Trong đó $V_{CE(p)}$ là giá trị đỉnh của điện áp $v_{ce}(t)$. Tín hiệu điện áp xoay chiều được biểu diễn trong hình 5.5 với các giá trị $V_{CE(p-p)}$ và $V_{CE(rms)}$ lần lượt là giá trị biên độ đỉnh-đỉnh ($= 2V_{CE(p)}$) và giá trị hiệu dụng ($= \sqrt{2}V_{CE(p)}$).



Hình 5.5: Biểu diễn điện áp xoay chiều.

▷ **Dòng điện xoay chiều**

$$i_c = I_{C(p)} \sin(\omega t)$$

5.1. GIỚI THIỆU CHUNG

Với $I_{C(p)}$, $I_{C(p-p)}$, $I_{C(rms)}$ lần lượt là giá trị biên độ đỉnh, đỉnh-đỉnh và hiệu dụng của dòng xoay chiều $i_c(t)$.

* Tính toán các tham số trong mạch khuếch đại công suất:

- ▷ Công suất của nguồn cấp một chiều

$$P_{i(dc)} = V_{CC} i_C = \frac{1}{T} \int V_{CC} (I_{CQ} + i_c) dt \quad (5.2)$$

- ▷ Công suất xoay chiều trên tải

$$P_{o(ac)} = V_{CE(rms)} I_{C(rms)} \quad (5.3)$$

Công suất xoay chiều ra trên tải có thể được tính theo một trong các công thức trong bảng 5.2.

Bảng 5.2: Công thức tính công suất xoay chiều ra trên tải

Giá trị hiệu dụng	Giá trị đỉnh	Giá trị đỉnh-đỉnh
$P_{o(ac)} = V_{CE(rms)} I_{C(rms)}$	$P_{o(ac)} = \frac{1}{2} V_{CE(p)} \cdot I_{C(p)}$	$P_{o(ac)} = \frac{1}{8} V_{CE(p-p)} I_{C(p-p)}$
$P_{o(ac)} = R_C I_{C(rms)}^2$	$P_{o(ac)} = \frac{1}{2} I_{C(p)}^2 R_C$	$P_{o(ac)} = \frac{1}{8} I_{C(p-p)}^2 R_C$
$P_{o(ac)} = \frac{V_{CE(rms)}^2}{R_C}$	$P_{o(ac)} = \frac{1}{2} V_{CE(p)}^2 R_C$	$P_{o(ac)} = \frac{1}{8} \frac{V_{CE(p-p)}^2}{R_C}$

- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor¹.

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} \quad (5.4)$$

- ▷ Hiệu suất của mạch

$$\eta = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100 \% \quad (5.5)$$

¹với giả thiết bỏ qua công suất tiêu tán trên các điện trở phân cực và tụ điện nối tầng

5.2 MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A

Mạch khuếch đại chế độ A khuếch đại tín hiệu vào một cách tuyến tính. Mạch khuếch đại chế độ này không gây méo biên độ và pha của tín hiệu. Điểm làm việc được chọn ở chính giữa đường tải để tín hiệu được khuếch đại lớn nhất mà không bị méo.

Transistor hoạt động ở chế độ A tức là làm việc trong miền tích cực trong suốt chu kỳ tín hiệu. Dòng Collector trong mạch chế độ A luôn khác 0 ngay cả khi không có tín hiệu vào do dòng phân cực tĩnh $I_{CQ} \neq 0$. Transistor sẽ tiêu thụ công suất ngay cả khi không làm việc (không khuếch đại tín hiệu). Do đó, hiệu suất của mạch khuếch đại chế độ A rất thấp, tối đa là 25% (với tải điện trở), với tải cuộn cảm hoặc biến áp thì khoảng 50%.

Tại chế độ A, điểm công tác tĩnh Q của transistor nằm trong miền tuyến tính và transistor sẽ dẫn trong toàn bộ chu kỳ của tín hiệu xoay chiều đầu vào. Đối với mạch khuếch đại công suất chế độ A xét 3 dạng mạch khác nhau:

- ▷ Tải điện trở
- ▷ Tải là cuộn cảm
- ▷ Tải ghép biến áp

5.2.1 Mạch tải điện trở

Xét mạch khuếch đại công suất chế độ A tải điện trở đơn giản trên hình 5.6. Đây là mạch khuếch đại Emitter chung, để đơn giản ta bỏ qua phần tính toán phân cực cho mạch này. Điểm khác nhau giữa mạch này với mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ là tín hiệu vào (v_i) có biên độ lớn (hàng trăm mV).

Hình 5.6 mô tả sơ đồ mạch khuếch đại công suất chế độ A tải điện trở và biểu diễn đường tải tĩnh.

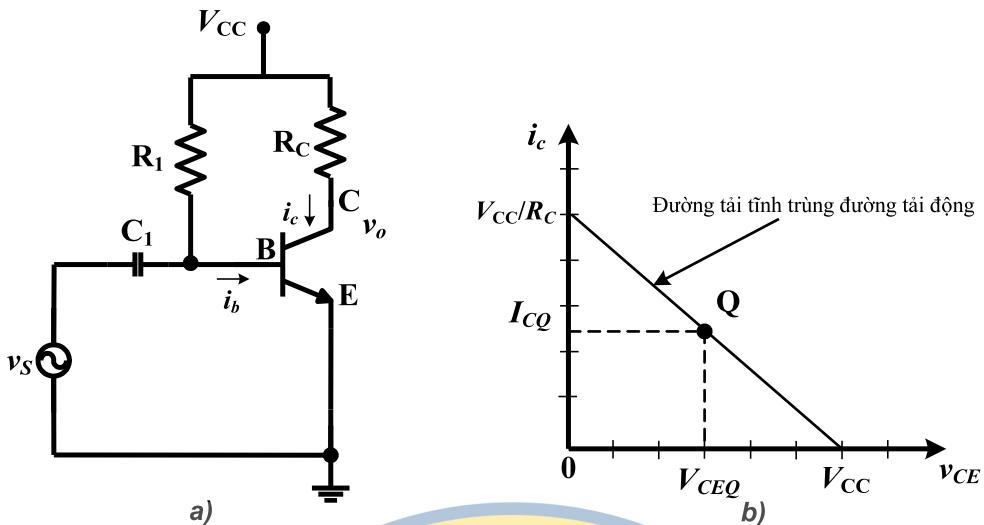
Hình 5.7 biểu diễn dạng sóng tín hiệu vào/ra của mạch khuếch đại công suất chế độ A. Khi này, tín hiệu ra xuất hiện trong cả hai nửa chu kỳ.

Tính toán các thông số của mạch:

- ▷ Phương trình đường tải tĩnh DCLL:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \leftrightarrow I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

5.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A



Hình 5.6: a) Sơ đồ mạch khuếch đại công suất chế độ A; b) Biểu diễn điểm công tác tĩnh.

Hệ số góc của đường tải tĩnh ($\operatorname{tg}\alpha_1 = -\frac{1}{R_C}$)

▷ Phương trình đường tải xoay chiều (còn gọi là đường tải động - ACLL):

$$v_{ce} = -i_c R_C \leftrightarrow i_c = -\frac{1}{R_C} v_{ce}$$

Hệ số góc của đường tải xoay chiều: $\operatorname{tg}\alpha_2 = -\frac{1}{R_C} = \operatorname{tg}\alpha_1$

Như vậy, đường tải động và đường tải tĩnh trùng nhau.

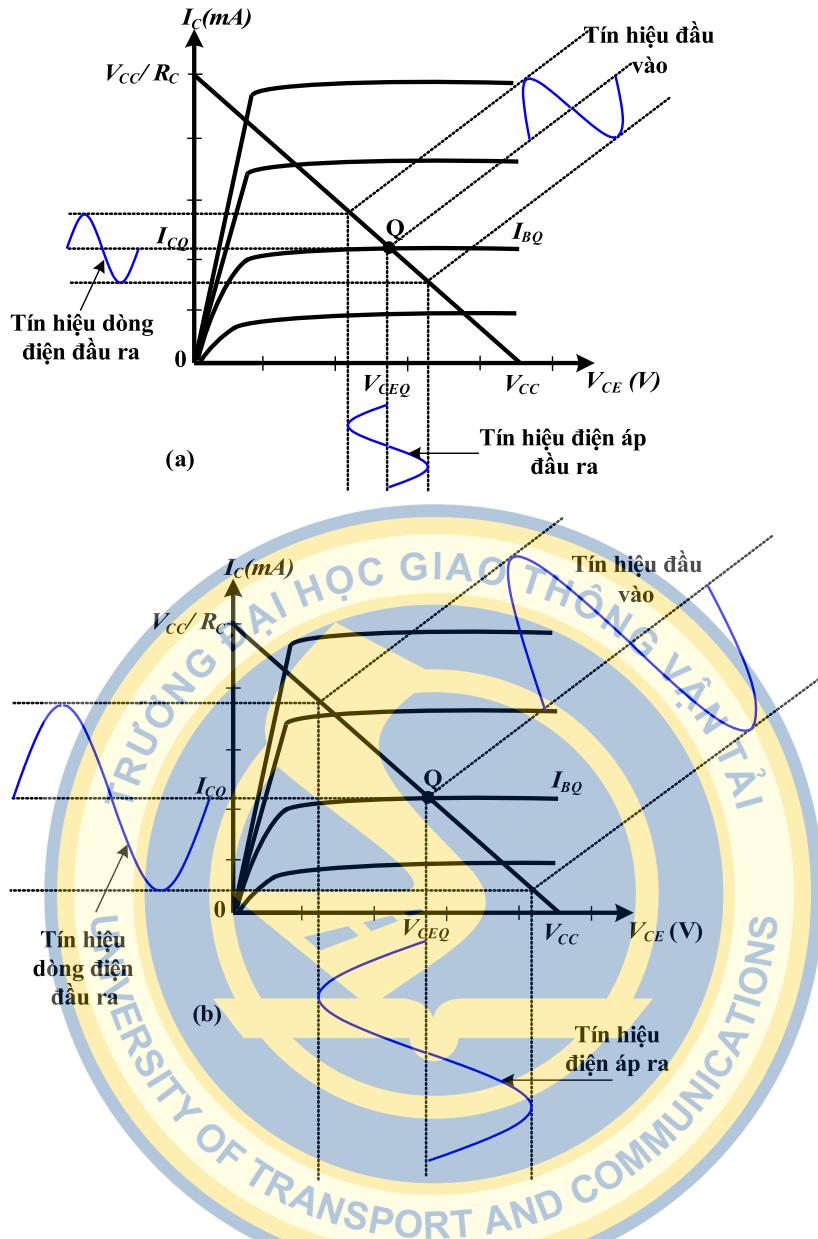
▷ Công suất vào của nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC}(I_{CQ} + i_c) dt = V_{CC} I_{CQ} + \frac{1}{T} V_{CC} \int_0^T I_{C(p)} \sin \omega t dt$$

Do tín hiệu ra thu được trong cả hai nửa chu kỳ, đối xứng, nên:

$$P_{i(dc)} = V_{CC} I_{CQ} \quad (5.6)$$

Để đạt được **hiệu suất lớn nhất** thì điểm công tác tĩnh Q phải nằm chính giữa đường tải tĩnh hay cũng chính là điểm giữa của đường tải động như thể hiện trong hình 5.7.



Hình 5.7: Sự biến thiên của tín hiệu ra theo tín hiệu vào: a) Tín hiệu vào với biên độ nhỏ và b) Tín hiệu vào với biên độ lớn hơn.

Khi đó điểm làm việc tĩnh Q có tọa độ:

$$\begin{cases} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_C} \\ V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} \end{cases}$$

5.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A

Biên độ đỉnh- đỉnh tối đa của tín hiệu ra là:

$$\begin{cases} V_{CE(p-p)max} = V_{CC} \\ I_{C(p-p)max} = \frac{V_{CC}}{R_C} \end{cases} \quad (5.7)$$

- ▷ Công suất của nguồn cung cấp một chiều trong trường hợp đạt hiệu suất lớn nhất là:

$$P_{i(dc)} = V_{CC}I_{CQ} = \frac{V_{CC}^2}{2R_C}$$

- ▷ Công suất xoay chiều trên tải cực đại:

$$P_{o(ac)max} = \frac{1}{8}V_{CE(p-p)}I_{C(p-p)} = \frac{1}{8}\frac{V_{CC}^2}{R_C}$$

- ▷ Hiệu suất cực đại:

$$\eta_{max} = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100\% = 25\%$$

- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor:

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} = \frac{3}{8}\frac{V_{CC}^2}{R_C}$$

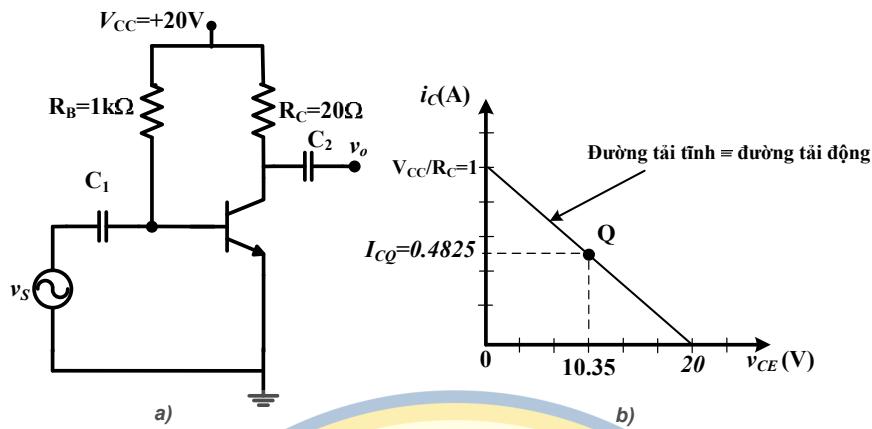
Cần chú ý rằng hiệu suất của tầng khuếch đại sẽ thay đổi khi ta nối tải vào đầu ra của bộ khuếch đại. Hiệu suất này khá thấp, do đó các mạch khuếch đại chế độ A kiểu này thường không được dùng khi cần công suất tín hiệu lớn hơn 1 W. Trên thực tế thì điện áp và dòng điện ra lớn nhất sẽ nhỏ hơn các giá trị $V_{CC}/2$ và I_{CQ} để tránh đưa transistor vào trạng thái bão hòa hoặc khóa². Do đó, hiệu suất thực tế của các mạch khuếch đại chế độ A thường nhỏ hơn 20% nên không tận dụng được khả năng làm việc của phần tử khuếch đại vì công suất ra thấp nên thường dùng để khuếch đại tín hiệu nhỏ.

Ví dụ 5.1. Cho mạch khuếch đại công suất có sơ đồ mạch như hình 5.8. Biết khi có tín hiệu vào dòng i_b có biên độ đỉnh $I_{B(p)} = 10 \text{ mA}$. Transistor có $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ và $\beta = 20$.

²các trạng thái gây méo phi tuyến

Chương 5: Mạch khuếch đại công suất

Tính công suất nguồn cấp một chiều, công suất ra xoay chiều trên tải, công suất tiêu tán trên BJT và hiệu suất của mạch.



Hình 5.8: Ví dụ mạch khuếch đại công suất chế độ A tải điện trở.

Bài giải:

▷ Dòng công tác tĩnh:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = 19,3 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 0,4825 \text{ A}$$

▷ Phương trình đường tải tĩnh: $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 10,35 \text{ V}$$

Từ các tính toán này, ta vẽ được đường tải tĩnh, động và điểm công tác tĩnh như trên hình 5.8(b). Từ đồ thị này, giả thiết trong trường hợp lý tưởng, giá trị đỉnh tối đa của tín hiệu xoay chiều trong mạch này là:

$$\begin{cases} V_{CE(p)\max} = 20 - 10,35 = 9,65 \text{ V} \\ I_{C(p)\max} = 0,4825 \text{ A} \end{cases}$$

Mà theo đầu bài ta có $I_{B(p)} = 10 \text{ mA}$, vậy:

$$I_{C(p)} = \beta I_{B(p)} = 25 \times 10 \text{ mA} = 0,25 \text{ A} < I_{C(p)\max}$$

Vậy transistor làm việc ở chế độ tích cực.

5.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A

- ▷ Công suất nguồn cấp một chiều

$$P_{i(dc)} = V_{CC}I_{CQ} = 20 \times 0,4825 = 9,65 \text{ W}$$

- ▷ Công suất xoay chiều trên tải

$$P_{o(ac)} = \frac{1}{2}I_{C(p)}^2R_C = \frac{1}{2} \times 0,25 \times 20 = 0,625 \text{ W}$$

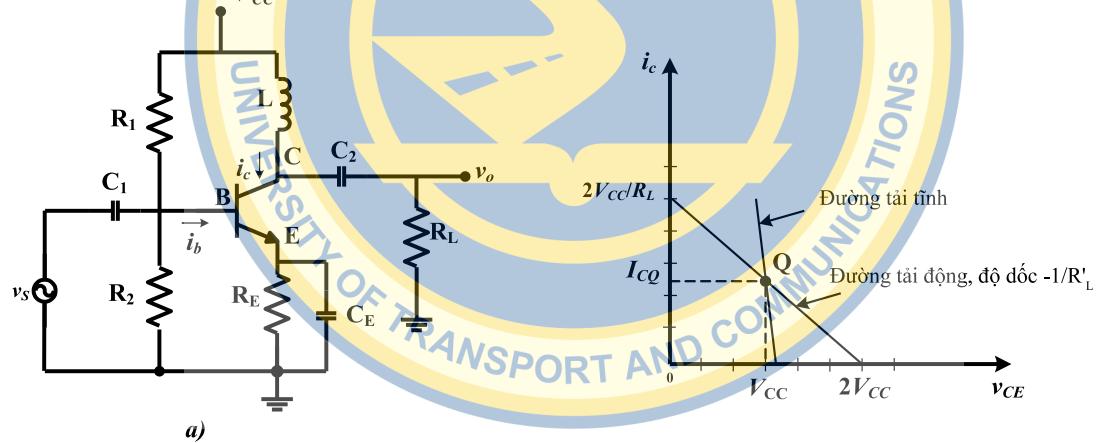
- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} = 9,025 \text{ W}$$

- ▷ Hiệu suất của mạch

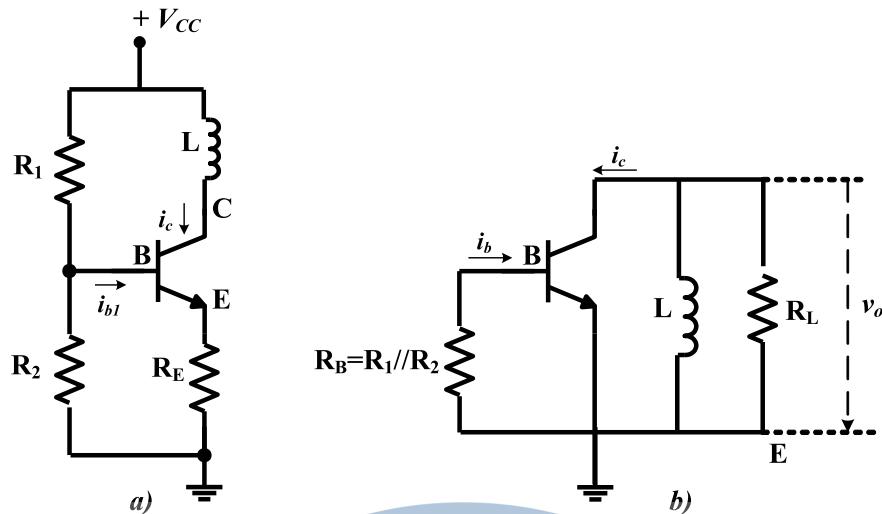
$$\eta = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100\% \approx 6,5\%$$

5.2.2 Mạch tải cuộn cảm



Hình 5.9: a) Sơ đồ mạch khuếch đại công suất chế độ A tải cuộn cảm; b) Biểu diễn đường tải tĩnh và đường tải động.

- ▷ Đường tải tĩnh: Cuộn cảm L được coi là ngắn mạch trong chế độ tĩnh. Vì vậy, phương trình đường tải tĩnh có dạng:



Hình 5.10: Chế độ tĩnh (a) và chế độ động (b) của mạch khuếch đại công suất chế độ A tải cuộn cảm.

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_E \leftrightarrow I_C = -\frac{1}{R_E} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_E}$$

Hệ số góc đường tải tĩnh: $\tan \alpha = -\frac{1}{R_E}$

Với điều kiện: R_E rất nhỏ thì $\tan \alpha_1 \rightarrow \infty$ hay $\alpha_1 \approx \frac{\pi}{2}$, đường tải tĩnh gần như song song với trục tung.

▷ Đường tải động: cuộn cảm có trở kháng $Z_L = \infty$.

Phương trình đường tải động:

$$v_o = v_{ce} = -i_c R_L \leftrightarrow i_c = -\frac{1}{R_L} v_{ce}$$

Hệ số góc của đường tải động: $\tan \alpha_2 = -\frac{1}{R_L} \rightarrow \frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$

Vậy trong trường hợp này đường tải tĩnh dốc hơn đường tải động. Để vẽ đường tải động người ta vẽ một đường thẳng đi qua điểm công tác tĩnh Q có hệ số góc bằng $\tan \alpha_2$.

Tính toán các thông số của mạch:

Cũng giống như trong trường hợp tải là điện trở thì để đạt được hiệu suất của mạch là lớn nhất thì điểm công tác tĩnh phải nằm chính giữa của đường

5.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A

tải động. Đường tải tĩnh cắt trực hoành tại giá trị V_{CC} , dựa vào đồ thị hình 5.9(b), để Q là trung điểm của đường tải động thì đường tải động phải cắt trực hoành tại giá trị là $2V_{CC}$ và cắt trực tung tại giá trị $(2V_{CC}/R_L)$. Vậy ta có:

$$\begin{cases} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_L} \\ V_{CEQ} = V_{CC} \end{cases}$$

Suy ra giá trị đỉnh tối đa của tín hiệu xoay chiều trong mạch này là:

$$\begin{cases} I_{C(p)\max} = I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_L} \\ V_{CE(p)\max} = V_{CEQ} = V_{CC} \end{cases} \quad (5.8)$$

- ▷ Công suất của nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)} = V_{CC}I_{CQ} = \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

- ▷ Công suất xoay chiều cực đại trên tải:

$$P_{o(ac)\max} = \frac{1}{2}V_{CE(p)\max}I_{C(p)\max} = \frac{1}{2}\frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

- ▷ Hiệu suất tối đa của mạch:

$$\eta = \frac{P_{o(ac)\max}}{P_{i(dc)}} \times 100\% = 50\%$$

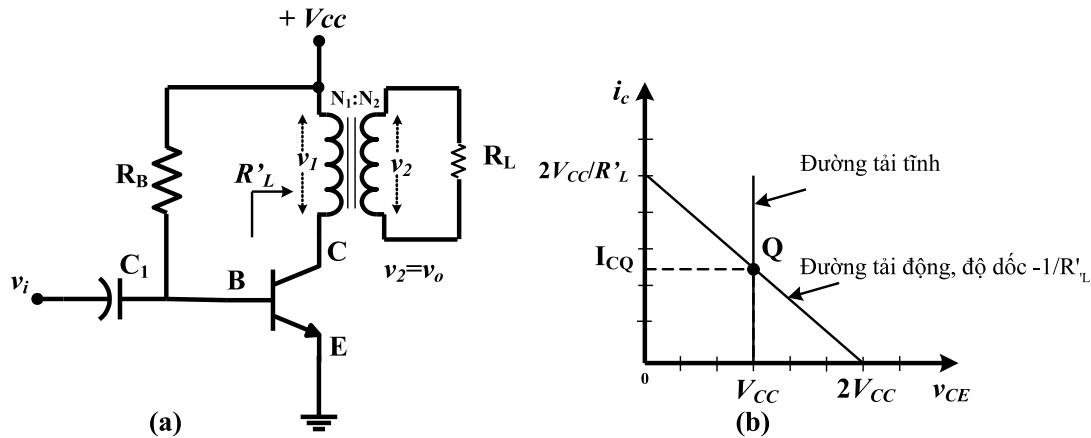
- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} = \frac{1}{2}\frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

Vậy trong trường hợp này, khi thay điện trở tải R_C bằng cuộn cảm thì hiệu suất của mạch tăng gấp đôi.

5.2.3 Mạch tải biến áp

Trong sơ đồ mạch trên hình 5.11(a), cuộn sơ cấp của máy biến áp sẽ đóng vai trò là tải của mạch khuếch đại công suất. Đối với chế độ một chiều, cuộn



Hình 5.11: a) Sơ đồ mạch khuếch đại công suất chế độ A tải biến áp; b) Biểu diễn đường tải tĩnh và đường tải động.

sơ cấp được coi là ngắn mạch. Đối với chế độ xoay chiều, tải của cuộn sơ cấp³ là:

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L = n^2 R_L$$

Trường hợp tải ghép biến áp cũng tương tự với trường hợp tải ghép cuộn cảm, với giá trị R_E rất nhỏ, đường tải tĩnh gần như vuông góc với trục hoành $\tan\alpha_1 = \pi/2$ và đường tải động có hệ số góc $\tan\alpha_2 = -1/R'_L$, đường tải tĩnh dốc hơn đường tải động.

Để đạt được hiệu suất cực đại, thì điểm công tác tĩnh Q phải nằm chính giữa đường tải động như thể hiện trên hình 5.11(b). Khi đó có:

$$\begin{cases} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R'_L} \\ V_{CEQ} = V_{CC} \end{cases}$$

Suy ra giá trị đỉnh tối đa của tín hiệu xoay chiều trong mạch này là:

$$\begin{cases} I_{C(p)\max} = I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R'_L} \\ V_{CE(p)\max} = V_{CEQ} = V_{CC} \end{cases} \quad (5.9)$$

³chính là tải phản ánh về sơ cấp do điện trở tải R_L nối với cuộn thứ cấp của biến áp

5.2. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ A

- ▷ Công suất của nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)} = V_{CC} I_{CQ} = \frac{V_{CC}^2}{R'_L}$$

- ▷ Công suất xoay chiều cực đại trên tải:

$$P_{o(ac)max} = \frac{1}{2} V_{CE(p)max} I_{C(p)max} = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R'_L}$$

- ▷ Hiệu suất tối đa của mạch:

$$\eta_{max} = \frac{P_{o(ac)max}}{P_{i(dc)}} \times 100\% = 50\%$$

- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor:

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R'_L}$$

Vậy trong trường hợp sử dụng tải là biến áp thì hiệu suất của mạch bằng với mạch tải điện cảm.

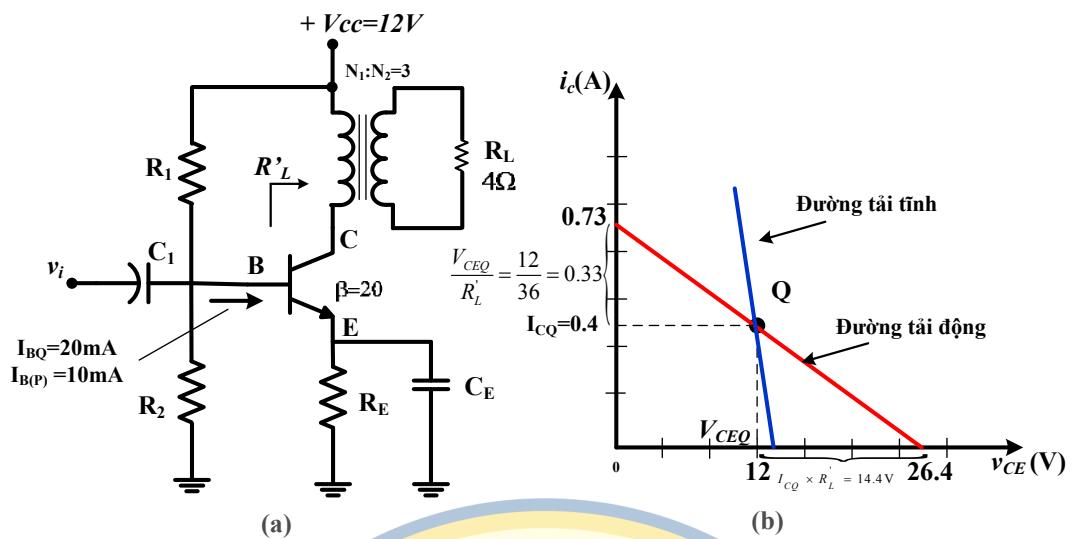
Ví dụ 5.2. Cho mạch khuếch đại công suất chế độ A tải biến áp có sơ đồ mạch như hình 5.12(a), coi điện trở R_E rất nhỏ. Điểm công tác tĩnh có $I_{BQ} = 20 \text{ mA}$, biết khi có tín hiệu vào dòng i_b có biên độ đỉnh $I_{B(p)} = 10 \text{ mA}$. Transistor có $\beta = 20$. Coi biến áp lý tưởng và có hệ số biến áp là $n = 3$.

- Vẽ đường tải xoay chiều.
- Tính công suất ra xoay chiều trên tải, công suất nguồn cấp một chiều, công suất tiêu tán trên transistor và hiệu suất của mạch.
- Tính công suất ra xoay chiều trên tải, công suất nguồn cấp một chiều, công suất tiêu tán trên transistor trong trường hợp đạt hiệu suất tối đa.

Bài giải:

- a) Vẽ đường tải động

- ▷ Do điện trở R_E rất nhỏ nên coi $V_{CEQ} \approx V_{CC} = 12 \text{ V}$
- ▷ Đường tải động có hệ số góc $\tan \alpha_2 = -1/R'_L$ với ($R'_L = n^2 R_L = 36 \Omega$) và đi qua điểm công tác tĩnh Q nên vẽ được đường tải động như trên hình 5.12(b).



Hình 5.12: Ví dụ mạch khuếch đại công suất chế độ A tải biến áp.a) Sơ đồ mạch.
b) Đường tải tĩnh và đường tải động.

▷ Từ đồ thị đường tải động, xác định được:

$$\begin{cases} I_{C(P)\max} = 0,33A \\ V_{CE(P)\max} = 12V \end{cases}$$

b) Tính các thông số của mạch với $I_{B(P)} = 10mA$

▷ Biên độ đỉnh của dòng I_c là $I_{C(P)} = \beta I_{B(P)} = 0,2A$

▷ Công suất của nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)} = V_{CC} I_{CQ} = V_{CC} \beta I_{BQ} = 12 \times 20 \times 0,02 = 4,8W$$

▷ Công suất ra xoay chiều trên tải:

$$P_{o(ac)} = \frac{1}{2} I_{C(P)}^2 R'_L = 0,72W$$

▷ Hiệu suất của mạch:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100\% = 15\%$$

5.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B

- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor:

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} = 4,08 \text{ W}$$

c) Tính các thông số của mạch trong trường hợp đạt hiệu suất cực đại

- ▷ Công suất của nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)} = V_{CC}I_{CQ} = V_{CC}\beta I_{BQ} = 12 \times 20 \times 0,02 = 4,8 \text{ W}$$

- ▷ Công suất xoay chiều cực đại trên tải:

$$P_{o(ac)\max} = \frac{1}{2}V_{CE(p)\max}I_{C(p)\max} = \frac{1}{2} \times 12 \times 0,33 = 1,98 \text{ W}$$

- ▷ Hiệu suất tối đa của mạch:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{o(ac)\max}}{P_{i(dc)}} \times 100 \% = 41,25 \%$$

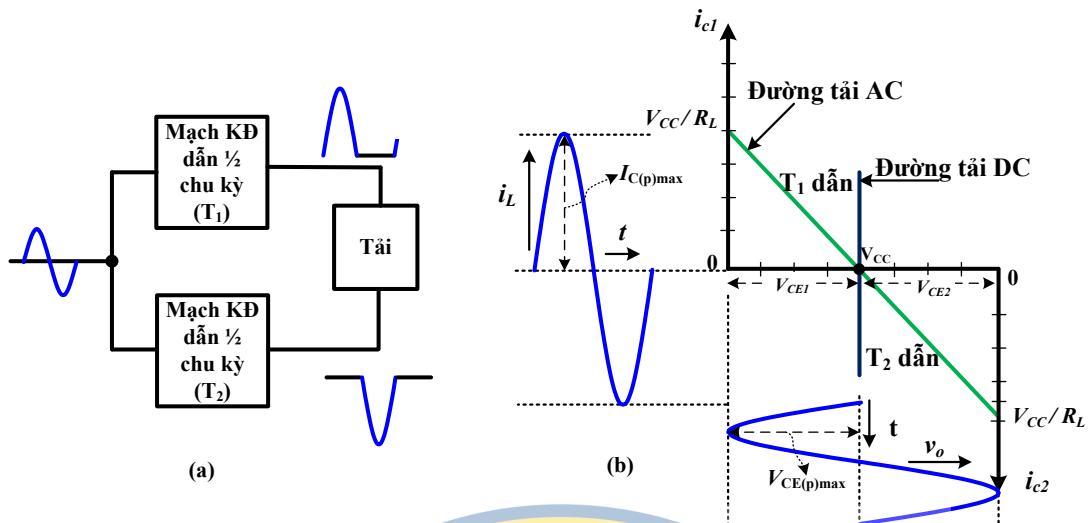
- ▷ Công suất tiêu tán trên transistor:

$$P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)} = 2,8 \text{ W}$$

5.3 MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B

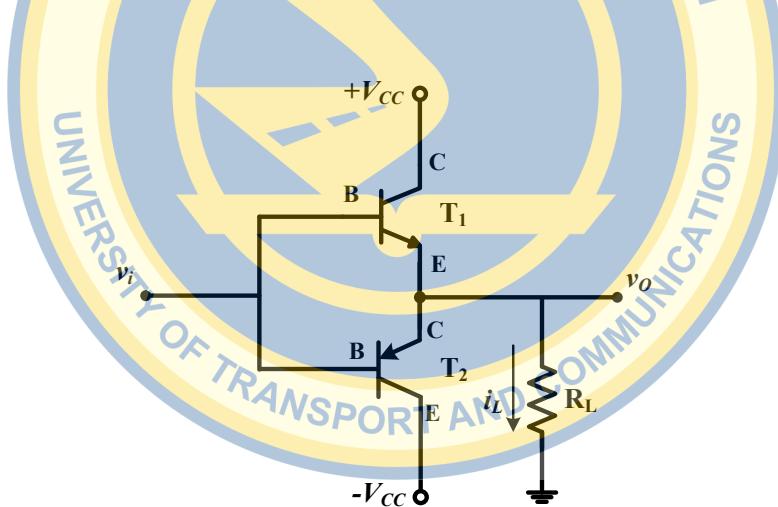
Mạch khuếch đại công suất chế độ B có đặc điểm là điểm công tác tĩnh Q của transistor nằm trong miền tuyến tính sát với miền ngắn. Do đó nó chỉ dẫn dòng trong một nửa chu kỳ của tín hiệu vào và chính điện áp vào đóng vai trò là điện áp phân cực cho transistor dẫn.

Để thu được tín hiệu đầu ra trong cả hai nửa chu kỳ, người ta thường sử dụng hai transistor hoạt động ngược chiều nhau. Một transistor dẫn dòng trong một nửa chu kỳ dương và một transistor hoạt động trong một nửa chu kỳ âm. Mạch đó được gọi là mạch khuếch đại đẩy kéo, có sơ đồ khối và biểu diễn đường tải động như hình 5.13. Đối với mạch khuếch đại đẩy kéo người ta có thể sử dụng hai nguồn đối xứng hoặc một nguồn đơn.



Hình 5.13: a) Sơ đồ khối mạch khuếch đại công suất chế độ B đẩy kéo; b) Biểu diễn đường tải tĩnh và động.

5.3.1 Mạch khuếch đại đẩy kéo dùng nguồn đối xứng



Hình 5.14: a) Sơ đồ khối mạch khuếch đại công suất chế độ B đẩy kéo dùng nguồn đối xứng; b) Biểu diễn đường tải tĩnh và động.

Hình 5.14 là mạch khuếch đại chế độ B gồm hai transistor khác loại. Cả hai transistor T₁ và T₂ được phân cực sao cho điểm công tác tĩnh nằm sát ranh

5.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B

giới giữa miền tuyến tính và miền ngắt. Khi đó có:

$$\begin{cases} I_{CQ1} = I_{CQ2} = 0 \\ V_{CEQ1} = V_{CEQ2} = V_{CC} \end{cases} \quad (5.10)$$

Khi không có tín hiệu vào $v_i = 0$, cả hai transistor đều trong trạng thái ngắt và điện áp ra $v_o = 0$. Khi có tín hiệu vào, trong một nửa chu kỳ dương thì $v_{be1} = v_{be2} > 0$, nên T₁ dẫn và hoạt động như một mạch lặp Emitter sê cung cấp dòng điện i_L dương trên tải. Transistor T₂ trong trường hợp này sẽ ngắt do tiếp giáp B-E phân cực ngược. Ngược lại, trong một nửa chu kỳ âm thì T₁ ngắt và T₂ dẫn dòng. Dòng qua tải xuất hiện trong cả hai nửa chu kỳ.

Mạch này được gọi là mạch đẩy-kéo bù. Mỗi transistor được phân cực ở chế độ B và chỉ dẫn trong nửa chu kỳ. Mặc dù không có hệ số khuếch đại áp nhưng hệ số khuếch đại dòng điện lớn nên hệ số khuếch đại công suất vẫn lớn. Tuy nhiên, có một sự suy biến nhỏ đặc biệt khi tín hiệu nhỏ (méo điểm "0") sẽ được trình bày kỹ hơn trong phần 5.3.3.

* Xét trường hợp lý tưởng

Khi đó điện áp v_{be} để transistor dẫn là 0 V, nghĩa là mỗi transistor sẽ dẫn hoàn toàn trong một nửa chu kỳ tín hiệu sin. Điểm công tác tĩnh Q có dòng $I_{CQ} = 0$ hay cả hai transistor đều ngắt. Do đó, công suất tiêu thụ trên mỗi transistor khi không có tín hiệu vào bằng 0.

- ▷ Công suất của một nguồn cấp dương do mỗi transistor chỉ dẫn dòng trong một nửa chu kỳ nên:

$$P_{i(dc)}^+ = V_{CC} i_C = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{CC} i_C dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{CC} (I_{CQ} + i_C) dt$$

Mà $I_{CQ} = 0$ nên có:

$$P_{i(dc)}^+ = \frac{1}{T} V_{CC} \int_0^{T/2} I_{C(p)} \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} V_{CC} I_{C(p)} \quad (5.11)$$

- ▷ Công suất của hai nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)} = P_{i(dc)}^+ + P_{i(dc)}^- = 2P_{i(dc)}^+ = \frac{2}{\pi} V_{CC} I_{C(p)}$$

Chương 5: Mạch khuếch đại công suất

- ▷ Công suất xoay chiều ra trên tải:

$$P_{o(ac)} = \frac{1}{2} V_{CE(p)} I_{C(p)} \quad (5.12)$$

* Xét trường hợp hiệu suất của mạch là cực đại

Dựa vào đồ thị đường tải động hình 5.14(b) xác định được các giá trị tối đa như sau:

$$\begin{cases} I_{C(p)\max} = \frac{V_{CC}}{R_L} \\ V_{CE(p)\max} = V_{CC} \end{cases}$$

Tính toán trong trường hợp đạt công suất cực đại như sau:

- ▷ Công suất của 2 nguồn cấp một chiều

$$P_{i(dc)\max} = \frac{2 V_{CC}^2}{\pi R_L}$$

- ▷ Công suất xoay chiều ra trên tải:

$$P_{o(ac)\max} = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

- ▷ Hiệu suất cực đại của mạch:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100 \% = \frac{\pi}{4} \times 100 \% \approx 78,5 \%$$

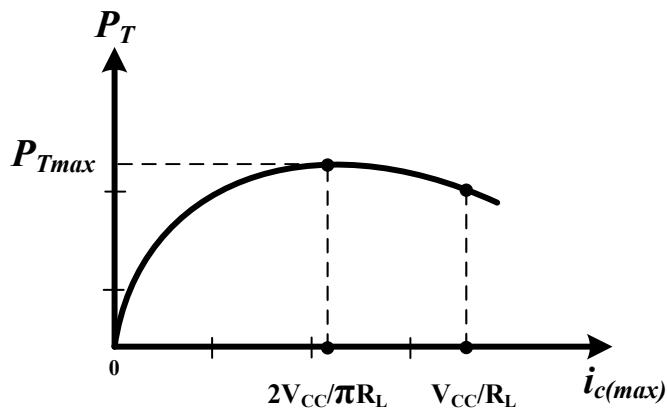
Ta thấy hiệu suất chuyển đổi của mạch chế độ B lớn hơn nhiều so với mạch khuếch đại chế độ A tiêu chuẩn (tải điện trở). Thực tế, hiệu suất của mạch chế độ B thấp hơn giá trị trên do các suy hao khác của mạch và điện áp ra đỉnh $V_{CE(p)}$ phải nhỏ hơn V_{CC} để tránh đưa transistor vào miền bão hoà. Khi biên độ điện áp ra tăng thì méo tín hiệu ra cũng tăng. Để méo ở mức chấp nhận được, điện áp ra đỉnh $V_{CE(p)}$ thường nhỏ hơn V_{CC} vài Volt. Xét công suất tiêu tán trên hai transistor (trường hợp tổng quát):

$$2P_T = P_{i(dc)} - P_{o(ac)}$$

Công suất tiêu tán trên mỗi Transistor:

$$P_T = \frac{1}{2} [P_{i(dc)} - P_{o(ac)}] = \frac{1}{\pi} V_{CC} I_{C(p)} - \frac{1}{4} I_{C(p)}^2 R_L$$

5.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B



Hình 5.15: Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của P_T theo $I_{C(p)}$.

Vậy công suất tiêu tán P_T trên mỗi transistor là hàm bậc 2 của $I_{C(p)}$. Đồ thị biểu diễn sự biến thiên của công suất tiêu tán P_T theo $I_{C(p)}$ cho trên hình 5.15.

Suy ra P_T đạt giá trị cực đại tại:

$$I_{C(p)} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Khi đó công suất tiêu tán cực đại trên transistor là:

$$P_{T(\max)} = \frac{1}{\pi^2} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

Ví dụ 5.3. Cho mạch khuếch đại công suất chế độ B có sơ đồ mạch như hình 5.16(a). Bỏ qua méo điểm "0" trong mạch.

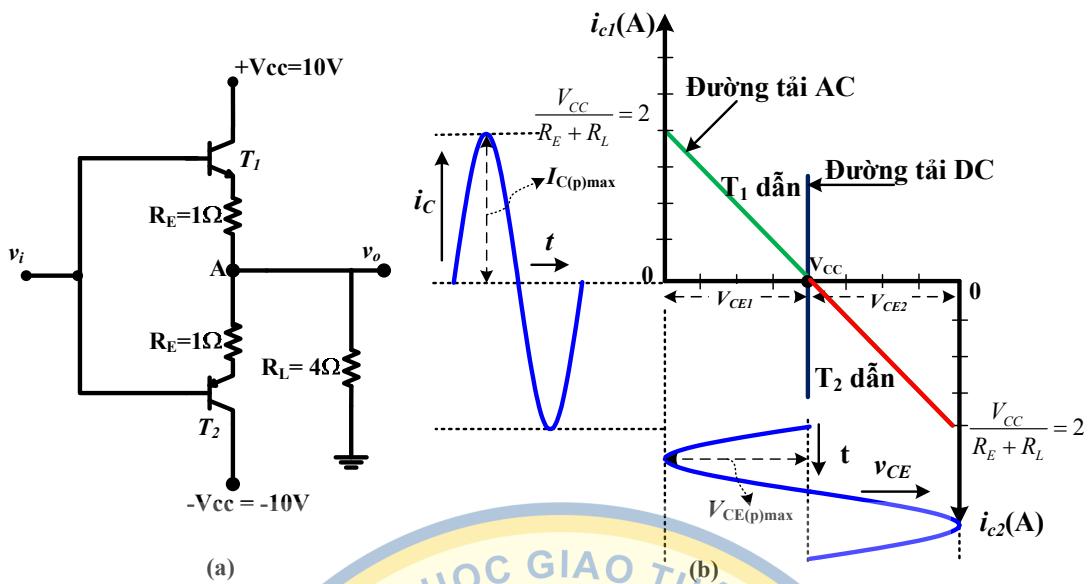
a) Vẽ đường tải xoay chiều.

b) Tính công suất ra xoay chiều trên tải, công suất mỗi nguồn cấp, công suất tiêu tán trên mỗi transistor và hiệu suất của mạch biết điện áp xoay chiều vào v_i có biên độ đỉnh là 5 V.

c) Tính công suất ra xoay chiều trên tải, công suất mỗi nguồn cấp, công suất tiêu tán trên mỗi transistor trong trường hợp đạt hiệu suất tối đa.

Bài giải:

a) Vẽ đường tải xoay chiều



Hình 5.16: Ví dụ mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ B: a) Sơ đồ mạch và b) Đường tải tĩnh và đường tải động.

- ▷ Mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ B, hai transistor làm việc luân phiên trong mỗi nửa chu kỳ tín hiệu. Sơ đồ mạch thành phần AC mỗi nửa chu kỳ được cho trên hình 5.17.
- ▷ Hệ số góc của đường tải động: $\tan \alpha = -\frac{1}{R_E + R_L}$. Từ đó, vẽ được đường tải động như trên hình 5.16(b).
- ▷ Dựa vào đồ thị đường tải động hình 5.16(b), xác định được các giá trị tối đa:

$$\begin{cases} I_{C(p)max} = \frac{V_{CC}}{R_E + R_L} = 2A \\ V_{CE(p)max} = V_{CC} = 10V \end{cases}$$

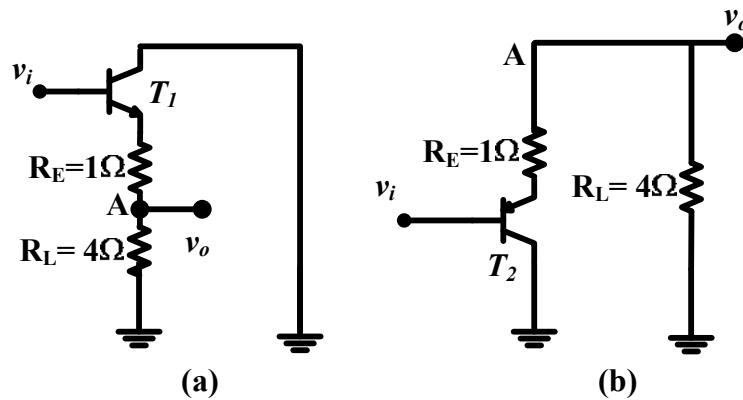
b) Khi điện áp khuếch vòi v_i có biên độ đỉnh là 5 V, do mạch mắc kiểu Collector chung nên có:

$$\begin{cases} V_{CE(p)} = 5V \\ I_{C(p)} = \frac{V_{CE(p)}}{R_E + R_L} = 1A \end{cases}$$

- ▷ Công suất của mỗi nguồn cấp một chiều:

$$P_{i(dc)}^+ = P_{i(dc)}^- = \frac{1}{\pi} V_{CC} I_{C(p)} = 3,185W$$

5.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B



Hình 5.17: Sơ đồ mạch thành phần AC: a) Nửa chu kỳ dương. b) Nửa chu kỳ âm.

- ▷ Công suất xoay chiều ra trên tải:

$$P_{o(ac)} = \frac{1}{2} I_{C(p)}^2 R_L = 2 \text{ W}$$

- ▷ Hiệu suất của mạch:

$$\eta = \frac{P_{o(ac)}}{P_{i(dc)}} \times 100 \% = \frac{2}{2 \times 3,185} \times 100 \% \approx 31,4 \%$$

- ▷ Công suất tiêu tán trên mỗi transistor:

$$P_T = \frac{1}{2} [P_{i(de)} - P_{(ac)}] = \frac{1}{2} [P_{i(de)} - \frac{1}{2} I_{C(p)}^2 (R_L + R_E)] = \frac{1}{2} (2 \times 3,185 - 2,5) = 1,685 \text{ W}$$

c) Trong trường hợp đạt hiệu suất tối đa

- ▷ Công suất của mỗi nguồn cấp một chiều

$$P_{i(dc)max}^+ = P_{i(dc)max}^- = \frac{1}{\pi} V_{CC} I_{C(p)max} = 6,37 \text{ W}$$

- ▷ Công suất xoay chiều ra trên tải:

$$P_{o(ac)max} = \frac{1}{2} I_{C(p)max}^2 R_L = 8 \text{ W}$$

- ▷ Hiệu suất của mạch:

$$\eta_{max} = \frac{P_{o(ac)max}}{P_{i(dc)}} \times 100 \% = \frac{8}{2 \times 6,37} \times 100 \% \approx 62,8\%$$

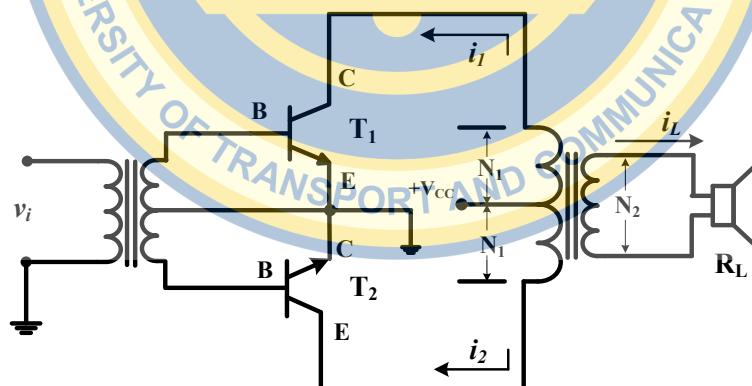
- ▷ Công suất tiêu tán trên mỗi transistor:

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2}[P_{i(\text{dc})} - P_{o(\text{ac})}] = \frac{1}{2}[P_{i(\text{dc})} - \frac{1}{2}I_{C(\text{p})}^2(R_L + R_E)] \\
 &= \frac{1}{2}(2 \times 6,37 - 10) = 1,37 \text{ W}
 \end{aligned}$$

5.3.2 Mạch khuếch đại công suất chế độ B ghép biến áp

Hình 5.18 là mạch khuếch đại công suất chế độ B ghép biến áp. Biến áp đầu vào có nhiệm vụ tạo nên hai tín hiệu vào ngược pha nhau. Trong nửa chu kỳ dương, transistor T₁ dẫn và T₂ ngắt. Dòng i₁ có chiều như hình vẽ, cảm ứng từ cuộn sơ cấp sang cuộn thứ cấp tạo nên dòng i_L trên tải. Trong nửa chu kỳ âm, transistor T₁ ngắt và T₂ dẫn, dòng i₂ có chiều ngược với chiều của dòng i₁, cảm ứng sang cuộn thứ cấp tạo nên dòng i_L đảo pha so với dòng i_L trong nửa chu kỳ dương. Vậy, dòng trên tải xuất hiện trong cả 2 nửa chu kỳ.

Phân tích tính toán mạch khuếch đại công suất chế độ B ghép biến áp tương tự như mạch khuếch đại công suất chế độ B đẩy kéo bù. Tuy nhiên, hiệu suất tối đa đạt được sẽ thấp hơn do phải chịu thêm tổn thất của biến áp. Nếu hiệu suất biến áp 80% thì hiệu suất cực đại mạch khuếch đại công suất chế độ B ghép biến áp khoảng 60% đến 70%.

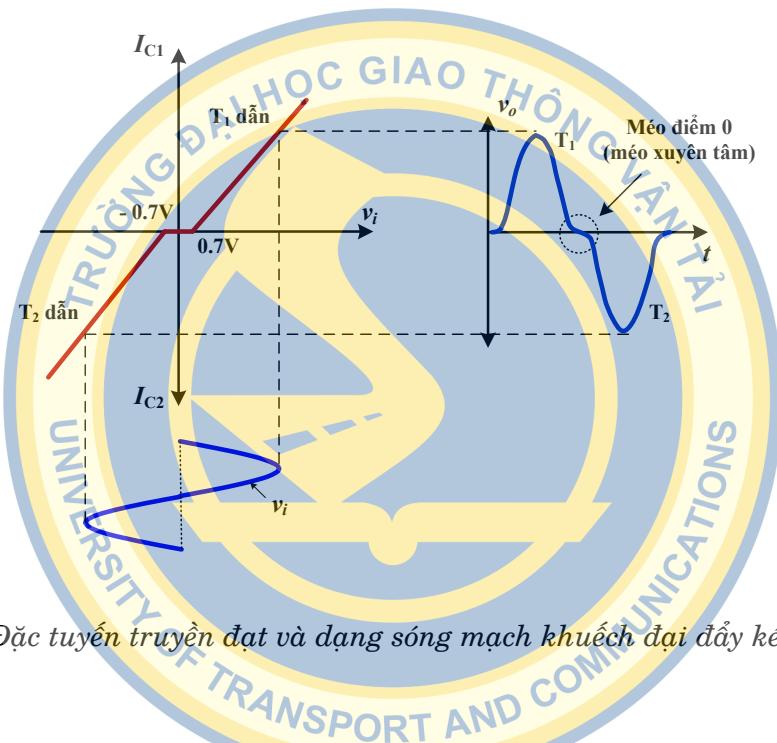


Hình 5.18: Mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ B ghép biến áp.

5.3. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ B

5.3.3 Hiện tượng méo điểm "0" trong mạch chế độ B

Mạch khuếch đại công suất chế độ B có ưu điểm là hiệu suất cao hơn chế độ A nhưng lại xuất hiện hiện tượng méo điểm "0". Trong chế độ B, khi chưa có tín hiệu xoay chiều đầu vào thì cả hai transistor đều ngắt. Tín hiệu vào biến thiên và khi điện áp đặt vào hai cực của transistor V_{BE} đạt được giá trị ngưỡng ($0,7V$ đối với transistor làm từ Silic) thì transistor mới bắt đầu dẫn dòng, lúc đó mới xuất hiện dòng trên tải. Vậy, sẽ phải có những khoảng thời gian mà dòng trên tải bằng $0V$. Hiện tượng đó được gọi là hiện tượng méo điểm "0" (*crossover distortion*) như minh họa trong hình 5.19.



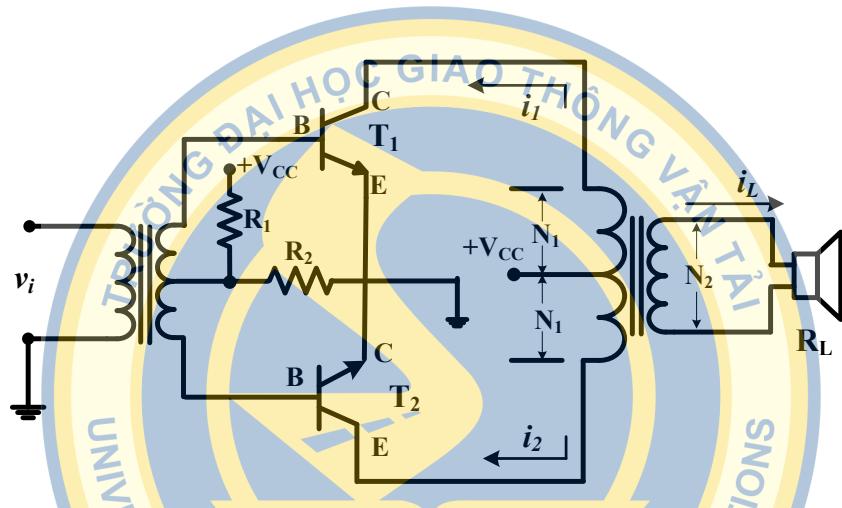
Hình 5.19: Đặc tuyến truyền đạt và dạng sóng mạch khuếch đại đẩy kéo chế độ B.

Hình 5.19 là đặc tuyến truyền đạt điện áp của mạch khuếch đại công suất chế độ B. Khi một trong hai transistor dẫn, độ khuếch đại điện áp (hay độ dốc của đặc tuyến) về cơ bản bằng 1 (do tính chất của mạch lặp Emitter). Trong dải điện áp gần $0V$, cả hai transistor đều ngắt và điện áp ra bằng $0V$ và tạo ra méo điểm "0" như trên hình 5.19 với tín hiệu vào dạng sin. Méo điểm "0" này có thể được khắc phục bằng cách phân cực tinh với giá trị nhỏ cho cả T_1 và T_2 và mạch khuếch đại kiểu này hoạt động trong chế độ AB. Mạch này sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

5.4 MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ AB

Mạch khuếch đại công suất chế độ AB sẽ loại bỏ méo điếm "0" hay méo xuyên tâm trong mạch khuếch đại công suất chế độ B bằng cách phân cực nhỏ (V_{BE} hoặc V_{EB} bằng 0,7 V) cho các transistor sao cho chúng sẽ dẫn ngay khi có tín hiệu vào. Mạch chế độ AB có hiệu suất cao tương tự mạch chế độ B, đồng thời tín hiệu ra ít méo giống chế độ A.

Mạch khuếch đại chế độ AB dùng máy biến áp trên hình 5.20 giống như mạch đẩy kéo chế độ B hình 5.18, chỉ khác là có thêm các điện trở phân cực R_1 và R_2 để các transistor T_1 và T_2 làm việc ở miền khuếch đại, vì vậy mạch hoạt động ở chế độ AB.



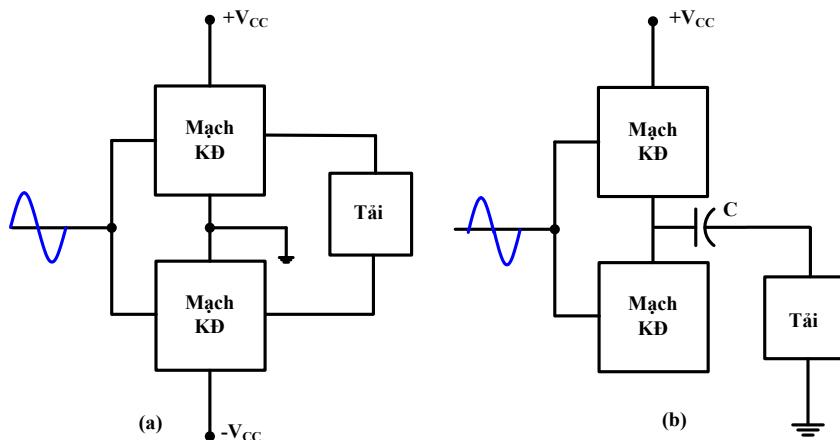
Hình 5.20: Mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ AB ghép biến áp.

Do việc sử dụng biến áp ở đầu ra có một số hạn chế như giá thành cao, méo tín hiệu ở dải âm tần nên ít sử dụng. Thay vào đó sẽ sử dụng hai transistor khác loại với nguồn đối xứng hoặc nguồn đơn như thể hiện trong hình 5.21.

5.4.1 Mạch khuếch đại chế độ AB dùng nguồn đối xứng

Xét mạch khuếch đại chế độ AB dùng nguồn đối xứng trên hình 5.22. Khi không có tín hiệu xoay chiều đầu vào $v_i = 0$, hai transistor T_1 và T_2 được phân cực bằng nguồn phân cực V_{bias} , cả hai transistor cùng dẫn với dòng tĩnh I_{CQ} rất nhỏ.

5.4. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ AB

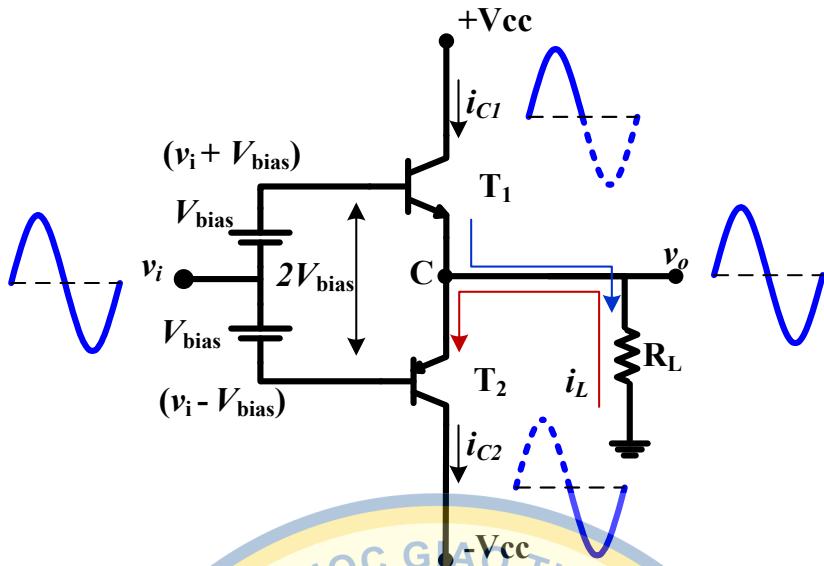


Hình 5.21: Mạch khuếch đại đẩy kéo chế độ AB: a) Nguồn đối xứng, b) Nguồn đơn.

Trong nửa chu kỳ dương, khi tín hiệu vào lớn hơn không $v_i > 0$ và tăng dần, điện áp ($v_i + V_{bias}$) trên cực Base của transistor T_1 tăng, dòng i_{C1} của T_1 tăng và điện áp ra v_o tăng. Transistor T_1 hoạt động như một mạch lặp Emitter cấp dòng qua tải R_L . Tuy nhiên, do điện áp giữa hai cực Base của transistor là cố định và không đổi ($v_{BE1} + v_{EB2} = 2V_{bias}$) nên khi v_{BE1} tăng sẽ làm v_{EB2} giảm. Vậy khi T_1 dẫn tăng sẽ dẫn đến T_2 giảm dẫn, thậm chí T_2 sẽ ngưng dẫn trong cả nửa chu kỳ dương. Kết quả là chỉ T_1 cung cấp dòng cho tải trong nửa chu kỳ dương.

Tương tự với nửa chu kỳ âm, khi tín hiệu xoay chiều vào nhỏ hơn không $v_i < 0$ và giảm dần, điện áp ($v_i - V_{bias}$) giảm dần, T_2 dẫn mạnh lên cung cấp dòng cho tải trong khi T_1 dẫn giảm dần và ngưng dẫn. Như vậy, hai transistor luân phiên dẫn trong mỗi nửa chu kỳ trong mạch đẩy kéo chế độ AB.

Tóm lại, khi không có tín hiệu xoay chiều tại đầu vào, cả hai transistor đều dẫn với dòng phân cực rất nhỏ, khi có tín hiệu điện áp vào dương hoặc âm, một trong hai transistor sẽ dẫn ngay để cung cấp dòng cho tải. Do việc chuyển chế độ dẫn giữa hai transistor gần như tức thời khi có điện áp vào nên khắc phục được méo điếm "0" trong mạch đẩy kéo chế độ B. Tuy nhiên, khi không có tín hiệu xoay chiều đầu vào vẫn tồn tại dòng phân cực tĩnh nhỏ nên công suất tiêu thụ của nguồn cấp và công suất tiêu tán trên transistor của mạch khuếch đại công suất chế độ AB lớn hơn so với mạch chế độ B. Do đó, hiệu suất của mạch khuếch đại công suất chế độ AB thấp hơn mạch



Hình 5.22: Mạch khuếch đại công suất đẩy kép chế độ AB nguồn đôi xứng.

khuếch đại công suất chế độ B một chút nhưng không đáng kể so với ưu điểm "0" có méo điểm "0".

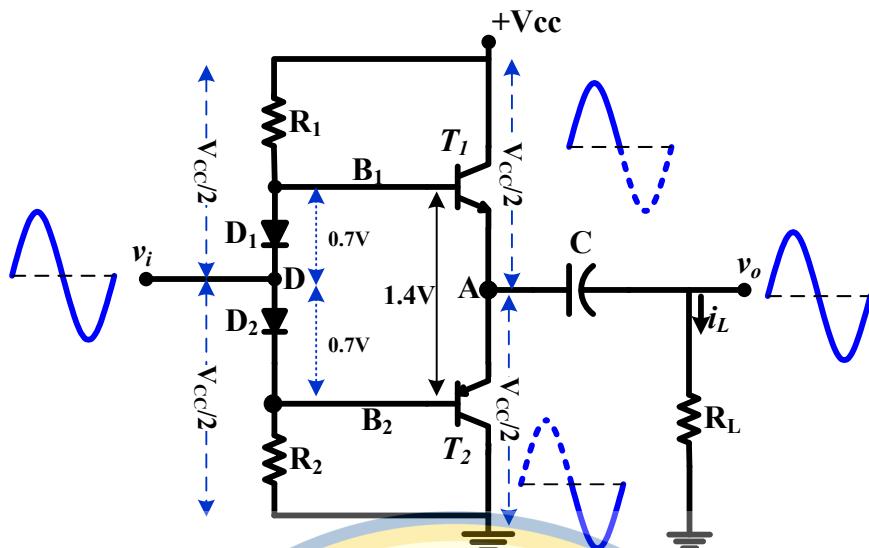
Mạch khuếch đại chế độ AB dùng nguồn đôi không sử dụng tụ đầu ra nên băng thông của mạch được mở rộng ở tần số thấp và tín hiệu ra không bị méo. Tuy nhiên mạch có một số nhược điểm như phải dùng nguồn đôi, khó thiết kế, cần mạch bảo vệ quá công suất cho tải do tải ghép trực tiếp.

5.4.2 Mạch khuếch đại chế độ AB dùng nguồn đơn

Hình 5.23 là mạch khuếch đại chế độ AB nguồn đơn chỉ sử dụng một nguồn $+V_{CC}$. Các linh kiện R_1, D_1, D_2, R_2 tạo mạng phân cực cho các transistor T_1 và T_2 . Do được phân cực thuận nên trên mỗi diode có điện áp rơi khoảng 0,7V cấp cho tiếp giáp B-E của hai transistor (giả thiết $V_{BE(on)} = 0,7\text{ V}$). Hai diode sẽ tạo điện áp không đổi khoảng 1,4V giữa hai cực Base của transistor, phân cực cho các transistor này trên vùng ngắt một chút. Các diode D_1 và D_2 ngoài tác dụng tạo điện áp phân cực không đổi giữa hai cực Base của các transistor còn có tác dụng ổn định nhiệt cho mạch.

Khi không có tín hiệu xoay chiều vào $v_i = 0$, cả hai transistor đều dẫn với

5.4. MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ AB



Hình 5.23: Mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ AB dùng nguồn đơn.

dòng phân cực rất nhỏ. Nếu mạch phân cực hoàn toàn đối xứng thì khi chưa có tín hiệu xoay chiều vào, điện thế tại điểm A là $V_A = V_{CC}/2$ và thế tại điểm D cũng là $V_D = V_{CC}/2$, điện thế tại các cực Bas của hai transistor như sau:

$$V_{B1} = \frac{V_{CC}}{2} + 0,7V$$

$$V_{B2} = \frac{V_{CC}}{2} - 0,7V$$

Khi có tín hiệu xoay chiều vào, điện thế của các cực Base của hai transistor lần lượt là:

$$v_{B1} = \frac{V_{CC}}{2} + v_i + 0,7V$$

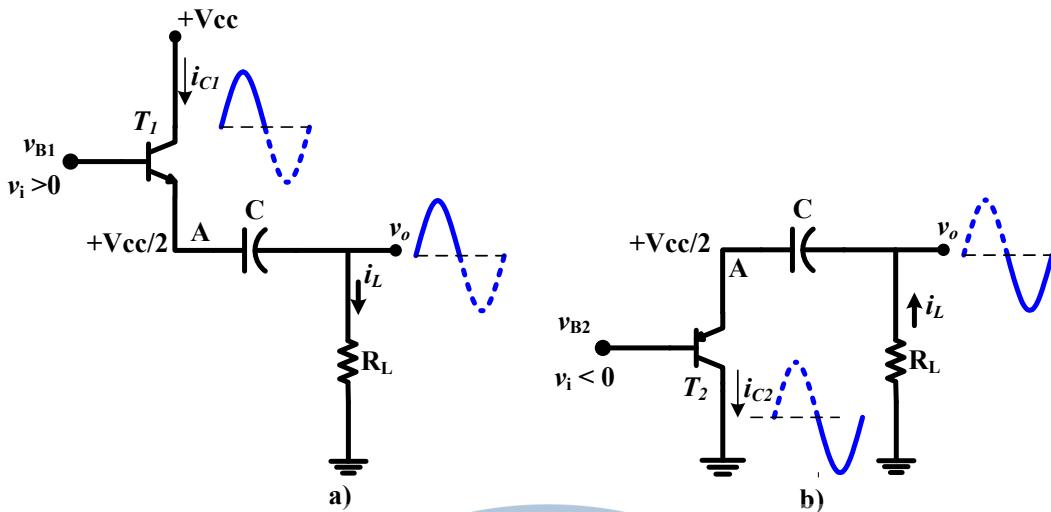
$$v_{B2} = \frac{V_{CC}}{2} + v_i - 0,7V$$

Vậy, điện áp tiếp giáp B-E của hai transistor như sau:

$$v_{BE1} = v_{B1} - \frac{V_{CC}}{2} = v_i + 0,7V$$

$$v_{EB2} = \frac{V_{CC}}{2} - v_{B2} = -v_i + 0,7V$$

Xét trong nửa chu kỳ dương, khi tín hiệu vào lớn hơn 0 và tăng dần, điện áp



Hình 5.24: Mô tả hoạt động của mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ AB dùng nguồn đơn: a) Nửa chu kỳ dương. b) Nửa chu kỳ âm.

v_{BE1} sẽ tăng dần và T_1 dẫn mạnh dần, dòng điện i_{C1} tăng và cấp dòng qua tải R_L . Đồng thời, v_{EB2} sẽ giảm dần đến T_2 dẫn giảm và thậm chí T_2 sẽ ngưng dẫn trong cả nửa chu kỳ dương. Kết quả là chỉ T_1 cung cấp dòng cho tải trong nửa chu kỳ dương. Hoạt động của mạch trong nửa chu kỳ dương được mô tả trong hình 5.24(a).

Tương tự, xét nửa chu kỳ âm, khi tín hiệu vào nhỏ hơn 0 và giảm dần, điện áp v_{EB2} sẽ tăng dần và v_{BE1} sẽ giảm dần nên T_1 ngưng dẫn, chỉ có T_2 cung cấp dòng cho tải. Hoạt động của mạch trong nửa chu kỳ âm được mô tả trong hình 5.24(b).

Giá trị của tụ C cần chọn đủ lớn để hằng số thời gian $R_L C$ phải lớn hơn so với tần số thấp nhất của tín hiệu vào. Điều kiện chọn giá trị tụ C như sau:

$$\frac{1}{\omega_L C} \leq R_L \text{ hay } C \geq \frac{1}{\omega_L R_L}$$

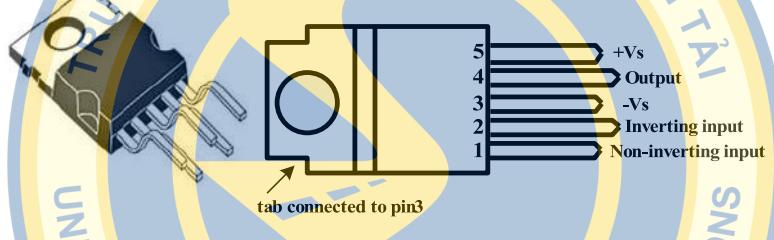
trong đó ω_L là tần số cắt thấp của mạch. Nhược điểm của việc dùng tụ là làm suy hao tín hiệu, đồng thời tụ sẽ hạn chế các thành phần tần số thấp của mạch, làm giảm khả năng khuếch đại của mạch ở dải âm siêu trầm.

5.4.3 IC khuếch đại công suất

Khi cần khuếch đại công suất ra lớn có thể sử dụng IC khuếch đại công suất riêng. Mức công suất ra, mức nguồn nuôi tùy thuộc vào loại IC mà ta chọn cho phù hợp.

Tùy mục đích sử dụng sẽ chọn các IC công suất khác nhau. Nếu sử dụng như bộ tiền khuếch đại thì có các IC như LM358, LM324 ... Còn nếu dùng như bộ khuếch đại công suất thì dùng những loại thông dụng như TDA2030, LA4440 ... giá thành thấp và dễ lắp ráp.

Xét IC TDA2030 công suất đầu ra 14 W thường dùng cho mạch khuếch đại công suất tần thấp chế độ AB. IC sẽ đảm bảo cung cấp công suất 12 W với tải 4Ω và 8 W cho tải 8Ω . IC khuếch đại công suất TDA2030 có dòng đầu ra lớn, méo nhỏ, có bảo vệ ngắn mạch bằng cách tự động hạn chế công suất tiêu tán và giữ điểm làm việc của transistor đầu ra ở chế độ an toàn. Hình dáng và sơ đồ chân của IC TDA2030 trên hình 5.25.

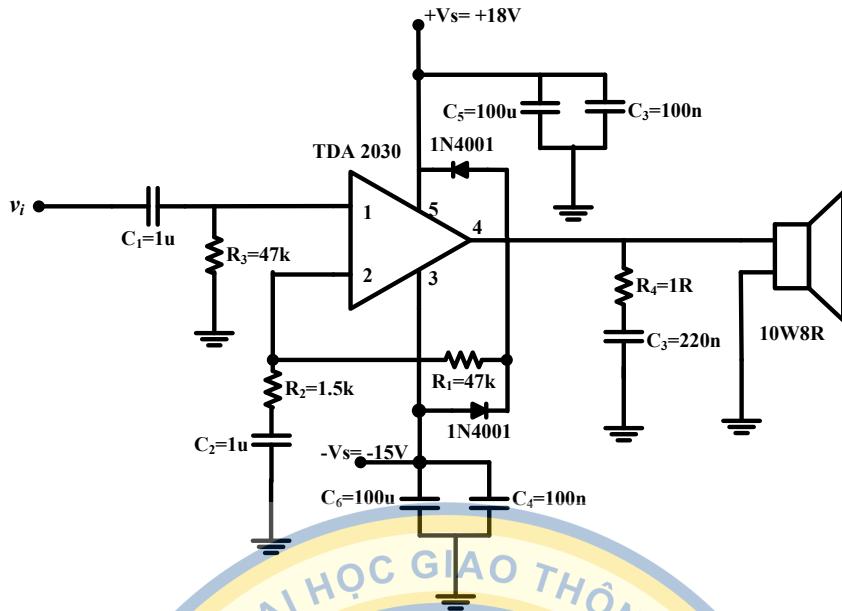


Hình 5.25: Hình dạng và sơ đồ chân của TDA2030.

Các thông số tối đa của TDA2030 như sau:

- ▷ Điện áp cung cấp: $\pm 18\text{V}$
- ▷ Điện áp vào vi sai: $\pm 15\text{V}$
- ▷ Đòng đỉnh đầu ra: 3, 5 (A)
- ▷ Công suất tiêu tán tại (90°C): $\pm 20\text{W}$
- ▷ Dải nhiệt độ: -40°C đến 150°C

Mạch khuếch đại công suất trong hình 5.26 sử dụng TDA2030 để tạo ra công suất lên đến 10 W trên tải 8Ω .



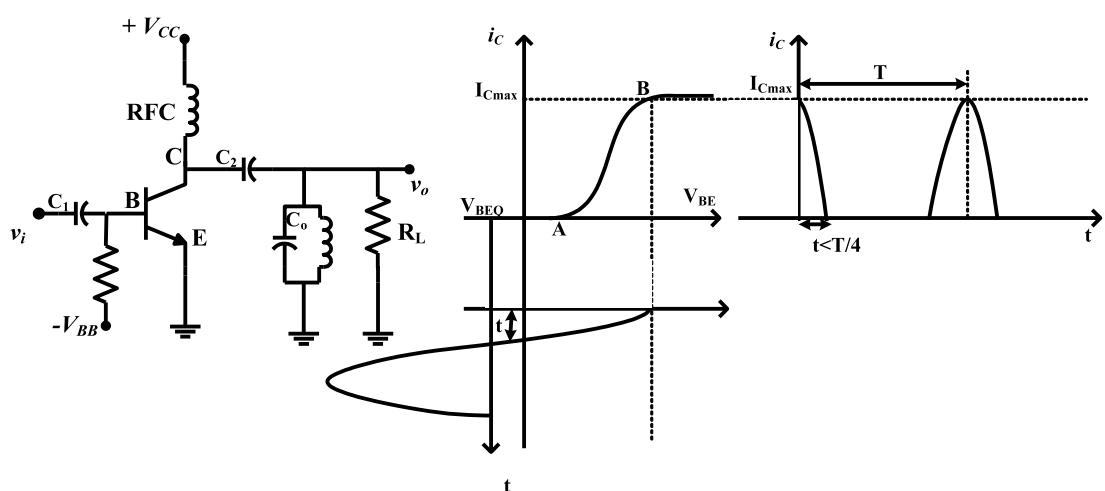
Hình 5.26: Sơ đồ mạch khuếch đại công suất 8 W dùng TDA2030.

5.5 MẠCH KHUẾCH ĐẠI SUẤT CHẾ ĐỘ C

Mạch khuếch đại chế độ C transistor được phân cực trong miền ngắn, điểm làm việc còn thấp hơn điểm ngắn. Tại một số điểm khi tín hiệu đủ lớn để vượt quá ngưỡng ngắn (trong nửa chu kỳ dương của tín hiệu) thì mới xuất hiện tín hiệu ra. Do đó trong chế độ này transistor chỉ dẫn trong khoảng nhỏ hơn nửa chu kỳ. Với tín hiệu vào hình sin, tín hiệu ra sẽ là các xung với độ rộng nhỏ hơn nửa chu kỳ như hình 5.27.

Tín hiệu ra của mạch khuếch đại chế độ C là những xung hẹp. Méo trong trường hợp này là rất lớn nên không sử dụng tầng khuếch đại đơn hoặc tầng đẩy kéo.

Mạch khuếch đại chế độ C có khả năng cung cấp công suất lớn với hiệu suất lớn hơn 78,5 %, tuy nhiên chế độ C tạo méo lớn trong tín hiệu ra. Các mạch khuếch đại chế độ C chủ yếu được ứng dụng trong khuếch đại tần số cao dùng tải cộng hưởng RLC thường dùng trong các máy phát của Tivi hoặc đài. Đây là một lĩnh vực cần được xem xét riêng (trong phần thông tin vô tuyến) nên trong phần này không phân tích các mạch khuếch đại công suất chế độ C.



Hình 5.27: Sơ đồ mạch và dạng sóng ra của một mạch khuếch đại chế độ C.

CÂU HỎI LÝ THUYẾT

- 5.1.** Phân biệt mạch khuếch đại công suất và mạch khuếch đại tín hiệu nhỏ ? Phân loại mạch khuếch đại công suất ? Yếu tố nào quyết định chế độ hoạt động của mạch khuếch đại công suất ?
- 5.2.** Trình bày các thông số cơ bản của mạch khuếch đại công suất ? Mạch khuếch đại công suất chế độ nào thường dùng cho dải âm tàn ?
- 5.3.** Trình bày nguyên lý hoạt động của mạch khuếch đại đẩy kéo ? Có những dạng kết cấu nào của mạch đẩy kéo ? Ưu nhược điểm của các kết cấu đó ?
- 5.4.** Nguyên nhân gây méo méo điểm "0" (méo xuyên tâm) trong mạch khuếch đại công suất đẩy kéo chế độ B ? Cách khắc phục ?
- 5.5.** Khi không có tín hiệu vào, mạch khuếch đại công suất chế độ B có tiêu thụ công suất không ? Tại sao ? So sánh với mạch khuếch đại chế độ A.

5.6. Trong mạch khuếch đại đẩy kéo, hiệu suất tối đa đạt được trong điều kiện nào ?

5.7. Trong mạch khuếch đại đẩy chế độ B, công suất tiêu tán cực đại của transistor xảy ra khi nào ? Tại sao cần tính toán công suất này ?

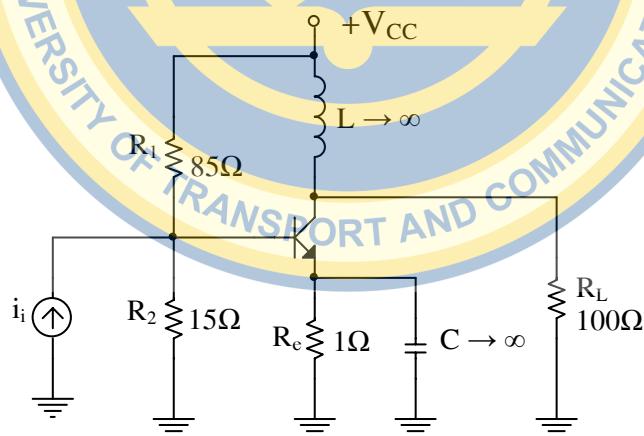
5.8. Cần sử dụng mạch khuếch đại đẩy kéo có kết cấu như thế nào trong trường hợp khuếch đại âm tần số rất thấp ?

5.9. Sử dụng biến áp đảo pha và biến áp ra trong mạch khuếch đại công suất đẩy kéo có ưu nhược điểm gì ?

5.10. Nêu biện pháp nâng cao hệ số khuếch đại công suất trong mạch khuếch đại công suất đẩy kéo.

BÀI TẬP

5.1. Cho mạch khuếch đại công suất chế độ A ghép cuộn cảm như hình dưới đây. Điện áp nguồn cung cấp $V_{CC} = 10\text{ V}$.

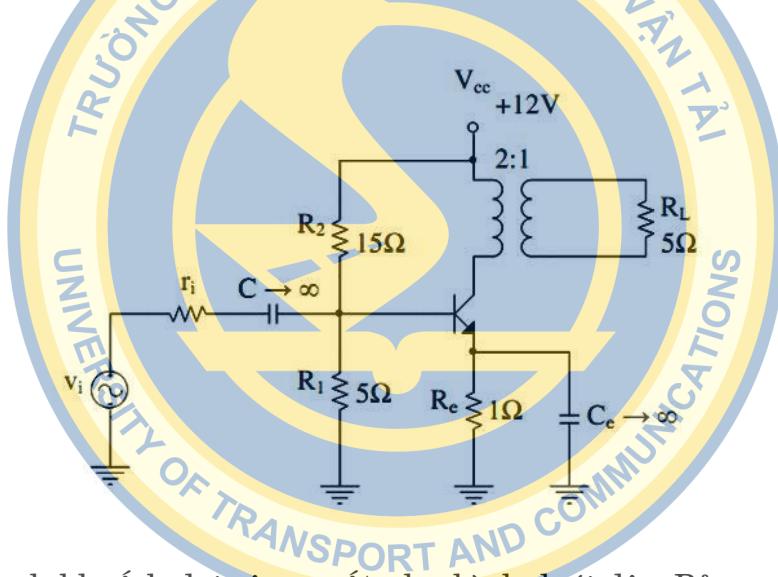


a. Vẽ đường tải tĩnh và động của mạch. Nhận xét biên độ điện áp ra tối đa có thể đạt được trên tải ?

- b. Tính công suất nguồn cấp, công suất ra trên tải, công suất tiêu tán trên transistor khi đạt hiệu suất tối đa ? Khi đó, hiệu suất tối đa là bao nhiêu ?
- c. Tính lại các giá trị điện trở phân cực R_1, R_2 để mạch đạt hiệu suất tối đa ? Tính lại các thông số ở câu b) cho mạch trong trường hợp này.

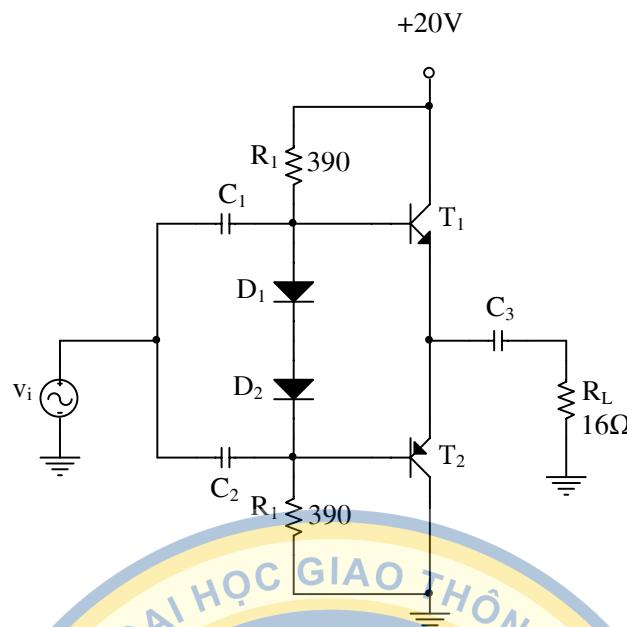
5.2. Cho mạch khuếch đại công suất như hình dưới đây. Transistor có điện áp bão hòa $V_{CE,sat} = 2\text{V}$, $\beta = 20$, $V_{BEQ} = 0,7\text{V}$

- a. Vẽ đường tải động và đường tải tĩnh.
- b. Tính công suất nguồn một chiều, công suất trên tải, công suất tiêu tán trên BJT và hiệu suất của mạch trong trường hợp đạt tối đa.
- c. Tính lại R_1 và R_2 để mạch hoạt động ở chế độ đổi xứng cực đại (*max swing*). Tính lại các thông số ở câu trên.

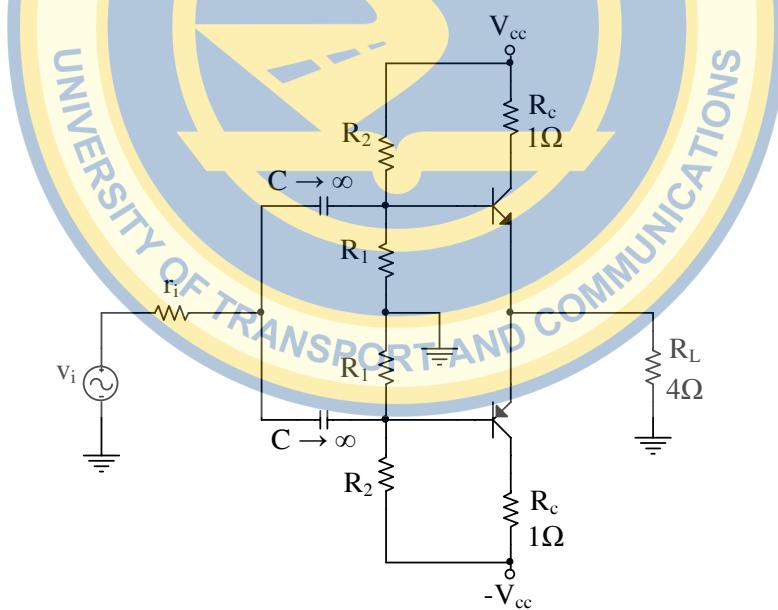


5.3. Cho mạch khuếch đại công suất như hình dưới đây. Bỏ qua công suất tiêu tán trên các điện trở phân cực.

- a. Vẽ đường tải động của mạch. Nhận xét biên độ điện áp ra tối đa có thể đạt được trên tải ?
- b. Tính công suất nguồn cấp, công suất ra trên tải, công suất tiêu tán trên transistor khi đạt hiệu suất tối đa ? Khi đó, hiệu suất tối đa là bao nhiêu ?



5.4. Cho mạch khuếch đại công suất chế độ B như hình vẽ dưới đây. Bỏ qua công suất tiêu tán trên các điện trở phân cực, điện áp nguồn cung cấp $V_{CC} = 10\text{V}$.

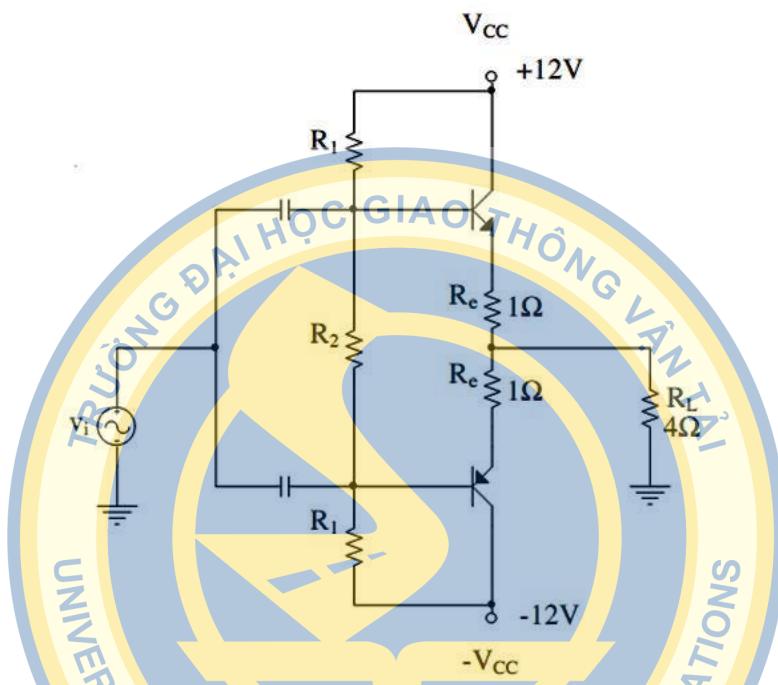


a. Vẽ đường tải động của mạch

260 * KTDTTT

- b. Xác định giá trị tối đa của điện áp vào và điện áp ra trên tải
- c. Tính công suất nguồn cấp, công suất ra trên tải, công suất tiêu tán trên mỗi transistor khi đạt hiệu suất tối đa ? Khi đó, hiệu suất tối đa là bao nhiêu ?

5.5. Cho mạch như hình vẽ dưới đây. Bỏ qua công suất tiêu tán trên các điện trở phân cực.



- a. Vẽ đường tải động của mạch và xác định giá trị tối đa của điện áp vào và điện áp ra trên tải.
- b. Tính công suất nguồn cấp, công suất ra trên tải, công suất tiêu tán trên mỗi transistor khi đạt hiệu suất tối đa ? Khi đó, hiệu suất tối đa là bao nhiêu ?
- c. Nếu biên độ đỉnh của điện áp vào v_i là 8 V, tính công suất nguồn cấp, công suất ra trên tải, công suất tiêu tán trên mỗi transistor và hiệu suất của mạch.

Chương 6

MẠCH KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Khái niệm cơ bản về mạch khuếch đại thuật toán;
- ▷ Phương pháp phân tích mạch sử dụng khuếch đại thuật toán;
- ▷ Các mạch cơ bản ứng dụng khuếch đại thuật toán;
- ▷ Phương pháp thiết kế mạch sử dụng khuếch đại thuật toán.

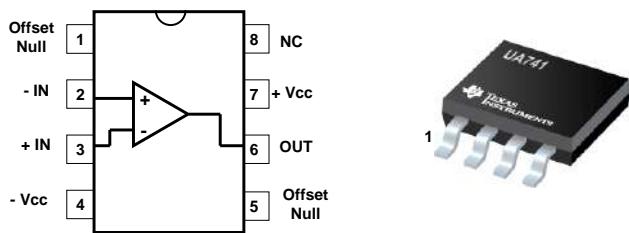
6.1 KHÁI NIỆM VÀ THÔNG SỐ CƠ BẢN

Mạch khuếch đại thuật toán (*Operational Amplifier: Op-Amp*) là một vi mạch tích hợp có hệ số khuếch đại rất lớn với đầu vào vi sai. Ban đầu, khuếch đại thuật toán được dùng trong các mạch thực hiện phép toán với tín hiệu tương tự như cộng, trừ, tích phân, vi phân... nên gọi là khuếch đại thuật toán. Ngày nay, Op-Amp được sử dụng như một bộ khuếch đại đa chức năng và là các IC tiêu biểu trong các mạch tương tự. Bộ khuếch đại thuật toán có kích thước nhỏ, tiêu hao ít năng lượng, độ ổn định và độ tin cậy cao, đặc tính hoạt động tốt.

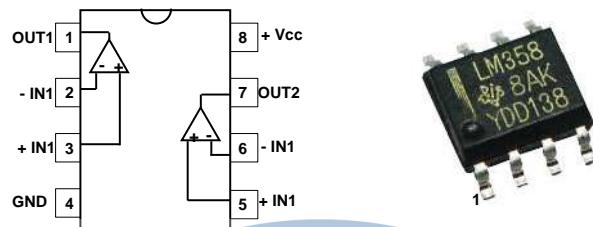
6.1.1 Cấu tạo và ký hiệu

Bộ Op-Amp là vi mạch tích hợp có hệ số khuếch đại rất lớn. Chúng thường có hai đầu vào tín hiệu, một đầu ra, hai đầu vào cấp nguồn, và các chân bù điện áp lệch, bù tần số ... Thông thường bộ Op-Amp là IC có 8 chân dạng DIP, sơ đồ chân và hình dạng thực tế của một số Op-Amp được cho trên hình 6.1.

6.1. KHÁI NIỆM VÀ THÔNG SỐ CƠ BẢN



a) Nguồn đôi xứng



b) Nguồn đơn

Hình 6.1: Hình dáng và sơ đồ chân của hai loại IC Op-Amp thông dụng: a) μ A741 và b) LM358.

Vi mạch khuếch đại thuât toán thực chất là một mạch bao gồm một bộ khuếch đại vi sai (KDVS) ở tầng vào, các bộ khuếch đại đệm và cuối cùng là bộ khuếch đại công suất. Các mạch khuếch đại này có thể là transistor BJT hoặc transistor trường FET, vì vậy các thông số của các bộ Op-Amp cũng khác nhau ít nhiều.



Hình 6.2: Sơ đồ khối cơ bản của IC Op-Amp.

Để đạt được các chỉ tiêu kỹ thuật gần với dạng lý tưởng, các hằng điện tử trên thế giới chế tạo các IC Op-Amp khá đa dạng nhưng nhìn chung đều tuân thủ sơ đồ khối như hình 6.2. Để có đầu vào đối xứng, tầng đầu tiên bao giờ cũng là tầng khuếch đại vi sai đối xứng có dòng tĩnh nhỏ, trở kháng vào lớn, cho phép mắc thêm mạch bù trôi.

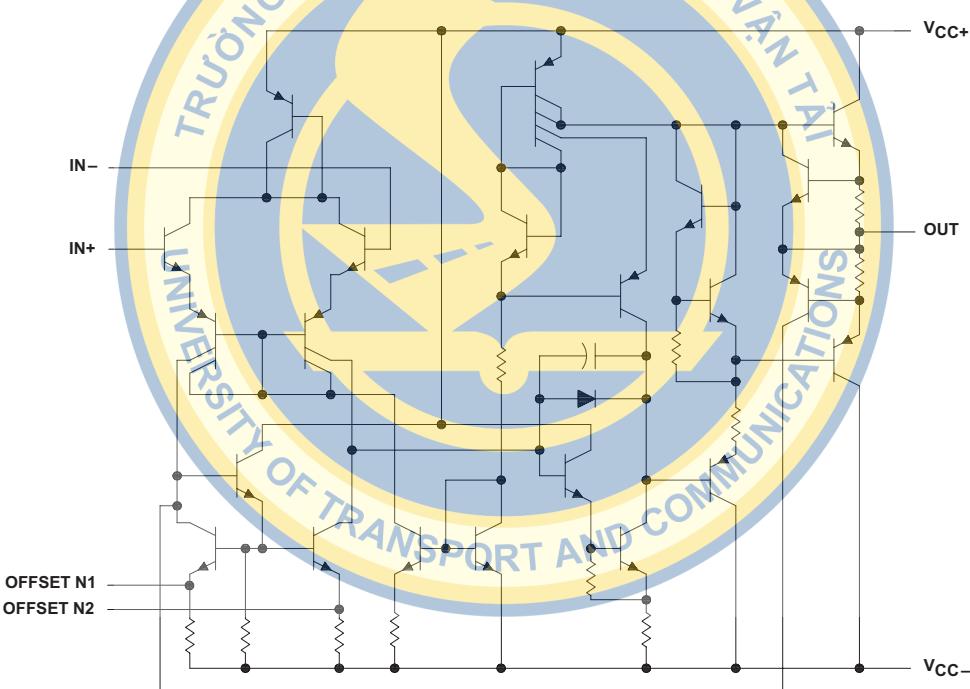
Chương 6: Mạch khuếch đại thuật toán

Tầng thứ hai là tầng khuếch đại vi sai cho phép chuyển từ đầu vào đối xứng sang đầu ra không đối xứng. Các tầng trung gian nhằm khuếch đại tín hiệu lên đủ lớn để có thể kích thích cho tầng cuối.

Tầng cuối, tức tầng ra phải đảm bảo có dòng ra lớn, điện áp ra lớn và trở kháng ra nhỏ. Mạch này thường là khuếch đại đẩy kéo có bù kèm theo mạch chia công suất.

Trong Op-Amp, ghép giữa các tầng thực hiện trực tiếp (Collector của tầng trước nối trực tiếp với Base của tầng sau). Vì vậy, các transistor NPN càng về sau càng có điểm công tác tinh đẩy dần về phía các giá trị dương nguồn. Do đó cần phải có một mạch dịch mức đẩy lùi điểm tinh về phía âm nằm trong một mạch nào đó của Op-Amp.

Hình 6.3 là sơ đồ khối chức năng IC Op-Amp μ A741 hãng Texas Instruments gồm 22 transistor, 11 điện trở, 1 diode và 1 tụ điện, tất cả được tích hợp trên một chíp nguyên khối.

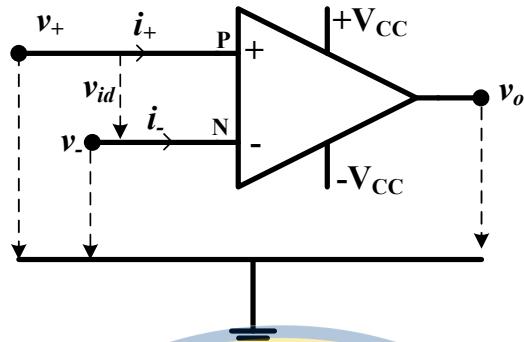


Hình 6.3: Sơ đồ khối chức năng IC Op-Amp μ A741 hãng Texas Instruments.

Ký hiệu khuếch đại thuật toán trong mạch điện được cho trên hình 6.4. Bộ khuếch đại thuật toán gồm hai đầu vào có đầu vào vi sai: đầu vào đảo v_- , ký

6.1. KHÁI NIỆM VÀ THÔNG SỐ CƠ BẢN

hiệu là cửa N (*Negative*) và đầu vào không đảo v_+ , ký hiệu là cửa P (*Positive*), một đầu ra (v_o), nguồn điện áp DC dạng đối xứng ($+V_{CC}$ và $-V_{CC}$) hoặc là nguồn đơn ($+V_{CC}$).



Hình 6.4: Ký hiệu khuếch đại thuật toán.

Điện áp vi sai (điện áp sai lệch giữa 2 đầu vào thuật toán) được định nghĩa như sau:

$$v_{id} = v_+ - v_-$$

Điện áp đầu ra được biểu diễn trong phương trình sau:

$$v_o = K_d v_{id} = K_d(v_+ - v_-) \quad (6.1)$$

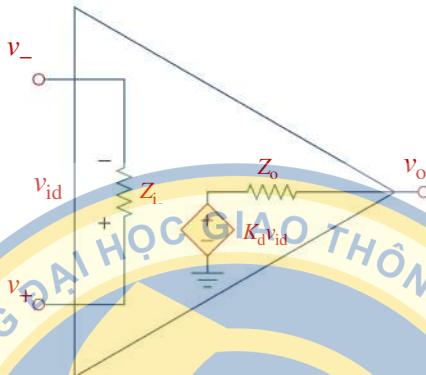
Trong đó, K_d là hệ số khuếch đại vi sai hay hệ số khuếch đại vòng hở của Op-Amp, có giá trị rất lớn (khoảng 10^5 đến 10^6 lần).

- ▷ Nếu điện áp $v_- = 0$ thì điện áp ra $v_o = K_d v_+ > 0$, lúc này điện áp ra đồng pha điện áp vào, do đó **cửa P** được gọi là **cửa thuận**, ký hiệu là dấu (+).
- ▷ Nếu điện áp $v_+ = 0$ thì điện áp ra $v_o = -K_d v_- < 0$, lúc này điện áp ra ngược pha điện áp vào, do đó **cửa N** được gọi là **cửa đảo**, ký hiệu là dấu (-).

Từ công thức xác định v_o trên có thể thấy, nhiều sẽ bị loại trừ vì đầu ra là hiệu của 2 đầu vào, nên thành phần nhiễu (cùng giá trị) sẽ bị loại theo công thức trên, đây cũng là ưu điểm so với các mạch sử dụng transistor đơn đã

trình bày ở các phần trước. Đồng thời, do K_d là hệ số khuếch đại vòng hở của Op-Amp có giá trị rất lớn nên các thông số của mạch sử dụng Op-Amp chủ yếu phụ thuộc vào khâu hồi tiếp mắc ngoài mạch. Từ đó, thiết kế và xây dựng mạch với khuếch đại thuật toán đơn giản hơn so với BJT và FET.

6.1.2 Các đặc tính cơ bản của Op-Amp



Hình 6.5: Sơ đồ tương đương của khuếch đại thuật toán [7].

Sơ đồ tương đương của khuếch đại thuật toán được cho trên hình 6.5. Trong đó, Z_i và Z_o lần lượt là trở kháng vào và trở kháng ra của mạch khuếch đại thuật toán. Một bộ Op-Amp lý tưởng có các tính chất sau:

- ▷ Hệ số khuếch đại vòng hở rất lớn $K_d \rightarrow \infty$;
- ▷ Trở kháng vào vô cùng lớn $Z_i \rightarrow \infty$;
- ▷ Trở kháng ra rất nhỏ $Z_o \rightarrow 0$;

Để đơn giản hóa trong tính toán, khi phân tích mạch dùng Op-Amp thường áp dụng tính chất của Op-Amp lý tưởng và kết quả có sai số chấp nhận được. Bảng 6.1 so sánh thông số của Op-Amp lý tưởng và thực tế.

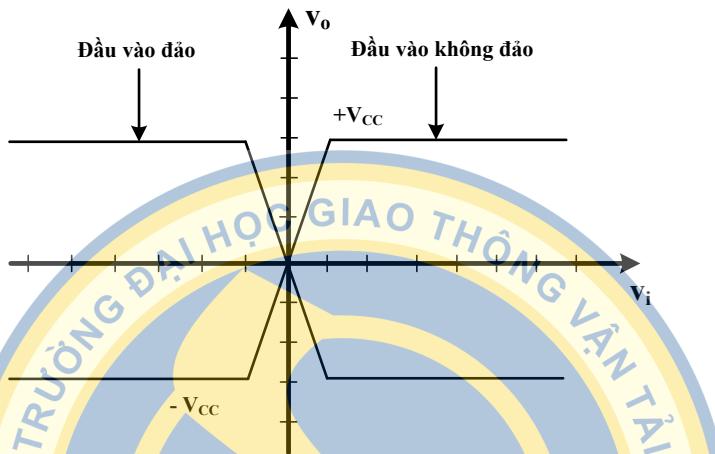
6.1.3 Đặc tuyến truyền đạt của Op-Amp

Đặc tuyến truyền đạt của Op-Amp biểu diễn ở hình 6.6, gồm 2 miền:

6.1. KHÁI NIỆM VÀ THÔNG SỐ CƠ BẢN

Bảng 6.1: So sánh thông số Op-Amp lý tưởng và Op-Amp thực tế.

Thông số	Op-Amp lý tưởng	Op-Amp thực tế
Trở kháng vào Z_i	∞	10^6 (BJT) và $10^9 \div 10^{12}$ (FET)
Hệ số khuếch đại vòng hở K_d	∞	$10^5 \div 10^9$
Trở kháng ra Z_o	0	$100\Omega \div 1k\Omega$
Dòng vào i_+, i_-	0	nA \div pA



Hình 6.6: Đặc tuyến truyền đạt của khuếch đại thuật toán.

- ▷ Miền tuyển tính: Điện áp đầu ra biến thiên một cách tuyến tính theo điện áp đầu vào. Nghĩa là $v_o = K_d v_{id}$.
- ▷ Miền bão hòa: Dù điện áp đầu vào có thay đổi nhưng điện áp đầu ra vẫn giữ tại giá trị không đổi. Op-Amp có 2 mức bão hòa là bão hòa dương và bão hòa âm. Khi đó điện áp ra của Op-Amp chỉ có thể là một trong hai mức: $+V_{CC}$ hoặc $-V_{CC}$.

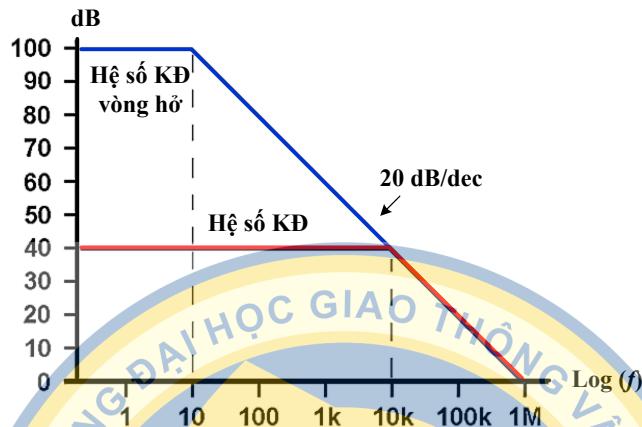
Thực tế giá trị điện áp bão hòa thường nhỏ hơn điện áp nguồn cấp khoảng 1 V.

6.1.4 Bảng thông của bộ khuếch đại thuật toán

Bảng thông của mạch điện tử là một thông số rất quan trọng, do đó bảng thông của IC Op-Amp là một yếu tố quan trọng trong các mạch sử dụng nó.

Hệ số khuếch đại, băng thông, tích băng thông hệ số khuếch đại (GBP: Gain Bandwidth Product) có mối liên hệ chặt chẽ với nhau.

Hệ số khuếch đại vòng hở (K_d) của IC Op-Amp không phải là một hằng số mà thay đổi phụ thuộc vào tần số của tín hiệu vào. Hình 6.7 là đặc tuyến biên độ-tần số của IC Op-Amp μ A741.



Hình 6.7: Đặc tuyến biên độ-tần số của IC Op-Amp μ A741.

Từ hình vẽ ta thấy băng thông của bộ Op-Amp khoảng 10 Hz. Sau đó, hệ số khuếch đại suy giảm với độ dốc -20 dB/dec đạt đến hệ số khuếch đại -0 dB (hay 1 đơn vị) tại tần số xấp xỉ 1 MHz, tần số này được gọi là *tần số khuếch đại đơn vị* f_T .

Với mỗi mạch khuếch đại thuật toán cụ thể, giá trị GBP là một величина không đổi. Rõ ràng băng thông 3 dB khoảng 10 Hz thì không hiệu quả trong sử dụng, tuy nhiên có thể mở rộng băng thông của mạch bằng cách sử dụng hồi tiếp âm. Hệ số khuếch đại K của mạch có hồi tiếp âm sẽ nhỏ hơn hệ số khuếch đại vòng hở K_d nhưng băng thông sẽ mở rộng. Ví dụ trong hình 6.7, khi hệ số khuếch đại là 40 dB thì băng thông của mạch khuếch đại có hồi tiếp sẽ được mở rộng lên 10 kHz.

6.1.5 Dòng vào tĩnh và điện áp lệch "0"

Khuếch đại một chiều có hiện tượng trôi điểm "0" do sự phụ thuộc vào nhiệt độ của các thông số transistor. Để cân bằng ban đầu cho Op-Amp, thường cho một trong các đầu vào của nó một điện áp phu thích hợp hoặc một điện

6.1. KHÁI NIỆM VÀ THÔNG SỐ CƠ BẢN

trở để điều chỉnh dòng phân cực đầu vào. Các thông số đặc trưng cho hiện tượng trôi điểm "0" của Op-Amp thực tế như sau:

- ▷ **Dòng vào tĩnh:** $I_t = \frac{I_+ + I_-}{2}$ khi $V_+ = V_- = 0$
- ▷ **Dòng vào lệch "0":** $I_0 = I_+ - I_-$ khi $V_+ = V_- = 0$ (thường $I_0 = 0, 1I_t$)
- ▷ **Điện áp lệch "0":** $V_0 = V_+ - V_-$ khi điện áp ra $v_o = 0$. Trong thực tế khi $v_{id} = 0$ thì v_o vẫn khác 0 do điện áp lệch "0" ở đầu vào gây ra. Điện áp lệch "0" là điện áp cần đặt vào đầu vào Op-Amp để $v_o = 0$.

Các giá trị I_0 và V_0 đều phụ thuộc nhiệt độ, khi nhiệt độ thay đổi sẽ dẫn đến hiện tượng trôi dòng lệch "0" và điện áp lệch "0". Với Op-Amp lý tưởng thì các giá trị I_0 và V_0 đều bằng 0.

6.1.6 Tỷ số nén tín hiệu đồng pha

Nếu đặt vào đầu vào đảo và đầu vào không đảo các điện áp bằng nhau thì theo lý thuyết $v_o = 0$ theo biểu thức 6.1 nhưng trên thực tế lại không như vậy, điện áp ra lúc này sẽ bằng:

$$v_o = K_{cm}v_{cm}$$

trong đó:

K_{cm} : Hệ số khuếch đại đồng pha;

v_{cm} : Điện áp đồng pha;

Tỷ số nén tín hiệu đồng pha CMRR (Common Mode Rejection Ratio) được định nghĩa như sau:

$$CMRR = \frac{K_d}{K_{cm}} \quad (6.2)$$

Op-Amp thực tế có CMRR nằm trong khoảng từ 10^3 đến 10^5 hay $76 \div 100$ dB với $CMRR(\text{dB}) = 20\log K_d / K_{cm}$

Hệ số nén đồng pha sẽ đánh giá khả năng làm việc của bộ Op-Amp thực tế so với bộ Op-Amp lý tưởng.

Với Op-Amp lý tưởng $CMRR \rightarrow \infty$ vì $K_{cm} = 0$

6.2 CÁC MẠCH ỨNG DỤNG OP-AMP CƠ BẢN

Phần này sẽ phân tích các mạch cơ bản dùng Op-Amp dựa trên giả thiết **Op-Amp lý tưởng** như sau:

- ▷ Trở kháng vào $Z_i = \infty$, dẫn đến

$$\begin{cases} i_+ = 0 \\ i_- = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

- ▷ Hệ số khuếch đại vòng hở $K_d = \infty$, dẫn đến $v_{id} = 0$ hay điện thế cửa thuận bằng điện thế cửa đảo

$$v_P = v_N \quad (6.4)$$

- ▷ Trở kháng ra $Z_o = 0$
- ▷ Hệ số khuếch đại không đổi trong băng thông tín hiệu xét.

Các bước phân tích mạch thực hiện theo trình tự sau:

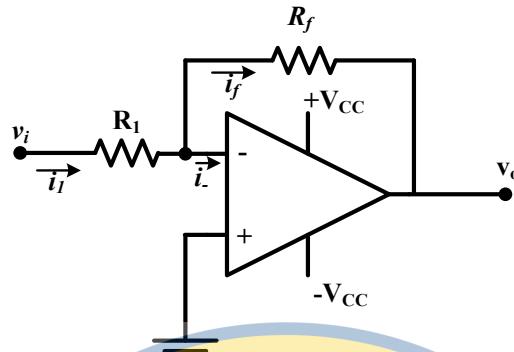
- ▷ Xác định số nút trong mạch điện cần phân tích (Ví dụ nút N, nút P tại cửa vào Op-Amp). Sau đó quy ước chiều các thành phần dòng điện tại các nút đó. Lưu ý với Op-Amp lý tưởng, dòng vào $i_+ \approx 0$ và $i_- \approx 0$.
- ▷ Viết phương trình KCL cho các nút đó.
- ▷ Cân bằng $v_P = v_N$.
- ▷ Xác định hàm điện áp ra theo các điện áp vào.

Các phần dưới đây sẽ xét các mạch cụ thể.

6.2. CÁC MẠCH ỦNG DỤNG OP-AMP CÓ BẢN

6.2.1 Mạch khuếch đại đảo/không đảo

Mạch khuếch đại đảo



Hình 6.8: Mạch khuếch đại đảo

Sơ đồ mạch khuếch đại đảo như hình 6.8. Cửa P được nối đất, cửa N được nối với điện trở đầu vào R_1 và điện trở hồi tiếp R_f . Tín hiệu vào v_i được đưa vào cửa đảo. Từ sơ đồ mạch ta có phương trình KCL cho nút N như sau:

$$i_1 = i_- + i_f \xrightarrow{i_- = 0} i_1 = i_f$$

$$\Leftrightarrow \frac{v_i - v_N}{R_1} = \frac{v_N - v_o}{R_f}$$

Mà cực P nối đất, vậy ta có $v_N = v_P = 0 \rightarrow v_o = -\frac{R_f}{R_1}v_i$

Suy ra hệ số khuếch đại điện áp của mạch được tính theo biểu thức:

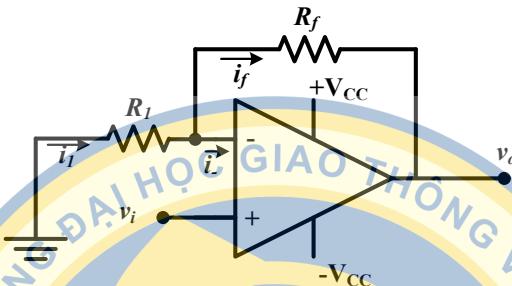
$$K_v = -\frac{R_f}{R_1} \quad (6.5)$$

* Nhận xét:

- ▷ Hệ số khuếch đại chỉ phụ thuộc vào giá trị điện trở hồi tiếp R_f và điện trở vào R_1 mà không phụ thuộc vào bản thân Op-Amp. Do đó, để thay đổi hệ số khuếch đại ta chỉ cần thay đổi các giá trị điện trở này.
- ▷ Ta thấy, $K_v < 0$, nghĩa là tín hiệu ra đảo pha so với tín hiệu đầu vào, nên được gọi là mạch khuếch đại đảo.

- ▷ Tầng khuếch đại đảo có trở kháng vào nhỏ ($= R_1$). Nếu tăng trở kháng vào sẽ làm giảm hệ số khuếch đại.
- ▷ Nếu cho $R_1 = R_f$ thì $K_v = -1$ tạo tầng đảo lặp lại điện áp.
- ▷ Nếu $R_1 = 0$ thì dòng điện $i_1 = -v_o/R_f$, hay điện áp ra tỷ lệ với dòng điện vào. Mạch lúc này đóng vai trò như một bộ biến đổi dòng sang áp.

Mạch khuếch đại không đảo



Hình 6.9: Mạch khuếch đại không đảo.

Sơ đồ mạch khuếch đại không đảo như hình 6.9, điện áp vào v_i được đặt vào cửa thuận. Khâu hồi tiếp âm điện áp về cửa đảo. Từ sơ đồ mạch ta có phương trình KCL cho nút N như sau:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_- + i_f \xrightarrow{i_- = 0} i_1 = i_f \\ \Leftrightarrow \frac{0 - v_N}{R_1} &= \frac{v_N - v_o}{R_f} \\ \Rightarrow v_N &= \frac{R_1}{R_1 + R_f} v_o \end{aligned}$$

Mà $v_P = v_i$, vậy ta có hệ số khuếch đại áp:

$$K_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_f}{R_1}$$

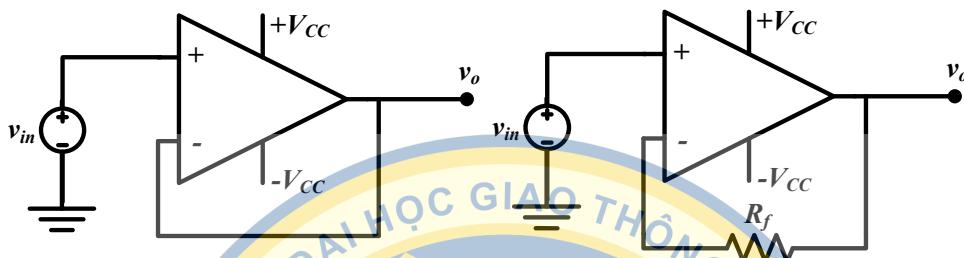
Suy ra:

$$K_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (6.6)$$

Nhận xét:

6.2. CÁC MẠCH ỦNG DỤNG OP-AMP CO BẢN

- ▷ Hệ số khuếch đại của mạch khuếch đại không đảo là K_v dương và luôn lớn hơn 1, tín hiệu ra đồng pha với tín hiệu vào.
- ▷ Nếu $R_f = 0$ hoặc $R_1 = \infty$ thì đều có $v_o = v_i$ (hình 6.10) được gọi là mạch lặp điện áp, thường được dùng làm mạch đệm (buffer), có trở kháng vào lớn và trở kháng ra nhỏ như mạch khuếch đại BJT mắc kiểu Collector chung.

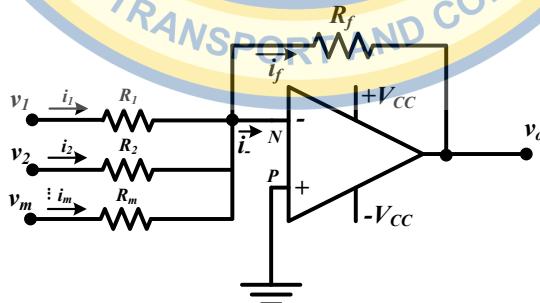


Hình 6.10: Mạch đệm điện áp.

6.2.2 Mạch cộng đảo/không đảo

Mạch cộng đảo hoặc mạch cộng không đảo là các mạch khuếch đại đảo/không đảo có nhiều đầu vào.

6.2.2.1 Mạch cộng đảo



Hình 6.11: Mạch cộng đảo.

Chương 6: Mạch khuếch đại thuật toán

Áp dụng định luật KCL cho điểm nút N:

$$i_1 + i_2 + \cdots + i_m = i_f + i_-$$

$$i_- = 0 \rightarrow i_1 + i_2 + \cdots + i_m = i_f$$

$$\Rightarrow \frac{v_1 - v_N}{R_1} + \frac{v_2 - v_N}{R_2} + \cdots + \frac{v_m - v_N}{R_m} = \frac{v_N - v_o}{R_f}$$

Mà ta có cửa P nối đất nên $v_N = v_P = 0$

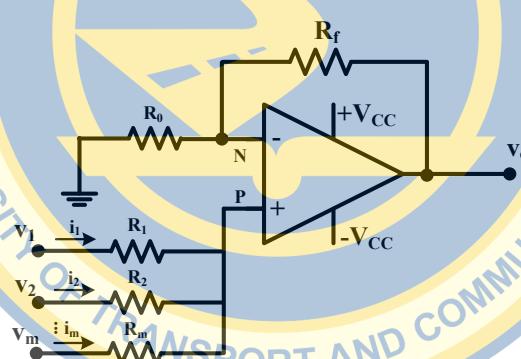
$$\Rightarrow \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \cdots + \frac{v_m}{R_m} = -\frac{v_o}{R_f}$$

Vậy, điện áp ra v_o là:

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{R_f}{R_2}v_2 + \cdots + \frac{R_f}{R_m}v_m\right) \quad (6.7)$$

Như vậy, tín hiệu đầu ra bằng tổng các tín hiệu đầu vào theo các hệ số $K_i = -R_f/R_i$ như biểu diễn trong biểu thức 6.5.

6.2.2.2 Mạch cộng không đảo



Hình 6.12: Mạch cộng không đảo.

Sơ đồ mạch cộng không đảo trên hình 6.12, ta thấy mạch có 2 nút là N và P. Để đơn giản tính toán, tại nút N ta có dòng $i_- = 0$ nên có thể coi điện trở R_0 mắc nối tiếp R_f , áp dụng công thức chia áp ta có:

$$v_N = \frac{R_0}{R_0 + R_f} v_o$$

6.2. CÁC MẠCH ỦNG DỤNG OP-AMP CO BẢN

Áp dụng định luật KCL cho điểm nút P:

$$i_1 + i_2 + \cdots + i_m = i_+$$

Mà $i_+ = 0$

$$\Rightarrow \frac{v_1 - v_N}{R_1} + \frac{v_2 - v_N}{R_2} + \cdots + \frac{v_m - v_N}{R_m} = 0$$

Đặt:

$$R_{eq} = (R_1 // R_2 // \dots R_m) \rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_m} \right)$$

Thay vào ta được:

$$\begin{aligned} \frac{v_N}{R_{eq}} &= \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \cdots + \frac{v_m}{R_m} \\ \Rightarrow v_N &= \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \cdots + \frac{v_m}{R_m} \right) R_{eq} \end{aligned}$$

Kết hợp với (6.2.2.2), điện áp ra của mạch như sau:

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_0} \right) \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \cdots + \frac{v_m}{R_m} \right) R_{eq} \quad (6.8)$$

Nếu $R_1 = R_2 = \cdots = R_m = R$ thì $R_{eq} = R/m$

$$\Rightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_0} \right) \left(\frac{v_1 + v_2 + \cdots + v_m}{m} \right)$$

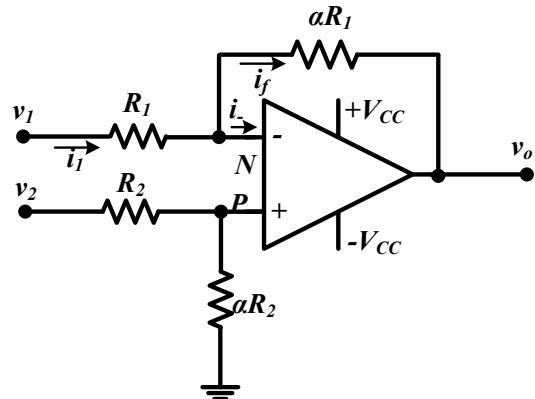
Vậy tín hiệu ra bằng tổng các tín hiệu vào với các hệ số khác nhau, pha của điện áp ra cùng pha với tổng các điện áp vào.

6.2.3 Mạch khuếch đại hiệu

Sơ đồ mạch khuếch đại hiệu trên hình 6.13 có tín hiệu vào đưa tới cả cửa thuận và cửa đảo.

Tại nút P ta có dòng $i_+ = 0$ nên có thể coi điện trở R_2 mắc nối tiếp αR_2 , áp dụng công thức chia áp ta có:

$$v_P = \frac{\alpha R_2}{R_2 + \alpha R_2} v_2 = \frac{\alpha}{1 + \alpha} v_2$$



Hình 6.13: Mạch khuếch đại hiệu.

Áp dụng định luật KCL cho điểm nút N:

Mà $i_- = 0$

$$\begin{aligned} i_1 &= i_f + i_- \\ \rightarrow \frac{v_1 - v_N}{R_1} &= \frac{v_N - v_o}{\alpha R_1} \\ \Leftrightarrow v_N &= \frac{\alpha v_1 + v_o}{1 + \alpha} \end{aligned}$$

Mà $v_N = v_P$, kết hợp với (6.2.3), điện áp ra của mạch như sau:

$$v_o = \alpha(v_2 - v_1) \quad (6.9)$$

Vậy tín hiệu ra bằng hiệu các tín hiệu vào với hệ số α

6.2.4 Mạch tích phân/vi phân

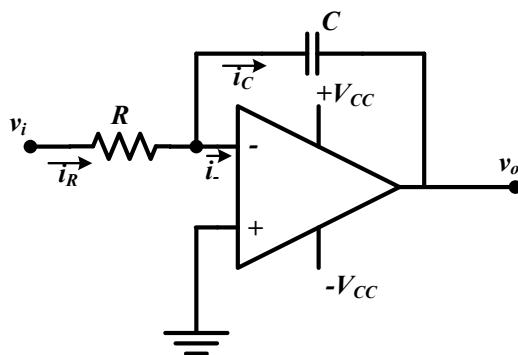
6.2.4.1 Mạch tích phân

Sơ đồ mạch tích phân tín hiệu trên hình 6.14. Áp dụng định luật KCL cho điểm nút N:

$$i_R = i_C + i_-$$

Với i_R là dòng đầu vào, dòng này nạp vào tụ C và tạo ra điện áp ra v_o

6.2. CÁC MẠCH ỦNG DỤNG OP-AMP CO BẢN



Hình 6.14: Mạch tích phân.

Mà $i_- = 0$, suy ra:

$$\frac{v_i - v_N}{R} = C \frac{d(v_N - v_o)}{dt}$$

Mà cửa P nối đất, vậy có $v_N = v_P = 0$, thay vào công thức trên rồi tích phân hai vế ta được:

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt \quad (6.10)$$

Vậy điện áp ra sẽ bằng tích phân của điện áp vào chia cho hằng số thời gian $\tau = RC$. Biến τ được định nghĩa là thời gian cần thiết cho điện áp v_o đạt tới biên độ bằng với điện áp vào, bắt đầu từ điều kiện 0 và với điện áp vào là hằng số. Xét tín hiệu vào dạng sin với biên độ $v_i = V_{i(p)} \sin \omega t$, ta có điện áp ra mạch tích phân như sau:

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int V_{i(p)} \sin \omega t = \frac{1}{\omega RC} V_{i(p)} \cos \omega t$$

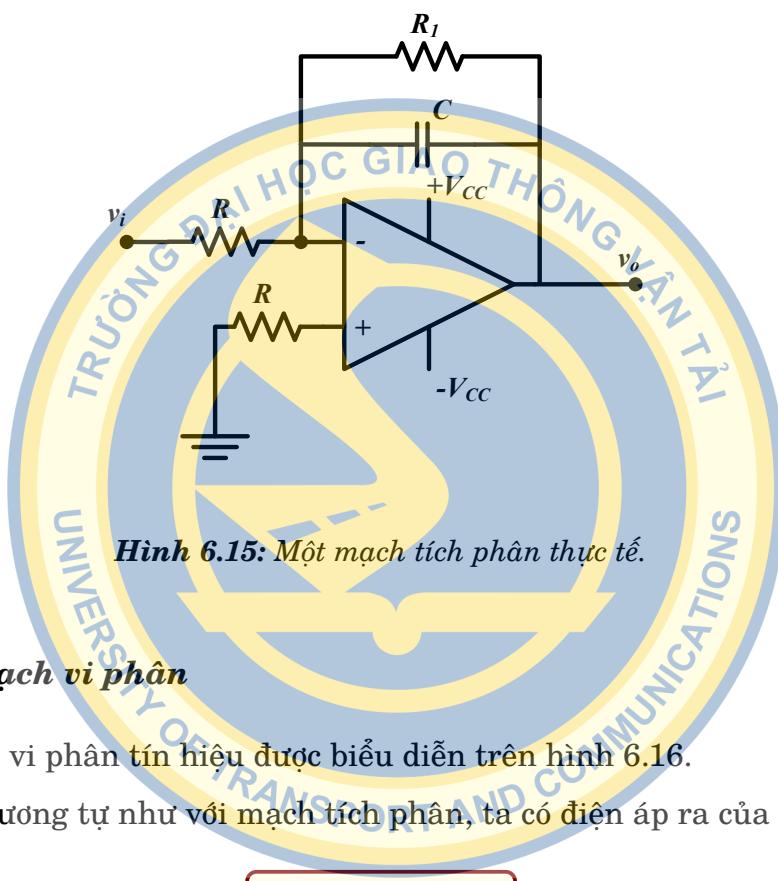
Như vậy, biên độ đỉnh điện áp ra:

$$V_{o(p)} = \frac{1}{\omega RC} V_{i(p)}$$

là một giá trị phụ thuộc vào tần số tín hiệu vào ω . Khi tần số tín hiệu tăng, biên độ điện áp ra giảm. Vậy mạch tích phân có tính chất của mạch lọc thông thấp.

Bên cạnh đó, mạch tích phân còn được áp dụng làm mạch biến đổi dạng sóng tuần hoàn. Ví dụ, khi đưa điện áp vào dạng xung vuông, điện áp ra sẽ có dạng xung tam giác.

Với bộ Op-Amp thực tế, có điện áp lệch "0", xuất hiện như là điện áp DC tại đầu vào và khi được tích phân sẽ xuất hiện tại đầu ra như là một điện áp tăng tuyến tính. Tương tự, một phần của dòng lệch "0" cũng được tích phân, tạo nên sự thay đổi của điện áp ra. Hai nguyên nhân gây lỗi trên thực tế sẽ đưa bộ Op-Amp đến trạng thái bão hòa. Đây chính là một hạn chế của mạch. Vấn đề này sẽ được khắc phục bởi việc nối thêm một điện trở giữa đầu vào không đảo và đất, để bù ảnh hưởng của dòng lệch "0"; đồng thời thêm điện trở mắc song song với tụ C để trung hòa ảnh hưởng của điện áp lệch như hình 6.15.



6.2.4.2 Mạch vi phân

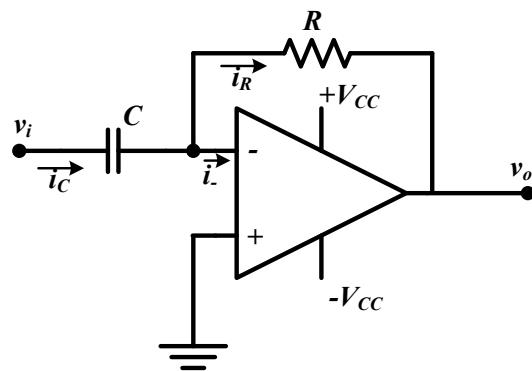
Sơ đồ mạch vi phân tín hiệu được biểu diễn trên hình 6.16.

Phân tích tương tự như với mạch tích phân, ta có điện áp ra của mạch là:

$$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt} \quad (6.11)$$

Như vậy, điện áp ra là vi phân điện áp vào. Các ứng dụng của mạch vi phân cũng tương tự như mạch tích phân gồm: mạch lọc thông cao và các mạch biến đổi dạng tín hiệu. Ví dụ nếu tín hiệu vào mạch vi phân là dạng sóng vuông thì điện áp ra sẽ có dạng xung kim.

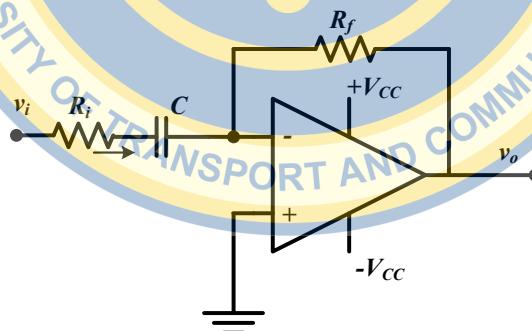
6.2. CÁC MẠCH ỦNG DỤNG OP-AMP CO BẢN



Hình 6.16: Mạch vi phân.

Tạp âm luôn xuất hiện trong các mạch điện tử sẽ trở nên mạnh hơn trong các mạch lấy vi phân. Tạp âm có xu hướng thay đổi đột ngột, bất ngờ tạo ra các xung nhọn do tín hiệu ra của bộ vi phân thực tế tỷ lệ với tốc độ biến thiên của tín hiệu vào. Đặc biệt khi ở tần số cao thì tạp âm càng được khuếch đại nhiều do độ khuếch đại của mạch vi phân tăng khi tần số tăng. Có thể giảm được vấn đề tạp âm nếu sử dụng ở tần số thấp.

Để khắc phục một phần nào, mắc thêm một điện trở nối tiếp với tụ C ở đầu vào như hình 6.17. Lúc này mạch chỉ có đặc tính vi phân tốt khi tần số của tín hiệu nhỏ hơn $1/2\pi R_i \cdot C$.



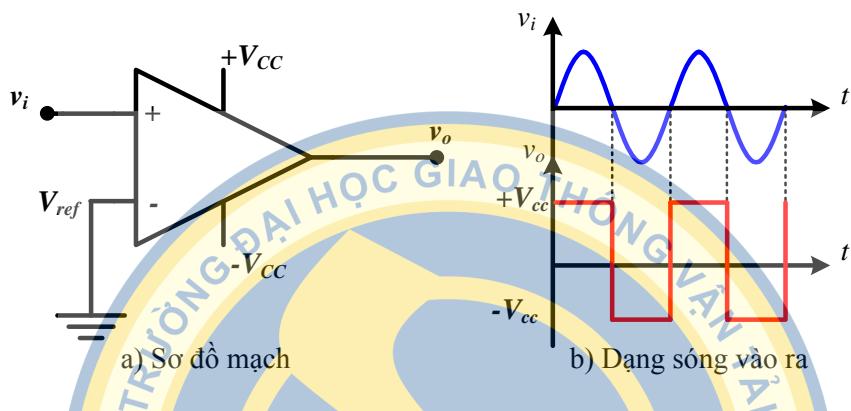
Hình 6.17: Mạch vi phân thực tế.

6.2.5 Mạch so sánh

Mạch so sánh sẽ so sánh biên độ điện áp đưa vào với một điện áp chuẩn. Thông thường điện áp chuẩn được định trước cố định.

+ Mạch so sánh mức 0

Hình 6.18 là mạch so sánh mức 0 (còn được gọi là mạch phát hiện điểm "0") khi điện áp chuẩn $V_{ref} = 0$ được đưa vào cửa đảo, điện áp vào đưa tới cửa thuận.



Hình 6.18: Mạch so sánh mức 0 điện áp vào cửa không đảo.

Nguyên tắc hoạt động:

- ▷ Khi điện áp vào dương $v_i > 0$ thì điện áp ra bằng mức bão hòa dương $v_o = +V_{CC}$
- ▷ Khi điện áp vào nhỏ hơn điện áp chuẩn $v_i < 0$ thì điện áp ra bằng mức bão hòa âm $v_o = -V_{CC}$

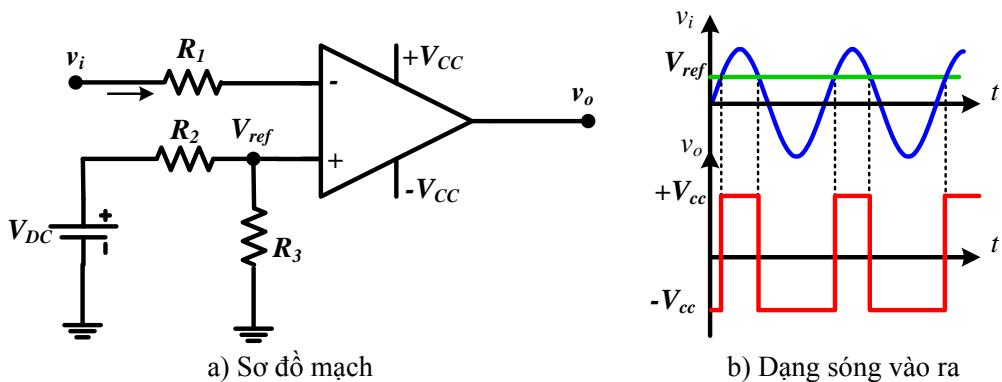
Ứng dụng chủ yếu của mạch là bộ phát hiện qua mức 0 và mạch tạo xung vuông.

+ Mạch so sánh với điện áp chuẩn V_{ref}

Có thể thay đổi mức điện áp chuẩn V_{ref} bằng sơ đồ mạch hình 6.19 nhờ thay đổi các điện trở R_2 và R_3 . Điện áp chuẩn sẽ được điều chỉnh theo công thức sau:

$$V_{ref} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times V_{DC}$$

6.2. CÁC MẠCH ỦNG DỤNG OP-AMP CO BẢN



Hình 6.19: Mạch so sánh điện áp với điện áp V_{ref} vào cửa đảo.

Nguyên tắc hoạt động:

- ▷ Khi điện áp vào lớn hơn điện áp chuẩn $v_i > V_{ref}$ thì điện áp ra bằng mức bão hòa âm $v_o = -V_{CC}$
- ▷ Khi điện áp vào nhỏ hơn điện áp chuẩn $v_i < V_{ref}$ thì điện áp ra bằng mức bão hòa dương $v_o = +V_{CC}$

Chú ý: Trong thực tế điện áp bão hòa dương và âm sẽ nhỏ hơn điện áp nguồn cấp V_{CC} một chút.

6.2.6 Mạch hàm mũ/logarit

6.2.6.1 Mạch hàm mũ

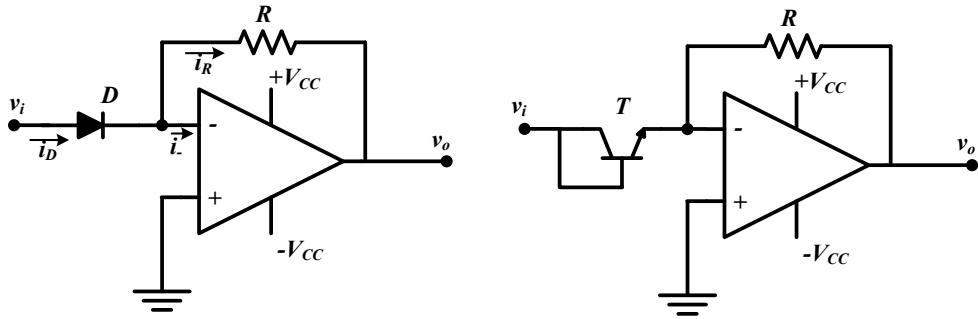
Mạch hàm mũ (đôi loga) sử dụng các phần tử phi tuyến như diode và transistor. Sơ đồ mạch như hình 6.20.

Xét với diode, quan hệ của dòng I_D và điện áp V_{AK} được cho bởi phương trình Shockley:

$$I_D \approx I_S \left(e^{\frac{V_{AK}}{nV_T}} \right)$$

trong đó:

- ▷ I_S là dòng ngược bão hòa;



Hình 6.20: Mạch hàm mũ.

▷ V_T là hiệu điện thế nhiệt; tại nhiệt độ phòng $t = 25^\circ\text{C}$ thì $V_T = 26 \text{ mV}$;

▷ n là hệ số hiệu chỉnh tùy thuộc vào cấu tạo và vật liệu.

Mạch có một nút N, ta có $I_D = I_R$, nghĩa là:

$$I_S \left(e^{\frac{v_i - v_N}{nV_T}} \right) = \frac{v_N - v_o}{R}$$

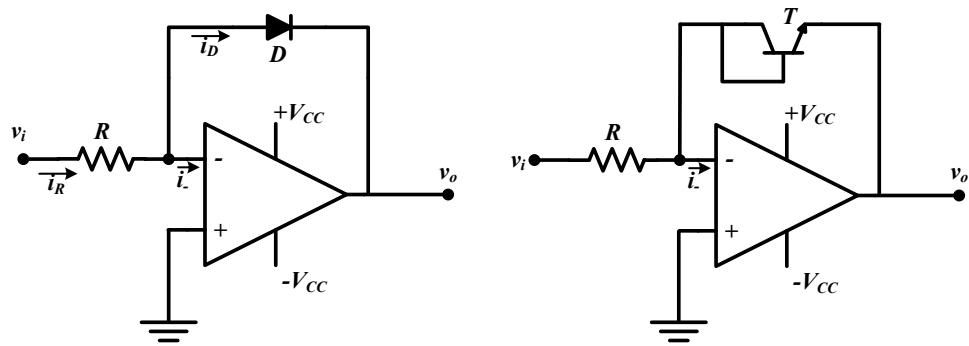
Mà cửa P nối đất, vậy có $v_N = v_P = 0$, thay vào phương trình trên ta được:

$$v_o = -I_S R e^{\frac{v_i}{nV_T}} \quad (6.12)$$

6.2.6.2 Mạch hàm logarit

Tương tự như mạch hàm mũ, mạch hàm logarit cũng sử dụng các phần tử phi tuyến như diode và transistor. Sơ đồ mạch như hình 6.21.

6.3. THIẾT KẾ MẠCH SỬ DỤNG OP-AMP



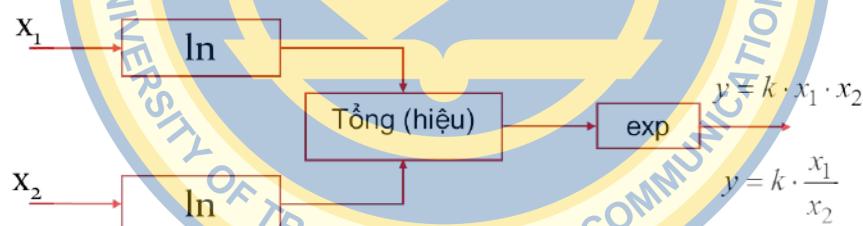
Hình 6.21: Mạch hàm logarit.

Phân tích tương tự, ta có điện áp ra của mạch hàm logarit sử dụng diode như sau:

$$v_o = -nV_T \ln(v_i / I_S R) \quad (6.13)$$

6.2.7 Mạch nhân/chia tương tự

Mạch nhân/chia tương tự được thực hiện bằng mạch khuếch đại loga và đổi loga. Sơ đồ khối mạch nhân/chia tương tự như hình 6.22.



Hình 6.22: Sơ đồ khối mạch nhân / chia tương tự.

6.3 THIẾT KẾ MẠCH SỬ DỤNG OP-AMP

Thiết kế mạch sử dụng Op-Amp thực hiện hàm tổng quát sau:

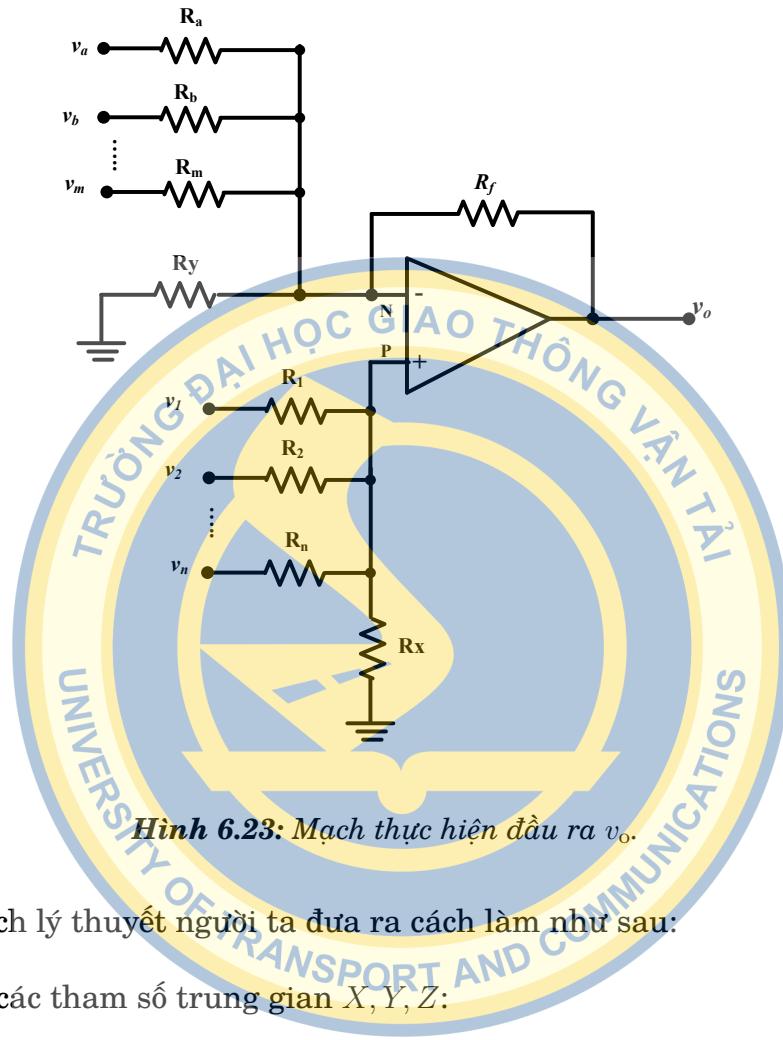
$$v_o = x_1 v_1 + x_2 v_2 + \cdots + x_n v_n - y_1 v_a - y_2 v_b - \cdots - y_m v_m$$

trong đó:

x_1, x_2, \dots, x_n là các hệ số khuếch đại đầu vào không đảo;

y_1, y_2, \dots, y_m là các hệ số khuếch đại đầu vào đảo.

Dạng mạch hình 6.23 thực hiện đầu ra theo yêu cầu trên.



Từ phân tích lý thuyết người ta đưa ra cách làm như sau:

- ▷ Tính các tham số trung gian X, Y, Z :

$$X = \sum_{i=1}^n x_i$$

$$Y = \sum_{j=1}^m y_j$$

$$Z = X - Y - 1$$

6.3. THIẾT KẾ MẠCH SỬ DỤNG OP-AMP

- ▷ Tùy thuộc vào giá trị của tham số Z , có ba trường hợp và cách tính các điện trở của mạch như bảng 6.2

Bảng 6.2: Bảng tính toán giá trị các điện trở cho mạch hình 6.23

Trường hợp	Z	R_y	R_x	R_1, R_2, \dots, R_n	R_a, R_b, \dots, R_m
1	> 0	R_f/Z	∞	R_f/x_i	R_f/y_j
2	< 0	∞	$-R_f/Z$		
3	$= 0$	∞	∞		

Chú ý nên chọn giá trị các điện trở cỡ $k\Omega$, trong đó điện trở R_f khoảng từ $100 k\Omega$ đến $200 k\Omega$.

Thiết kế một mạch Op-Amp có **phương trình** của điện áp đầu ra chứa cả biểu thức tính tổng, hiệu, vi phân và tích phân. Ta thực hiện như sau:

- ▷ Bước 1: Thiết kế mạch dùng bộ Op-Amp 1 thực hiện phép tính tổng, hiệu.
- ▷ Bước 2: Thiết kế mạch dùng bộ Op-Amp 2 thực hiện phép tính vi phân.
- ▷ Bước 3: Thiết kế mạch dùng bộ Op-Amp 3 thực hiện phép tính tích phân.
- ▷ Bước 4: Dùng một bộ tổng với các hệ số bằng 1 để cộng các kết quả trên

Ví dụ 6.1. Thiết kế một mạch Op-Amp có **phương trình** của điện áp đầu ra như sau:

$$v_o = -10v_a - 4v_b + 5v_1 + 2v_2$$

Bài giải:

Tính các tham số trung gian:

$$X = 5 + 2 = 7$$

$$Y = 10 + 4 = 14$$

$$Z = X - Y - 1 = -8 < 0$$

Dựa vào bảng 6.2, với $Z < 0$ ứng với trường hợp 2, vậy có:

$$R_1 = R_f/5; R_2 = R_f/2;$$

$$R_a = R_f/10; R_b = R_f/4;$$

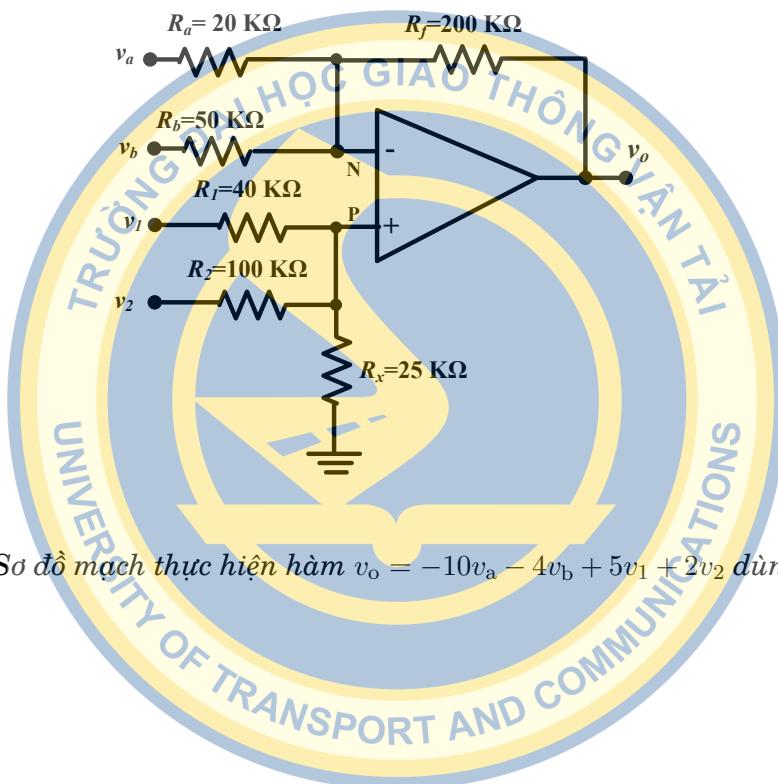
Trong các giá trị điện trở trên, ta thấy R_a có giá trị nhỏ nhất, chọn $R_a = 20 \text{ k}\Omega$, vậy có:

$$R_f = 200 \text{ k}\Omega$$

Từ giá trị R_f , tính được:

$$R_1 = R_f/5 = 40 \text{ k}\Omega; R_2 = R_f/2 = 100 \text{ k}\Omega; R_b = R_f/4 = 50 \text{ k}\Omega; R_x = -R_f/Z = 25 \text{ k}\Omega.$$

Vậy mạch thực hiện hàm $v_o = -10v_a - 4v_b + 5v_1 + 2v_2$ như trên hình 6.24.



Hình 6.24: Sơ đồ mạch thực hiện hàm $v_o = -10v_a - 4v_b + 5v_1 + 2v_2$ dùng Op-Amp.

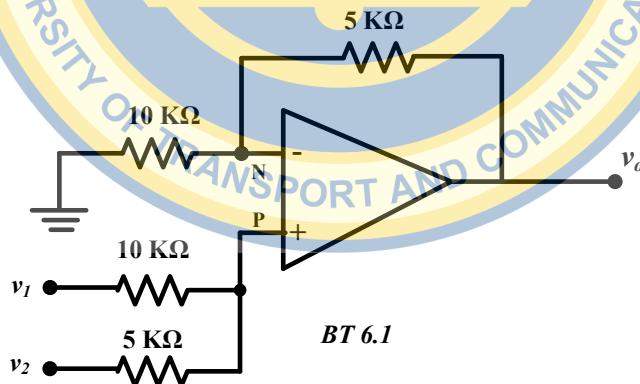
Ôn tập chương 6

CÂU HỎI LÝ THUYẾT

- 6.1. Nêu các tính chất cơ bản của bộ khuếch đại thuật toán lý tưởng.
- 6.2. Nêu các tham số cơ bản của bộ khuếch đại thuật toán thực tế ?
- 6.3. Ý nghĩa của tham số tích băng thông hệ số khuếch đại trong Op-Amp ? Làm thế nào mở rộng băng thông của mạch sử dụng Op-Amp ?
- 6.4. Dòng lệch "0" có và điện áp lệch "0" có ảnh hưởng đến mạch vi phân thế nào ? Nêu biện pháp khắc phục ?
- 6.5. Vẽ dạng sóng đầu ra của mạch tích phân và vi phân khi tín hiệu vào có dạng xung vuông.

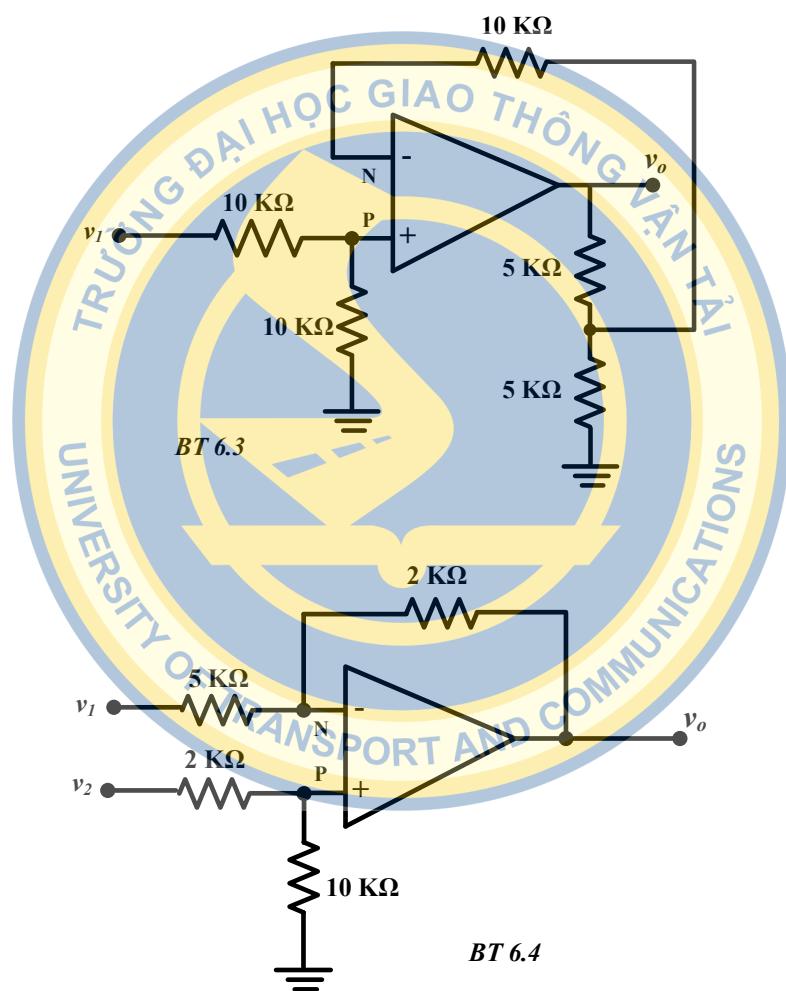
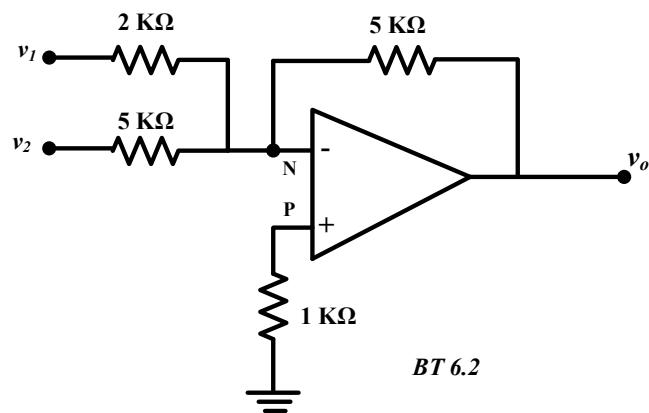
BÀI TẬP

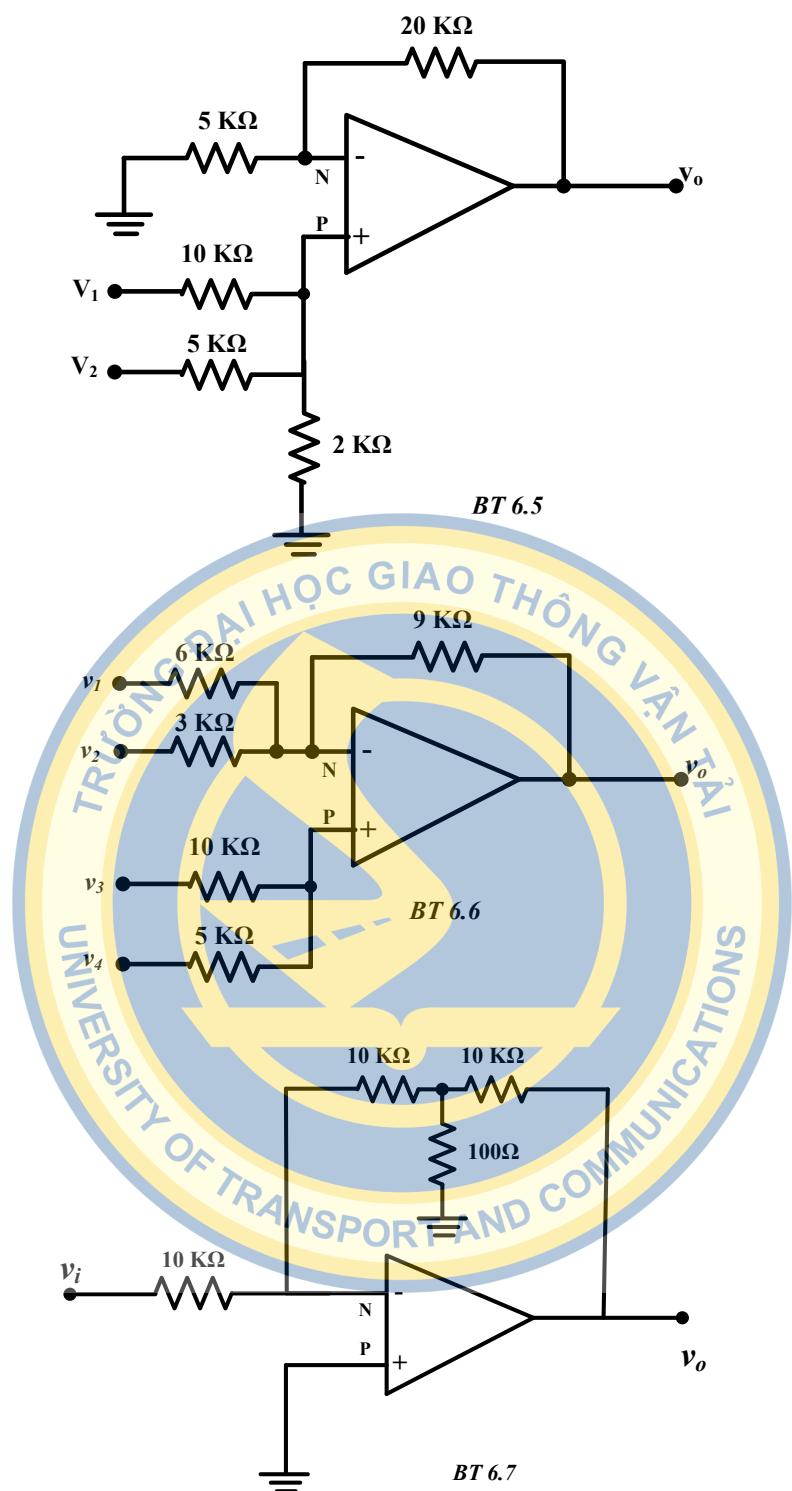
- 6.1. Xác định điện áp ra trên cơ sở điện áp vào cho mạch từ hình BT6.1 đến BT6.7. Với khuếch đại thuật toán là lý tưởng.

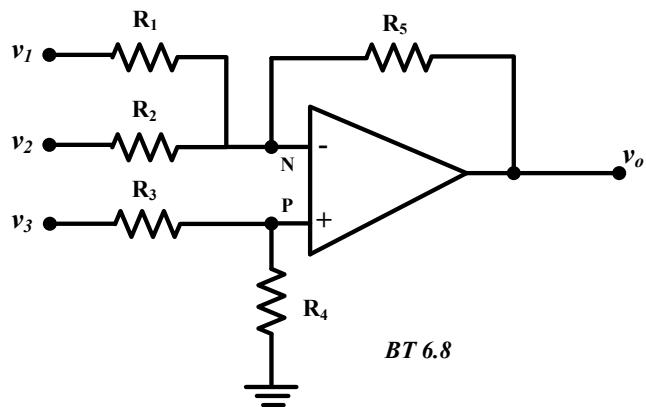


- 6.2. Cho sơ đồ mạch hình BT6.8. Với mạch khuếch đại thuật toán là lý tưởng.

▷ Xác định điện áp ra v_o

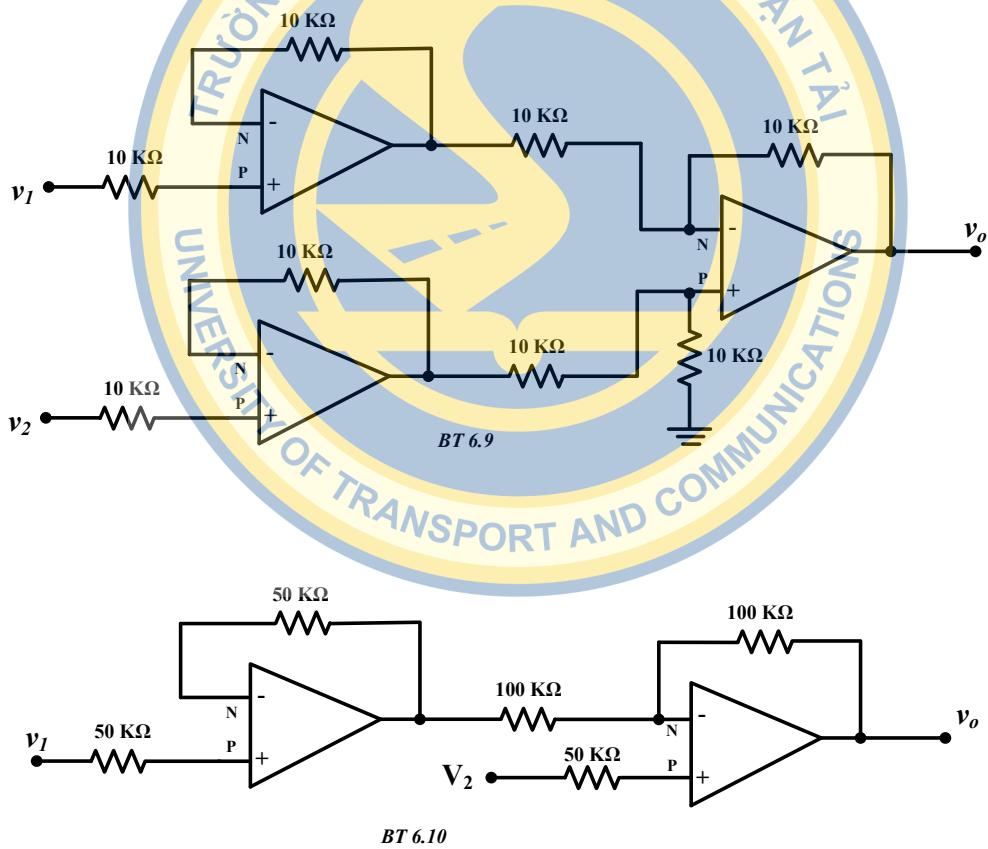






▷ Tìm quan hệ giữa R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 sao cho: $v_o = -2v_1 - 8v_2 + v_3$

6.3. Xác định điện áp ra trên cơ sở điện áp vào cho các mạch hình BT6.9, BT6.10 với khuếch đại thuật toán là lý tưởng.



6.4. Thiết kế mạch khuếch đại thuật toán thực hiện các hàm sau, với V_1, V_2, V_3, V_4 là điện áp đầu vào; V_o là điện áp đầu ra.

a)

$$V_o = 2V_1 + 8V_2 - 2V_3 - 4V_4$$

b)

$$V_o = 3V_1 + 6V_2 - 8V_3 - 12V_4$$

c)

$$V_o = 2V_1 + 3 \int V_2 dt - 4 \frac{dv_3}{dt}$$

d)

$$V_o = 3V_1 + 5 \frac{dV_2}{dt} - 6 \int V_3 dt$$



Chương 7

MẠCH TẠO DAO ĐỘNG

Nội dung chính của chương này là cung cấp kiến thức về:

- ▷ Giới thiệu chung về mạch tạo dao động.
- ▷ Mạch tạo dao động điều hòa.
- ▷ Mạch tạo dao động tích thoát.
- ▷ Mạch tạo dao động định thời 555.

7.1 GIỚI THIỆU CHUNG

- ▷ Mạch tạo dao động là một mạch điện tử tạo ra một tín hiệu điện tử tuần hoàn, định kỳ, thường là dạng sóng sin hoặc sóng vuông. Mạch tạo dao động thực hiện chức năng biến đổi năng lượng một chiều¹ thành năng lượng xoay chiều².
- ▷ Phân loại:
 - **Mạch tạo dao động điều hòa** (*harmonic oscillators*): tạo ra các sóng hình sin, bao gồm:
 - * Mạch tạo dao động RC
 - Dịch pha
 - Cầu Wien
 - * Mạch tạo dao động LC
 - Ba điểm điện dung

¹của nguồn cung cấp dc

²của dây dao động đầu ra

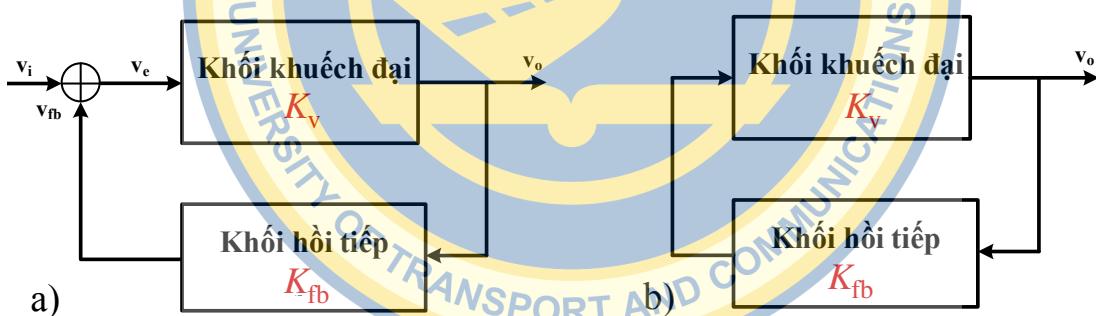
7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

- Ba điểm điện cảm
 - Thạch anh
- **Mạch tạo dao động tích thoát** (*relaxation oscillators*) tạo ra các sóng dạng xung (xung răng cưa, xung tam giác, xung vuông...), bao gồm:
- * Mạch tạo dao động đa hài
 - Hai trạng thái ổn định
 - Một trạng thái ổn định
 - Tự kích
 - * Mạch tạo dao động sử dụng IC định thời
 - * Dao động vòng

7.2 MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

7.2.1 Cấu tạo và nguyên lý

Mạch tạo dao động điều hòa gồm **một khối khuếch đại** và **một khối chọn tần** được kết nối trong vòng hồi tiếp như hình 7.1.



Hình 7.1: Sơ tổng quát của a) Mạch có hồi tiếp và b) Mạch tạo dao động.

trong đó:

v_e : Tín hiệu đầu vào của mạch khuếch đại không có hồi tiếp.

v_i : tín hiệu đầu vào của mạch khuếch đại có hồi tiếp.

v_{fb} : Tín hiệu hồi tiếp.

v_o : Tín hiệu đầu ra.

K_v : Hệ số khuếch đại của mạch khi không có hồi tiếp.

K_{fb} : Hệ số truyền đạt của mạch hồi tiếp.

Gọi K là hệ số khuếch đại của toàn mạch, từ hình 7.1(a):

$$K = \frac{v_o}{v_i} = \frac{K_v}{1 - K_{fb}K_v} \quad (7.1)$$

Hay:

$$K = \frac{v_o}{v_i} = \frac{|K_v| e^{j\phi_k}}{1 - |K_v| e^{j\phi_k} |K_{fb}| e^{j\phi_{Kfb}}}$$

Mạch khuếch đại hồi tiếp được gọi là **mạch tạo dao động** nếu thỏa mãn điều kiện: điện áp đầu ra $v_o \neq 0$ ngay cả khi $v_i = 0$, tức là $K \rightarrow \infty$. Điều này tương đương với biểu thức được biểu diễn ở phương trình 7.2.1:

$$\begin{aligned} |K_v| e^{j\phi_{Kv}} |K_{fb}| e^{j\phi_{Kfb}} &= 1 \\ |K_v| |K_{fb}| e^{j(\phi_{Kv} + \phi_{Kfb})} &= 1 \end{aligned}$$

Phương trình trên được thể hiện bởi hai điều kiện:

▷ Điều kiện về biên độ:

$$|K_v| |K_{fb}| = 1$$

▷ Điều kiện về pha:

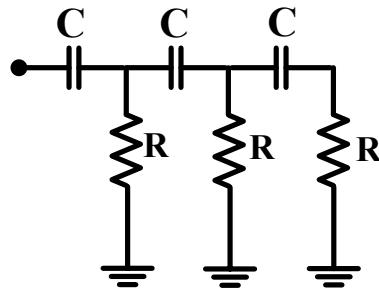
$$\phi_{Kv} + \phi_{Kfb} = 2n\pi; n = 0, 1, 2,$$

7.2.2 Mạch tạo dao động RC

7.2.2.1 Mạch tạo dao động dịch pha RC sử dụng khuếch đại thuần toán

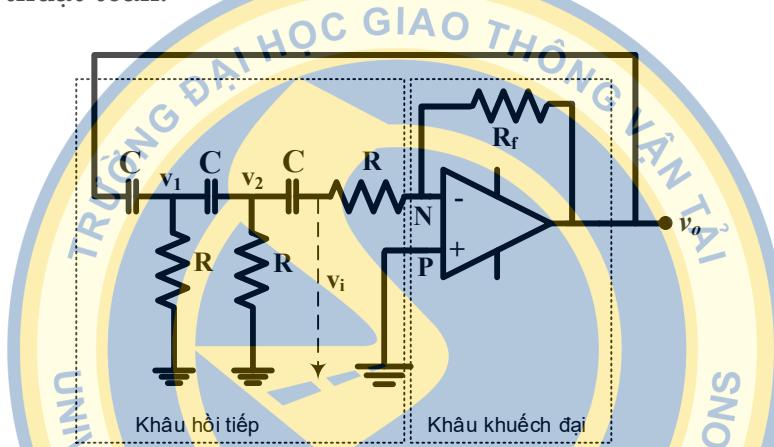
Mỗi khâu RC có thể có độ dịch pha lớn nhất là 90° , về lý thuyết chỉ cần 2 khâu để đạt độ dịch pha mong muốn là 180° . Tuy nhiên, thực tế rất khó đạt được điều kiện biên như vậy, cho nên thường sử dụng 3 khâu RC, mỗi khâu dịch pha 60° như minh họa trong hình 7.2.

7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA



Hình 7.2: Ba khâu hồi tiếp RC trong mạch tạo dao động.

Hình 7.3 là sơ đồ mạch tạo dao động RC với khuếch đại thuần toán, trong đó điện trở ở khâu RC cuối đóng luôn vai trò là điện trở vào chân đảo của khuếch đại thuần toán.



Hình 7.3: Mạch tạo dao động dịch pha sử dụng Op-Amp.

- ▷ Xét khối khuếch đại: Đây là mạch khuếch đại đảo với điện áp vào v_i , hệ số khuếch đại:

$$K_v = -\frac{R_f}{R}$$

- ▷ Xét khối hồi tiếp: Vì $v_N = v_P$, nên có thể coi đầu vào đảo N chính là điểm đất ‘ảo’:

$$\frac{v_i}{v_2} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{R/\left(\frac{1}{j\omega C} + R\right)}{R/\left(\frac{1}{j\omega C} + R\right) + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC(1 + j\omega RC)}{1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2}$$

$$\frac{v_1}{v_o} = \frac{Z_1}{\frac{1}{j\omega C} + Z_1}$$

trong đó:

$$Z_1 = R // (Z_2 + \frac{1}{j\omega C})$$

$$Z_2 = \frac{R(1 + j\omega RC)}{1 + 2j\omega RC}$$

Vậy:

$$Z_1 = \frac{R[1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2]}{1 + 4j\omega RC - 3(\omega RC)^2}$$

Suy ra:

$$\frac{v_1}{v_o} = \frac{Z_1}{Z_1 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC[1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2]}{1 + 5j\omega RC - 6(\omega RC)^2 - j(\omega RC)^2}$$

Vậy hệ số hồi tiếp được xác định như sau:

$$\begin{aligned} K_{fb} &= \frac{v_i}{v_o} = \frac{v_i}{v_2} \times \frac{v_2}{v_1} \times \frac{v_1}{v_o} \\ &= \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \times \frac{j\omega RC(1 + j\omega RC)}{1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2} \times \frac{j\omega RC[1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2]}{1 + 5j\omega RC - 6(\omega RC)^2 - j(\omega RC)^2} \\ &= \frac{-j(\omega RC)^3}{1 + 5j\omega RC - 6(\omega RC)^2 - j(\omega RC)^3} \end{aligned}$$

Vậy hệ số khuếch đại toàn mạch được tính theo biểu thức:

$$\begin{aligned} K &= K_v K_{fb} = -\frac{R_f}{R} \times \frac{-j(\omega RC)^3}{1 + 5j\omega RC - 6(\omega RC)^2 - j(\omega RC)^3} \\ &= \frac{R_f}{R} \times \frac{j(\omega RC)^3}{1 - 6(\omega RC)^2 + j(5\omega RC + (\omega RC)^3)} \end{aligned}$$

Để tạo dao động, phương trình trên phải thỏa mãn điều kiện pha:

$\phi_{Kv} + \phi_{Kfb} = 2n\pi$, hay $K_v \times K_{fb}$ phải là giá trị thực, tức là:

$$6(\omega_0 RC)^2 = 1 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6RC}}$$

7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

Vậy tần số dao động của mạch:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \quad (7.2)$$

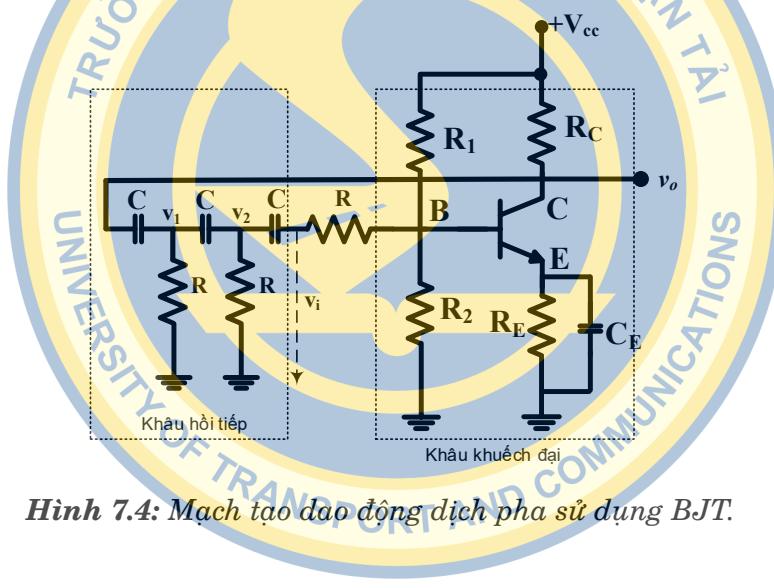
Điều kiện về biên độ:

$$|K_v| |K_{fb}| = \frac{R_f}{R} \times \frac{(\omega_0 RC)^2}{5 - (\omega_0 RC)^2} = \frac{R_f}{R} \times \frac{\frac{1}{6}}{5 - \frac{1}{6}} = \frac{R_f}{R} \times \frac{1}{29} = 1$$

Vậy để mạch duy trì dao động cần có điều kiện:

$$R_f \geq 29R \quad (7.3)$$

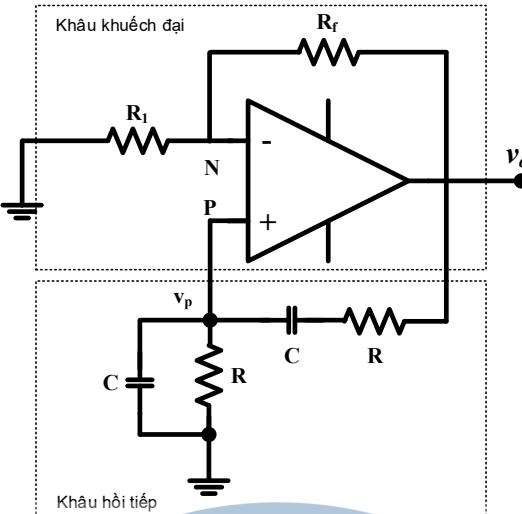
Mạch khuếch đại thuần toán trên có thể thay bằng BJT kiểu CE và FET măc kiểu CS, để đảm bảo điều kiện về di pha 180° (tín hiệu tại cực C hay D đảo pha so với tín hiệu tại cực B hay G), ví dụ như hình 7.4 là BJT kiểu CE.



Hình 7.4: Mạch tạo dao động dịch pha sử dụng BJT.

7.2.2.2 Mạch tạo dao động cầu Wien

Khâu hồi tiếp sử dụng cầu Wien: gồm một mạch song song (R song song C) và một mạch nối tiếp (R nối tiếp C) măc nối tiếp nhau. Do khâu này không di pha, do đó mạch khuếch đại phải thỏa mãn điều kiện là không di pha, ví dụ mạch khuếch đại BJT măc kiểu CC, mạch khuếch đại FET măc kiểu CD hay mạch khuếch không đảo sử dụng thuật toán như hình 7.5 dưới đây.



Hình 7.5: Mạch tạo dao động cầu Wien.

- Xét khối khuếch đại: đây là mạch khuếch không đảo, nên hệ số khuếch đại là:

$$K_v = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$$

- Xét khối hồi tiếp: Hàm truyền đạt của khâu hồi tiếp:

$$K_{fb} = \frac{v_p}{v_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{(R // \frac{1}{j\omega C}) + (R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{j\omega RC}{1 + 3\omega RC - (\omega RC)^2}$$

Ta có:

$$K_v \times K_{fb} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2}$$

Để thỏa mãn điều kiện pha, thì:

$$(\omega_0 RC)^2 = 1 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

hay tần số dao động của mạch là:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

(7.4)

7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

Xét điều kiện biên độ: $|K_v| \times |K_{fb}| = 1$. Khi đó:

$$(1 + \frac{R_f}{R_1}) \times \frac{1}{3} = 1$$

Vậy để duy trì dao động cần phải thỏa mãn điều kiện:

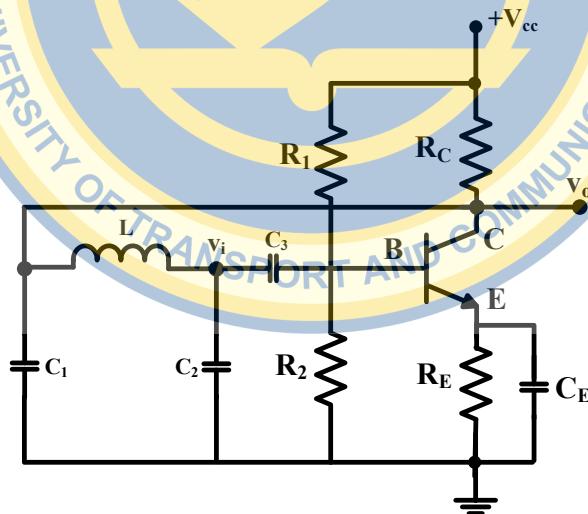
$$R_f \geq 2R_1 \quad (7.5)$$

7.2.3 Mạch tạo dao động LC

Các mạch tạo dao động dịch pha chỉ được sử dụng để tạo dao động tần số thấp trong phạm vi âm tần, để tạo dao động tần số cao hơn thường dùng các mạch cộng hưởng LC, còn được gọi là mạch tạo dao động 3 điểm.

7.2.3.1 Mạch tạo dao động ba điểm điện dung

Mạch tạo dao động ba điểm điện dung còn gọi là mạch tạo dao động Colpitts có sơ đồ như hình 7.6, trong đó khối hồi tiếp gồm L , C_1 , và C_2 , có tổng di pha là 180° .



Hình 7.6: Mạch tạo dao động ba điểm điện dung.

Chương 7: Mạch tạo dao động

- Xét khối khuếch đại: đây là mạch BJT kiểu CE, đồng thời tụ C_1 , cuộn cảm L và tụ C_2 đóng vai trò là tải của tầng khuếch đại, khi đó hệ số khuếch đại:

$$K_v = -\frac{R_C/Z_{eq}}{r_e}$$

Trong đó trở kháng tương đương Z_{eq} được tính bằng biểu thức:

$$Z_{eq} = Z_{C1} // (Z_L + Z_{C2}) = \frac{Z_{C1}(Z_L + Z_{C2})}{Z_{C1} + Z_L + Z_{C2}}$$

$$K_v = -\frac{R_C}{r_e} \times \frac{Z_{C1}(Z_L + Z_{C2})}{Z_{C1}(Z_L + Z_{C2}) + R_C(Z_{C1} + Z_L + Z_{C2})}$$

với β là hệ số khuếch đại dòng của BJT.

- Xét khối hồi tiếp: Hàm truyền đạt của khối hồi tiếp:

$$K_{fb} = \frac{v_i}{v_o} = \frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_L}$$

Vậy:

$$K_v \times K_{fb} = -\frac{R_C}{r_e} \times \frac{Z_{C1}Z_{C2}}{Z_{C1}(Z_L + Z_{C2}) + R_C(Z_{C1} + Z_L + Z_{C2})}$$

- Điều kiện về pha: để $\phi_{Kv} + \phi_{Kfb} = 2n\pi$ thì phần ảo của mău số trên phải bằng 0. Tức là:

$$Z_{C1} + Z_L + Z_{C2} = 0$$

Hay:

$$\frac{1}{j\omega_0 C_1} + j\omega_0 L + \frac{1}{j\omega_0 C_2} = 0 \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

trong đó:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Vậy, tần số dao động của mạch:

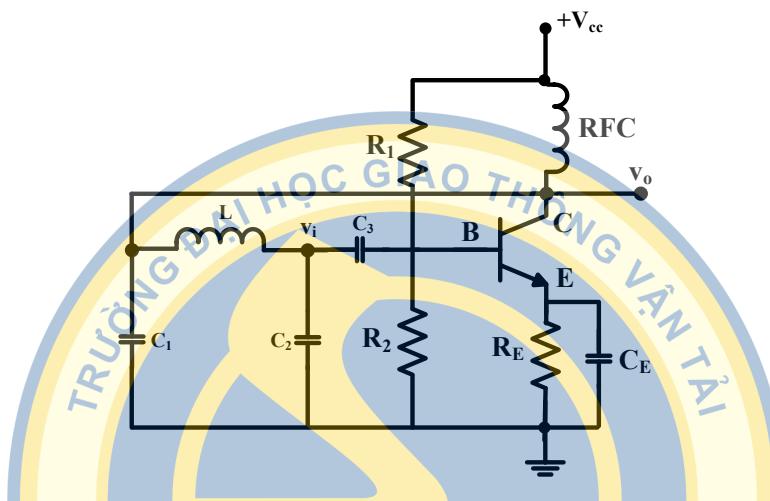
$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi LC}} \quad (7.6)$$

7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

▷ Điều kiện về biên độ:

$$|K_v| \times |K_{fb}| = \frac{R_C}{r_e} \times \frac{Z_{C2}}{Z_{C1}} = 1$$

Lưu ý: Trong mạch tạo dao động cao tần, điện trở RC trên hình 7.7 được thay bởi cuộn dây RFC (*Radio-Frequency Choke*), được gọi là cuộn chấn cao tần. Trong chế độ một chiều, cuộn RFC có điện trở rất thấp $X_L = \omega L$ nhưng tại tần số cao, trở kháng của cuộn dây rất lớn, nên có tác dụng cách ly nguồn một chiều với tín hiệu dao động cao tần.



Hình 7.7: Mạch tạo dao động ba điểm điện dung với cuộn chấn.

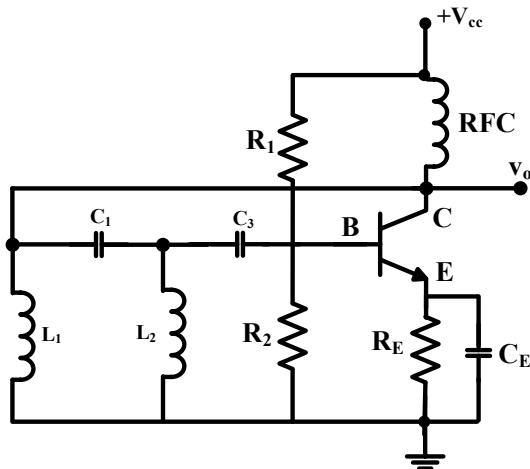
7.2.3.2 Mạch tạo dao động ba điểm điện cảm

Mạch tạo dao động ba điểm điện cảm, hay còn gọi là mạch tạo dao động Hartley với sơ đồ như hình 7.8, trong đó khối hồi tiếp gồm C , L_1 , và L_2 , có tổng di pha là 180° .

Sử dụng phương pháp tính toán tương tự như hình mạch tạo dao động ba điểm điện dung, ta sẽ tính được các giá trị cần thiết từ điều kiện cân bằng về pha và biên độ.

$$Z_{L1} + Z_C + Z_{L2} = 0$$

$$\Rightarrow j\omega_0 L_1 + \frac{1}{j\omega_0 C} + j\omega_0 L_2 = 0$$



Hình 7.8: Mạch tạo dao động ba điểm điện cảm.

$$\Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

trong đó:

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

M là hệ số hổ cảm giữa hai cuộn dây.

Vậy tần số của tín hiệu điều hoà do mạch tạo ra được tính theo biểu thức:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7.7)$$

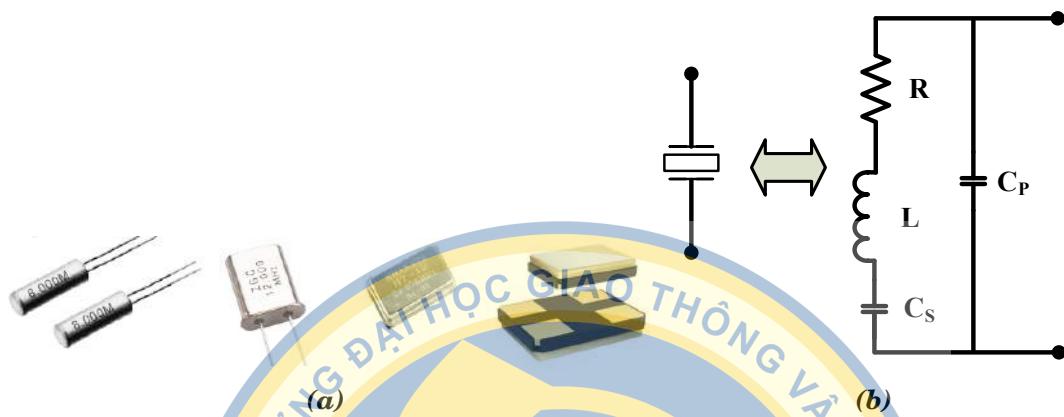
7.2.3.3 Mạch tạo dao động thạch anh

Với các mạch tạo dao động kể trên, nhiệt độ, tải, nguồn cung cấp một chiều, ảnh hưởng tới linh kiện bán dẫn, qua đó sẽ ảnh hưởng tới độ ổn định của tần số dao động. Để đạt được tần số dao động có tính ổn định cao, thông thường sử dụng mạch tạo dao động thạch anh. Mạch này hoạt động dựa trên tính chất áp điện, có nghĩa là chúng chuyển các dao động cơ học thành điện áp và ngược lại, chuyển điện áp biến thiên thành các dao động cơ. Vì vậy, dao động thạch anh rất ổn định đối với nhiệt độ và thời gian, tần số dao động hầu như chỉ phụ thuộc vào bản thân tinh thể thạch anh mà không phụ thuộc vào giá

7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

trị của các linh kiện mạch ngoài.

Tần số làm việc của thạch anh khoảng từ vài trăm kHz đến vài trăm MHz với tính ổn định và hệ số phảm chất cao. Thạch anh được sử dụng chế tạo các thiết bị tạo tín hiệu dao động đòi hỏi độ chính xác rất cao như tín hiệu xung nhịp cho bộ vi xử lý, tần số mẫu để hiệu chỉnh thiết bị đo lường,...



Hình 7.9: Hình ảnh một số loại, ký hiệu (a) và sơ đồ tương đương của dao động thạch anh (b).

Hình 7.9 biểu diễn sơ đồ tương đương của thạch anh: hệ số tự cảm L rất lớn, cỡ vài vài trăm Henry, tụ điện C_s có giá trị điện dung rất nhỏ, cỡ khoảng vài fF (femto Fara, $1\text{fF} = 10^{-15}\text{ F}$), tụ C_p cỡ khoảng vài pF (pico Fara, $1\text{pF} = 10^{-12}\text{ F}$).

Trở kháng của thạch anh được xác định theo sơ đồ tương đương:

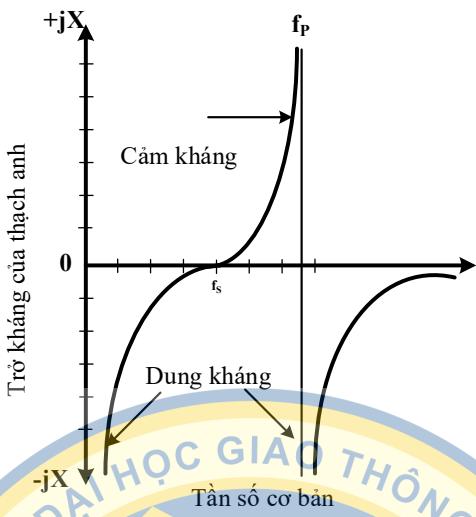
$$Z_x = Z_{C_p} // (R + Z_L + Z_{C_s})$$

Điện trở R có giá trị nhỏ nên có thể bỏ qua trong quá trình tính toán:

$$Z_x = Z_{C_p} // (Z_L + Z_{C_s})$$

$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{Z_{C_p}(Z_L + Z_{C_s})}{Z_{C_p} + (Z_L + Z_{C_s})} \\ &= \frac{1 - \omega^2 L C_s}{j\omega(C_p + C_s) - j\omega^3 L C_p C_s} \end{aligned}$$

Đồ thị trő kháng của thạch anh được biểu diễn trên hình 7.10 cho thấy thạch anh có hai tần số cộng hưởng nối tiếp f_s và tần số cộng hưởng song song f_p .



Hình 7.10: Đồ thị trő kháng của thạch anh.

▷ Tần số cộng hưởng nối tiếp:

$$Z_x = 0 \leftrightarrow \omega_s^2 LC_s = 1 \leftrightarrow \omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}$$

Vậy:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \quad (7.8)$$

▷ Tần số cộng hưởng song song:

$$\begin{aligned} Z_x &= \infty \\ \Rightarrow \omega_s^2 LC_p C_s &= C_p + C_s \\ \Rightarrow \omega_p &= \sqrt{\frac{C_p + C_s}{LC_p C_s}} = \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \right)} \end{aligned}$$

Vậy:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \right)} \quad (7.9)$$

7.2. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

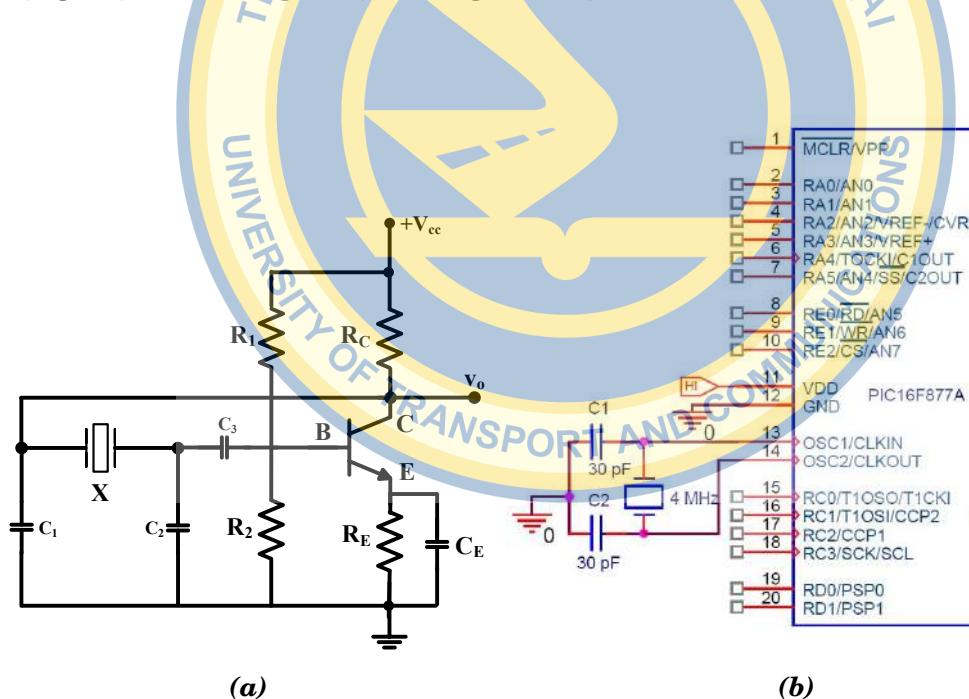
Do: $C_s \ll C_p$ nên $f_s \approx f_p$

Xét đồ thị trở kháng của thạch anh theo tần số làm việc:

▷ $f_s < f < f_p$: thạch anh mang tính cảm kháng.

▷ $f < f_s$ hoặc $f > f_p$: thạch anh mang tính dung kháng.

Ví dụ mạch tạo dao động ba điểm điện dung: trong dải tần giữa f_s và f_p , tinh thể thạch anh hoạt động như một cuộn cảm, áp dụng tính chất này thay thế L trong hình 7.7, ta có mạch tạo dao động ba điểm điện dung như hình 7.11. Thạch anh cùng với hai tụ điện C_1 và C_2 tạo nên mạch cộng hưởng LC, có nhiệm vụ như một mạch chọn tần. Do điện kháng của thạch anh thể hiện tính chất điện cảm chỉ trong dải tần hẹp từ f_s đến f_p , nên tần số dao động của thạch anh cũng bị giới hạn trong khoảng tần hẹp, tuy nhiên có độ ổn định rất cao, ít bị thay đổi theo giá trị dòng phân cực và nhiệt độ. Tần số dao động thạch anh có giá trị khoảng vài chục kHz đến vài chục MHz.

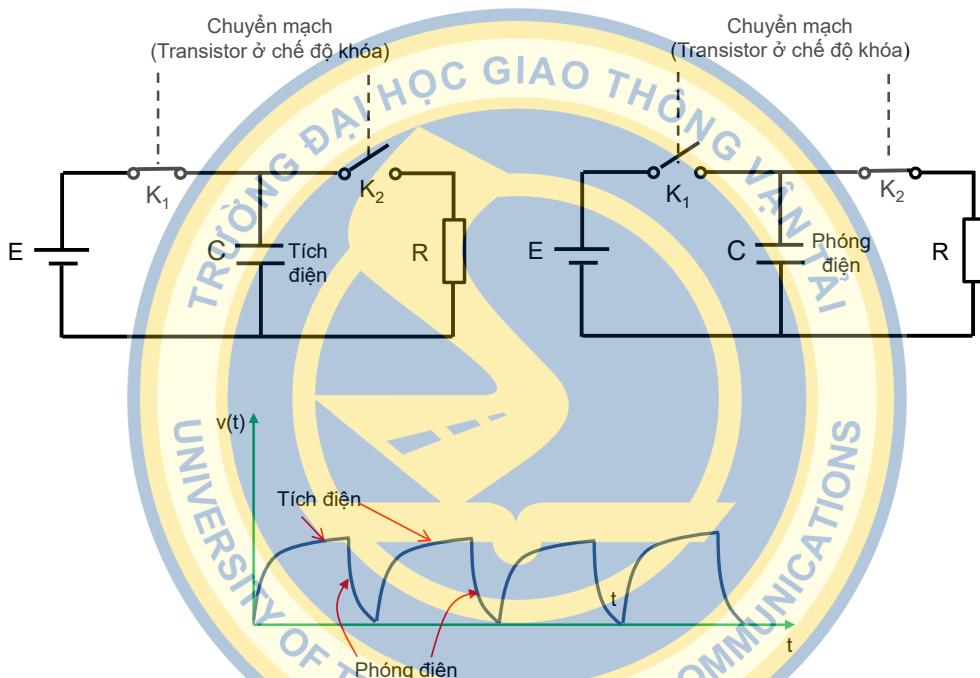


Hình 7.11: Sơ đồ mạch tạo dao động ba điểm điện dung sử dụng thạch anh (trái) và mạch tạo xung nhịp cho vi xử lý PIC 16F877A sử dụng thạch anh (phải).

7.3 MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT

7.3.1 Giới thiệu

Mạch tạo dao động tích thoát được sử dụng với mục đích tạo ra các tín hiệu xung. Hình 7.12 mô tả sơ đồ nguyên lý cơ bản của một mạch tạo dao động đa hài. Hai khóa điện tử K_1 và K_2 hoạt động một cách luân phiên: Khi khóa K_1 đóng, K_2 mở, tụ C được nạp điện; ngược lại khi khóa K_1 mở, K_2 đóng, tụ C phóng điện qua điện trở R đến một mức nào đó lại được nạp lại. Quá trình nạp và phóng năng lượng của tụ được lặp đi lặp lại tạo nên một tín hiệu xung tại đầu ra của mạch.



Hình 7.12: Mô tả nguyên tắc hoạt động của mạch tạo dao động tích thoát.

Mạch tạo dao động tích thoát còn được gọi là dao động đa hài. Có 3 dạng mạch tạo dao động đa hài:

- ▷ Mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định (*lưỡng ổn*);
- ▷ Mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định (*đơn ổn*);
- ▷ Mạch tạo dao động đa hài tự kích (*phi ổn*).

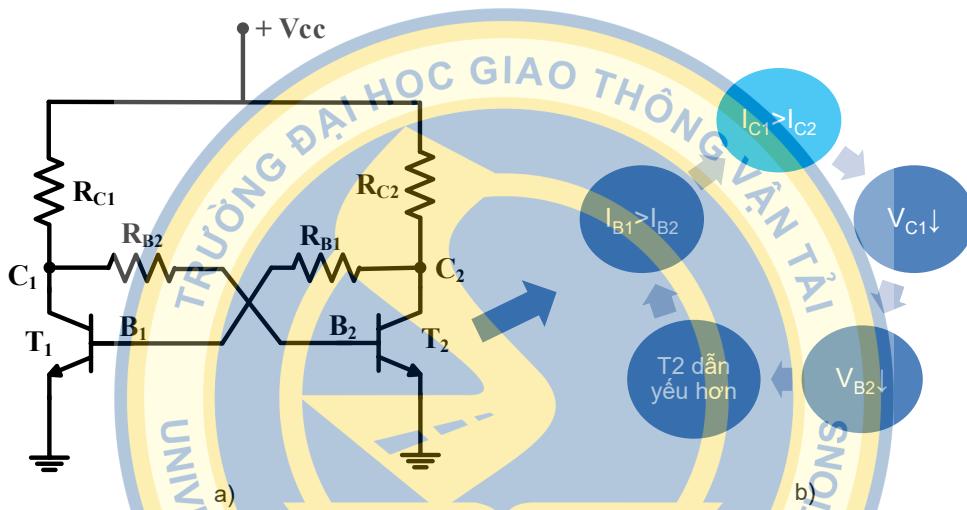
7.3. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT

7.3.2 Mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định

Mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định (*Bistable Multi-vibrator*) còn được gọi là mạch tạo dao động đa hài lưỡng ổn.

7.3.2.1 Nguyên tắc hoạt động

Hình 7.13(a) mô tả sơ đồ mạch tạo dao động đa hài lưỡng ổn, mạch có tính chất đối xứng: $R_{C1} = R_{C2}$, $R_{B1} = R_{B2}$, $T_1 = T_2$. Cặp điện trở R_{B1} và R_{B2} tạo nên vòng hồi tiếp dương.



Hình 7.13: a) Sơ đồ nguyên tắc cho mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định và b) Tác động của hồi tiếp dương.

Khi cấp nguồn V_{CC} cho mạch mặc dù các linh kiện hoàn toàn đối xứng nhưng không thể xảy ra trường hợp đồng thời cả T_1 và T_2 cùng thông và cùng ngắt. Điều đó được giải thích như sau: Khi bắt đầu cấp nguồn V_{CC} có thể cả hai transistor cùng thông nhưng do tính chất đối xứng không lý tưởng của các linh kiện chỉ cần một sự chênh lệch vô cùng nhỏ giữa dòng I_{B1} và I_{B2} sẽ dẫn đến sự khác biệt lớn giữa hai dòng I_{C1} và I_{C2} . Do sự tác động của vòng hồi tiếp dương nên độ chênh lệch này tăng lên một cách nhanh chóng.

Sự thiết lập trạng thái ban đầu này được giải thích như sau: Giả sử ban đầu, $I_{B1} > I_{B2}$ hay $I_{C1} > I_{C2}$, I_{C1} tăng làm cho điện áp rơi trên điện trở R_{C1} tăng, dẫn đến V_{C1} giảm, điện áp này qua R_{B2} phân cực cho T_2 , làm cho điện áp V_{B2}

Chương 7: Mạch tạo dao động

giảm, dòng I_{B2} giảm nên T_2 dẫn yếu hơn. Khi T_2 dẫn yếu hơn thì I_{C2} giảm làm cho V_{C2} tăng và qua điện trở R_{B1} phân cực cho T_1 , làm cho T_1 dẫn mạnh hơn. Quá trình đó vẫn tiếp tục xảy ra và dẫn đến trạng thái là T_1 thông bão hòa và T_2 ngắt. Nếu không có sự tác động tới đầu vào thì mạch sẽ ở mãi trạng thái này.

7.3.2.2 Phương pháp kích đổi trạng thái

Để thay đổi trạng thái của mạch, ta cần phải tác động một xung có biên độ và cực tính thích hợp đặt vào cực Base của T_1 hoặc T_2 theo một trong hai cách sau:

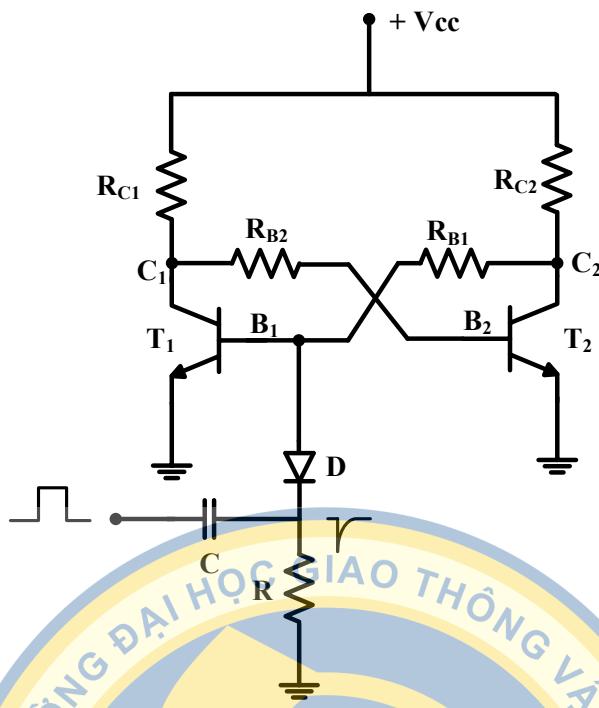
- ▷ Thay đổi trạng thái bão hòa của T_1 bằng cách tác động một xung âm vào cực B_1
- ▷ Thay đổi trạng thái ngắt của T_2 bằng cách tác động một xung dương vào cực B_2

Xung nhọn được tạo ra từ mạch RC với tín hiệu tại đầu vào là xung vuông, hệ số thời gian của mạch đủ nhỏ nhằm thu được điện áp ra trên điện trở R gồm hai xung nhọn: một xung dương và một xung âm. Tùy theo cách măc diode mà ta nhận được xung điều khiển có cực tính thích hợp để kích đổi trạng thái của mạch.

*** Phương pháp kích đổi một bên**

Trong phương pháp kích đổi một bên, xem minh họa trong hình 7.14, giả thiết mạch đang ở trạng thái: T_1 thông bão hòa và T_2 ngắt. Tín hiệu tại đầu ra của mạch RC là một cặp xung dương và xung âm. Diode D có nhiệm vụ loại bỏ xung dương và chỉ đưa xung âm đặt tới cực B_1 , điện áp tại cực B_1 đột ngột giảm xuống làm cho T_1 đang từ trạng thái thông bão hòa chuyển sang trạng thái ngắt, khi đó điện áp tại cực C_1 đang từ mức thấp nhảy lên mức cao và qua điện trở R_{B2} phân cực cho T_2 làm cho T_2 từ trạng thái ngắt chuyển sang trạng thái thông bão hòa. T_2 thông bão hòa, điện áp $V_{C2} \approx 0,2\text{ V}$ và qua điện trở R_{B1} làm cho T_1 tiếp tục ở trạng thái ngắt mặc dù không còn tồn tại xung âm nữa.

7.3. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT



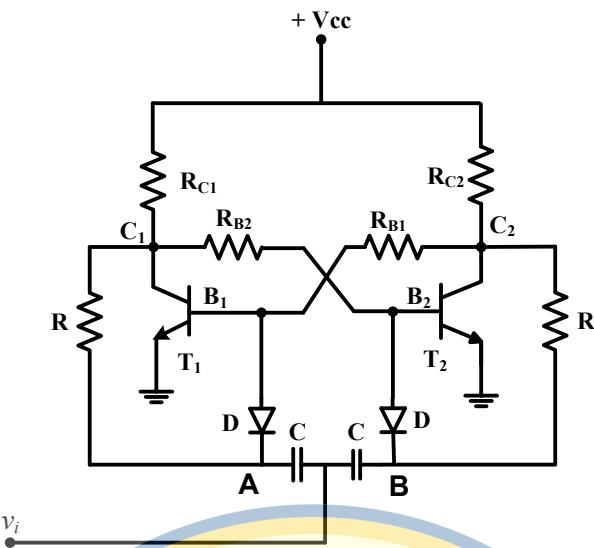
Hình 7.14: Sơ đồ kích đổi trạng thái một bên.

Như vậy, mạch đã chuyển từ trạng thái T_1 thông bão hòa và T_2 ngắt sang trạng thái T_1 ngắt và T_2 thông bão hòa. Tương tự như thế, để thay đổi trạng thái của mạch thì cần tác động xung âm tới cực B_2 của transistor T_2 .

* Phương pháp kích đổi hai bên

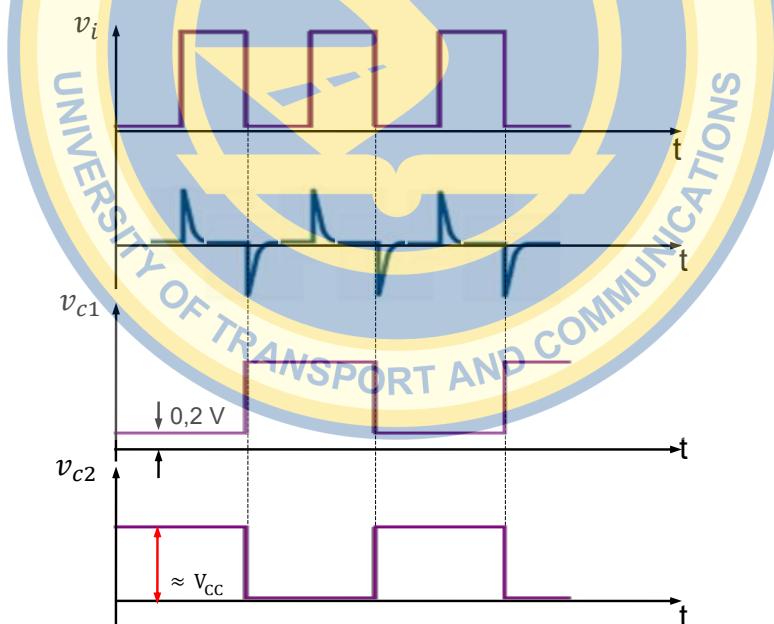
Hình 7.15 mô tả sơ đồ nguyên lý của phương pháp kích đổi trạng thái hai bên, điều khiển mạch bởi một tín hiệu duy nhất tại đầu vào.

Khi tác động xung vuông tới đầu vào thì tại hai điểm A và B sẽ xuất hiện các xung nhọn có cực tính giống nhau. Nếu đồng thời xuất hiện xung dương, khi đó D_1 và D_2 sẽ cách ly xung dương với mạch, khi đó mạch vẫn giữ nguyên trạng thái cũ. Nếu xuất hiện xung âm tại cả hai điểm A và B: T_1 đang ở trạng thái thông bão hòa, xung âm làm giảm đột điện áp tại điểm A và thông qua D_1 đặt tới cực B_1 làm cho T_1 chuyển sang trạng thái ngắt, đưa điện áp tại cực C_1 lên trạng thái cao và làm cho T_2 chuyển sang trạng thái thông bão hòa. Mặt khác, do khi T_2 ở trạng thái ngắt, mặc dù có sự xuất hiện của xung âm, diode D_2 bị phân cực ngược nên xung âm không có tác động tới transistor T_2 .



Hình 7.15: Sơ đồ kích đổi trạng thái hai bên.

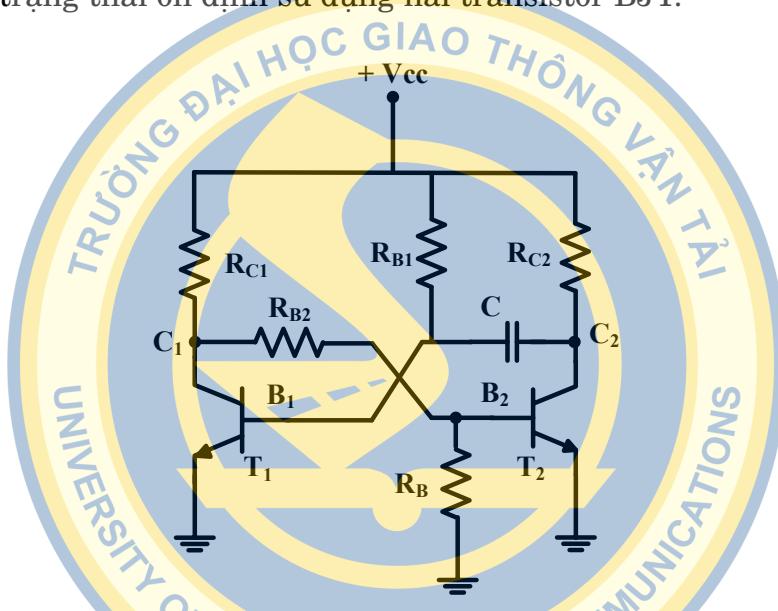
Hình 7.16 đưa ra giản đồ xung của các tín hiệu vào và ra của mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định.



Hình 7.16: Giản đồ xung tại đầu vào và các đầu ra.

7.3.3 Mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định

Mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định (*Monostable Multivibrator*) còn gọi là mạch tạo dao động đa hài đơn ổn. Mạch này cũng có hai trạng thái nhưng chỉ một trạng thái ổn định (trạng thái bền vững) còn một trạng thái không ổn định (trạng thái tạo xung). Mạch tạo dao động đa hài đơn ổn cũng giống mạch tạo dao động đa hài lưỡng ổn đó là khi bắt đầu được cấp nguồn thì mạch sẽ ở mãi một trạng thái ổn định nếu không có tác động tới đầu vào. Khi đầu vào nhận được một xung kích thì mạch sẽ đổi trạng thái và tạo xung ở đầu ra nhưng chỉ tồn tại ở trạng thái này một thời gian sau đó lại về trạng thái ổn định ban đầu. Chính vì vậy mà được gọi là mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định. Hình 7.17 biểu diễn một mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định sử dụng hai transistor BJT.



Hình 7.17: Mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định.

Mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định còn được gọi là mạch định thời vì độ rộng xung được tạo ra tại đầu ra của mạch có thể điều chỉnh được³ nhờ các thông số của mạch. Vì vậy, mạch được sử dụng phổ biến trong các lĩnh vực điều khiển tự động, trong các thiết bị điện tử và điện tử công nghiệp.

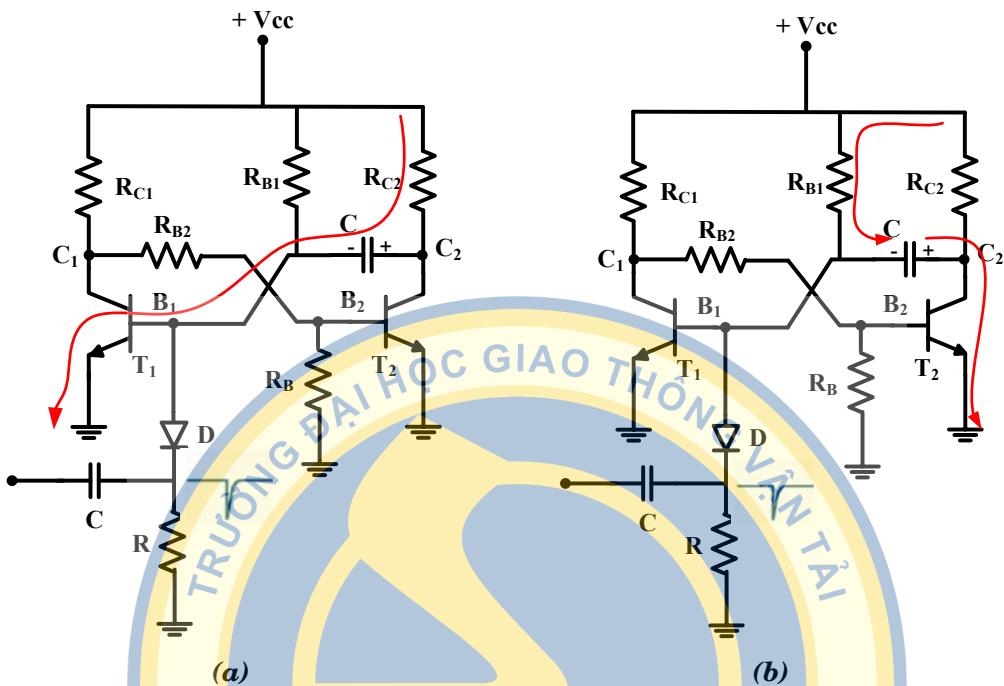
Nguyên tắc hoạt động

Khi cấp nguồn cho mạch, tụ điện C được nạp điện thông qua điện trở R_{C2}

³tức là điều chỉnh được khoảng thời gian

Chương 7: Mạch tạo dao động

tạo dòng điện đủ lớn để phân cực cho transistor T_1 làm cho T_1 đạt trạng thái thông bão hòa, điện áp $V_{C1} \approx 0,2\text{ V}$ (mức thấp) qua cầu phân áp R_{B2} và R_B phân cực cho transistor T_2 , làm cho T_2 ngắn. Điện áp nạp cho tụ có giá trị xấp xỉ điện áp nguồn V_{CC} , xem hình 7.18(a).



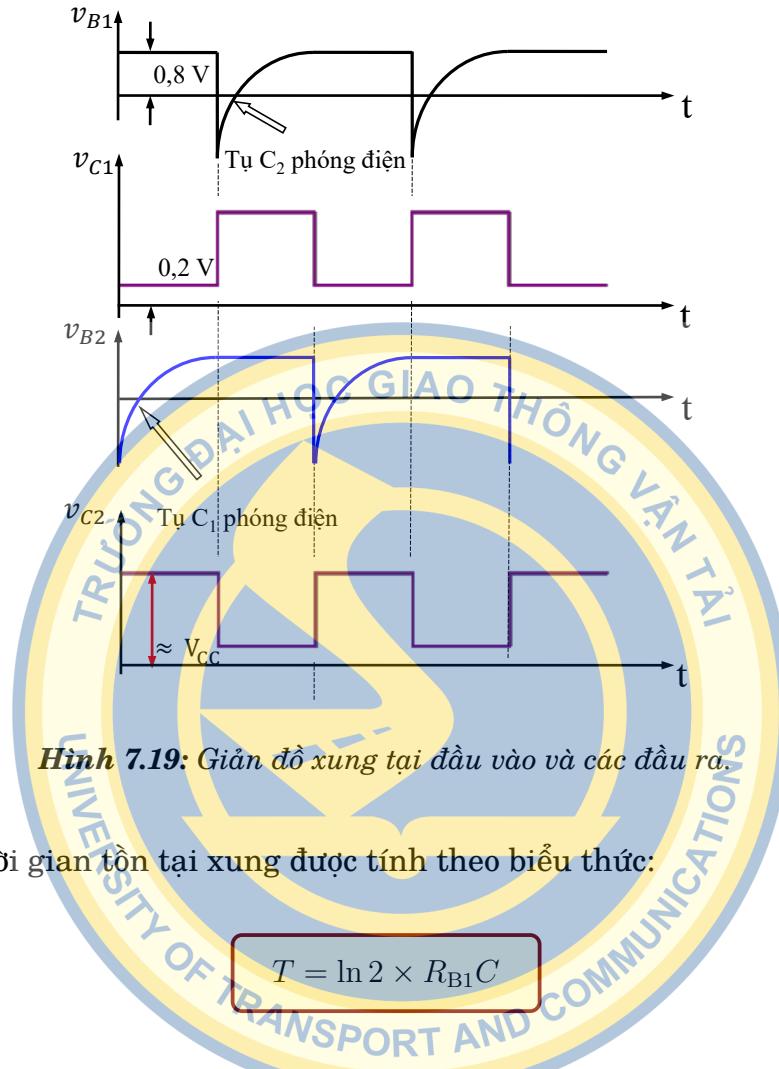
Hình 7.18: a) Tụ nạp điện (T_1 thông và T_2 ngắn) và b) Tụ phóng điện (T_1 ngắn và T_2 thông).

Khi xuất hiện xung âm tác động tới đầu vào, điện áp tại cực B_1 giảm một cách đột ngột làm cho transistor T_1 , đang ở trạng thái bão hòa chuyển sang trạng thái ngắn, đưa điện áp tại cực C_1 lên mức điện áp cao, qua cầu phân áp R_{B2} và R_B phân cực cho transistor T_2 chuyển từ trạng thái ngắn sang trạng thái thông bão hòa. Khi đó điện áp tại cực C_2 nối với bản cực dương của tụ C có điện áp xấp xỉ $0,2\text{ V}$, do đó bản cực âm của tụ nối với cực B_1 sẽ mang điện áp âm ($\approx -V_{CC}$) làm cho T_1 tiếp tục ở trạng thái ngắn mặc dù không còn tác động của xung âm nữa. Như vậy mạch đã chuyển trạng thái. Lúc này tụ C phóng điện qua điện trở R_{B1} . Khi tụ phóng điện thì điện áp V_{B1} dương dần lên và T_1 lại chuyển từ trạng thái ngắn sang trạng thái thông bão hòa đồng thời T_2 lại chuyển về trạng thái ngắn, hay mạch lại chuyển về trạng thái ổn định. Vậy khoảng thời gian tạo xung tại đầu ra chính là khoảng thời gian tụ C phóng điện. Quá trình phóng và nạp của tụ điện cứ thế xảy ra tạo nên

7.3. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT

tín hiệu xung vuông tại đầu ra.

Hình 7.19 đưa ra giản đồ xung của tín hiệu vào và tín hiệu ra của mạch tạo dao động đa hài một trạng thái ổn định.



Khoảng thời gian tồn tại xung được tính theo biểu thức:

$$T = \ln 2 \times R_{B1}C \quad (7.10)$$

7.3.4 Mạch tạo dao động đa hài tự kích

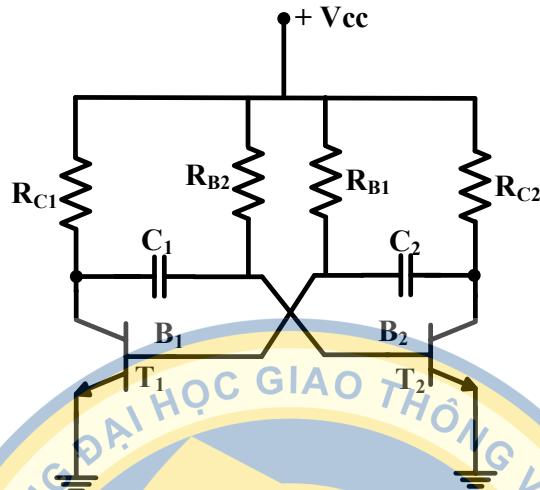
Mạch tạo dao động đa hài hai trạng thái ổn định và một trạng thái ổn định muốn thay đổi trạng thái đều phải có sự tác động của xung kích tới đầu vào. Với mạch tạo dao động đa hài tự kích (*Astable Multivibrators*) còn gọi là mạch tạo dao động đa hài phi ổn, khả năng chuyển trạng thái của mạch xảy ra mà không cần tác động tại đầu vào. Mạch tạo dao động đa hài phi ổn hoạt động theo đúng nguyên tắc của mạch tạo dao động vì tự tạo tín hiệu

Chương 7: Mạch tạo dao động

xung tại đầu ra mà không cần tín hiệu điều khiển tại đầu vào.

Hình 7.20 biểu diễn một mạch tạo dao động đa hài tự kích.

Nguyên tắc hoạt động



Hình 7.20: Mạch tạo dao động đa hài tự kích.

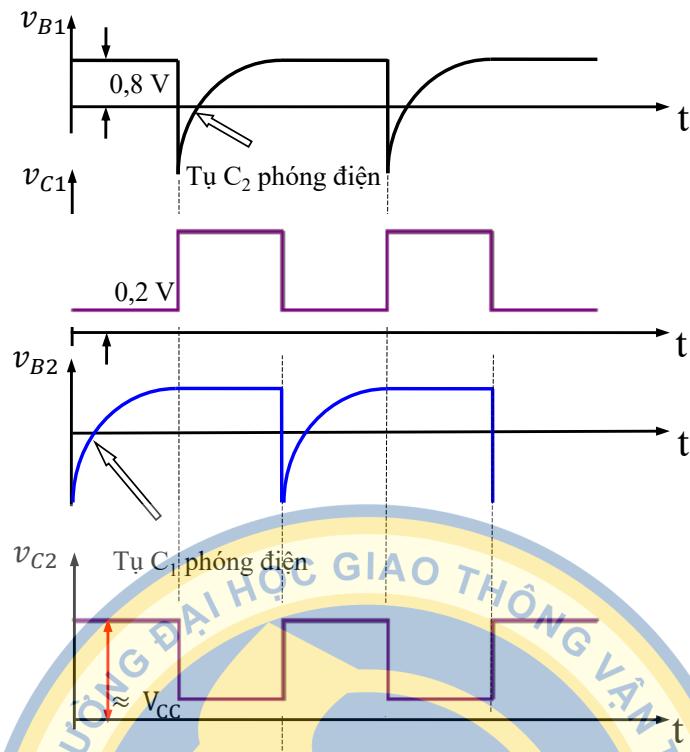
Cũng giống như mạch tạo dao động đa hài lưỡng ồn và đơn ồn thì mạch tạo dao động đa hài phi ồn cũng có hai trạng thái: T_1 thông bão hòa và T_2 ngắt hoặc T_1 ngắt và T_2 thông bão hòa.

Giả thiết, T_1 thông bão hòa và T_2 ngắt. Khi đó tụ C_1 đã được nạp đầy trước đó bắt đầu phóng điện qua tiếp giáp CE₁ qua điện trở R_{B2} (từ bản cực trái của tụ C_1 qua tiếp giáp CE₁ $\rightarrow GND \rightarrow +V_{CC} \rightarrow R_{B2} \rightarrow$ bản cực phải), đồng thời tụ C_2 được nạp điện: $+V_{CC} \rightarrow R_{B2} \rightarrow C_2$ tiếp giáp BE₁ $\rightarrow GND$. Khi tụ C_1 phóng điện thì điện áp tại cực B₂ dương dần lên và khi đạt được giá trị 0,6 V thì transistor T_2 bắt đầu thông, làm cho điện áp tại cực C₂ đột ngột giảm xuống, đưa điện áp tại bản cực trái của tụ C_2 hay điện áp tại cực B₁ về giá trị âm, do đó T_1 ngắt (ngưng dẫn). Như vậy, mạch đa hài đã đổi sang trạng thái T_1 ngắt và T_2 thông bão hòa.

Ngược lại, nếu T_1 ngắt và T_2 thông bão hòa, thì tụ C_2 sẽ phóng điện và tụ C_1 sẽ nạp điện. Cứ thế, quá trình phóng và nạp điện của hai tụ C_1 và C_2 cứ lần lượt lặp đi lặp lại làm thay đổi trạng thái đầu ra của mạch đa hài, tạo nên tín hiệu xung vuông tại đầu ra mà không phải tác động bất cứ tín hiệu gì tại đầu vào.

Chu kỳ xung: $T = T_1 + T_2$

7.3. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT



Hình 7.21: Giải đồ xung mạch tạo dao động đa hài tự kích.

Trong đó: T_1 là thời gian tụ C_1 phóng điện qua R_{B2} với hằng số thời gian:

$$\tau_1 = R_{B1}C_1 = R_B C$$

T_2 là thời gian tụ C_2 phóng điện qua R_{B1} với hằng số thời gian:

$$\tau_2 = R_{B2}C_2 = R_B C$$

Vậy, chu kỳ xung:

$$T = T_1 + T_2 = T_1 + T_2 = \ln 2(\tau_1 + \tau_2) = 2 \times 0,69 \times R_B C = 1,38 R_B C$$

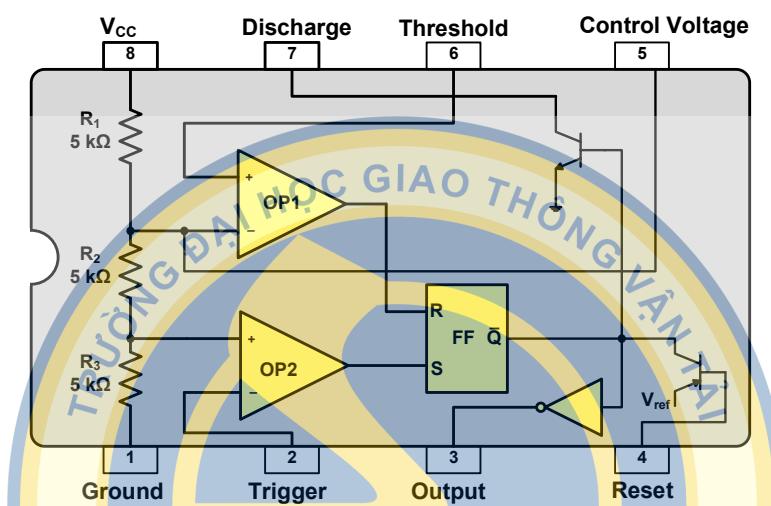
Tần số dao động của mạch:

$$f = \frac{1}{1,38 R_B C} \quad (7.11)$$

7.3.5 Vi mạch định thời 555

Vi mạch định thời 555 là một linh kiện khá phổ biến với việc dễ dàng tạo xung vuông và có thể thay đổi tần số tùy ý; sơ đồ mạch đơn giản và có khả năng thay đổi được độ rộng xung. IC này được ứng dụng hầu hết trong các mạch tạo xung hoặc trong các mạch tạo dao động với các loại thông dụng là LM555, NE555 và NE7555.

Hình 7.22 mô tả cấu tạo bên trong của IC 555 và tên gọi của các chân..



Hình 7.22: Sơ đồ mạch bên trong của IC 555.

Chức năng từng chân của IC 555

- ▷ **Chân số 1 (GND):** Nối đất để lấy dòng cấp cho IC.
- ▷ **Chân số 2 (TRIGGER):** Đầu vào (kích khởi), với mức điện áp chuẩn là $1/3 V_{CC}$, khi đặt một điện áp nhỏ hơn giá trị $1/3 V_{CC}$ thì đầu ra đảo $\bar{Q} = 0$ do đó đưa điện áp đầu ra lên mức cao.
- ▷ **Chân số 3 (OUTPUT):** Đầu ra, thường ở mức điện áp thấp và chỉ ở trạng thái mức điện áp cao trong một khoảng thời gian định thời.
- ▷ **Chân số 4 (RESET):** Khi điện áp tại chân này nhỏ hơn 0,4V thì chu kỳ định thời bị ngắt và đưa IC 555 trở về trạng thái không có xung kích. Khi không sử dụng, chân số 4 được nối với nguồn cấp V_{CC} .

7.3. MẠCH TẠO DAO ĐỘNG TÍCH THOÁT

- ▷ **Chân số 5 (CONTROL VOLTAGE):** Điện áp điều khiển, chân số 5 được nối với mức điện áp chuẩn $2/3 V_{CC}$. Có thể có một điện trở nối đất hoặc một điện áp ngoài được nối với chân số 5 để thay đổi các mức điện áp so sánh. Hoặc cũng có thể nối với một tụ có điện dung $C \geq 0,01 \mu F$ để lọc nhiễu.
- ▷ **Chân số 6 (THRESHOLD):** Nguồn, mức điện áp so sánh là $2/3 V_{CC}$, nếu điện áp đặt tới chân này lớn hơn $2/3 V_{CC}$ thì flip-flop FF được Reset đưa đầu ra về điện áp mức thấp.
- ▷ **Chân số 7 (DISCHARGE):** Được nối cực Collector của transistor.
- ▷ **Chân số 8 (V_{CC}):** Nối với nguồn cấp V_{CC} .

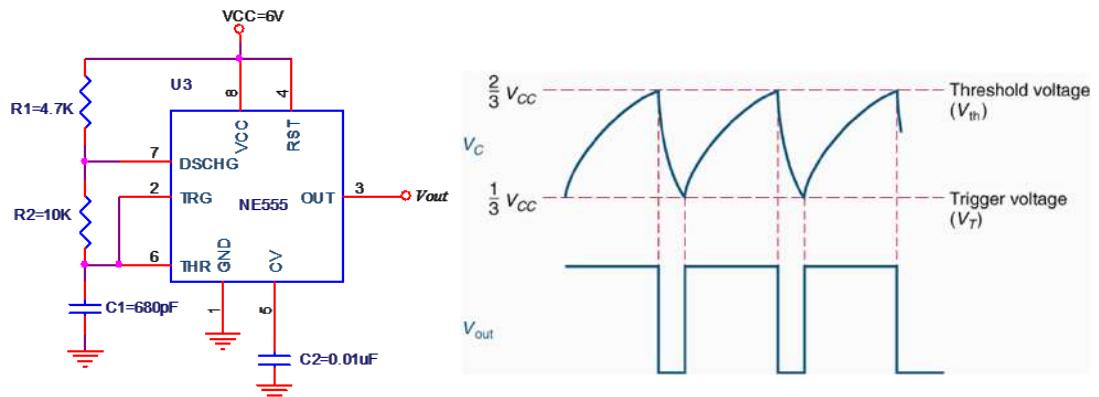
Các tham số cơ bản của IC 555:

- ▷ Điện áp đầu vào: $2 \div 18 V$
- ▷ Dòng điện cung cấp: $6 \div 15 mA$
- ▷ Điện áp logic ở mức cao: $0,5 \div 15 V$
- ▷ Điện áp logic ở mức thấp: $0,03 \div 0,06 V$
- ▷ Công suất cực đại: $600 mW$

Ứng dụng của IC 555: IC 555 thường được sử dụng trong các mạch sau:

- ▷ Thiết bị tạo xung chính xác
- ▷ Mạch phát xung
- ▷ Điều chế độ rộng xung (PWM)
- ▷ ...

Hình 7.23 biểu diễn một mạch tạo dao động đa hài tự kích sử dụng IC 555. Độ rộng xung T_{on} và tần số xung f_{on} có thể dễ dàng thay đổi bằng cách điều chỉnh các giá trị của tụ điện C_1 , điện trở R_1 và R_2 .



Hình 7.23: Một mạch tạo dao động đà hồi tự kích dùng IC 555.

Ôn tập chương 7

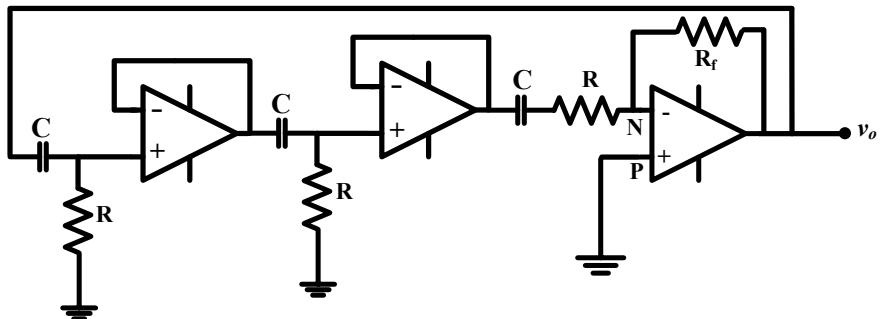
CÂU HỎI LÝ THUYẾT

- 7.1. Nêu khái niệm và ứng dụng của mạch dao động.
- 7.2. Phân biệt mạch tạo dao động điều hòa và dao động tích thoát.
- 7.3. Trình bày cấu tạo chung và nguyên lý của dao động điều hòa.
- 7.4. Trình bày cấu tạo chung và nguyên lý của dao động tích thoát.
- 7.5. Nêu cấu tạo và ứng dụng của IC 555.

BÀI TẬP

- 7.1. Cho mạch tạo dao động di pha như hình vẽ.

- ▷ Hãy xác định tần số dao động của mạch, biết $C = 0,1 \mu\text{F}$ và $R = 1 \text{k}\Omega$
- ▷ Tính giá trị nhỏ nhất của điện trở R_f ?



Hình 7.24: Mạch tạo dao động di pha.

7.2. Thiết kế mạch tạo dao động cầu Wien (giống hình 7.5) với tần số dao động bằng 800 Hz. Giả sử, $R = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$.

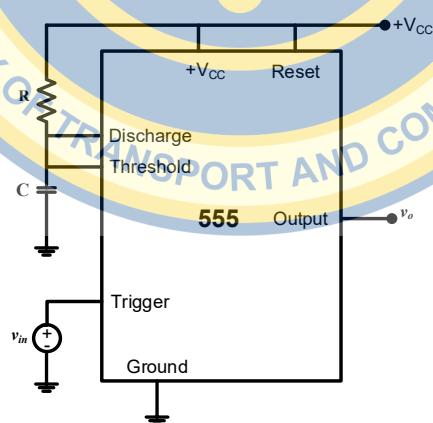
7.3. Thiết kế mạch tạo dao động 3 điểm điện dung với BJT để có tần số dao động là 10 MHz.

7.4. Thiết kế mạch tạo dao động 3 điểm điện cảm với BJT để có tần số dao động là 20 MHz.

7.5. Thiết kế mạch tạo dao động phi ổn sử dụng IC 555 như hình 7.23 với tần số dao động $f = 50 \text{ kHz}$, độ rộng xung bằng 75 %, $C = 1 \text{ nF}$.

7.6. Thiết kế mạch tạo dao động đơn ổn sử dụng IC 555 như hình 7.25 với độ rộng xung $T = 100 \mu\text{s}$, biết $C = 15 \text{ nF}$.

Hãy xác định giá trị của điện trở R .



Hình 7.25: Mạch tạo dao động đa hài đơn ổn dùng IC555

Phụ lục A

Một số khái niệm cơ bản về điện, điện tử

A.1 HẠT DẪN ĐIỆN

Hạt dẫn điện (*charge carrier*) là các phần tử mang điện tích có thể di chuyển tự do. Đơn vị đo lượng điện tích là culomb. Một culomb, ký hiệu là (C) được xác định là lượng điện tích của $6,24 \times 10^{18}$ electron. Trong mạch điện tử, hạt dẫn điện là electron mang điện tích âm (có giá trị $e = -1,6 \times 10^{-19}$ C) hoặc lỗ trống mang điện tích dương (có giá trị bằng $q = +1,6 \times 10^{-19}$ C).

Lượng điện tích Q của một vật mang điện được tính theo biểu thức sau:

$$Q = \frac{n_e}{6,24 \times 10^{18}} \quad (\text{A.1})$$

trong đó n_e là số lượng electron có trong vật đó.

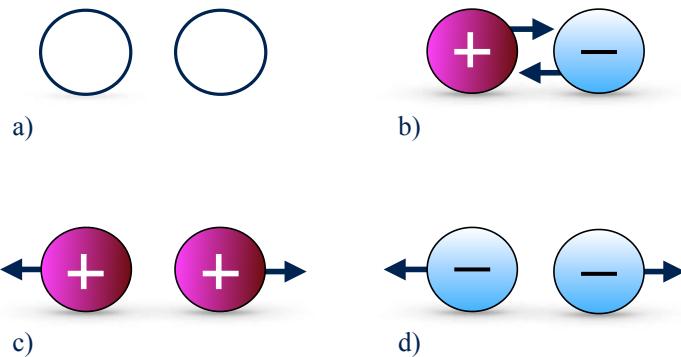
Xung quanh các điện tích tồn tại từ trường và khi hai điện tích cùng dấu chúng sẽ đẩy nhau; ngược lại, khi hai điện tích trái dấu chúng sẽ hút nhau, xem minh họa trong hình A.1.

A.2 ĐIỆN ÁP VÀ NGUỒN ĐIỆN ÁP

A.2.1 Điện áp

Điện thế là trường thế vô hướng của điện trường, vì vậy mỗi một điểm sẽ có giá trị điện thế khác nhau tùy thuộc vào điểm chọn làm mốc 0. Trong điện tử học, khái niệm hiệu điện thế hay điện áp (*voltage - V*) được sử dụng phổ biến hơn để nói tới sự chênh lệch điện thế giữa hai điểm.

Đơn vị của điện áp là volt, ký hiệu là (V) được định nghĩa như sau:



Hình A.1: Lực tương tác giữa các điện tích: a) không có điện tích, không có lực, b) điện tích trái dấu, lực hút và c), d) điện tích cùng dấu, lực đẩy nhau.

Một volt là hiệu điện thế (điện áp) giữa hai điểm khi một joule năng lượng làm di chuyển một coulomb điện tích di chuyển từ điểm này tới điểm kia.

$$V (V) = \frac{W (J)}{Q (C)}$$
(A.2)

A.2.2 Nguồn điện áp

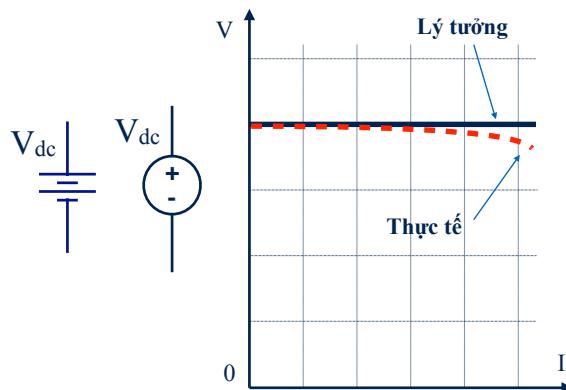
Nguồn điện áp (*voltage source*) là phần tử cung cấp năng lượng hay lực điện động để tạo ra sự di chuyển của các hạt dẫn trong mạch điện. Năng lượng mà nguồn điện áp có được có thể là từ hóa năng, quang năng, hay cơ năng.

Khi giá trị điện áp của nguồn điện áp là giá trị không đổi (lý tưởng), nguồn điện áp đó được gọi là **nguồn điện áp DC** (*direct current - DC*), một chiều không đổi. Nguồn điện áp một chiều phổ biến là pin hóa học, acquy, pin mặt trời ... được ký hiệu và có dạng đặc tuyến như biểu diễn trong hình A.2.

Hình A.2 cho thấy, nguồn điện áp lý tưởng là nguồn điện áp cung cấp giá trị điện áp như nhau với các giá trị của tải khác nhau. Nghĩa là dòng qua tải sẽ thay đổi khi tải thay đổi còn điện áp trên tải vẫn giữ nguyên.

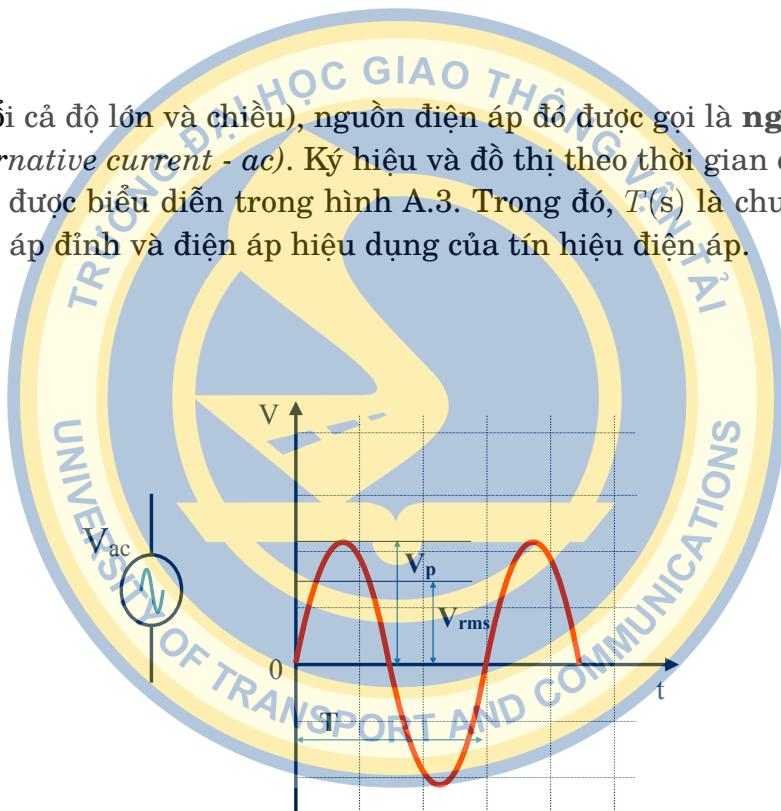
Nguồn điện áp lý tưởng là nguồn có nội trở bằng 0.

Khi giá trị điện áp của nguồn điện áp dạng hình sin biến đổi dương / âm liên



Hình A.2: Ký hiệu và đặc tuyến của một nguồn DC .

tục (biến đổi cả độ lớn và chiều), nguồn điện áp đó được gọi là **nguồn điện áp ac** (*alternative current - ac*). Ký hiệu và đồ thị theo thời gian của nguồn điện áp AC được biểu diễn trong hình A.3. Trong đó, $T(s)$ là chu kỳ và V_p , V_{rms} là điện áp đỉnh và điện áp hiệu dụng của tín hiệu điện áp.



Hình A.3: Ký hiệu và các giá trị đặc trưng cho tín hiệu điện áp ac.

Hình A.4 biểu diễn một số nguồn điện áp thông dụng trên thực tế.



Hình A.4: Hình dạng thực tế của một số nguồn điện áp.

A.3 DÒNG ĐIỆN VÀ NGUỒN DÒNG ĐIỆN

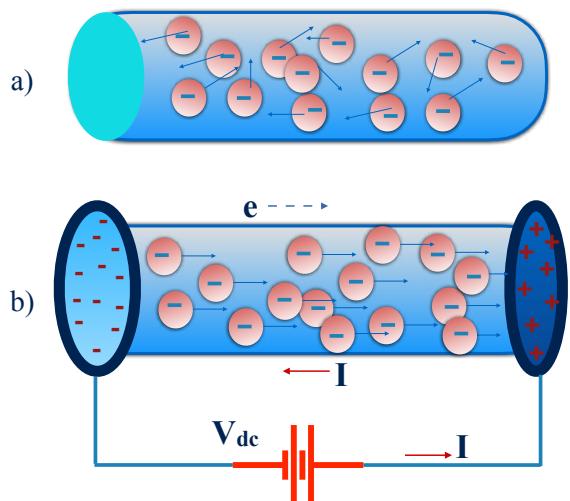
A.3.1 Dòng điện

Khi một vật dẫn điện có các hạt dẫn tự do thì các hạt dẫn này sẽ di chuyển ngẫu nhiên tùy theo sự tương tác hút hay đẩy giữa chúng và mạng tinh thể như mô tả trong hình A.5(a). Khi đặt một điện áp giữa hai đầu của vật dẫn này thì dưới tác động của lực điện, các hạt dẫn sẽ di chuyển theo một chiều và tạo thành dòng điện (*electrical current*) như mô tả trong hình A.5(b).

Vì vậy có thể nói dòng điện là dòng chuyển dời có hướng của các hạt mang điện dưới tác dụng của điện áp. Chiều của dòng điện là từ nơi có điện thế cao xuống nơi có điện thế thấp. Nếu hạt dẫn tạo dòng điện là hạt dẫn dương thì chiều chuyển động của hạt dẫn trùng với chiều dòng điện do chúng tạo nên. Nếu hạt dẫn tạo dòng điện là hạt dẫn âm thì chiều chuyển động của hạt dẫn ngược chiều với chiều dòng điện do chúng tạo nên.

Điều kiện để tạo nên dòng điện giữa hai điểm bao gồm:

- ▷ Có sự chênh lệch điện áp giữa hai điểm;
- ▷ Có hạt dẫn tự do trong khối vật chất nối giữa hai điểm;
- ▷ Tạo thành mạch kín.



Hình A.5: a) Electron di chuyển hỗn loạn trong vật dẫn và b) Dòng điện hình thành khi có điện áp.

Xem hình A.6 minh họa một số tình huống không / có dòng điện thông qua việc bóng đèn tắt / sáng.



Hình A.6: a) Không có điện áp, b) Mạch không kín và c) Dòng điện xuất hiện làm sáng bóng đèn khi hội tụ đủ 3 yếu tố.

Độ lớn của dòng điện được xác định bởi cường độ dòng điện, ký hiệu là I , đơn vị tính là ampe, ký hiệu là (A) được định nghĩa như sau:

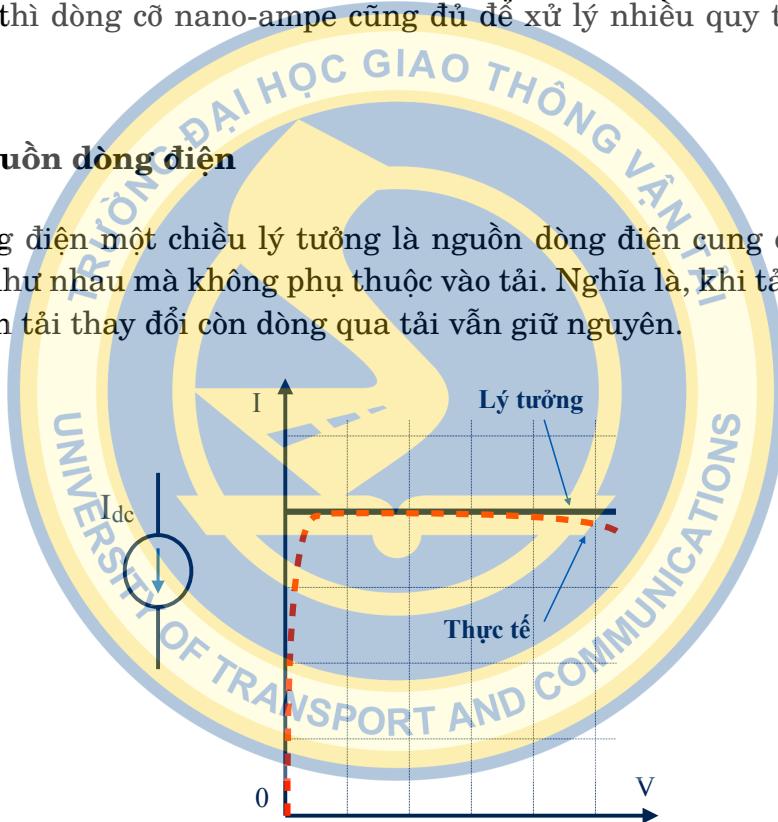
Một ampe là độ lớn của một dòng điện được tạo ra bởi 1 coulomb điện tích trong khoảng thời gian 1 giây.

$$I \text{ (A)} = \frac{Q \text{ (C)}}{t \text{ (s)}} \quad (\text{A.3})$$

Dòng điện khoảng 30 mA có thể gây té liệt cho con người và dòng 100 mA có thể gây chết người. Một bóng đèn 100 W thường chịu dòng 1 A còn các thiết bị điện gia đình như bàn là, bếp điện, máy giặt, tủ lạnh ... thường tiêu thụ dòng khoảng (10 ÷ 50 A). Với các thiết bị điện tử như máy vi tính hay đồng hồ điện tử thì dòng cỡ nano-ampe cũng đủ để xử lý nhiều quy trình phức tạp.

A.3.2 Nguồn dòng điện

Nguồn dòng điện một chiều lý tưởng là nguồn dòng điện cung cấp giá trị dòng điện như nhau mà không phụ thuộc vào tải. Nghĩa là, khi tải thay đổi, điện áp trên tải thay đổi còn dòng qua tải vẫn giữ nguyên.



Hình A.7: Ký hiệu và đặc tuyến Volt-Ampere của một nguồn dòng điện.

Nguồn dòng điện là thiết bị không phổ biến như nguồn điện áp, nó thường là thiết bị chuyên dụng có giá thành cao và được sản xuất tích hợp cùng nguồn điện áp, gọi chung là nguồn điện (*power supply*).

Hình A.7 biểu diễn ký hiệu và đặc tuyến Volt-Ampere của một nguồn dòng điện.

Nguồn dòng điện lý tưởng sẽ có nội trở bằng vô cùng.



Hình A.8: Hình ảnh thực tế của một bộ nguồn gồm nguồn áp và nguồn dòng điện.

Chú ý:

- + Nguồn dòng điện cũng có dạng DC và AC như đối với nguồn áp.
- + Các nguồn áp và dòng vừa trình bày ở trên được gọi là nguồn độc lập vì bản thân chúng tạo ra giá trị điện áp và dòng điện. Trong trường hợp các nguồn điện áp và dòng điện có được là do điện áp hay dòng điện khác thì gọi là nguồn dòng phụ thuộc và có ký hiệu như hình A.9.



Hình A.9: Ký hiệu của nguồn áp phụ thuộc a) và nguồn dòng phụ thuộc b).

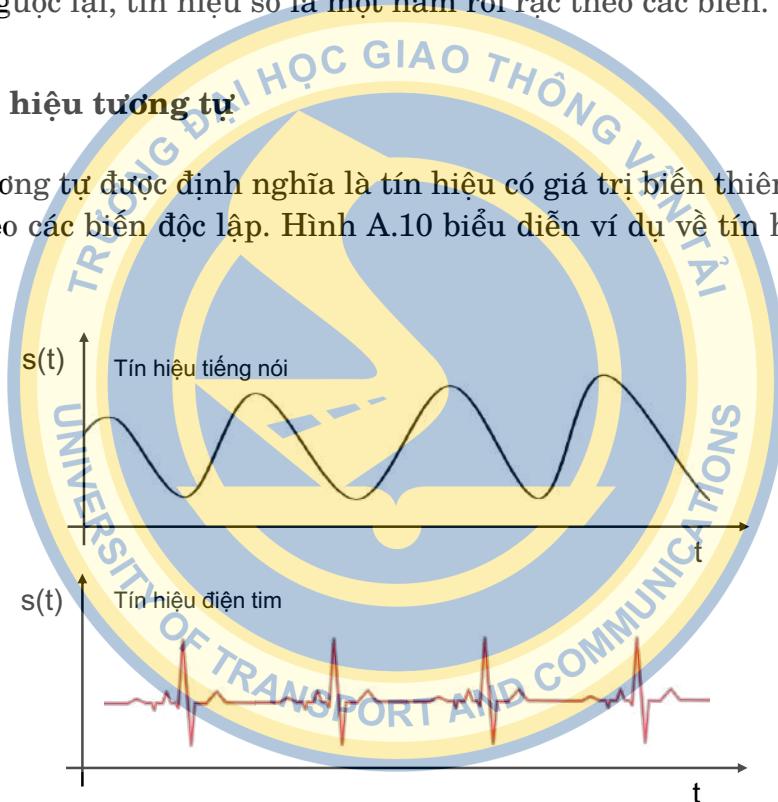
A.4 TÍN HIỆU

Trong thế giới thực (hay thế giới vật lý) xung quanh chúng ta, bất kỳ một đại lượng nào biến thiên theo thời gian hay không gian đều được gọi là tín hiệu. Tuy nhiên, khái niệm tín hiệu điện (*electrical signal*) trong kỹ thuật điện tử, là đại lượng vật lý nhưng phải mang thông tin, ví dụ: tín hiệu âm thanh (*audio*) tiếng nói (*speech*), hình ảnh (*image*), video, y sinh (*medical*), radar, cảm biến ... Tín hiệu thường được biểu diễn bởi một hàm toán học của một hay nhiều biến độc lập thời gian, tần số, áp suất tọa độ không gian,...

Tín hiệu được phân chia thành hai dạng chính: tín hiệu tương tự và tín hiệu số. Tín hiệu tương tự được biểu diễn bởi một hàm biến thiên liên tục theo các biến. Ngược lại, tín hiệu số là một hàm rời rạc theo các biến.

A.4.1 Tín hiệu tương tự

Tín hiệu tương tự được định nghĩa là tín hiệu có giá trị biến thiên một cách liên tục theo các biến độc lập. Hình A.10 biểu diễn ví dụ về tín hiệu tương tự.



Hình A.10: Ví dụ về tín hiệu tương tự: a) Tín hiệu tiếng nói và b) Tín hiệu điện tim của con người.

Biên độ của loại tín hiệu này biến thiên liên tục theo thời gian.

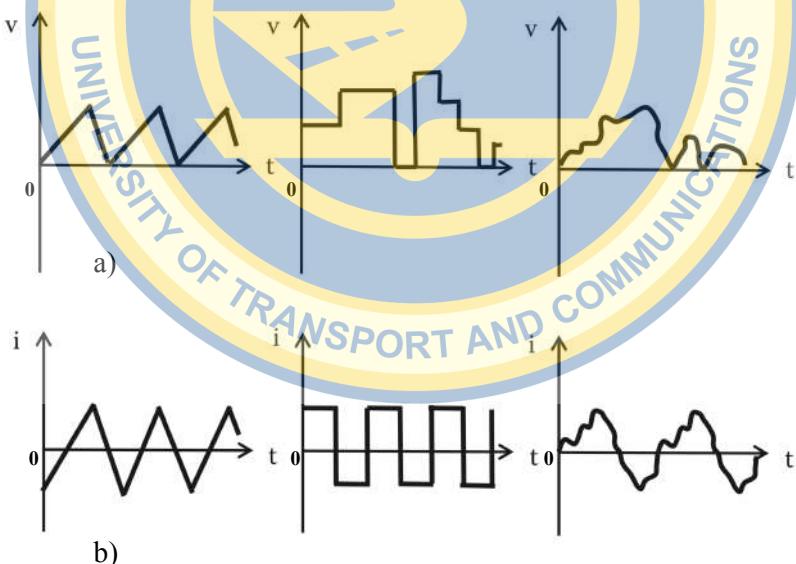
$$A = f(t)$$

trong đó, A là biên độ tín hiệu, t là biến thời gian.

Tín hiệu tương tự biểu diễn chính xác thông tin như sự thay đổi của cường độ âm thanh, sự thay đổi của nhiệt độ, sự thay đổi của cường độ sáng ... Tuy nhiên, do các giá trị biến thiên liên tục, nên rất khó phân tích và yêu cầu một bộ nhớ có dung lượng vô cùng lớn để lưu trữ thông tin khi xử lý thời gian thực.

Tín hiệu tương tự là đối tượng của mạch điện tử tương tự như khuếch đại, lọc, tạo dao động, biến đổi tần số, chuyển đổi **tương tự / số**...

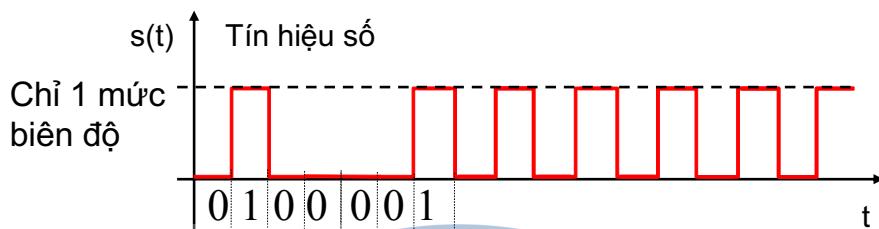
Tín hiệu tương tự có thể có dạng DC - một chiều không đổi hoặc AC - xoay chiều hình sin như đã đề cập ở phần trên. Bên cạnh đó, tín hiệu cũng có thể có độ lớn biến đổi nhưng chỉ có một cực tính (hoặc dương, hoặc âm) như ví dụ trong hình A.10 và A.11(a). Hoặc tín hiệu hai cực tính có độ lớn và chiều biến đổi liên tục như biểu diễn trong hình A.11(b). Chúng được gọi chung là tín hiệu biến đổi.



Hình A.11: a) Dạng tín hiệu biến đổi một cực tính và b) Dạng tín hiệu biến đổi hai cực tính.

A.4.2 Tín hiệu số

Tín hiệu số được định nghĩa là tín hiệu có giá trị biến thiên một cách rời rạc theo các biến độc lập và được mã hoá dưới dạng số nhị phân 0 và 1 như minh họa trong hình A.12. Giá trị logic 0 và 1 được biểu diễn bằng các giá trị điện áp (hoặc dòng điện).



Hình A.12: Minh họa tín hiệu số.

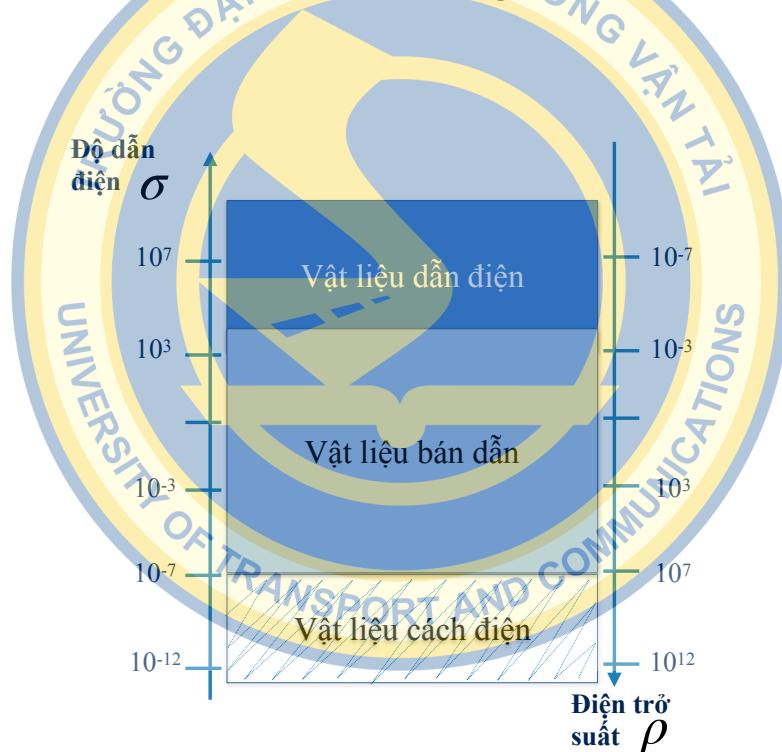
So với tín hiệu tương tự thì tín hiệu số có nhiều ưu điểm như sau:

- ▷ Dựa trên cơ sở của đại số logic có thể thiết kế và tối ưu mạch một cách nhanh chóng;
- ▷ Dễ tích hợp nhiều tính năng trên một chip do vậy thiết bị sẽ giảm kích thước đáng kể;
- ▷ Các mạch số ít bị ảnh hưởng của nhiễu, giá trị chính xác của điện áp và dòng điện là không quan trọng như điện tử tương tự, vì chỉ là dải giá trị biểu thị cho logic 1 và 0;
- ▷ Thuận tiện cho quá trình lưu trữ và tính bảo mật cao. Nếu trong hệ thống lưu thông tin tương tự như băng từ, đĩa từ thì các yếu tố như sự già hoá, sự tổn hao dù nhỏ nhất có thể làm thay đổi nội dung thông tin. Với với hệ thống số, dải giá trị biểu thị giá trị logic hay khoảng lề tránh nhiễu, cho phép thông tin lưu trữ có mật độ tích hợp và độ an toàn cao hơn nhiều.

Phụ lục B

Đặc tính điện của một số vật liệu điện tử

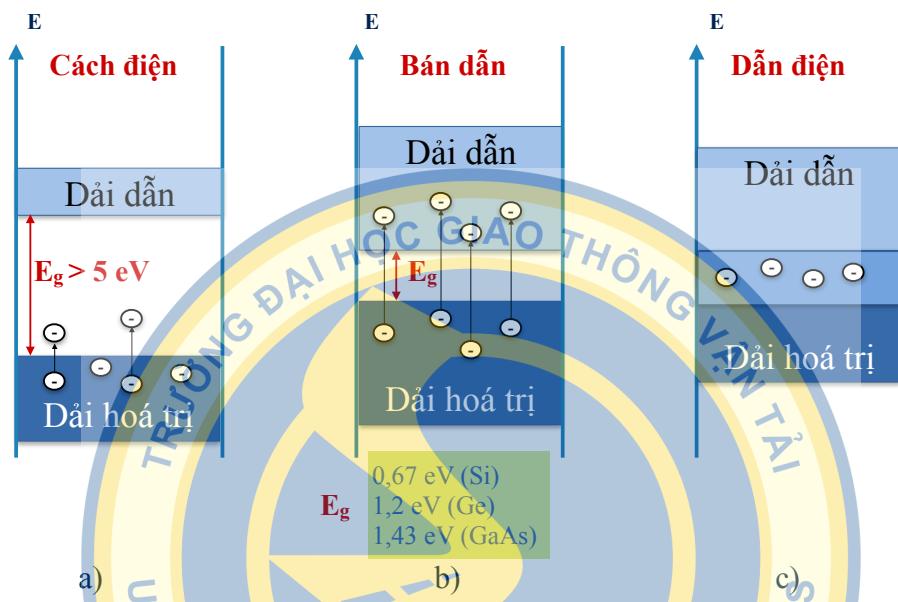
Tính chất dẫn điện của vật liệu được đặc trưng bởi thông số độ dẫn điện (*conductivity*) là σ ($1/\Omega\text{m}$) hoặc điện trở suất (*resistivity*) ρ (Ωm) = $1/\sigma$. Vật liệu có độ dẫn điện càng lớn thì điện trở suất càng nhỏ, nghĩa là khả năng dẫn dòng càng tốt. Căn cứ vào trị số của các thông số trên vật liệu điện tử được phân chia thành ba loại như mô tả trong hình B.1.



Hình B.1: Phân loại vật liệu dựa vào độ dẫn điện và điện trở suất.

B.1 DẢI NĂNG LƯỢNG TRONG VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ

Bên cạnh tham số độ dẫn, ở góc độ khác chi tiết hơn, tính dẫn điện của vật liệu được giải thích bằng lý thuyết dải năng lượng. Dựa vào sự phân bố của các dải năng lượng trong một vật liệu có thể xác định đó là vật liệu dẫn điện, cách điện hay bán dẫn. Dải năng lượng được phân chia thành ba dải chính: dải dẫn, dải hóa trị và dải cấm như mô tả ở hình B.2.



Hình B.2: Phân loại vật liệu điện tử theo cấu trúc dải năng lượng: a) Vật liệu cách điện, b) Vật liệu bán dẫn, c) Vật liệu dẫn điện.

- ▷ Dải hóa trị (*Valence band*): Là dải gồm các dải năng lượng mức thấp, khi đó các điện tử liên kết bền vững với hạt nhân. Các mức năng lượng trong dải hóa trị đều đã bị điện tử chiếm chỗ và không còn mức năng lượng tự do, nên còn được gọi là dải đầy. Khi điện tử trong dải hóa trị nhảy lên mức năng lượng cao hơn thì nó để lại lỗ trống. Vật liệu có lỗ trống trong dải hóa trị sẽ có khả năng dẫn điện. Khả năng dẫn điện của vật liệu tăng nếu mật độ lỗ trống trong dải hóa trị tăng.
- ▷ Dải dẫn (*Conduction band*): Còn được gọi là dải trống, gồm các dải năng lượng mức cao. Các mức năng lượng này có thể còn trống hoặc chỉ bị điện tử chiếm chỗ một phần. Các điện tử ở các mức năng lượng

này được gọi là **điện tử tự do**. Vật liệu có điện tử tự do mới có thể dẫn điện được. Khả năng dẫn điện của vật liệu tăng nếu mật độ điện tử trong dải dẫn tăng.

- ▷ Dải cấm (*Forbidden band*): Là dải năng lượng nằm giữa dải hóa trị và dải dẫn, không tồn tại mức năng lượng nào để điện tử có thể chiếm chỗ, hay nói cách khác, xác suất tìm thấy hạt dẫn tại dải cấm bằng 0. Tuy nhiên, trong trường hợp chất bán dẫn được pha tạp thì có thể xuất hiện các mức năng lượng trong dải cấm (mức pha tạp).

Khoảng cách giữa đáy dải dẫn và đỉnh dải hóa trị được gọi là **độ rộng dải cấm** hay **năng lượng dải cấm** (*gap band energy*):

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{B.1})$$

Trong đó, E_g ; E_c ; E_v lần lượt là năng lượng dải cấm, đáy dải dẫn và đỉnh dải hóa trị, xem hình B.2.

Hình B.2 cho thấy với vật liệu có $E_g > 5 \text{ eV}$, nghĩa là điện tử ở dải hóa trị không thể vượt qua khoảng năng lượng này để lên dải dẫn. Chính vì vậy loại vật liệu này không thể dẫn điện. Với vật liệu mà hai dải năng lượng dẫn và hóa trị phủ trùm lên nhau thì chúng luôn sẵn sàng dẫn điện, vì vậy gọi là vật liệu dẫn điện. Loại vật liệu có $0 < E_g < 5 \text{ eV}$ gọi là vật liệu bán dẫn như Si, Ge hay GaAs.

E_g là tham số quan trọng ảnh hưởng đến điện áp cần cung cấp để cho linh kiện bán dẫn: diode, transistor làm việc, hay để xác định bước sóng làm việc của linh kiện quang điện,...

B.2 VẬT LIỆU DẪN ĐIỆN

B.2.1 Đặc điểm chung

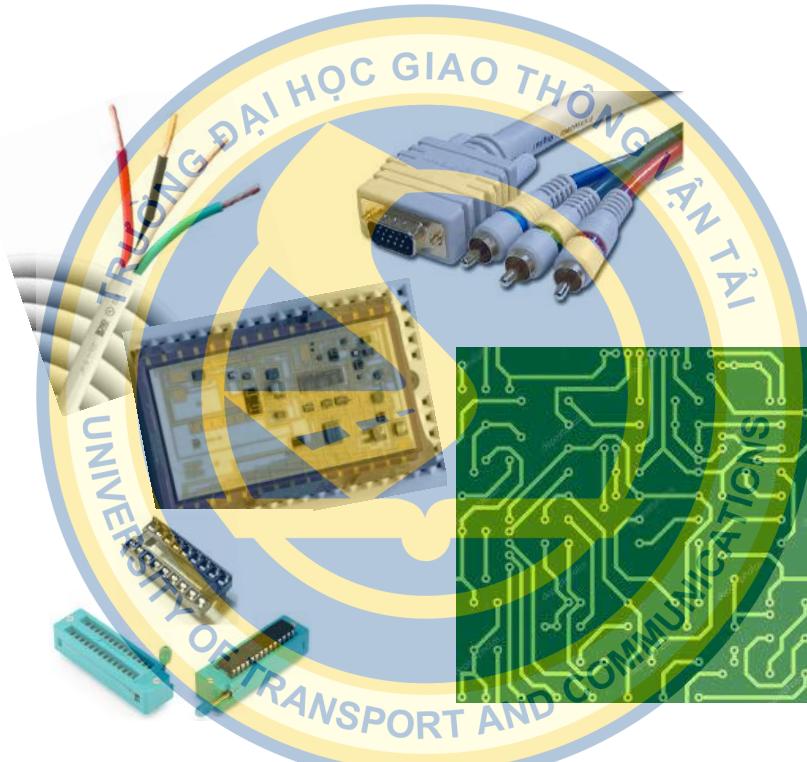
Vật liệu dẫn điện (*conductor*) là vật liệu mà ở đó các electron có thể dễ dàng di chuyển từ nguyên tử này sang nguyên tử khác. Vật liệu dẫn điện có trị số điện trở suất nhỏ nhất so với các loại vật liệu khác, khoảng ($10^{-8} \div 10^{-5} \Omega\text{m}$). Trong tự nhiên, vật liệu dẫn điện có thể ở thể rắn (kim loại, hợp kim), lỏng

(thuỷ ngân, kim loại nóng chảy, dung dịch điện phân) hay khí (chất khí và hơi khí dưới cường độ điện trường cao).

Điện tử di chuyển trong vật liệu dẫn điện không theo một dòng đều đặn mà di chuyển từ nguyên tử này sang nguyên tử khác kế cận. Số lượng điện tử di chuyển là một số cực lớn và chiều chuyển động của chúng ngược với chiều quy ước của dòng điện.

Nói chung, điện trở suất của mọi vật liệu là thông số phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ.

B.2.2 Một số vật liệu dẫn điện và ứng dụng điển hình



Hình B.3: Một số ứng dụng thực tế của vật liệu dẫn điện.

Hình B.3 biểu diễn một số ứng dụng điển hình của vật liệu dẫn điện trong việc làm dây dẫn, đầu nối tín hiệu, bảng mạch in, đế cắm mạch tích hợp.

Bảng B.1 thống kê đặc tính điện của một số loại vật liệu dẫn điện điển hình và ứng dụng quan trọng trong kỹ thuật điện tử.

Bảng B.1: Đặc tính điện (ở nhiệt độ 20°C) của một số loại vật liệu dẫn điện dùng trong kỹ thuật điện tử.

Vật liệu	Độ dẫn điện $\sigma \times 10^7 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$	Điện trở suất $\rho \times 10^{-8} \Omega\text{m}$	Ứng dụng
Bạc (Ag)	6,29	1,59	tráng bên ngoài chân linh kiện
Vàng (Au)	2,22	4,5	điện cực trong lõi linh kiện, đường mạch in trong mạch tích hợp
Đồng (Cu)	5,95	1,68	dây dẫn, đường mạch in
Nhôm (Al)	2,65	3,77	chân linh kiện
Thiếc (Sn)	8,69	1,15	hàn nối
Tungsten	1,79	5,6	đèn sợi đốt
Constantan	0,2	49	điện trở dây quấn
Nichrome	0,1	100	điện trở dây quấn

B.3 VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN

B.3.1 Đặc điểm chung

Vật liệu cách điện (*insulator*) là vật liệu mà ở đó hầu như không có hạt dẫn tự do nên không thể tạo thành dòng điện dù có đặt chúng trong điện trường. Vì vậy, có thể nói vật liệu cách điện ngăn cản không cho dòng điện lưu thông. Tuy nhiên, trên thực tế có thể coi chất cách điện là các chất có điện trở suất rất cao, khoảng ($10^7 \div 10^{17} \Omega\text{m}$) ở nhiệt độ phòng.

Hầu hết các chất khí đều là các chất cách điện tốt, thuỷ tinh, giấy khô, gỗ khô và các chất dẻo cũng là các chất cách điện. Nước thuần tuý là một chất cách điện tốt nhưng khi bị ô nhiễm, dù là rất nhỏ, nó sẽ cho phép dòng điện chạy qua. Oxit kim loại là chất cách điện mặc dầu kim loại ở dạng thuần tuý lại là chất dẫn điện.

Trong kỹ thuật điện, chất cách điện được sử dụng chủ yếu làm vỏ bọc dây dẫn, làm phần tử cách ly tránh ngắn mạch ... còn trong lĩnh vực sản xuất linh kiện thì chất cách điện được sử dụng để chế tạo điện trở và tụ điện. Khi

đó chúng thường được gọi là **chất điện môi**.

Khả năng tích trữ năng lượng điện của chất điện môi biểu thị bởi hằng số điện môi (*dielectric constant*), ký hiệu¹ là ϵ_r . Hằng số điện môi của một vật liệu được xác định bởi biểu thức sau:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{B.2})$$

trong đó ϵ và $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m tương ứng là độ điện thẩm tuyệt đối của vật liệu đó và của chân không. Nói cách khác, hằng số điện môi cho biết vật liệu có độ điện thẩm lớn hơn bao nhiêu lần so với chân không, hay chính là độ điện thẩm tương đối của vật liệu so với chân không.

Chất điện môi dùng làm chất cách điện trong sản xuất điện trở cần ϵ_r nhỏ còn chất điện môi dùng làm tụ điện cần có ϵ_r lớn, ϵ_r càng lớn thì khả năng tích lũy năng lượng điện của tụ càng lớn.

Bên cạnh các thông số trên, đặc tính điện của chất cách điện còn được thể hiện ở thông số độ bền điện, được tính bằng đơn vị (V/m). Giá trị này cho biết với khoảng cách 1 m thì điện áp lớn nhất có thể đặt lên chất điện môi là bao nhiêu mà nó vẫn giữ được tính chất cách điện của mình. Thông số này lớn cho biết chất điện môi có thể làm việc ở khu vực điện áp cao và ngược lại.

B.3.2 Phân loại và ứng dụng

Bảng B.2 cho biết thông số điện của một số chất điện môi điển hình. Với những vật liệu có hằng số điện môi lớn thì khả năng tích điện lớn nên được sử dụng làm tụ điện và nếu vật liệu đó còn có độ bền điện tốt, ví dụ như mica thì đó tụ có thể chịu được điện áp rất lớn. Với vật liệu mềm dẻo như nylon, polystyrene và cao su thì chủ yếu được làm vỏ bọc cách điện cho thiết bị, đầu đo hay chấu cắm.

Hình B.4 biểu diễn một số ứng dụng điển hình của vật liệu cách điện trong việc làm vỏ dây dẫn, vỏ giắc cắm hay vỏ thiết bị, đầu cách ly chống ngắt mạch, chất cản điện trong điện trở và chất điện môi trong tụ điện.

¹nhiều tài liệu đại lượng này được ký hiệu là κ (đọc là kappa)

Bảng B.2: Hằng số điện môi và ứng dụng của một số loại vật liệu cách điện dùng trong kỹ thuật điện tử.

Vật liệu	Hằng số diện môi ϵ_r	Độ bền điện $\times 10^6$ V/m	Ứng dụng
Không khí	1	3	tụ điện cao áp
Mica	3 ÷ 9	118	tụ điện cao áp
Gốm	21 ÷ 40	6 ÷ 160	tụ điện cao áp, sứ cách điện
Giấy tẩm	2,5 ÷ 4	40 ÷ 60	tụ điện
Nylon	3,4 ÷ 22,4	12	vỏ bọc
Cao su Neoprene	4 ÷ 7	10 ÷ 30	đế cách điện
Polyethylene	2,5	19 ÷ 160	tụ phân cực, vỏ bọc
Polystyrene	2,4 ÷ 3	19,7	tụ phân cực



Hình B.4: Một số ứng dụng thực tế của vật liệu cách điện.

B.4 VẬT LIỆU BÁN DẪN

Vật liệu bán dẫn (*semiconductor*) là vật liệu mà trong một số điều kiện nó trở thành cách điện và trong một số điều kiện khác nó lại dẫn điện. Tính đa năng này nằm ở chỗ sự dẫn điện có thể được điều khiển để tạo ra các hiệu ứng như sự khuếch đại âm thanh, sự chỉnh lưu dòng điện, chuyển đổi và trộn lẫn tín hiệu ...

Xét về đặc tính dẫn điện thì vật liệu bán dẫn có điện trở suất lớn hơn vật liệu dẫn điện nhưng nhỏ hơn vật liệu cách điện, xem lại hình B.1. Đặc điểm nổi bật của vật liệu bán dẫn là điện trở suất của nó phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ. Điện trở của chất bán dẫn có thể tăng hoặc giảm khi nhiệt độ tăng; trong khi đó, với kim loại thì điện trở luôn tăng khi nhiệt độ tăng. Ngoài ra, điện trở suất của chất bán dẫn còn phụ thuộc vào loại chất pha tạp, nồng độ tạp chất, ánh sáng chiếu vào ...

Trong kỹ thuật điện tử, một số chất bán dẫn được sử dụng rộng rãi là Silicon (Si), Germanium (Ge), Selenium (Se) và Gallium Arsenide (GaAs). Germanium được sử dụng trong những năm đầu của thúc nghệ bán dẫn còn hiện nay chỉ xuất hiện trong những ứng dụng đặc biệt do tính chịu nhiệt kém.

Phần này sẽ được trình bày chi tiết trong Chương 2 - Linh kiện điện tử bán dẫn.

Phụ lục C

Đặc tính từ của vật liệu từ

Vật liệu từ là vật liệu khi đặt vào trong một từ trường thì nó bị nhiễm từ. Nghĩa là sau khi thỏi không đặt trong từ trường nữa nhưng trong vật liệu từ vẫn có một lượng từ dư nhất định (biểu hiện bởi các đường từ thông lớn hay yếu).

Hình C.1 minh họa một vật nhỏ được đặt trong từ trường và sau khi hết tác động của từ trường thì quanh vật này vẫn tồn tại từ trường. Như vậy, vật này được làm từ vật liệu từ.



Hình C.1: Một vật được đặt trong từ trường B và sau khi hết tác động của B.

Khi không có từ trường ngoài thì bản thân trong vật liệu từ tồn tại các vùng nhiễm từ tự phát gọi là nguồn từ. Tuy nhiên từ thông của các vật liệu từ trong không gian ngoài đều bằng 0 vì hướng của các momen từ của từng nguồn riêng biệt trong nó khác nhau.

C.1 MỘT SỐ ĐẶC TÍNH CỦA VẬT LIỆU TỪ

C.1.1 Từ trở và từ thấm

Một số chất có thể làm cho các đường từ thông trở nên xa nhau hơn trong không khí. Một số chất khác lại có thể làm cho những đường từ thông lại gần nhau hơn so với trong không khí. Đại lượng đặc trưng cho hiện tượng này được gọi là từ trở và từ thấm.

Từ trở R_m là một đại lượng đánh giá sự ngăn cản việc lập nên từ thông của một mạch từ và được tính theo biểu thức sau:

$$R_m = \frac{1}{\mu} \times \frac{l}{S} \quad (C.1)$$

Trong đó:

μ là độ từ thấm của vật liệu trong mạch từ so với chân không;

$1/\mu$ gọi là từ trở suất của $1 m^3$ vật liệu từ;

l là độ dài của mạch từ;

S là diện tích tiết diện của mạch từ.

Độ từ thấm tương đối μ_r là độ từ thấm được đo một cách tương đối với chân không, chân không được gán độ từ thấm $\mu_0 = 1 (H/m)$. Đại lượng này không có thứ nguyên.

Hiện tượng: khi đưa vật liệu có từ tính vào trong lòng cuộn dây dẫn điện thì mật độ từ thông tổng hợp qua cuộn dây tăng lên nhiều lần. Đó là vì các vật liệu từ này có khả năng dẫn từ tốt. Sự gia tăng từ thông tổng hợp khi cho vật liệu từ vào mạch điện được gọi là độ từ thấm tương đối μ_r . Độ từ thấm của vật liệu khi đó được tính bằng biểu thức:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad (C.2)$$

Ngược lại, nếu cần làm cho nam châm điện yếu đi thì cho len khô hoặc sáp ong để làm vật liệu lõi, đây chính là các chất nghịch từ.

Hệ số từ thấm tương đối của một số vật liệu thông dụng được cho trong bảng C.1.

Bảng C.1: Hệ số từ thẩm của một số loại vật liệu.

Vật liệu	Hệ số từ thẩm tương đối μ_r
Bạc	< 1
Len khô	< 1
Không khí	1
Nhôm	> 1
Niken	50 ÷ 601
Cobalt	60 ÷ 70
Thép	60 ÷ 100
Ferite	100 ÷ 3.000
Sắt luyện	3.000 ÷ 8.000
Permalloy	3.000 ÷ 30.000
Permalloy đặc biệt	100.000 ÷ 1.000.000

C.1.2 Độ từ dư

Độ từ dư là phép đo một chất sẽ “nhớ” từ tính tốt như thế nào và vì thế trở thành nam châm vĩnh cửu. Độ dư từ được diễn đạt bằng phần trăm. Nếu mật độ từ thông trong vật liệu là X (Tesla) khi nó được đưa vào một từ trường có cường độ cao nhất (nghĩa là dòng điện có tiếp tục tăng thì thanh kim loại cũng không bị từ hoá thêm, nó đã bão hòa) và chỉ còn Y (Tesla) khi ngắt dòng điện thì độ từ dư được tính bằng $(Y/X) \times 100\%$.

Mỗi chất có độ từ dư khác nhau. Các chất có độ từ dư cao được sử dụng để làm nam châm vĩnh cửu. Trong khi các chất có độ từ dư rất thấp được sử dụng để làm nam châm điện (đặc biệt là nam châm điện xoay chiều) vì nếu độ từ dư cao vật liệu sẽ trở nên “chậm chạp”, tức là khả năng chuyển đổi cực tính khó khăn.

C.2 PHÂN LOẠI VÀ ỨNG DỤNG CỦA VẬT LIỆU TỪ

Vật liệu từ được chia thành 2 loại là vật liệu từ mềm có độ từ thẩm cao, lực kháng từ nhỏ và vật liệu từ cứng có độ từ thẩm nhỏ và lực kháng từ cao.

C.2.1 Vật liệu từ mềm

Vật liệu từ mềm được phân loại theo khu vực tần số hoạt động như sau:

- ▷ Vật liệu từ mềm dùng ở tần số thấp ($< 100 \text{ Hz}$): như là sắt, hợp kim sắt-silic, sắt-niken ... được sử dụng để làm lõi biến áp, nam châm điện. Đây là các vật liệu có độ thẩm từ rất cao nhưng độ từ dư lại thấp.
- ▷ Vật liệu từ mềm dùng ở tần số cao vài trăm KHz đến vài MHz. Trong đó điển hình là các chất sau:
 - + Ferit có đặc điểm: độ dẫn điện cao, độ từ thẩm rất cao, Ferit thích hợp dùng làm lõi của các linh kiện như: cuộn dây có hệ số phảm chất cao, biến áp dải tần rộng, cuộn dây trung tần, anten, biến áp xung, cuộn làm lệch tia điện tử ...
 - + Permalloy là hợp kim của $Ni, Fe, Mn, Cr, Cu, Si, \dots$ có đặc điểm là độ từ thẩm cao cỡ vài ngàn tới vài trăm ngàn H/m, dùng làm biến áp micro, đầu từ, biến áp nhỏ chất lượng cao.

C.2.2 Vật liệu từ cứng

Vật liệu từ cứng được phân loại theo ứng dụng như sau:

- ▷ Nam châm vĩnh cửu: thường làm từ vật liệu từ có đặc tính kháng từ lớn và độ từ dư lớn, tức là có khả năng “nhớ” từ tốt, với hình dạng hợp lý như hình móng ngựa để chế tạo nam châm vĩnh cửu. Khi bị một nam châm vĩnh cửu hoặc dòng điện một chiều từ hoá thì vật trên sẽ trở thành một nam châm vĩnh cửu.
- ▷ Băng từ: đó chính là **các băng ghi âm trong các máy cassette hay ghi hình cho máy video**. Bản thân băng từ chứa hàng triệu các hạt oxit sắt được gắn trên một dãy băng mylar hay băng nhựa. Từ trường dao động tại đầu ghi sẽ phân cực những hạt này. Khi từ trường thay đổi cường độ trong khi băng chạy với một tốc độ đều đặn sẽ tạo ra các vùng mà trong đó các hạt oxit sắt được phân cực tương ứng. Tốc độ của băng từ quyết định độ trung thực của việc ghi băng. Hiện nay loại hình lưu trữ này hầu như không còn được sử dụng vì chúng bị thay thế bởi các đĩa CD và DVD có dung lượng lớn hơn nhiều lần.

-
- ▷ Đĩa từ: Một đĩa từ có thể ở dạng cứng hay mềm. Các đĩa này có nhiều kích thước khác nhau. Các đĩa cứng lưu trữ hầu hết dữ liệu và nói chung là nằm bên trong máy tính. Đĩa mềm thường có kích thước $5\frac{1}{4}$ inch và $3\frac{1}{2}$ inch đường kính, có thể được đưa vào hay lấy ra từ một máy ghi/phát gọi là ổ đĩa mềm. Nguyên tắc của các đĩa từ cũng tương tự như băng từ. Tuy nhiên, ở đây thông tin được lưu trữ dưới dạng số, tức là chỉ có hai cách từ hoá các hạt khác nhau. Điều này sẽ tạo ra những bộ lưu trữ hoàn hảo không lỗi. Thêm nữa, đĩa từ hoạt động khác với băng từ do khác biệt về mặt hình học. Trên một băng từ, thông tin được trải ra trên một dây dài và rộng, đầu ghi hay đọc đứng yên trong khi băng từ quay. Ngược lại, trên đĩa từ không có hai bit nào nằm xa hơn đường kính của đĩa. Điều này có nghĩa là dữ liệu có thể được lưu trữ và sử dụng nhanh hơn nhiều so với một băng từ. Hiện nay phổ biến là các ổ đĩa cứng bao gồm nhiều đĩa từ xếp chồng lên nhau, giữa chúng có khe hở nhỏ để các đầu ghi/đọc có thể di chuyển dễ dàng trên mặt đĩa từ đang quay ở tốc độ cao.
 - ▷ Bộ nhớ bọt từ: đây là phương pháp lưu trữ dữ liệu phức tạp mà không cần phải di chuyển các thành phần như trong máy phát băng từ hay các ổ đĩa. Bộ nhớ bọt từ là sự kết hợp hoàn hảo của kỹ thuật lưu trữ dữ liệu từ cũng như kỹ thuật lưu trữ dữ liệu điện tử. Số bit dữ liệu được lưu trên các từ trường nhỏ trong một phương tiện được tạo ra từ phim từ và vật liệu bán dẫn. Ưu điểm của bộ nhớ bọt từ là mật độ cao, khả năng phục hồi dữ liệu nhanh, tuổi thọ dài và chi phí thấp.

Phụ lục D

Một số định luật cơ bản phân tích mạch điện tử

D.1 ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) là nhà vật lý người Đức có nhiều đóng góp trong lĩnh vực điện học, trong đó nổi bật là hai định luật mang tên ông về dòng điện và điện áp.

D.1.1 Định luật Kirchhoff về dòng điện

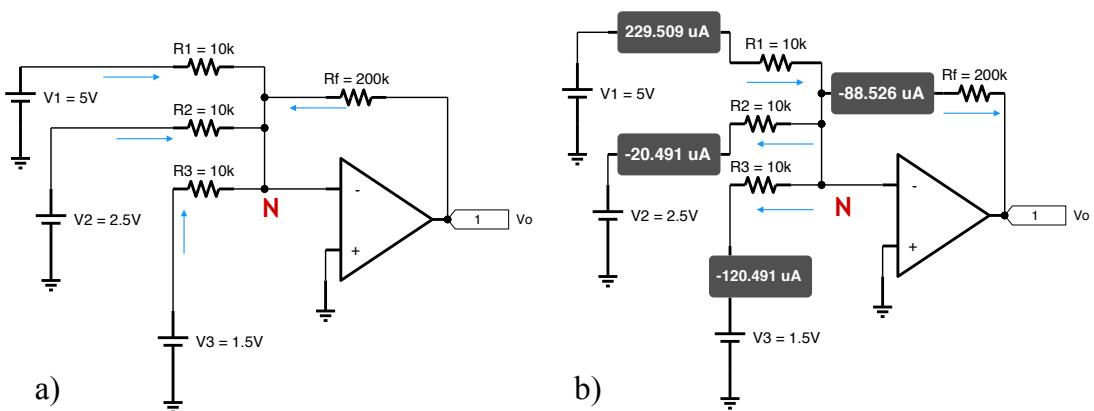
Định luật Kirchhoff về dòng điện (*Kirchhoff's Current Law - KCL*) trên thực tế có 3 phiên bản như sau:

- ▷ Tổng đại số các dòng điện đi vào một nút bằng 0.
- ▷ Tổng đại số các dòng điện đi ra khỏi một nút bằng 0.
- ▷ Tổng độ lớn các dòng điện đi vào một nút bằng tổng độ lớn các dòng đi ra khỏi nút đó.

Ví dụ D.1. Cho mạch điện như hình D.1(a).

Hãy viết phương trình KCL tại nút N.

Hình D.1(a) là một mạch điện mà tại nút N có tới 4 dòng điện đi qua. Khi này giả thiết là tất cả các dòng điện đều đi vào nút N, điện áp tại N được ký



Hình D.1: a) Các dòng điện vào nút N và b) Kết quả mô phỏng.

hiệu là V_N , định luật Kirchhoff về dòng điện có thể được viết dưới dạng biểu thức cụ thể như sau:

$$\frac{V_1 - V_N}{R_1} + \frac{V_2 - V_N}{R_2} + \frac{V_3 - V_N}{R_3} + \frac{V_o - V_N}{R_f} = 0$$

Phản tính toán để xác định từng giá trị trên sẽ được trình bày chi tiết trong chương Khuếch đại thuật toán. Kết quả mô phỏng thể hiện trong hình D.2(b) đã chứng minh cho định luật Kirchhoff về dòng điện. Do quy ước các dòng điện có chiều đi vào nút N nên khi dòng mang giá trị âm nghĩa là thực tế dòng đó có chiều đi ra khỏi nút N.

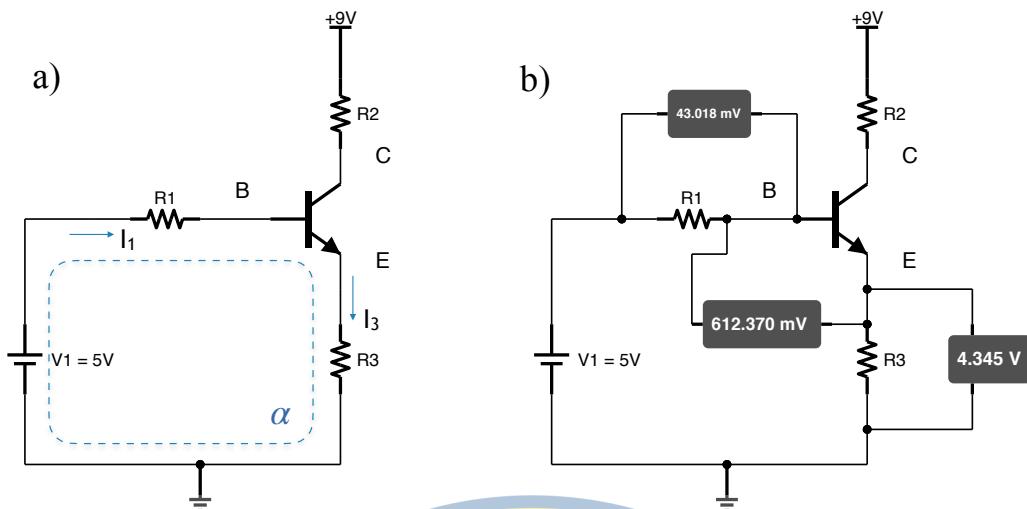
D.1.2 Định luật Kirchhoff về điện áp

Định luật Kirchhoff về điện áp (*Kirchhoff's Voltage Law - KVL*) được phát biểu như sau:

Trong một vòng kín, tổng sức động bằng tổng sụt áp trên các phần tử có trong vòng kín đó.

Ví dụ D.2. Cho mạch điện như hình D.2(a).

Hãy viết phương trình KVL cho vòng α.



Hình D.2: a) Vòng kín α trong một mạch điện và b) Kết quả mô phỏng.

Hình D.2(a) minh họa vòng kín α trong mạch điện gồm nguồn điện áp V_1 , điện trở R_1 , điện trở R_3 , tiếp giáp B-E của transistor. Khi này định luật Kirchhoff về áp được viết dưới dạng biểu thức cụ thể như sau:

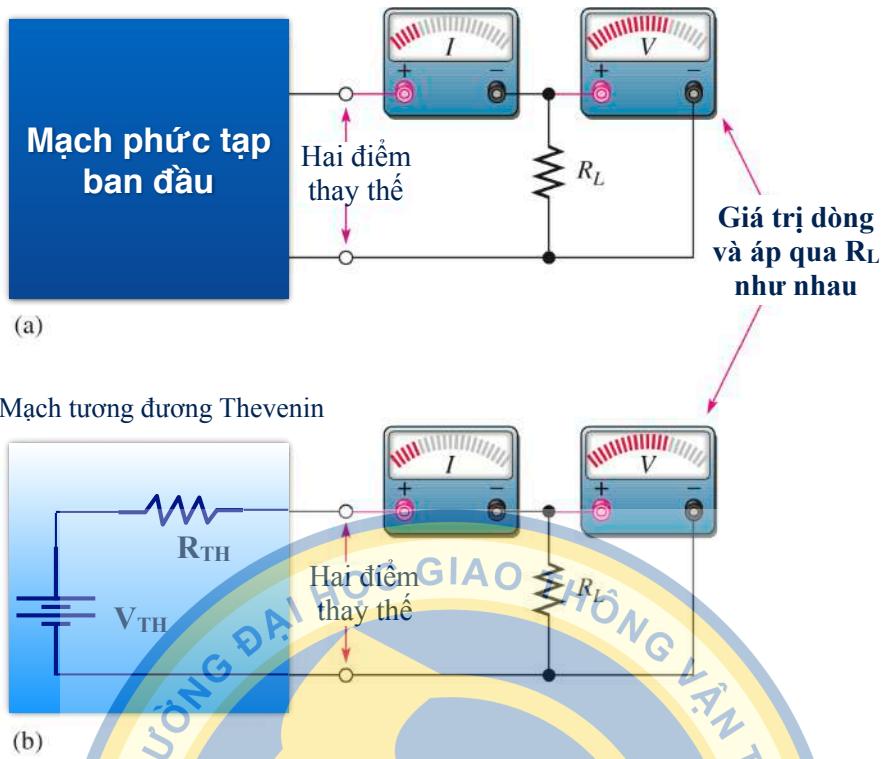
$$V_1 = I_1 R_1 + V_{BE} + I_3 R_3$$

Kết quả mô phỏng được thể hiện trong hình D.2(b) đã chứng minh cho biểu thức trên.

D.2 ĐỊNH LÝ THEVENIN

Leon Charles Thevenin (1857–1926) là nhà khoa học người Pháp đã đưa ra một cách thức thay thế một phần mạch điện phức tạp thành một phần mạch điện đơn giản, gọi là định lý Thevenin.

Hình D.3 mô tả việc thay thế mạch phức tạp bằng đoạn mạch Thevenin và cách xác định V_{TH} và R_{TH} . Khi thay thế mạch phức tạp thì tác động của mạch lên các phần tử còn lại phải không đổi, trong trường hợp này dòng và áp qua R_L là như nhau.



Hình D.3: Mạch tương đương Thevenin được sử dụng để thay thế một đoạn mạch phức tạp.

Nội dung định lý Thevenin

Trong một mạch điện, có thể thay thế một phần mạch bằng một mạch tương đương chỉ bao gồm một nguồn điện áp V_{TH} nối tiếp với một điện trở R_{TH} được xác định như sau:

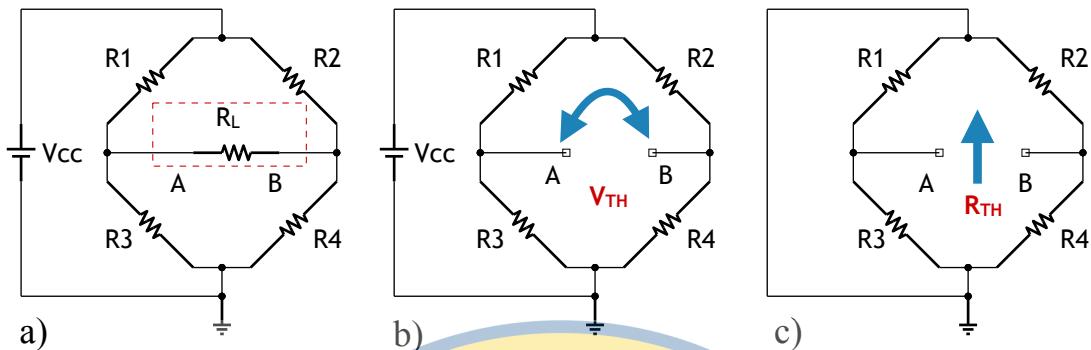
- + Điện áp Thevenin V_{TH} là điện áp hở mạch giữa hai điểm thay thế;
- + Điện trở Thevenin R_{TH} là tổng trở giữa hai điểm này trong điều kiện tất cả các nguồn áp đều ngắn mạch; các nguồn dòng đều hở mạch.

Ví dụ D.3. Cho mạch điện như hình D.4(a), biết nguồn $V_{CC} = 24\text{ V}$, các điện trở $R_1 = 330\Omega$, $R_2 = 680\Omega$, $R_3 = 560\Omega$, $R_4 = 680\Omega$ và $R_L = 1\text{k}\Omega$.

Hãy xác định dòng và áp qua điện trở R_L .

Bài giải:

Để xác định dòng và áp qua điện trở R_L áp dụng định lý Thevenin cho toàn bộ đoạn mạch còn lại sau khi tách R_L tại điểm A và B.



Hình D.4: a) Mạch ban đầu, b) Mạch xác định V_{TH} và c) Mạch xác định R_{TH} .

Hình D.4(b) cho thấy điện áp V_{TH} chính là điện áp giữa hai điểm A và B và được tính theo biểu thức sau:

$$V_{TH} = V_A - V_B = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \times V_{CC} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \times V_{CC} = 5,32 \text{ V}$$

Hình D.4(c) cho thấy điện trở R_{TH} chính là điện trở nhin từ phía giữa hai điểm A và B sau khi ngắn mạch V_{CC} . Khi đó sẽ thấy cặp điện trở (R_1 song song với R_3) và nối tiếp với cặp điện trở (R_2 song song với R_4). R_{TH} được tính theo biểu thức sau:

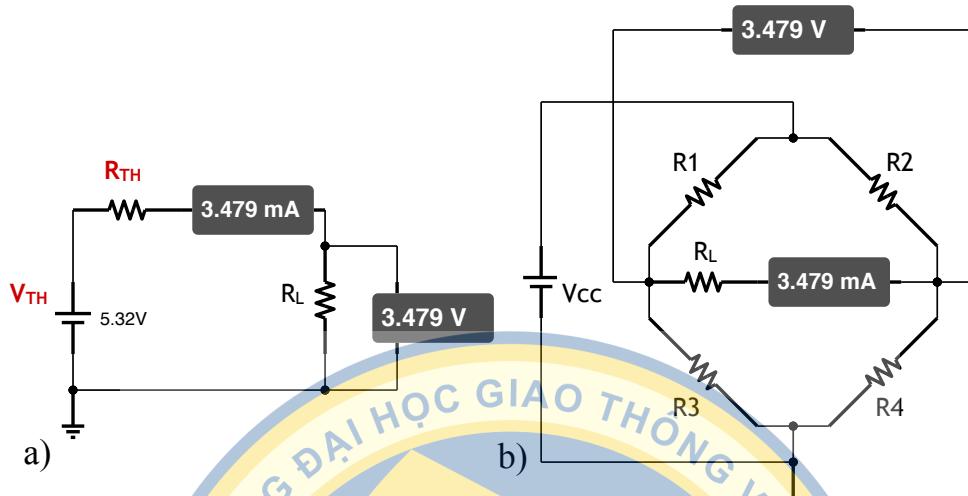
$$R_{TH} = \frac{R_1 \times R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \times R_4}{R_2 + R_4} = 529 \Omega$$

Sau khi xác định được V_{TH} và R_{TH} thì mạch ban đầu trở thành rất đơn giản như hình D.5(a). Lúc này có thể dễ dàng xác định được sút áp và dòng qua điện trở R_L theo biểu thức sau:

$$V_{R_L} = \frac{R_L}{R_{TH} + R_L} \times V_{TH} = 3,48 \text{ V}$$

$$I_{R_L} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L} = 3,48 \text{ mA}$$

Các kết quả trên hoàn toàn phù hợp với kết quả mô phỏng với mạch tương đương Thevenin trong hình D.5(a) và mạch ban đầu phức tạp như thể hiện trong hình D.5(b).



Hình D.5: Kết quả mô phỏng với a) Dùng mạch tương đương Thevenin và b) Mạch ban đầu.

D.3 NGUYỄN LÝ XẾP CHỒNG

Trong nhiều mạch điện tử có nhiều hơn một nguồn điện áp hay dòng điện. Khi này nếu phân tích mạch dưới tác động của tất cả các nguồn thì sẽ dẫn tới tính toán phức tạp nên cách tối ưu là áp dụng nguyên lý xếp chồng.

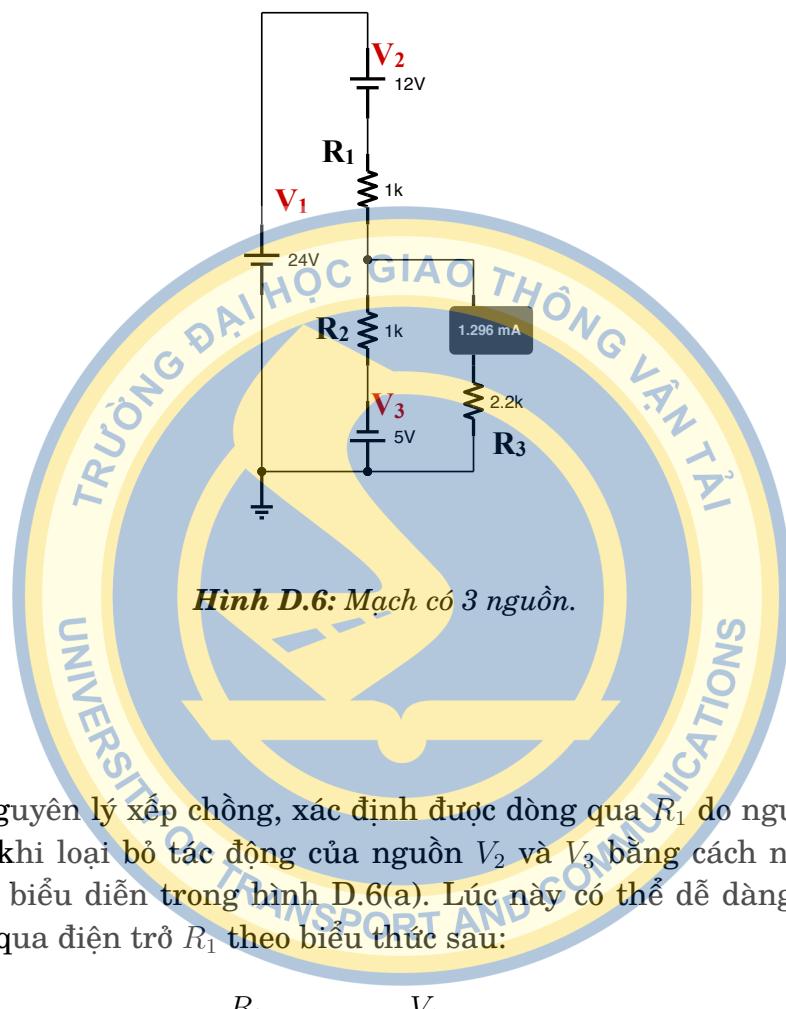
Nội dung

Trong một mạch tuyến tính có nhiều nguồn tác động thì tổng tác động của các nguồn lên một phần tử sẽ bằng tổng các tác động từ từng nguồn riêng rẽ trong khi các nguồn khác bị thay thế bởi nội trở của nó.

Chú ý là nguồn điện áp độc lập có nội trở lý tưởng là bằng 0 nên sẽ bị coi là ngắn mạch trong khi nguồn dòng độc lập có nội trở bằng ∞ nên nó bị coi là hở mạch.

Ví dụ D.4. Cho mạch điện như hình vẽ trong hình D.6.

Hãy tính dòng qua điện trở R_3 .



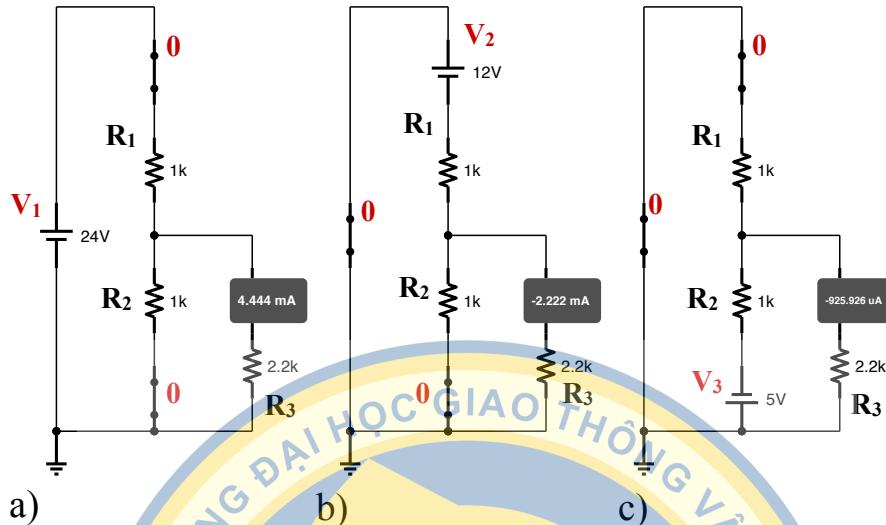
Bài giải:

Áp dụng nguyên lý xếp chồng, xác định được dòng qua R_1 do nguồn V_1 gây nên trong khi loại bỏ tác động của nguồn V_2 và V_3 bằng cách ngắn mạch chúng như biểu diễn trong hình D.6(a). Lúc này có thể dễ dàng xác định được dòng qua điện trở R_1 theo biểu thức sau:

$$I_{1R3} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \times \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = 4,444 \text{ mA}$$

Tương tự, áp dụng nguyên lý xếp chồng, xác định được dòng qua R_1 do nguồn V_2 gây nên trong khi loại bỏ tác động của nguồn V_1 và V_3 bằng cách ngắn mạch chúng như biểu diễn trong hình D.6(b). Lúc này có thể xác định được dòng qua điện trở R_1 theo biểu thức sau:

$$I_{2R3} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \times \frac{-V_2}{R_1 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = -2,222 \text{ mA}$$



Hình D.7: a) Chỉ xét nguồn V_1 , b) Chỉ xét nguồn V_2 và c) Chỉ xét nguồn V_3 .

Cuối cùng, xác định được dòng qua R_1 do nguồn V_3 gây nên trong khi loại bỏ tác động của nguồn V_1 và V_2 bằng cách ngắn mạch chúng như biểu diễn trong hình D.6(c). Lúc này có thể xác định được dòng qua điện trở R_1 theo biểu thức sau:

$$I_{3R3} = \frac{R_1}{R_1 + R_3} \times \frac{-V_3}{R_2 + \frac{R_1 * R_3}{R_1 + R_3}} = -0,926 \text{ mA}$$

Vậy dòng qua R_1 do cả 3 nguồn cùng tác động là:

$$I_{R_3} = I_{1R3} + I_{2R3} + I_{3R3} = 1,296 \text{ mA}$$

Kết quả trên hoàn toàn phù hợp với kết quả thu được trên dụng cụ đo của chương trình mô phỏng, xem lại hình D.6.

Tài liệu tham khảo

- [1] Đào Thanh Toản, Nguyễn Thúy Bình, Hồ Thành Trung. **Giáo trình Kỹ thuật điện tử**, NXB Giao thông Vận tải, 2017.
- [2] Phạm Thanh Huyền, Đỗ Việt Hà. **Linh kiện điện tử cơ bản**, NXB Thông tin và Truyền thông, 2009.
- [3] Thomas L. Floyd, David M. Buchla. **Electronics fundamental circuits, devices and applications**, Pearson Education Limited, Eighth edition, 2014.
- [4] Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky. **Electronic Devices and Circuit Theory**, Pearson Education Limited, 11th edition, 2013.
- [5] Donald A Neamen. **Electronics Circuit Analysis and Design**, McGraw-Hill 2nd edition, 2001.
- [6] Hernando Lautaro Fernandez-Canque. **Analog Electronics Applications (fundamentals of design and analysis)**, CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [7] Charles K. Alexander and Matthew N. O. Sadiku **Fundamentals of Electric Circuits**, McGraw-Hill, 4th edition, 2009.
- [8] Trần Thu Hà, Trương Thị Bích Ngọc, Nguyễn Thị Lưỡng, Bùi Thị Tuyết Đan, Phù Thị Ngọc Hiếu, Dương Thị Cẩm Tú. **Điện tử Cơ Bản**, NXB Đại học Quốc Gia Thành Phố Hồ Chí Minh, 2013.
- [9] Phạm Minh Hà. **Kỹ thuật Mạch Điện tử**, NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2008.
- [10] Gibilisco, Stan. **Teach yourself electricity and electronics**. McGraw-Hill, Inc., 2006.
- [11] Nguồn Internet.

-
- [12] <https://history-computer.com/ModernComputer/Basis/transistor.html>
 - [13] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>, truy cập ngày 08/02/2019.
 - [14] <http://www.resistorguide.com/metal-film-resistor/>, truy cập ngày 08/02/2019.
 - [15] <https://industrial.panasonic.com/ww/products/semiconductors>, truy cập ngày 08/02/2019.





KTDTTT * 353