

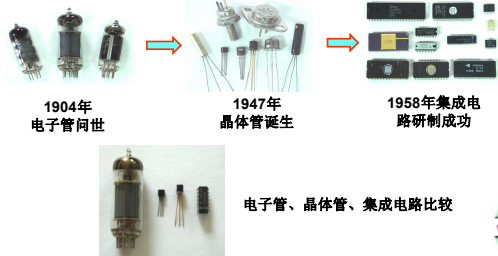
电子技术概貌:

电子技术应用领域:

- 广播通信: 发射机、接收机、扩音、录音、程控交换机、电话、手机
- 网络: 路由器、ATM交换机、收发器、调制解调器
- 工业: 钢铁、石油化工、机加工、数控机床
- 交通: 飞机、火车、轮船、汽车
- 军事: 雷达、电子导航
- 航空航天: 卫星定位、监测
- 医学: γ 刀、CT、B超、微创手术
- 消费类电子: 家电(空调、冰箱、电视、音响、摄像机、照相机、电子表)、电子玩具、各类报警器、保安系统

电子器件发展历程:

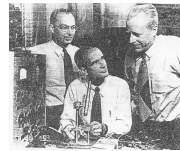
电子管→晶体管→集成电路→大规模集成电路→超大规模集成电路



- 1947年 贝尔实验室——第一只晶体管
- 1958年 德州仪器公司——第一块集成电路
- 1969年 大规模集成电路
- 1975年 超大规模集成电路

第一片集成电路只有4个晶体管, 而1997年一片集成电路中有40亿个晶体管。有科学家预测, 集成度还将按10倍/6年的速度增长, 到2015或2020年达到饱和。

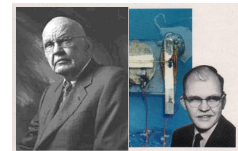
现代电子器件的鼻祖



第一只晶体管的发明者

(by John Bardeen, William Shockley and Walter Brattain in Bell Lab)

他们在1947年11月底发明了晶体管, 并在12月16日正式宣布“晶体管”诞生。1956年获诺贝尔物理学奖。巴因所做的超导研究于1972年第二次获得诺贝尔物理学奖。

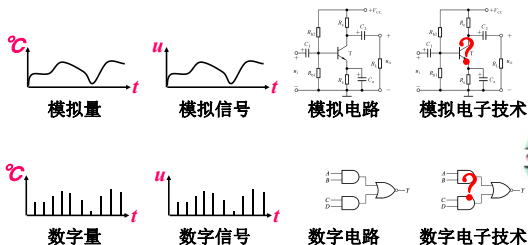


第一个集成电路及其发明者 (Jack Kilby from TI)

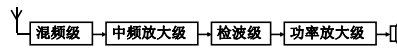
1958年9月12日, 在德州仪器公司的实验室里, 实现了把电子器件集成在一块半导体材料上的构想。42年以后, 2000年获诺贝尔物理学奖。“为现代信息技术奠定了基础”。

模电与数电:

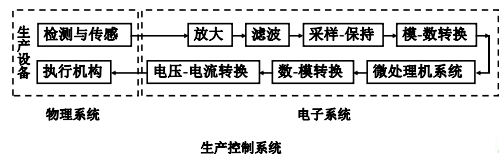
自然界中的物理量有两类: 模拟量和数字量

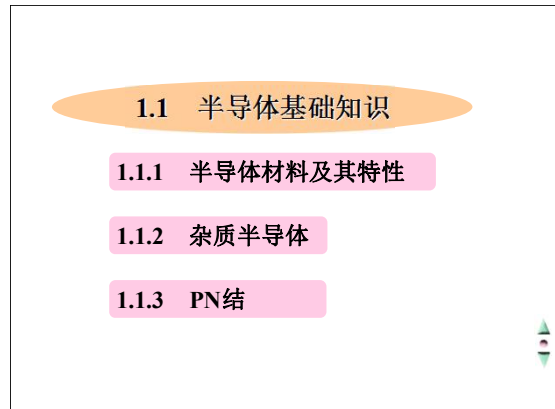
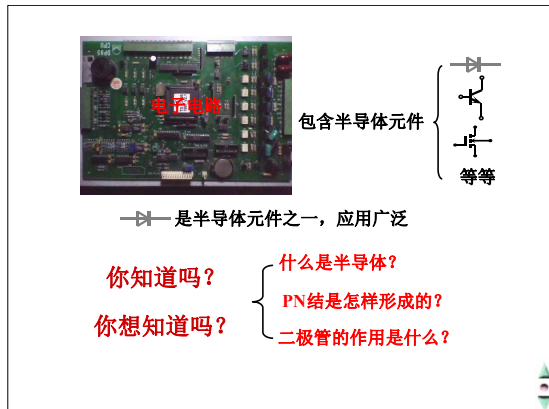
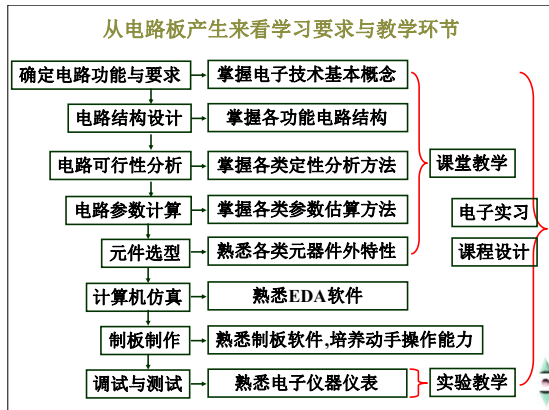


电子系统:



超外差式无线电收音机原理框图





1.1.1 半导体材料及其特性

从导电性来分类, 物体可分为:

导体、绝缘体、半导体

半导体 — 导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。

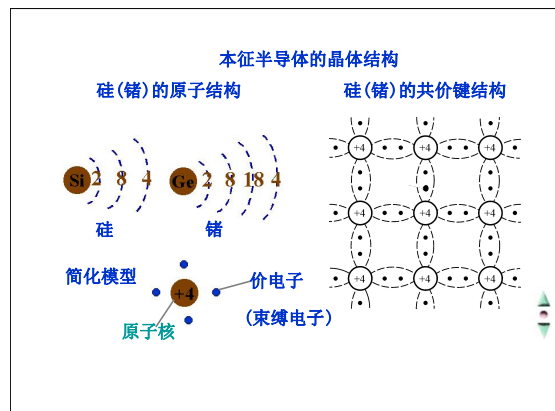
1. 半导体的特殊性质——热敏性、光敏性、掺杂性

2. 本征半导体的共价键结构

本征半导体 — 纯净的半导体。如硅、锗单晶体。

共价键结构 —

共价键 — 相邻原子共有价电子所形成的束缚。



3. 本征半激发与复合

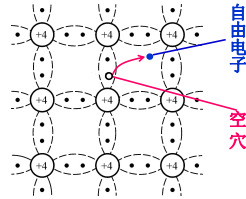
本征激发:

在室温或光照下价电子获得足够能量摆脱共价键的束缚成为自由电子,并在共价键中留下一个空穴的过程。

复合:

自由电子和空穴在运动中相遇重新结合成对消失的过程。

本征激发与复合是一对相反的运动!



载流子 — 运载电荷的粒子 (带电粒子)

半导体中有两种载流子——自由电子和空穴

自由电子带负电,空穴带正电。

两种载流子的运动:

自由电子 (在共价键以外) 的运动

空穴 (在共价键以内) 的运动

电子电流、空穴电流——

本征半导体中的电流是两个电流之和

4. 温度对本征半导体中载流子的影响

载流子的浓度随温度的升高而增加。

动态平衡——本征激发与复合运动最终要达到动态平衡。

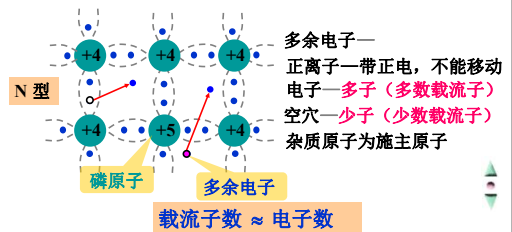
结论:

1. 本征半导体中电子空穴 成对出现,且数量少;
2. 半导体中有 电子和空穴 两种载流子参与导电;
3. 本征半导体导电能力弱,并与 温度有关。

1.1.2 杂质半导体

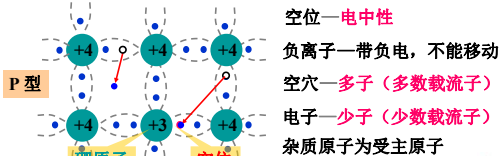
1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的 5 价杂质元素



2. P 型半导体

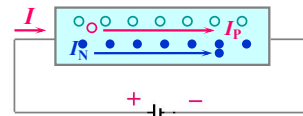
在本征半导体中掺入微量的 3 价杂质元素



区分N型半导体和P型半导体!

3. 杂质半导体中载流子的浓度

4. 杂质半导体的导电作用

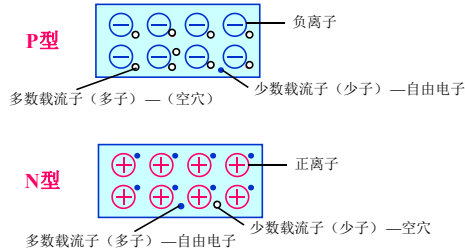


$$I = I_P + I_N$$

$$N \text{ 型半导体 } I \approx I_N$$

$$P \text{ 型半导体 } I \approx I_P$$

5. P型与N型半导体的简化示意图



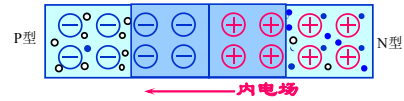
【问题引导1】负离子、或正离子是怎么形成的？

【问题引导2】N型、P型半导体多子是什么，少子是什么？

1.1.3 PN 结

【问题引导】PN结是怎么形成的？

1. PN 结(PN Junction)的形成



扩散运动—由于载流子浓度差而引起的运动

复合—使交界面形成空间电荷区

漂移运动—载流子在电场力作用下的运动

空间电荷区、耗尽层、阻挡层、PN结

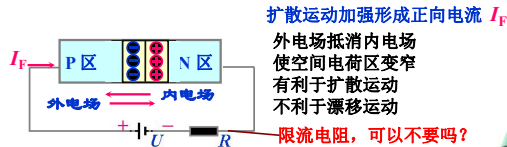
扩散和漂移达到动态平衡：

扩散电流 等于 漂移电流， 总电流 $I = 0$ 。

2. PN 结的单向导电性

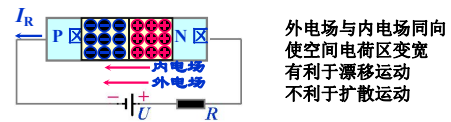
(1) PN结外加正向电压时处于导通状态

正向电压、正向接法、正向偏置、正偏



(2) PN结外加反向电压时处于截止状态

反向电压、反向接法、反向偏置、反偏



漂移运动加强形成反向电流 I_R $I_R = I_{\text{少子}} \approx 0$

反向饱和电流 I_s —

PN 结的单向导电性：

正偏导通，呈小电阻，电流较大；

反偏截止，电阻很大，电流近似为零。

【问题引导】什么是PN结的单向导电性？

3. PN 结的伏安特性 PN结具有单向导电性！

$$I = I_s (e^{u/U_T} - 1)$$

反向饱和
和电流

温度
电压当量

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

玻尔兹曼
常数

电子电量

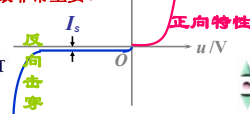
当 $T = 300 (27^\circ\text{C})$ ：

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

该常数非常重要！

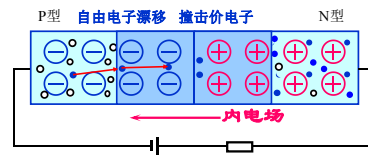
加正向电压时 $i \approx I_s e^{u/U_T}$

加反向电压时 $i \approx -I_s$

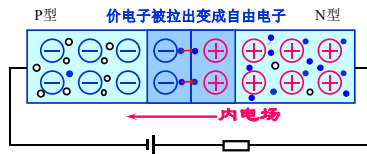


反向击穿，反向击穿电压 —

- **雪崩击穿**—当耗尽层宽度较宽时，耗尽层的电场使少子加快漂移速度，从而与共价键中的价电子相碰撞，把价电子撞出共价键，产生电子空穴对，载流子雪崩式地倍增，致使电流急剧增加。

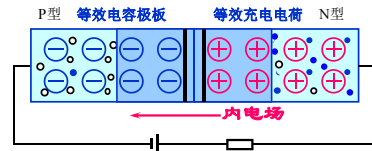


- **齐纳击穿**—当耗尽层宽度很小时，不大的反向电压就可以在耗尽层形成很强的电场，而直接破坏共价键，使价电子脱离共价键束缚，产生电子空穴对，致使电流急剧增加。



4. PN结的电容效应 $C_j = C_b + C_d$

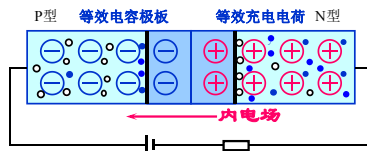
- 势垒电容 C_b —空间电荷区的宽度和空间电荷的数量随外加电压而变化，如同电容的充放电过程。
- 外加反向电压时，势垒电容占主导。



常把PN结当电容使用!

4. PN结的电容效应 $C_j = C_b + C_d$

- 扩散电容 C_d —PN结在正偏时，在外电场的作用下，靠近耗尽层交界面的地方，少子的浓度高，且向远离耗尽层的地方扩散。扩散区内电荷的积累与释放如同电容的充放电过程。
- 外加正向电压时，扩散电容占主导；



5. PN结的温度特性

无论是正偏还是反偏，当温度升高时，电流增加

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构类型

1.2.2 二极管的伏安特性

1.2.3 二极管的势垒电容与扩散电容

1.2.4 二极管的主要参数

1.2.5 二极管等效电路

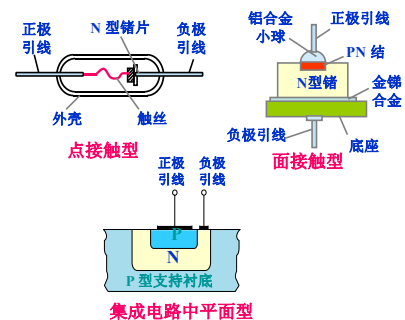
1.2.1 二极管的结构与类型

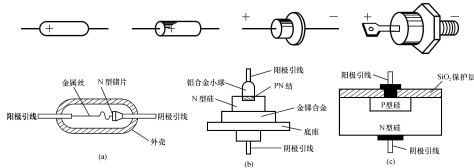
构成: PN 结 + 引线 + 管壳 = 二极管 (Diode)

符号: 阳极 阴极 阳极 A (anode) 阴极 C (cathode)

分类: 按材料分 { 硅二极管 锗二极管

按结构分 { 点接触型 面接触型 平面型

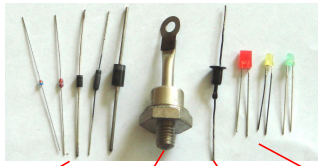




点接触型：结面积小，结电容小，故结允许的电流小，最高工作频率高。

面接触型：结面积大，结电容大，故结允许的电流大，最高工作频率低。

平面型：结面积可小，可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大。



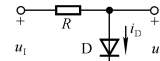
小功率二极管

大功率二极管

稳压二极管

发光二极管

1.2.2 二极管的伏安特性



1. 二极管结电流方程

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1)$$

反向饱和电流

温度电压当量

当 $T = 300 (27^\circ\text{C})$:

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

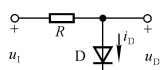
二极管实质就是一个PN结！

玻尔兹曼常数

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

电子电量

2. 二极管的伏安特性曲线



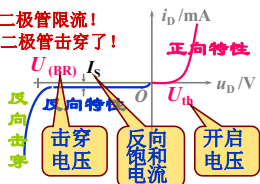
$0 < U < U_{th}$ 时, $i_D = 0$

$U > U_{th}$ 时, i_D 急剧上升

$|U_{(BR)}| > |U| > 0$ 时, $i_D = I_S$

$|U| > |U_{(BR)}|$ 时, 反向电流急剧增大 (反向击穿)

记得对二极管限流！
不要让二极管击穿了！



材料	开启电压 U_{th}	导通电压 $U_{D(on)}$	反向饱和电流
硅Si	0.5V	0.6~0.8V (通常取0.7V)	1μA以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V (通常取0.3V)	几十μA

反向击穿类型：

电击穿 — PN 结未损坏，断电即恢复。

热击穿 — PN 结烧毁。

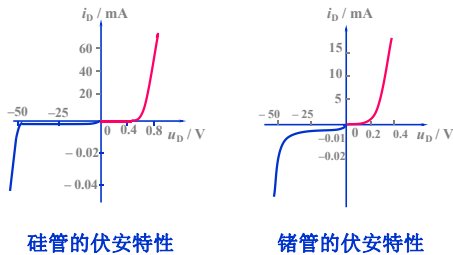
反向击穿原因：

齐纳击穿：反向电场太强，将电子强行拉出共价键。
(Zener) (击穿电压 $< 6 \text{ V}$ ，负温度系数)

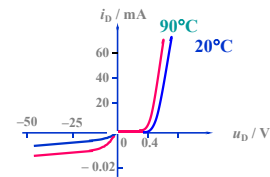
雪崩击穿：反向电场使电子加速，动能增大，撞击使自由电子数突增。

(击穿电压 $> 6 \text{ V}$ ，正温度系数)

击穿电压在 6 V 左右时，温度系数趋近零。



3. 温度对二极管特性的影响



T 升高时，

$U_{D(\text{on})}$ 以 $(2 \sim 2.5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 下降

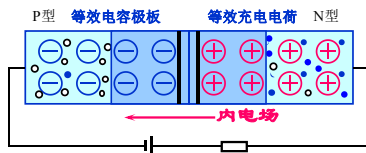
【问题引导】温度变化会导致半导体元件的哪些参数发生变化？

1.2.3 二极管的势垒电容与扩散电容

$$C_j = C_b + C_d$$

(1) 势垒电容 C_b —空间电荷区的宽度和空间电荷的数量随外加电压而变化，如同电容的充放电过程。

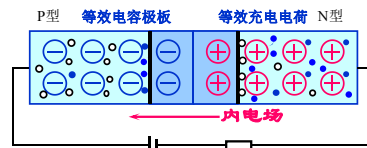
外加反向电压时，势垒电容占主导。



4. PN 结的电容效应 $C_j = C_b + C_d$

(2) 扩散电容 C_d —PN 结在正偏时，在外电场的作用下，靠近耗尽层交界面的地方，少子的浓度高，且向远离耗尽层的地方扩散。扩散区内电荷的积累与释放如同电容的充放电过程。

外加正向电压时，扩散电容占主导。



1.2.4 二极管的主要参数

直流参数：

1. I_F —最大整流电流
(最大正向平均电流)

2. U_{RM} —最高反向工作电压，为 $U_{(BR)}/2$

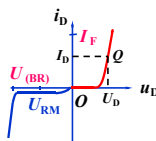
3. I_R —反向电流 (越小单向导电性越好)

4. R_D —直流电阻

交流参数：

1. r_d —交流电阻 $r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{du_D}{di_D} = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26}{I_D} (\Omega)$

2. f_M —最高工作频率 (超过时单向导电性变差)



影响工作频率的原因 — PN 结的电容效应



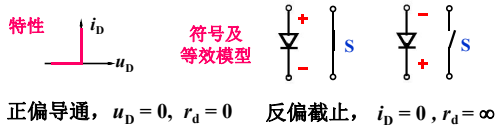
结论：

1. 低频时，因结电容很小，容抗很大，结电容对二极管影响很小。
2. 高频时，因结电容容抗减小，使结电容分流，导致二极管单向导电性变差。
3. 结面积小时结电容小，工作频率高。

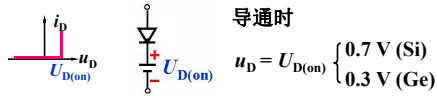
高频信号时，必须考虑二极管的电容效应！

1.2.5 二极管等效电路

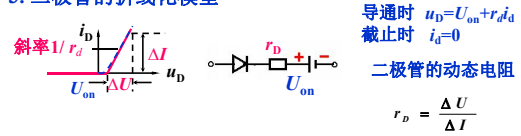
1. 理想二极管模型



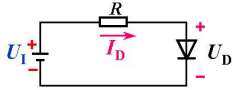
2. 二极管的恒压降模型 (理想二极管串联电压源模型)



3. 二极管的折线化模型



1.2.6 选择二极管限流电阻



步骤:

1. 设定工作电压 (如 0.7 V; 2 V (LED); U_Z)
2. 确定工作电流 (如 1 mA; 10 mA; 5 mA)
3. 根据欧姆定律求电阻 $R = (U_1 - U_D) / I_D$
(R 要选择标称值)

记得对二极管限流!

• 半导体二极管的型号 (知识扩充)

• 国家标准对半导体器件型号的命名举例如下:

- 2AP9
- 用数字代表同类型器件的不同型号
 - 用字母代表器件的类型, P代表普通管
 - 用字母代表器件的材料, A代表N型Ge
 - B代表P型Ge, C代表N型Si, D代表P型Si
 - 2代表二极管, 3代表三极管

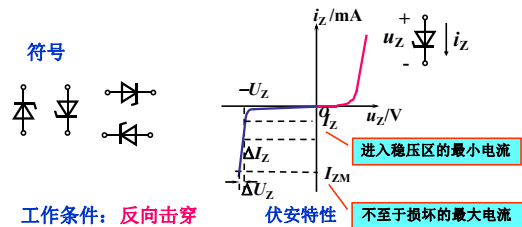
1.3 稳压二极管

1.3.1 稳压二极管的工作原理

1.3.2 稳压二极管的主要参数

1.3.3 稳压电路

1.3.1 稳压二极管的工作原理



【问题引导】稳压二极管的工作区在哪个区域?

稳压二极管起稳压作用是工作在反向击穿区!

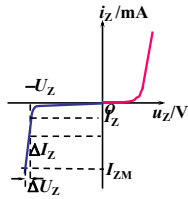
1.3.2 稳压二极管的主要参数

1. 稳定电压 U_Z
流过规定电流时
稳压管两端的反向电压值。

2. 稳定电流 I_Z
越大稳压效果越好
小于 I_Z 时不稳压。

3. 最大工作电流 I_{ZM} $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$
最大耗散功率 P_{ZM}

4. 动态电阻 r_Z 几 Ω ~ 几十 Ω
 $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ 越小稳压效果越好。

5. 稳定电压温度系数 C_T

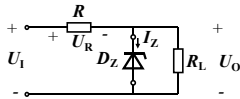
$$C_T = -\frac{\Delta U_Z}{U_Z} \times 100\%$$

$U_Z < 4 \text{ V}$, $C_{TV} < 0$ (为齐纳击穿) 具有负温度系数;

$U_Z > 7 \text{ V}$, $C_{TV} > 0$ (为雪崩击穿) 具有正温度系数;

$4 \text{ V} < U_Z < 7 \text{ V}$, C_{TV} 很小。

1.3.3 稳压电路



稳压原理: $U_1 \uparrow \rightarrow U_O \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$

记得让稳压二极管工作在反向击穿区! 但有限流!

1.4 二极管典型应用电路

1. 二极管的整流与检波

2. 二极管限幅

3. 二极管钳位电路

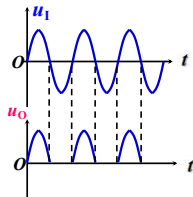
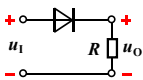
4. 二极管在电路中的应用

5. 稳压管基本稳压电路

1. 二极管整流

例1.1(a) u_i 为正弦波输入信号, 试画出 u_o 的波形。

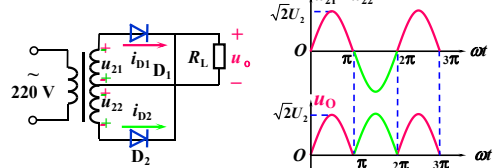
半波整流



【问题引导】当 u_i 幅值只有几毫伏时, 也能整流吗?

例1-1(b) u_i 为正弦波输入信号, 试画出 u_o 的波形。

全波整流

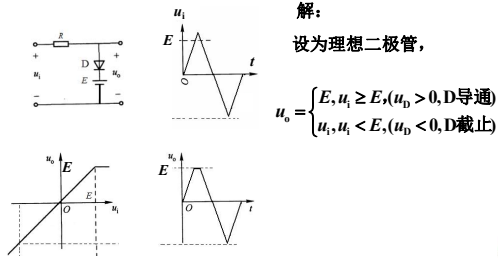


正半周是利用哪一交流电压整流?

负半周是利用哪一交流电压整流?

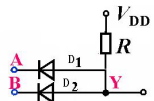
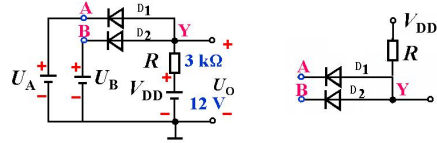
2. 二极管限幅

例1-2 已知电路和 u_i ，试画出电压传输特性和 u_o 的波形。



3. 二极管逻辑电路-二极管的优先导通

例1-3 二极管构成“门”电路，设 D_1 、 D_2 导通压降为 $0.7V$ ，当输入电压 U_A 、 U_B 为低电压 $0V$ 和高电压 $3V$ 的不同组合时，求输出电压 U_O 的值。



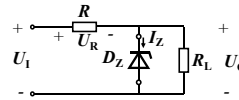
真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

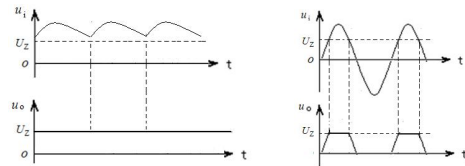
输入电压		二极管		输出 电压
U_A	U_B	D_1	D_2	
0V	0V	正偏 导通	正偏 导通	0.7V
0V	3V	正偏 导通	反偏 截止	0.7V
3V	0V	反偏 截止	正偏 导通	0.7V
3V	3V	正偏 导通	正偏 导通	3.7V

4. 稳压管稳压电路

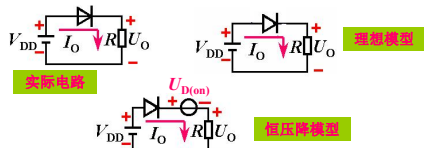
例1-4 稳压电路和波形如图所示，画出输出电压波形。



解：稳压原理： $U_1 \uparrow \rightarrow U_O \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$



例A 下图电路中，硅二极管， $R = 2k\Omega$ ，分别用二极管理想模型和恒压降模型求出 $V_{DD} = 2V$ 和 $V_{DD} = 10V$ 时 I_O 和 U_O 的值。



[解] 1. $V_{DD} = 2V$

理想 $U_O = V_{DD} = 2V$ $I_O = V_{DD} / R = 2 / 2 = 1 (mA)$

恒压降 $U_O = V_{DD} - U_{D(on)} = 2 - 0.7 = 1.3 (V)$

$I_O = U_O / R = 1.3 / 2 = 0.65 (mA)$

2. $V_{DD} = 10V$

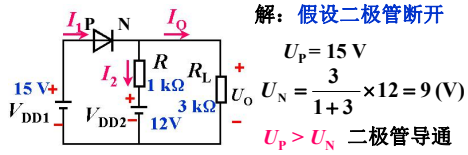
理想 $I_O = V_{DD} / R = 10 / 2 = 5 (mA)$

恒压降 $U_O = 10 - 0.7 = 9.3 (V)$

$I_O = 9.3 / 2 = 4.65 (mA)$

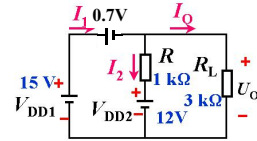
V_{DD} 大，
采用理想模型
 V_{DD} 小，
采用恒压降模型

例B 试求电路中电流 I_1 、 I_2 、 I_O 和输出电压 U_O 的值。



采用恒压降模型，二极管等效为 0.7 V 的恒压源

记得先判断：二极管导通吗？



$$U_O = V_{DD1} - U_{D(\text{on})} = 15 - 0.7 = 14.3 \text{ (V)}$$

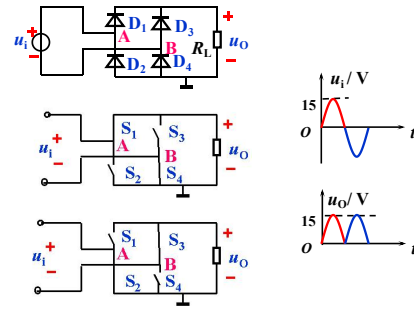
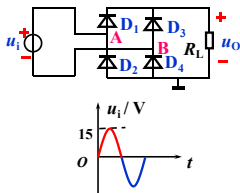
$$I_O = U_O / R_L = 14.3 / 3 = 4.8 \text{ (mA)}$$

$$I_2 = (U_O - V_{DD2}) / R = (14.3 - 12) / 1 = 2.3 \text{ (mA)}$$

$$I_1 = I_O + I_2 = 4.8 + 2.3 = 7.1 \text{ (mA)}$$

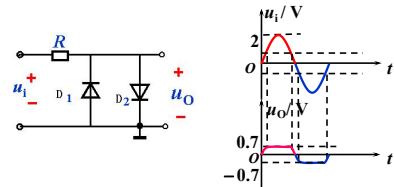
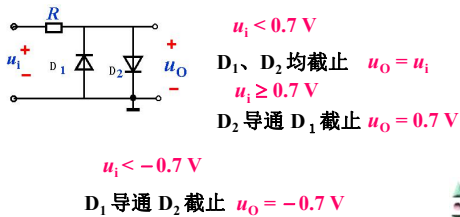
例C 画出硅二极管构成的桥式整流电路在 $u_i = 15\sin\omega t$ (V) 作用下输出 u_O 的波形。

(按理想模型)



例D $u_i = 2 \sin \omega t$ (V)，分析二极管的限幅作用。

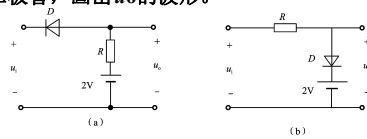
u_i 较小，宜采用恒压降模型



思考题：

【问题引导】若在 D_1 、 D_2 支路各串联恒压源，输出波形如何？

练习：已知 $u_i = 4 \sin \omega t$ (V)，二极管为理想二极管，画出 u_o 的波形。



1.5 辅修内容

1.5.1 发光二极管

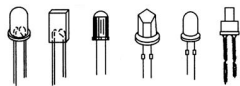
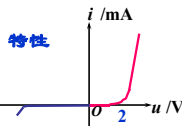
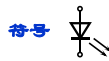
1.5.2. 光电二极管

1.5.1 发光二极管 LED (Light Emitting Diode)

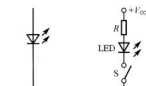
1. 符号和特性

工作条件：正向偏置

一般工作电流几十 mA，
导通电压 (1~2) V



外形



符号

应用

2. 主要参数

电学参数： I_{FM} ， $U_{(BR)}$ ， I_R

光学参数：峰值波长 λ_p ，亮度 L ，光通量 Φ

发光类型：可见光：红、黄、绿 不可见光：红外光

显示类型：普通 LED，七段 LED，点阵 LED



发光二极管

型号：5133D

规格： $\phi 5$
红光

符号：[Symbol]



发光二极管

$\phi 8$ 双色

符号：[Symbol]

1.5.2 光电二极管

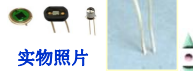
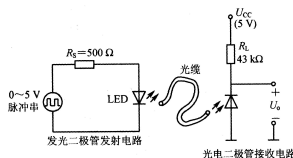
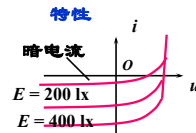
1. 符号和特性

工作条件：反向偏置

2. 主要参数

电学参数：暗电流，光电流，最高工作范围

光学参数：光谱范围，灵敏度，峰值波长



实物照片

小结

一、两种半导体和两种载流子

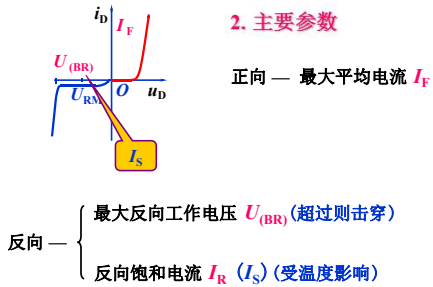
两种载流子 { 电子 — 自由电子 两种 N 型 (多电子)
 { 空穴 — 价电子 半导体 P 型 (多空穴)

二、二极管

1. 特性 — 单向导电

正向电阻小 (理想为 0)，反向电阻大 (∞)。

$$i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \begin{cases} u_D > 0, & i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \\ u_D < 0, & I = -I_S \approx 0 \end{cases}$$



3. 二极管的等效模型

理想模型 (大信号状态采用)

正偏导通 电压降为零 相当于理想开关闭合

反偏截止 电流为零 相当于理想开关断开

恒压降模型

正偏电压 $\geq U_{D(on)}$ 时导通 等效为恒压源 $U_{D(on)}$

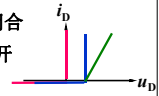
否则截止, 相当于二极管支路断开

硅管: $U_{D(on)} = (0.6 \sim 0.8) \text{ V}$ 估算时取 **0.7 V**

锗管: $(0.2 \sim 0.4) \text{ V}$ **0.3 V**

折线近似模型

相当于有内阻的恒压源 $U_{D(on)}$



4. 二极管的分析方法

图解法

微变等效电路法

5. 特殊二极管

	工作条件	主要用途
稳压二极管	反 偏	稳 压
发光二极管	正 偏	发 光
光电二极管	反 偏	光电转换