



清华大学
Tsinghua University

“模电”欢迎大家！



清华大学自动化系
耿华

课程介绍

➤ 网络学堂

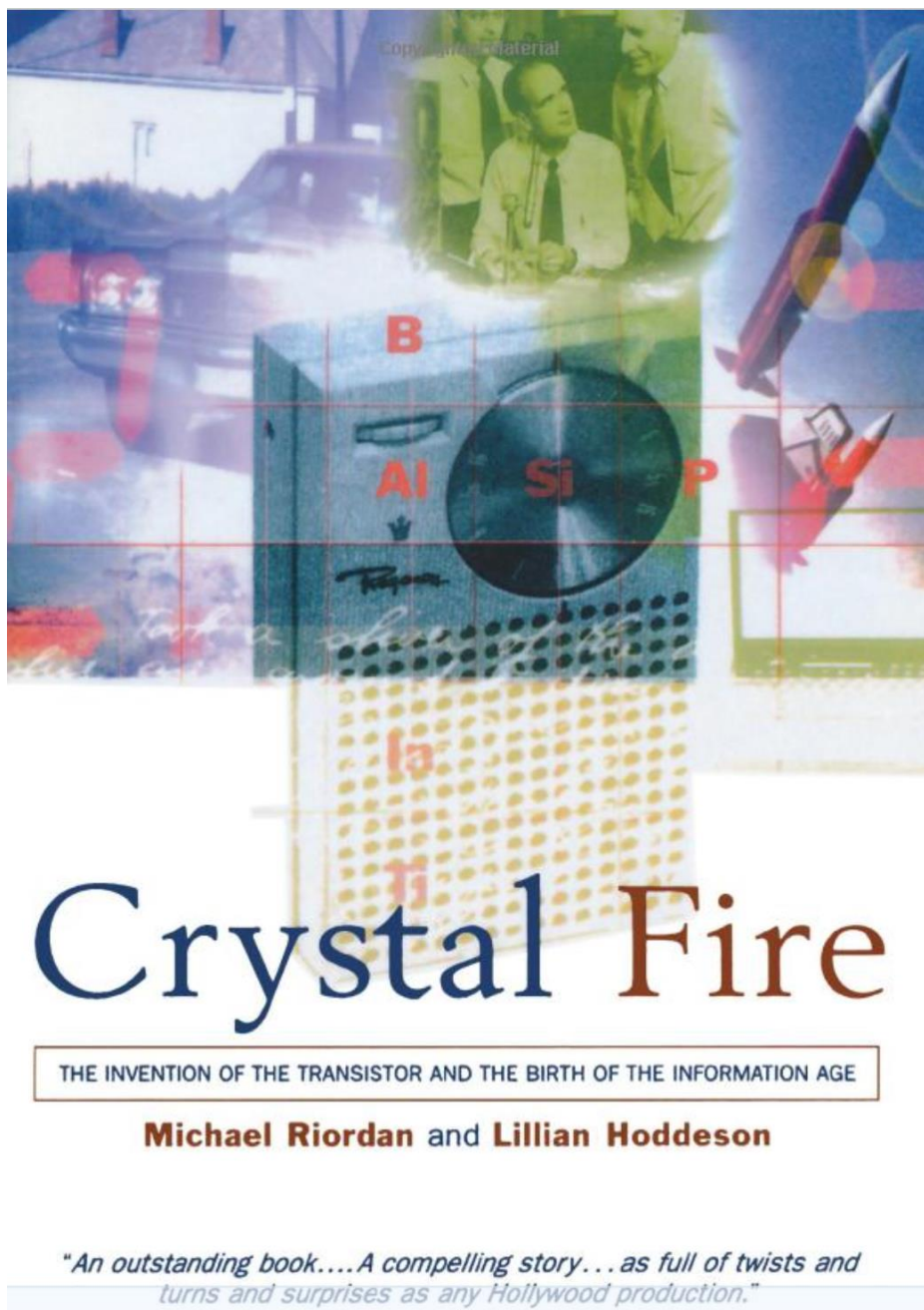
- 教学日历、课件、课外阅读资料
- 作业发布、通知
- 仿真报告提交
- 提问和讨论

➤ 教学日历

- 教学进度和重点
- 课程目的和要求
- 作业要求及提交
- 答疑时间
- 考试及成绩
- 参考资料

➤ 学习要求

- 主动思考和提问
- 上课、作业



Crystal Fire (1998.12.17)

--The invention of the transistor and the birth of the information age

Comments:

"Without the invention of the transistor, I'm quite sure that the PC would not exist as we know it today." —Bill Gates

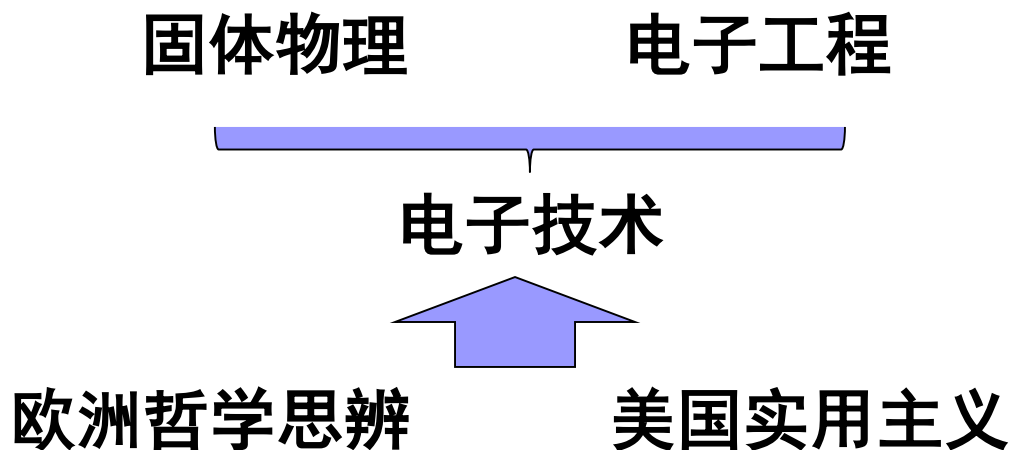
Keywords:

半导体，晶体管，贝尔实验室，电子技术，摩尔定律，计算机，数字化，信息化，智能化

0.1 电子技术的发展及应用

- 什么是电子技术？

研究电子的特性和行为以及电子器件应用的技术

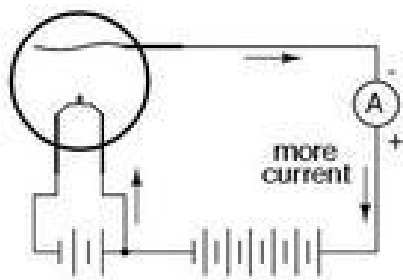


电子技术是两种思维模式(文化)碰撞的必然结果，
体现了理论联系实践的魅力

➤ 电子技术的发展历史

● 前夜：

- 1883 “爱迪生效应” by Edison (美国发明大王)
- 1897 电子, by Thomson (英国物理学家, 诺贝尔物理学奖 1906)
- 1904 真空二极管, by J.A. Fleming (英国物理学家)
- 1907 真空三极管, by De Forest Lee (美国发明家)



爱迪生效应



1904 电子管



1907 真空管

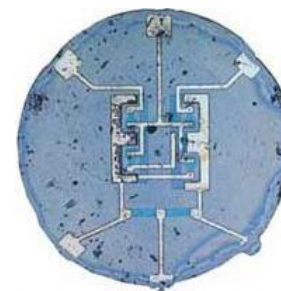
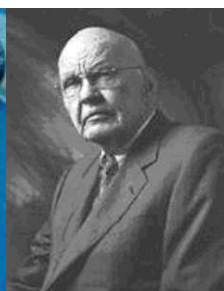
➤ 电子技术的发展历史

● 黎明:

- 1947 晶体管, by Brattain (美国实验物理学家), Bardeen (美国理论物理学家), Shockley (美国理论物理学家) (BELL Lab, 诺贝尔物理学奖1956)
- 1958 集成电路 (IC), by Kilby (TI, 诺贝尔物理学奖2000), Noyce (Fairchild, Intel创始人之一)
- 1960 金属氧化物场效应管 (MOSFET), by Kahng, Atalla (BELL Lab)



第一只晶体管的发明者



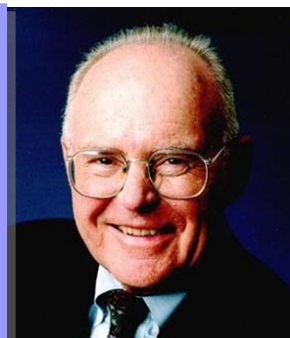
第一个集成电路及其发明者: Kilby (左), Noyce (右)

➤ 电子技术的发展历史

● 白昼：

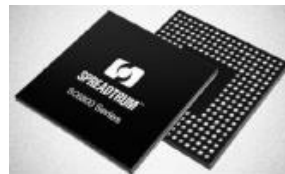
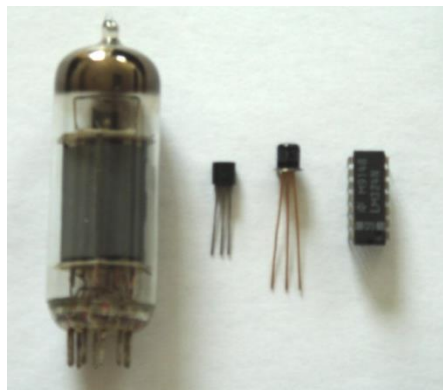
- 1969 大规模集成电路 (LSI), 集成度达 10^3 器件/芯片
- 1970 VLSI(超大规模), 10^5 器件/芯片
- 1980's ULSI(特大规模), 10^6 器件/芯片
- 1995 GLSI(巨大规模, 吉规模), 10^9 器件/芯片 (0.5 μ s技术)
- 2020 1.713亿BJT/mm² (5nm技术), 三星/台积电

摩尔定律：集成电路上可容纳的晶体管数目，约每隔18个月便会增加一倍，性能也将提升一倍；2020年左右趋于饱和。—— Golden Moore (Intel CEO)

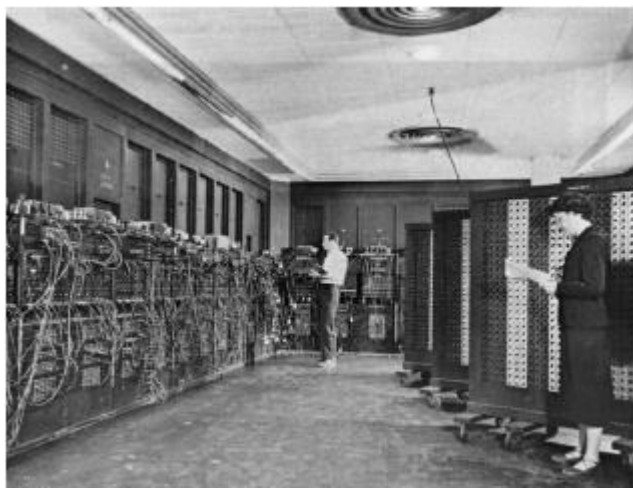


学习电子技术方面的课程需时刻关注电子技术的发展！

电子技术的发展： 电子管→半导体管→集成电路



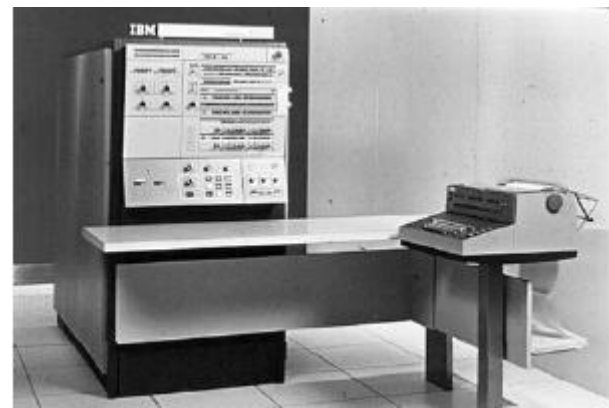
电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路



1946- Pennsylvania



1957- BELL Lab



1964- IBM

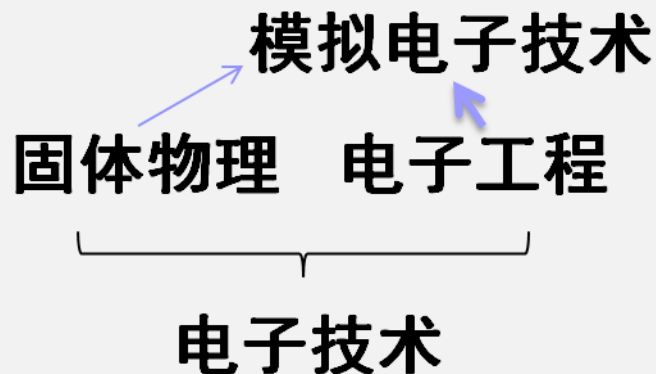
计算机：分别由电子管、晶体管、集成电路制成

0.2 关于本课程

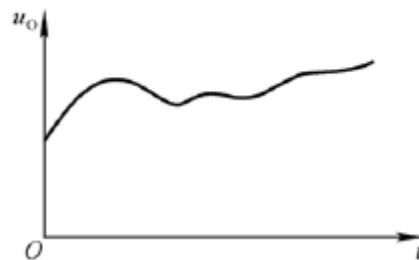
一、基本概念

■ 电信号、模拟信号与数字信号

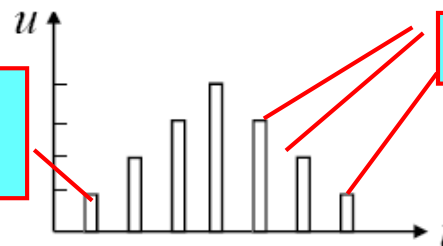
- 电信号：随时间变化的电压或电流，可用波形或函数表示
- 模拟信号(Analog Signal)：在时间和数值上均连续的电信号，如声音、亮度、颜色、温度、压力、流量等
- 数字信号(Digital Signal)：在时间或数值上均离散的电信号，如脉冲信号、开关信号



→ 了解半导体电子特性，着重于模拟电子器件及应用



模拟信号



“1”的电压当量

“1”的倍数

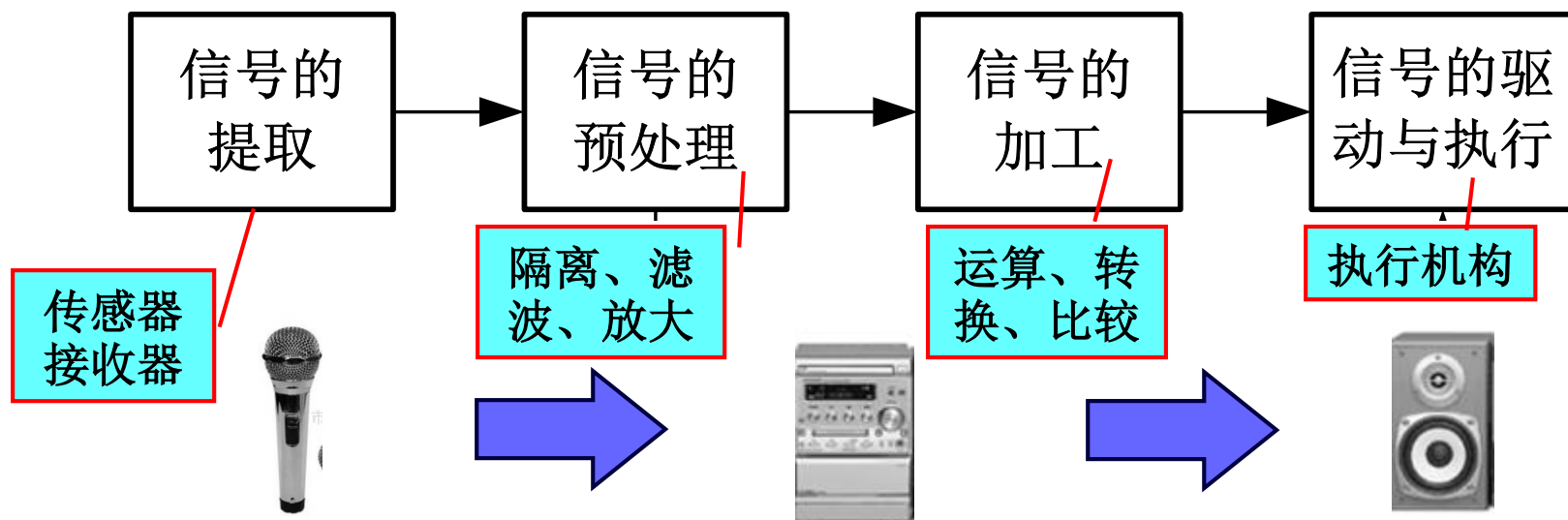
数字信号

■ 模拟电路 (Analog Electronic Circuit):

- 模拟电路是用于产生或处理模拟信号的电子电路，其最基本的功能为放大

■ 电子系统 (Electronic System):

- 由电子元件或部件组成，能产生、传输、处理电信号及信息的完整的电子装置



模拟电子系统的组成

二、课程特点

➤ 工程性

- 定性分析——证明实际工程的可行性
- 定量估算——实际工程允许误差；半导体器件具有非线性、温度敏感性和参数分散性
- 合理设计——实际工程没有最好的方案，只有最合适的方案

➤ 实践性

- 仿真：Multisim
- 搭建电路：面包板
- 测试电路：实验

三、学习方法

- 以[听课](#)为线索，抓[基本概念、基本电路、基本分析方法](#)
- 注意定性分析和近似分析的重要性
- 学会辨证、全面地分析问题
- 理论-EDA-实践缺一不可、相互验证
- 注意电路中常用定理的应用



第一章 半导体器件基础



§ 1.1 半导体基础知识

§ 1.2 半导体二极管

§ 1.3 晶体三极管

§ 1.1 半导体基础知识

一、本征半导体

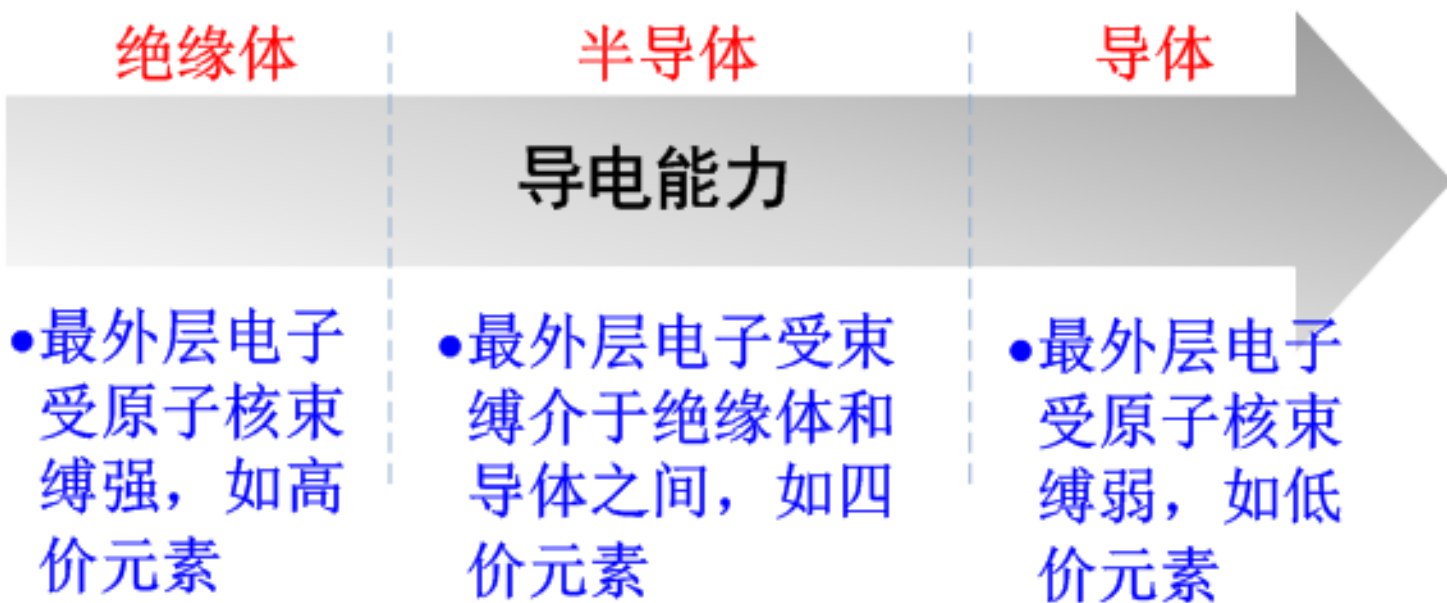
二、杂质半导体

三、PN结的形成及单向导电性

四、PN结的电容效应

一、本征半导体

- 什么是导体？绝缘体？半导体？
- 什么是本征半导体？



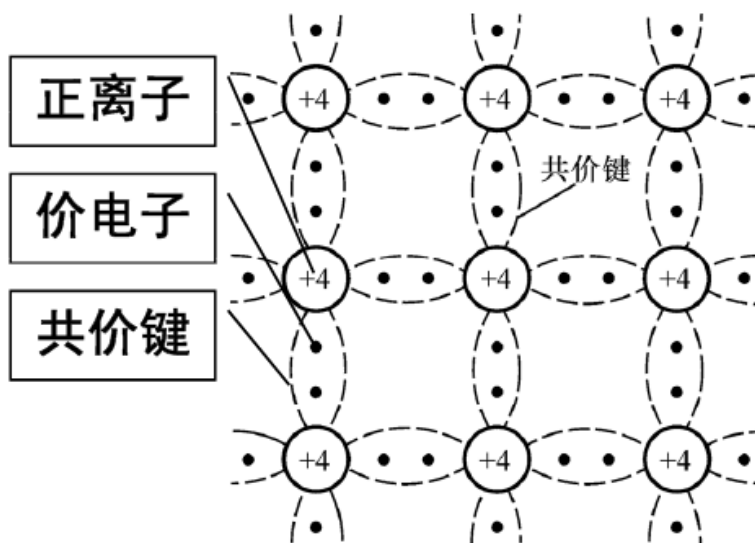
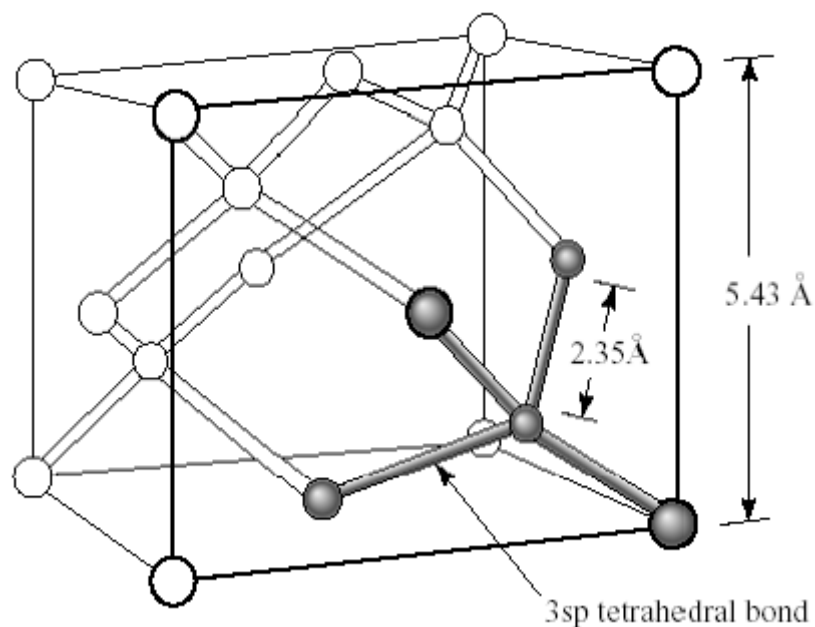
半导体材料

- ✓ 单质：四价元素组成，如 硅 Si，锗 Ge
- ✓ 化合物：三价和五价元素组成，如 砷化镓 (GaAs)，
 锑化铟 (InSb)

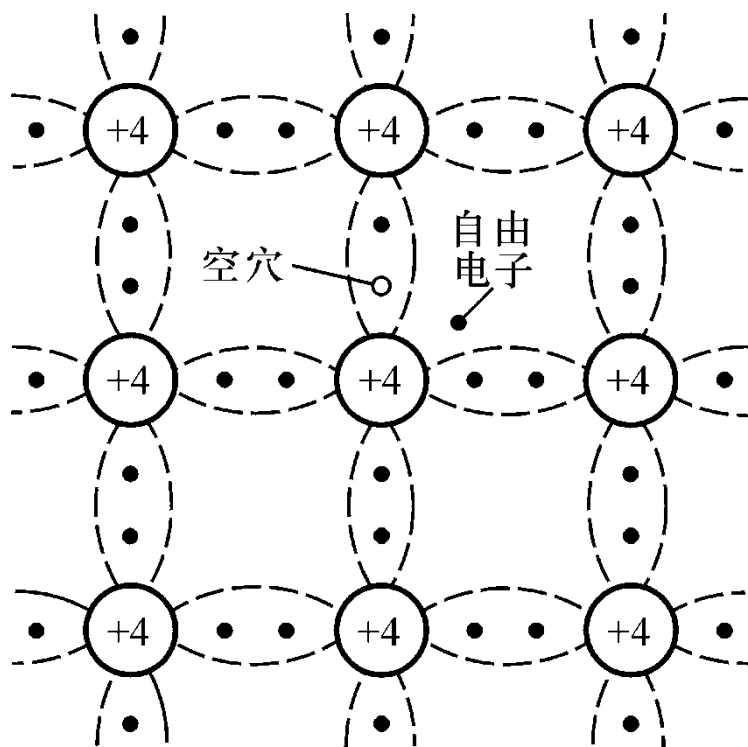
半导体→提纯→形成晶体，得本征半导体

➤ 本征半导体的结构？

□ 本征半导体的原子结构及其共价键 (Covalent bond)



➤ 本征半导体中的两种载流子



➤ 几个概念：

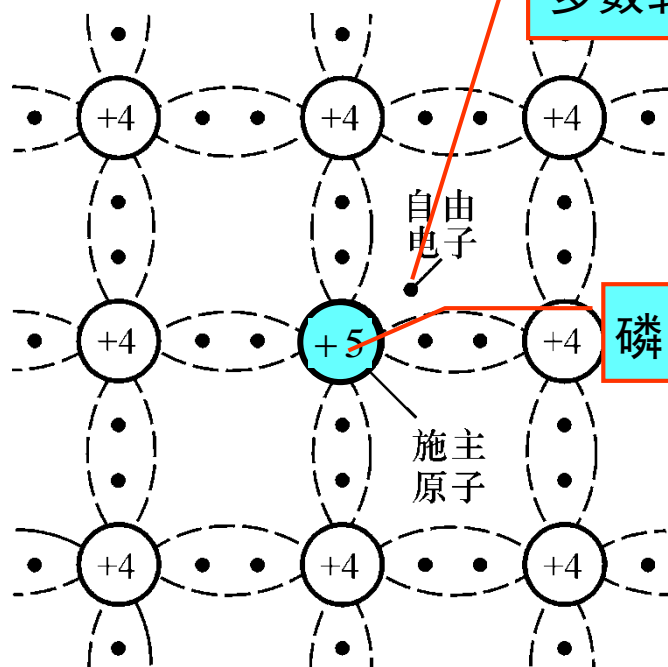
- ✓ **载流子**：运载电荷的粒子
- ✓ **自由电子**：由于热运动，具有足够能量的价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子，其带负电
- ✓ **空穴**：自由电子的产生使共价键中留有一个空位置，称为空穴，其带正电
- ✓ **本征激发**：热激发下产生自由电子和空穴对的现象
- ✓ **复合**：自由电子和空穴相碰同时消失

➤ 几个特点：

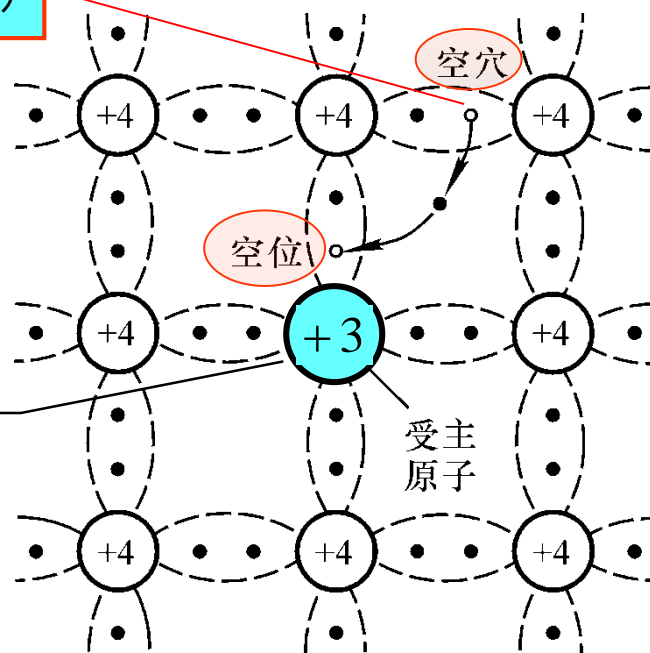
- ✓ 本征半导体载流子浓度很低，温度升高时，由于热运动加剧，其浓度增加
- ✓ 外加电场时，自由电子和空穴均参与导电，其运动方向相反
- ✓ 由于载流子数目很少，其导电性很差

二、杂质半导体

➤ N型半导体



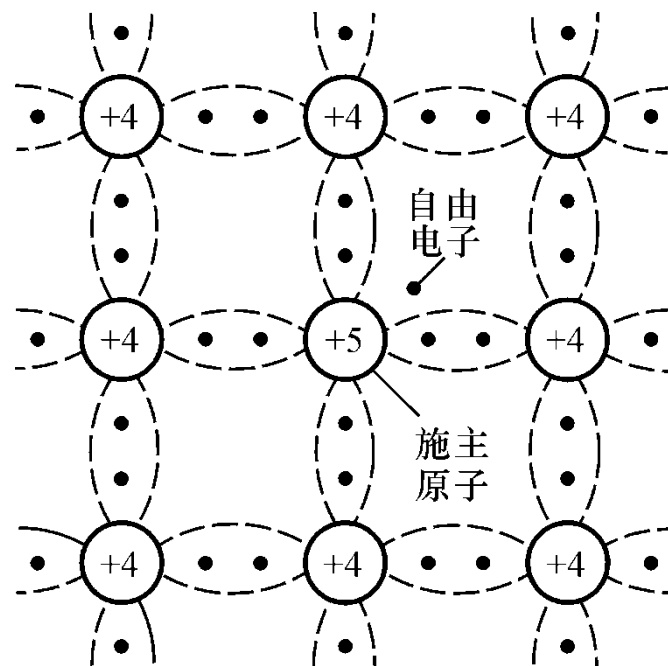
➤ P型半导体



□ 杂质半导体主要靠多数载流子导电，掺入杂质越多，多子浓度越高，导电性越强，实现导电性可控

以N型半导体为例，
增加掺杂浓度后，多子和少子数目如何变化？

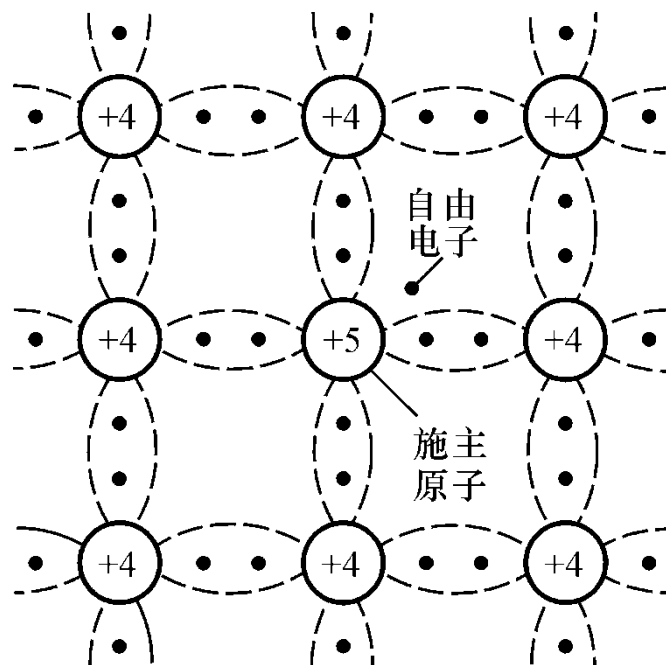
- ☐ A 都增加
- ☒ B 多子增加，少子减少
- ☐ C 多子减少，少子增加
- ☐ D 都减少



提交

以N型半导体为例，
掺杂不变温度升高时，载流子的数目如何变化？

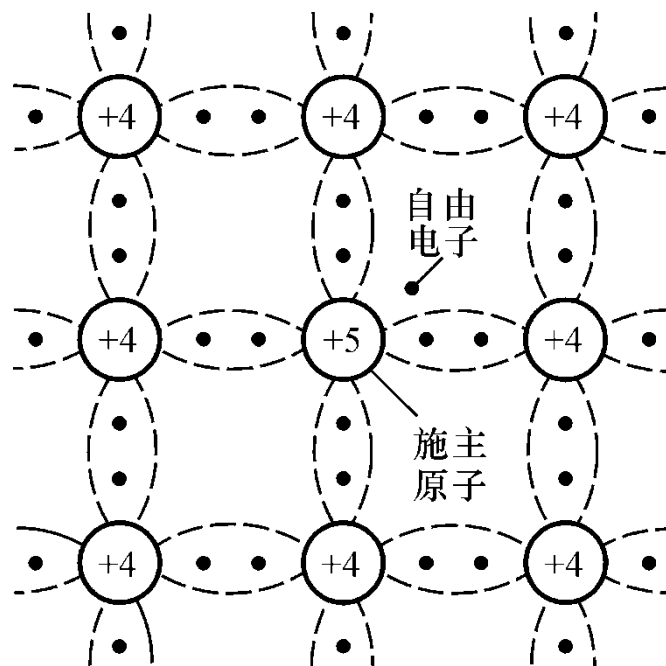
- ☐ A 多子增加，少子减少
- ☒ B 多子少子都增加
- ☐ C 多子减少，少子增加



提交

以N型半导体为例，掺杂不变温度变化时，少子与多子浓度的变化相同吗？

- ☐ A 相同
- ☐ B 不相同，多子变化大
- ☒ C 不相同，少子变化大

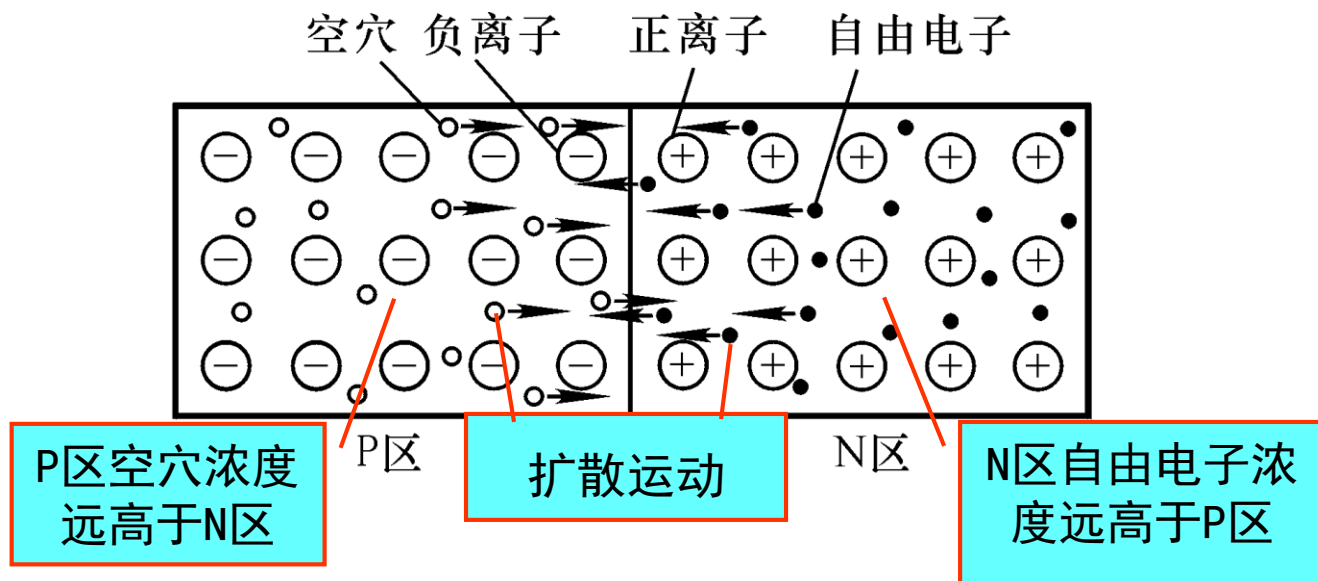


提交

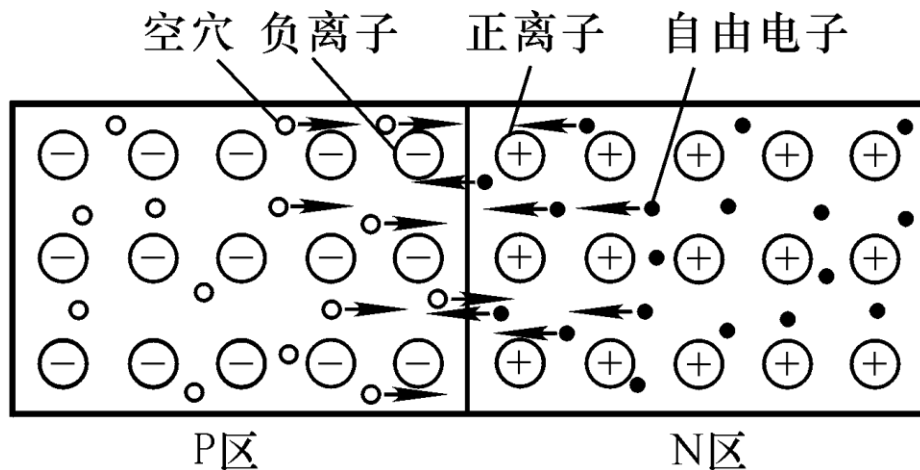
三、PN结的形成及单向导电性

➤ PN结的形成

- 制作方式：采用不同掺杂工艺，将P型半导体与N型半导体制作在同一块硅片上，在其交界面形成PN结
- 物理过程：多子扩散 → 形成空间电荷区 (耗尽层) → 产生内电场 → 阻止多子扩散，利于少子漂移，达动态平衡，形成PN结



◆ 扩散运动：因浓度差而产生的多子运动

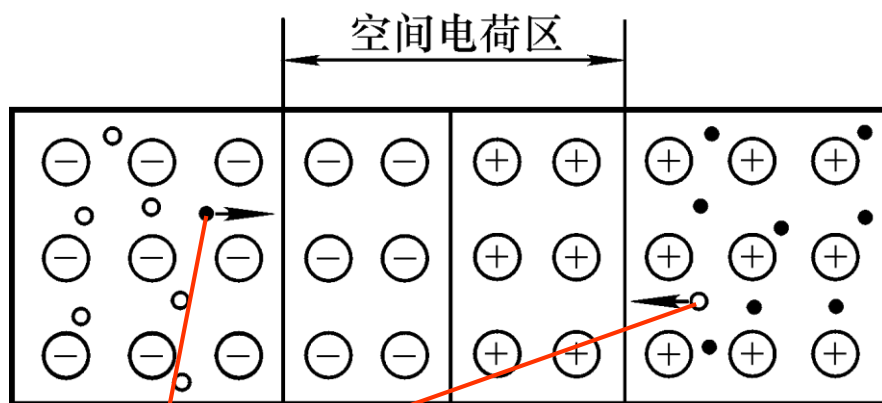


多子扩散

参与扩散运动和漂移运动的载流子数目相同

→ 达动态平衡 (多子与少子电流和为零)

→ 形成PN结



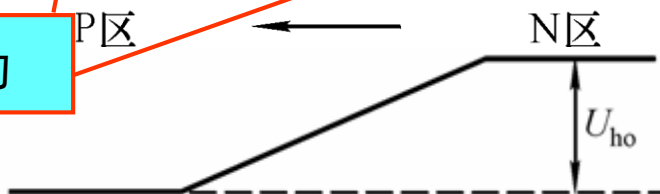
形成空间电荷区 (耗尽层)



产生内电场

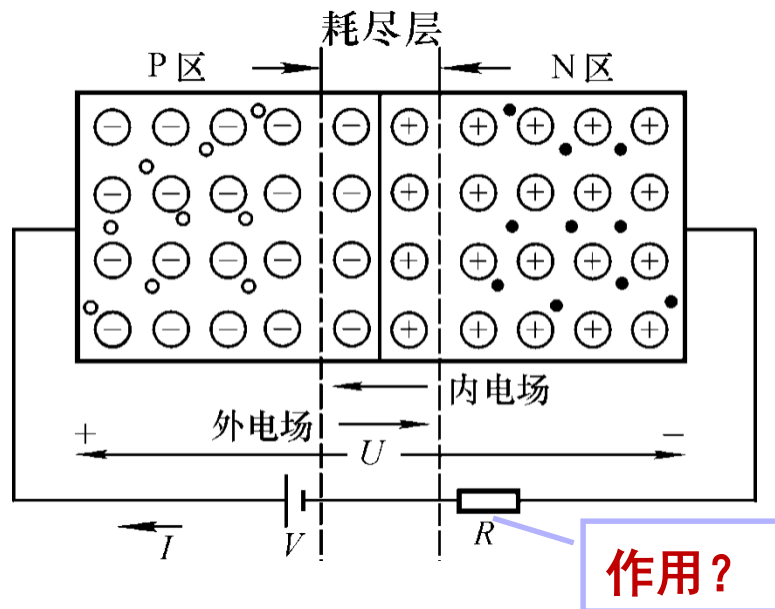
✓ 阻止多子扩散
✓ 利于少子漂移

漂移运动



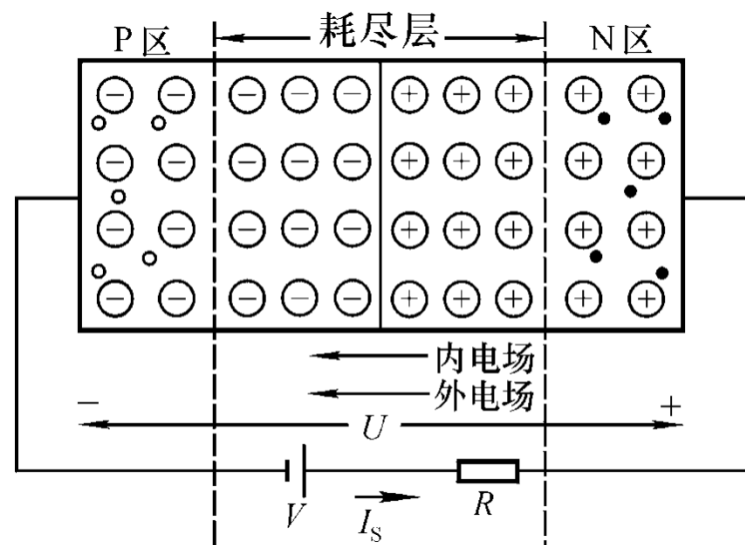
◆ 漂移运动：在电场力作用下少子的运动

➤ PN结的单向导电性



正向偏置 (PN结加正向电压):

- 扩散运动加剧
- 耗尽层变窄
- 呈现小电阻，扩散电流大
- PN结处于导通状态



反向偏置 (PN结加反向电压):

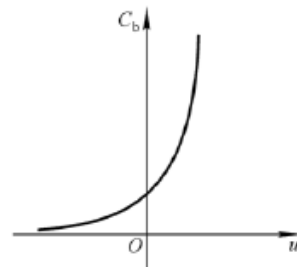
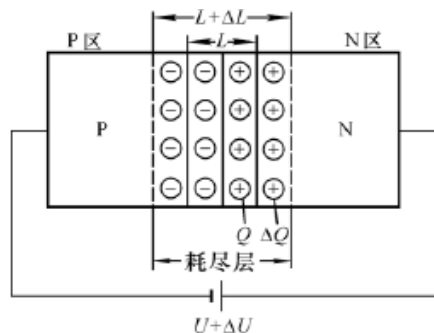
- 漂移运动加剧
- 耗尽层变宽
- 呈现大电阻，反向饱和 (漂移) 电流小
- PN结近似为截止状态



Note: PN结的导通、关断需要时间!

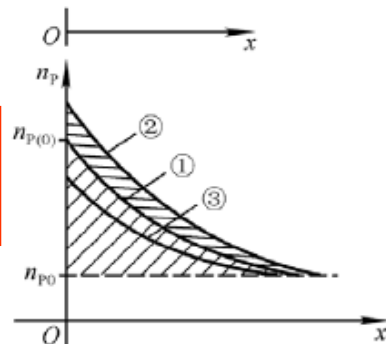
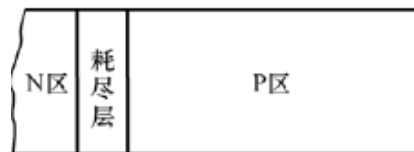
➤ **势垒电容 C_b**

- 空间电荷区的宽度随PN结外加电压而变化，伴随电荷的积累和释放，等效得到的电容



➤ **扩散电容 C_d**

- **PN结正向偏置时**，扩散路程中载流子浓度的梯度随外加电压而变化，伴随电荷的积累和释放，等效得到的电容


$$C_j = C_b + C_d$$

1~几百pF,
非常量!

- ✓ 正向偏置以 C_d 为主，反向偏置以 C_b 为主
- ✓ PN结外加高频电压时，失去单向导电性

反向恢复时间 t_{rr}

- ## □ 高频时影响开关电路的重要参数

➤ 讨论

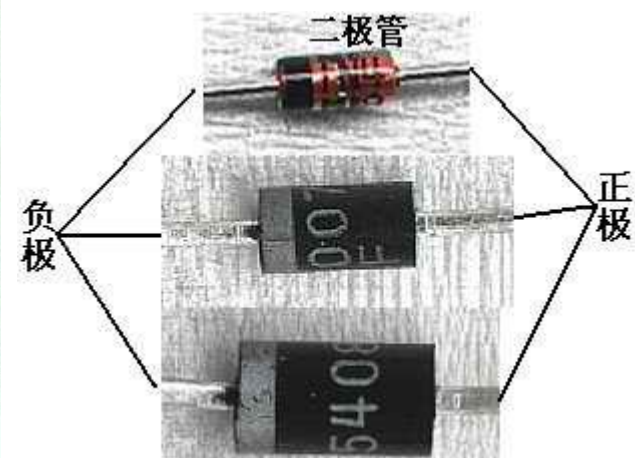
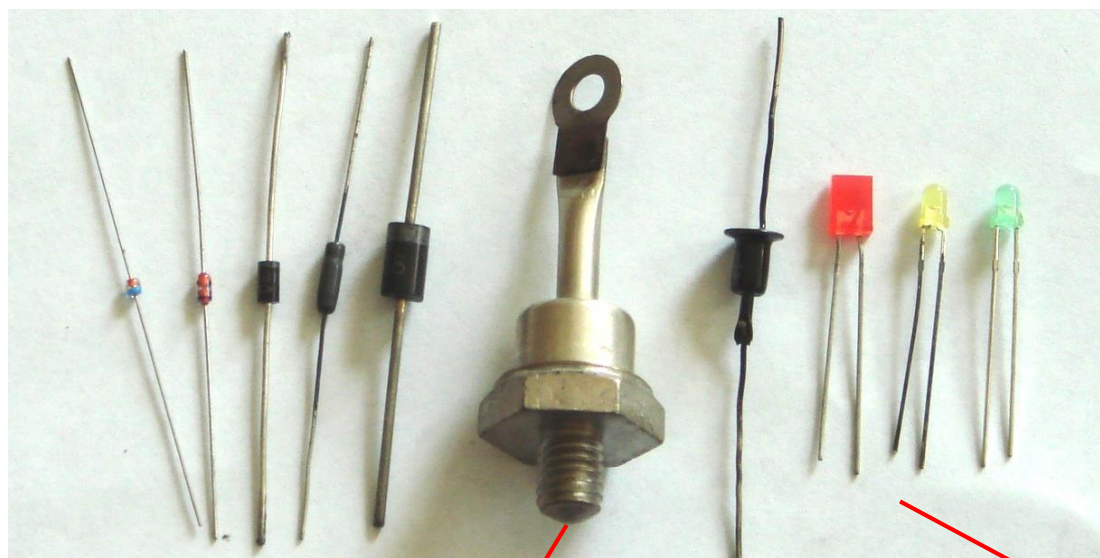
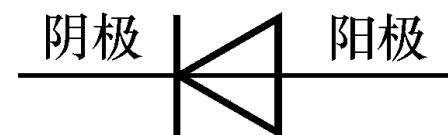
- ❑ 为什么将自然界导电性能中等的半导体材料制成本征半导体，导电性能极差，又将其掺杂，改善导电性能？
- ❑ 为什么半导体器件的温度稳定性差？是多子还是少子是影响温度稳定性的主要因素？
- ❑ 为什么半导体器件有最高工作频率？

§ 1.2 半导体二极管

- 一、二极管的组成
- 二、二极管的伏安特性及电流方程
- 三、二极管的等效电路
- 四、二极管的主要参数
- 五、稳压二极管

一、二极管的组成

- 将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管



小功率
二极管

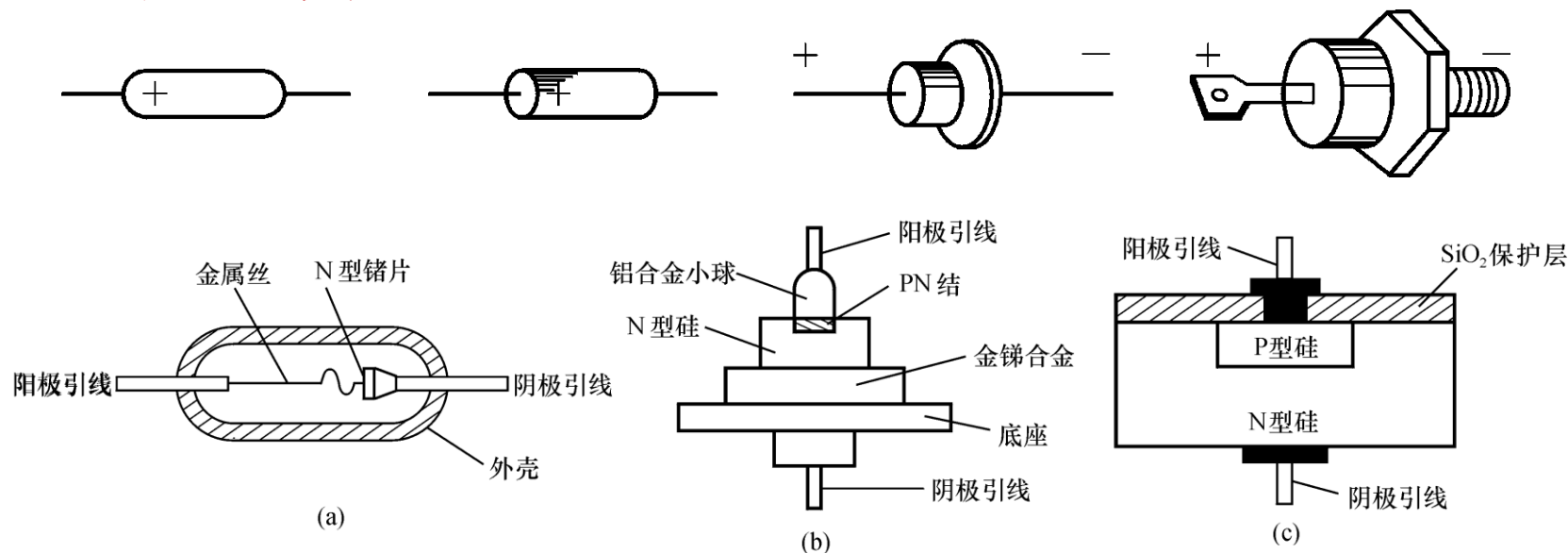
大功率
二极管

稳压
二极管

发光
二极管

✓ 特点和用途不同!

➤ 二极管的类型



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

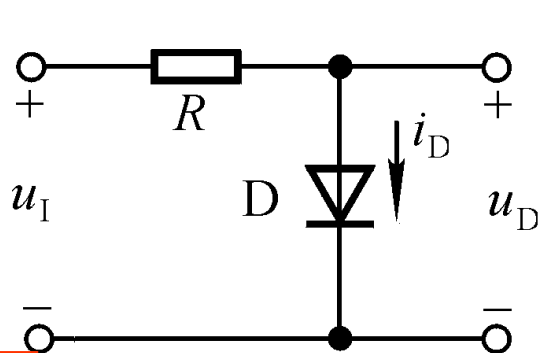
面接触型：结面积大，结电容大，故结允许的电流大，最高工作频率低

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

✓ **结构不同！**

二、二极管的伏安(I-V)特性及电流方程

➤ 二极管的伏安特性：其电流与端电压的关系



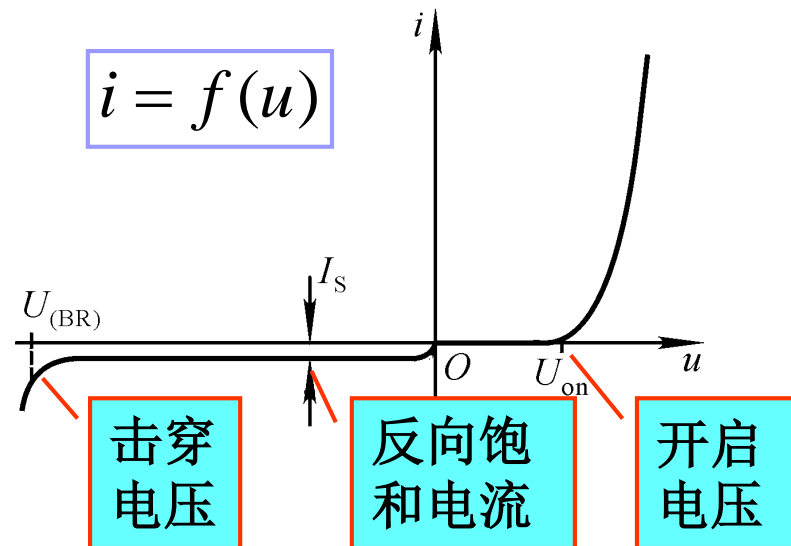
反向饱和
和电流

$$i = I_S \left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1 \right)$$

二极管
端电压

$$U_T = kT/q$$

温度电压当量
(常温27°C时为
26mV)



击穿
电压

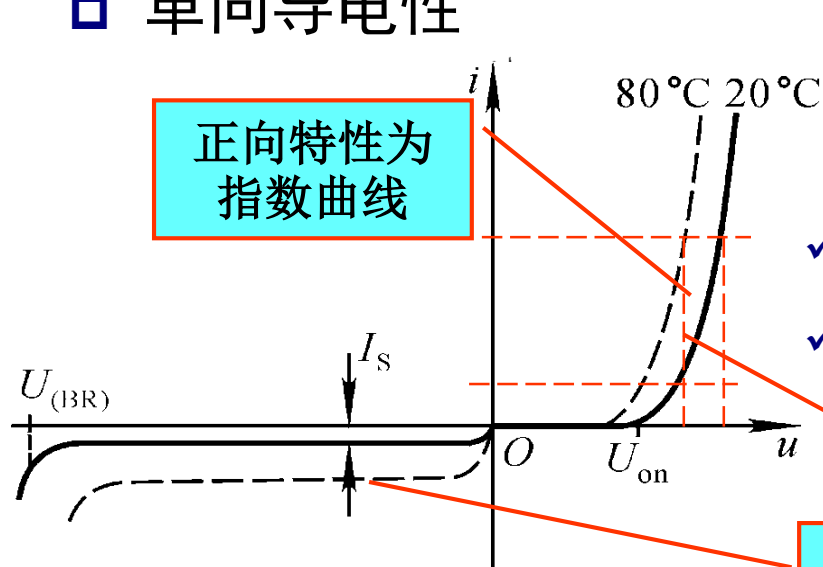
反向饱
和电流

开启
电压

材料	开启电压	导通电压	反向饱和 和电流	击穿电压
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	10pA	高
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	1μA	低
GaAs	1.0V	1.0~1.2V	1pA	较高

➤ 二极管的伏安特性 (外特性)

□ 单向导电性



正向特性为指数曲线

$$i = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$$

$$U_T = kT/q$$

✓ 若正向电压 $u_D \gg U_T$, 则 $i \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$

✓ 若反向电压 $|u_D| \gg U_T$, 则 $i \approx -I_S$

导通时 u_D 非恒定值

反向特性为横轴的平行线

□ 伏安特性受温度影响

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow$



在电流不变情况下管压降 $U \downarrow$



反向饱和电流 $I_S \uparrow$, $U_{(BR)} \downarrow$

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow$

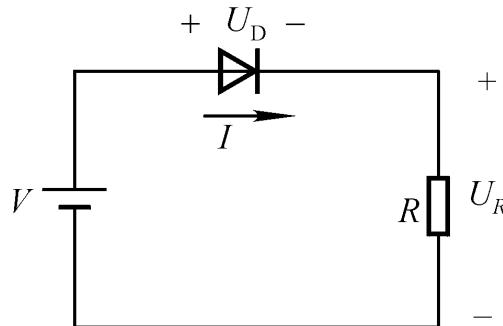


正向特性左移, 反向特性下移

2-2.5mV/ 1°C

1倍/ 10°C

三、二极管的等效电路



➤ 1. 折线化等效电路 (线性化)

✓理想等效

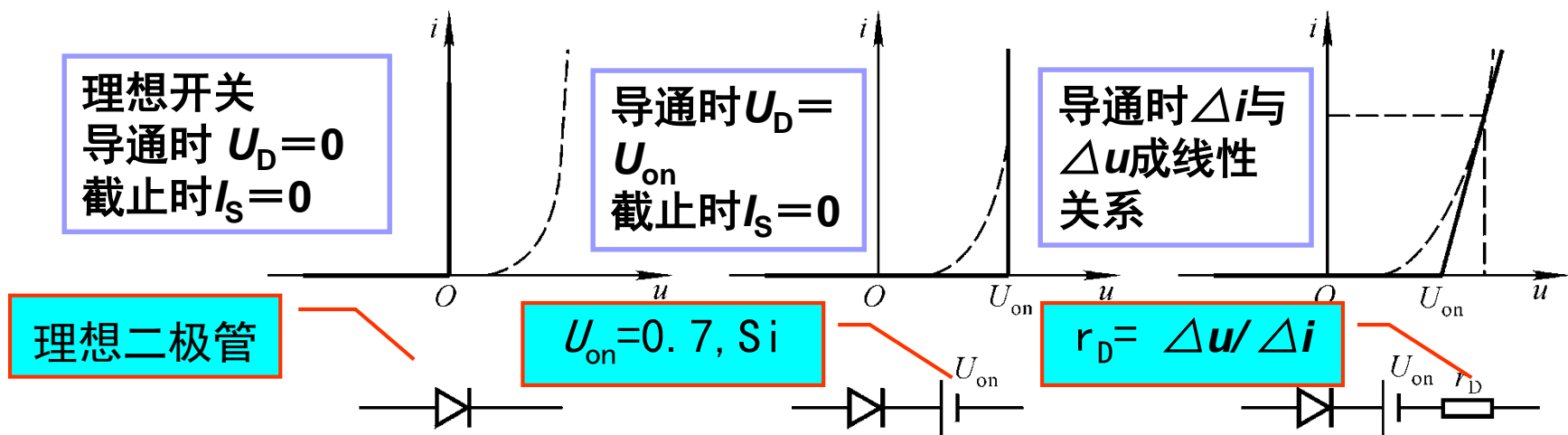
条件：二极管电路外加电压幅值较大
($V > 7V$, Si)

✓恒压等效

条件：二极管电路外加电压幅值大
($V > 2V$, Si)

✓线性等效

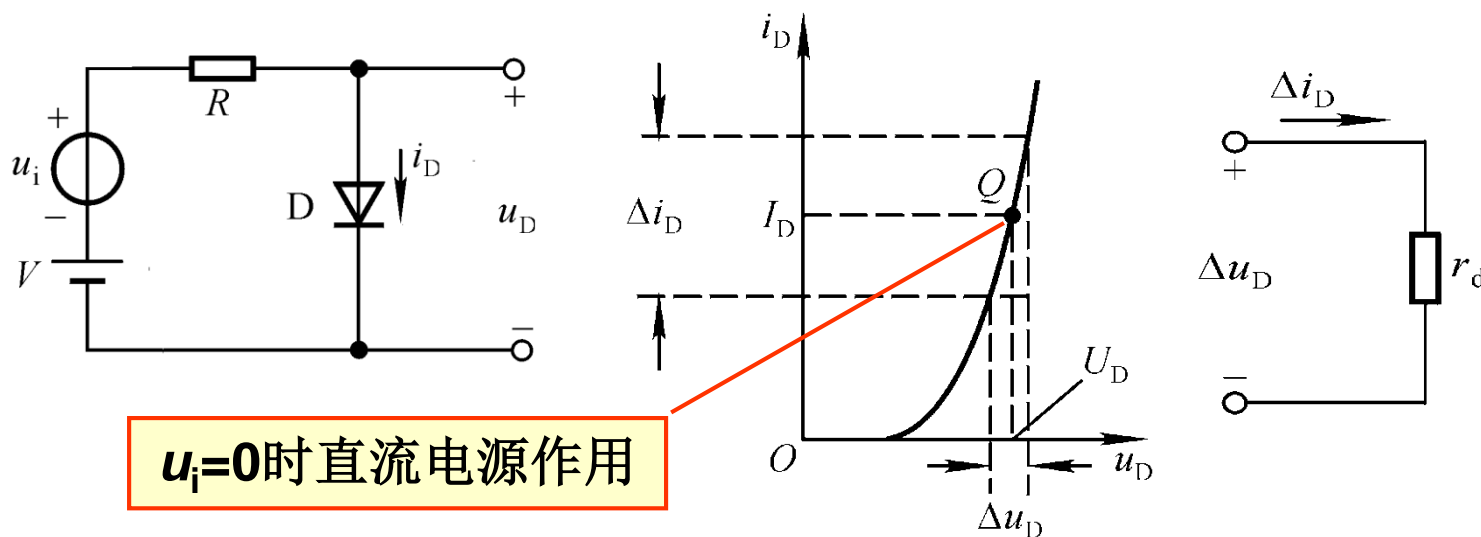
条件：二极管电路外加电压幅值较小
($V < 2V$, Si)



- ✓ 第二种最常用，第三种最精确
- ✓ 应根据不同情况选择不同的等效电路！

➤ 2. 微变等效电路

- 二极管在静态基础上有一动态信号作用时，可将二极管等效为一个电阻，称为动态电阻，即为微变等效电路



$u_i=0$ 时直流电源作用

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} = \frac{du_D}{di_D} \approx \frac{U_T}{I_D}$$

小信号作用

Q越高， r_d 越小！

静态电流

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1 \right)$$

四、二极管的主要参数

- 最大整流电流 I_F ：最大正向电流平均值
- 最大反向工作电压 U_R ：最大瞬时值， $=1/2 U_{(BR)}$
- 反向电流 I_R ：即 I_S
- 最高工作频率 f_M ：因 PN 结有电容效应
结电容为扩散电容 (C_d) 与势垒电容 (C_b) 之和

✓ 参数具有分散性！

- 选用时注意上下限值、测试条件

电路中二极管D的工作状态是：

A

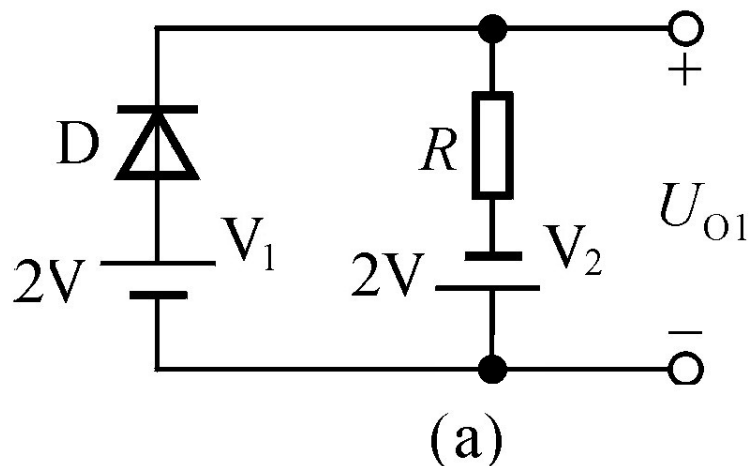
导通

B

截止

C

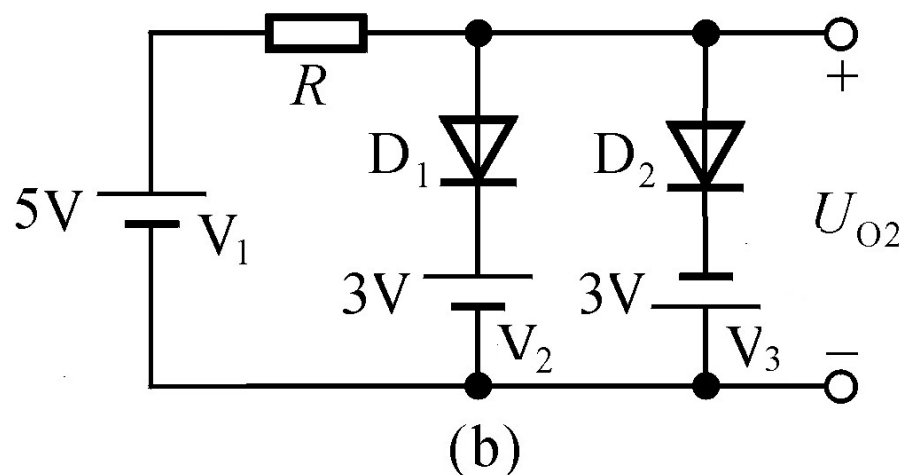
无法判断



提交

电路中二极管 D_1 的工作状态是：

- ☐ A 导通
- ☒ B 截止
- ☐ C 无法判断



五、稳压二极管

面接触型

- 利用PN结的反向特性 (第三象限)
- 稳压二极管又称为齐纳二极管或简称稳压管
- 稳压管外加反向击穿电压时，在一定的电流范围内稳压

加限流电阻

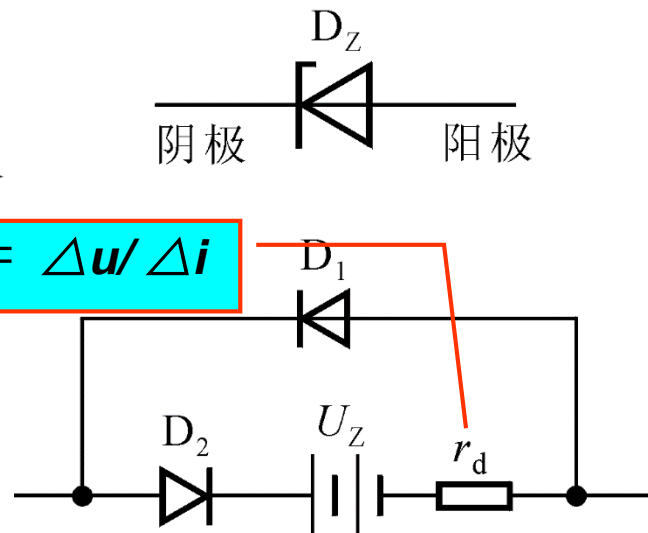
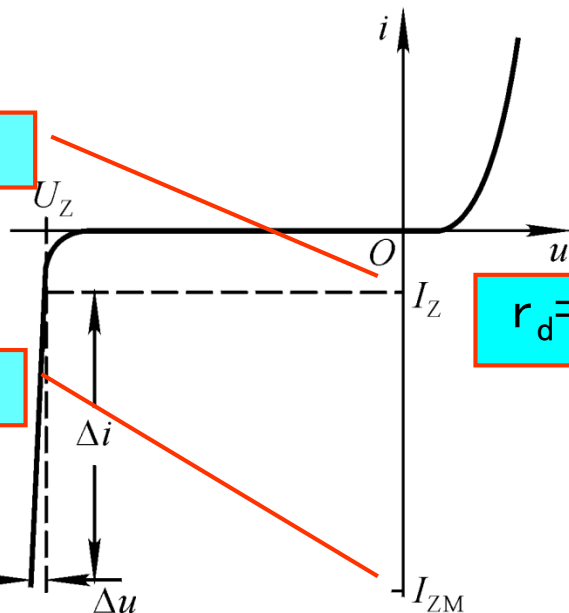
进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流

主要参数：

- ✓ 稳定电压 U_Z
- ✓ 稳定电流 I_Z
- ✓ 最大稳定电流 I_{ZM}

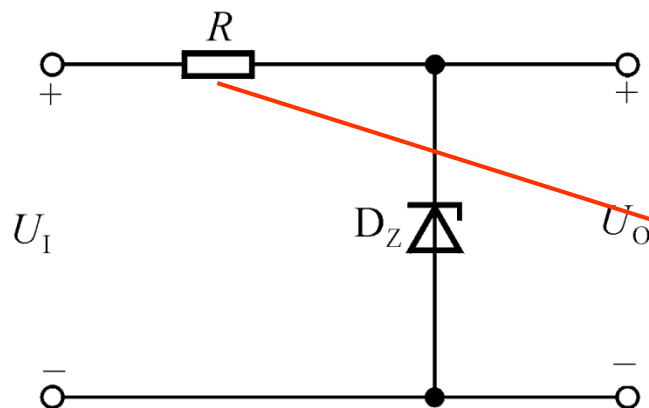
- ✓ 额定功耗 $P_{ZM} = U_Z * I_{ZM}$
- ✓ 动态电阻 $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ ，几到几十欧
- ✓ 温度系数 $\alpha = \Delta U_Z / \Delta T$



➤ 讨论:

□ 已知稳压管的 $U_Z=6V$, $I_Z=5mA$, $I_{ZM}=30mA$ 。

1. 设电阻 R 取值合适, 求 U_I 分别为 $5V$ 、 $10V$ 时 U_O 的值;
2. 设 $U_I=10V$, 求使稳压管正常稳压时限流电阻 R 的范围。



✓ $U_I=5V$ 时 $U_O=5V$
 $U_I=10V$ 时 $U_O=6V$

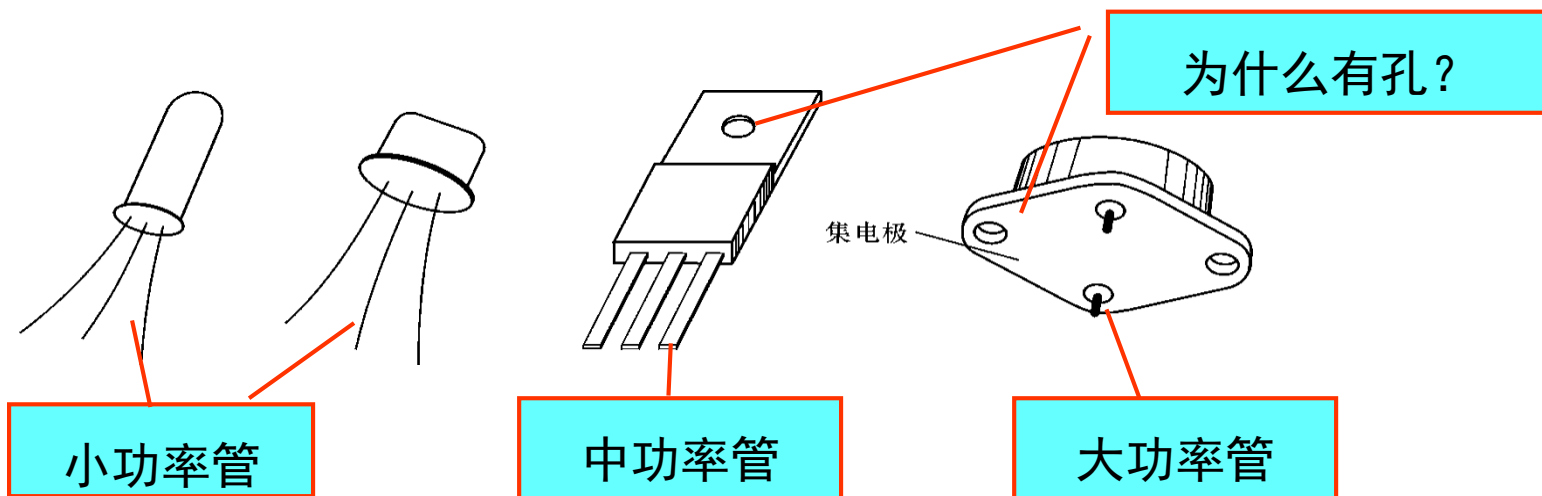
作用? 可以去掉么?

✓ 限流电阻必须保证稳压管电流在 I_Z 和 I_{ZM} 之间

由 $I_Z < I_{DZ} = \frac{U_I - U_Z}{R} < I_{ZM}$, 求出限流电阻 R 的范围

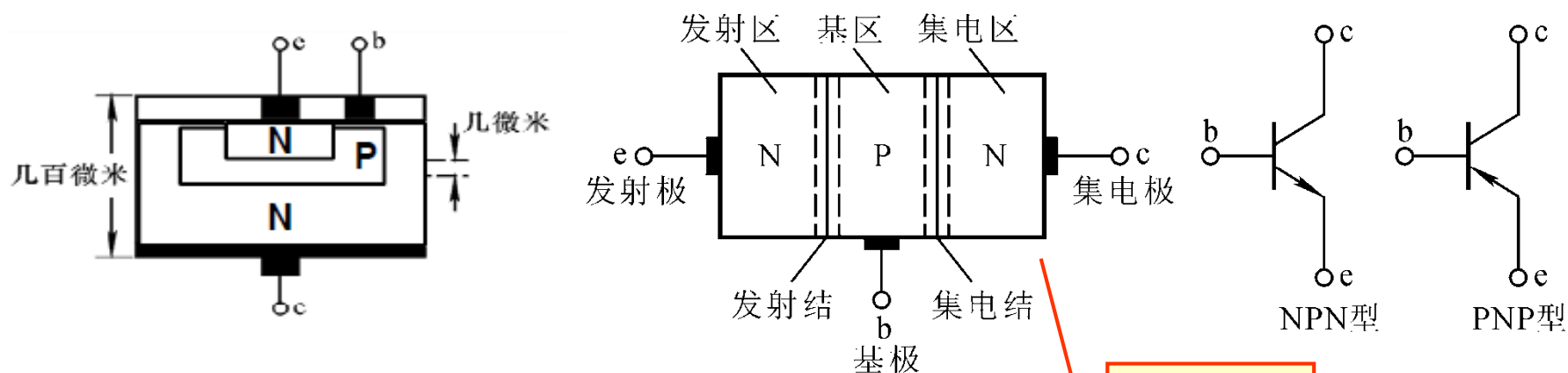
§ 1.3 晶体三极管

- 一、结构和符号
- 二、晶体管的放大原理
- 三、共射输入特性和输出特性
- 四、温度对晶体管特性的影响
- 五、主要参数



一、晶体管的结构和符号

- 采用不同掺杂方式在同一硅片上制造出三个区，形成两个PN结，引出三个电极，构成晶体管



✓ 晶体管三个区的特点：

用于放大

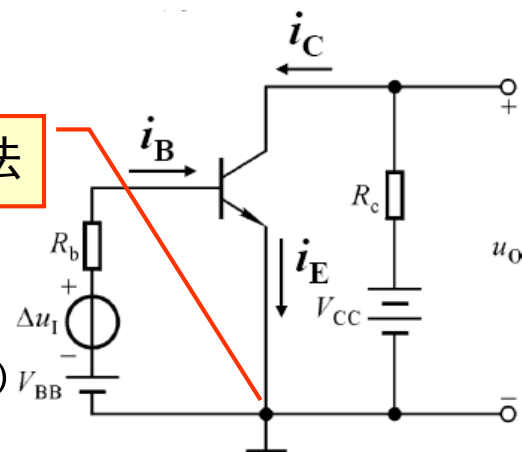
- 发射区--掺杂浓度很高
- 基区--很薄 (对于分立元件，1至几微米)
- 集电区--结面积大

二、晶体管的放大原理

➤ 放大原理

放大的条件 $\begin{cases} u_{BE} > U_{on} \text{ (发射结正偏)} \\ u_{CB} \geq 0, \text{ 即 } u_{CE} \geq u_{BE} \text{ (集电结反偏)} \end{cases}$

共射接法



平衡少子的
漂移运动

因集电区面积大，在外电场作用下大部分扩散到基区的电子漂移到集电区

因基区薄且多子浓度低，使扩散到基区的电子（非平衡少子）中的极少数与空穴复合

因发射区多子浓度高使大量电子从发射区扩散到基区

基区空穴的
扩散

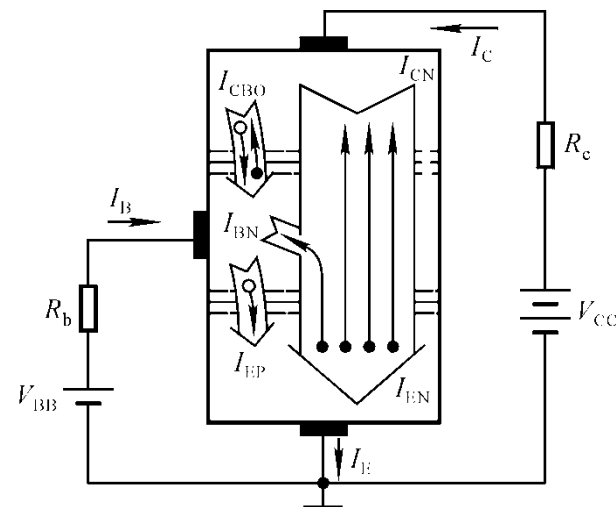
✓ 扩散运动形成发射极电流 I_E ，复合运动形成基极电流 I_B ，漂移运动形成集电极电流 I_C ， $I_E = I_C + I_B$

➤ **电流分配:** $I_E = I_B + I_C$

I_E —扩散运动形成的电流

I_B —复合运动形成的电流

I_C —漂移运动形成的电流



共射直流电
流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

集电结反向
饱和电流

$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

共基直流电
流放大系数

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

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

共射交流电
流放大系数

穿透电流

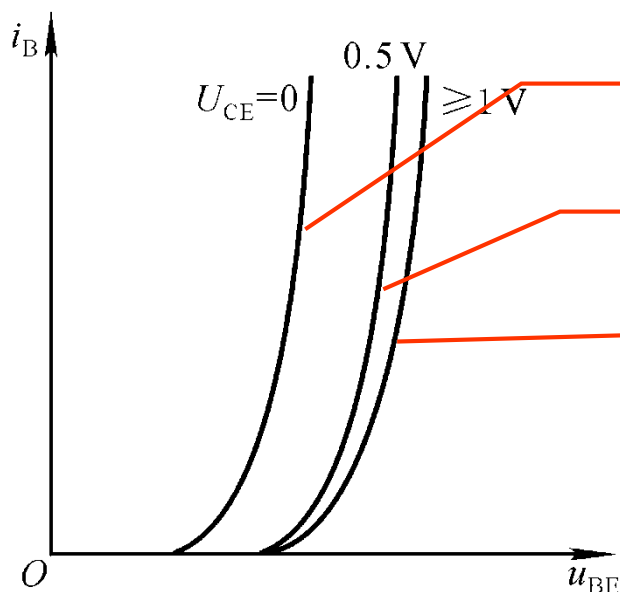
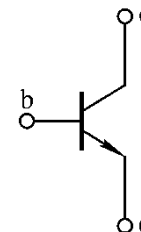
$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

共基交流电
流放大系数

三、晶体管的共射输入特性和输出特性

➤ 1. 输入特性

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{U_{CE}}$$

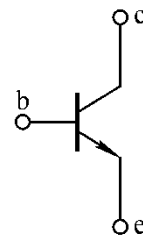


为什么像PN结的伏安特性？

为什么 U_{CE} 增大曲线右移？

为什么 U_{CE} 增大到一定值曲线右移就不明显了？

➤ 2. 输出特性



$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B}$$

临界饱和
和/放大

为什么 u_{CE} 较小时 i_C 随 u_{CE} 变化很大？为什么进入放大状态曲线几乎是横轴的平行线？

饱和区

$$u_{BE} > U_{on}$$

$$u_{BE} > u_{CE} > 0$$

$$i_C < \bar{\beta} i_B$$

放大区

$$u_{CE} > u_{BE} > U_{on}$$

$$i_C = \bar{\beta} i_B$$

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常量}}$$

截止区

$$u_{BE} \leq U_{on}$$

$$u_{CE} > u_{BE}$$

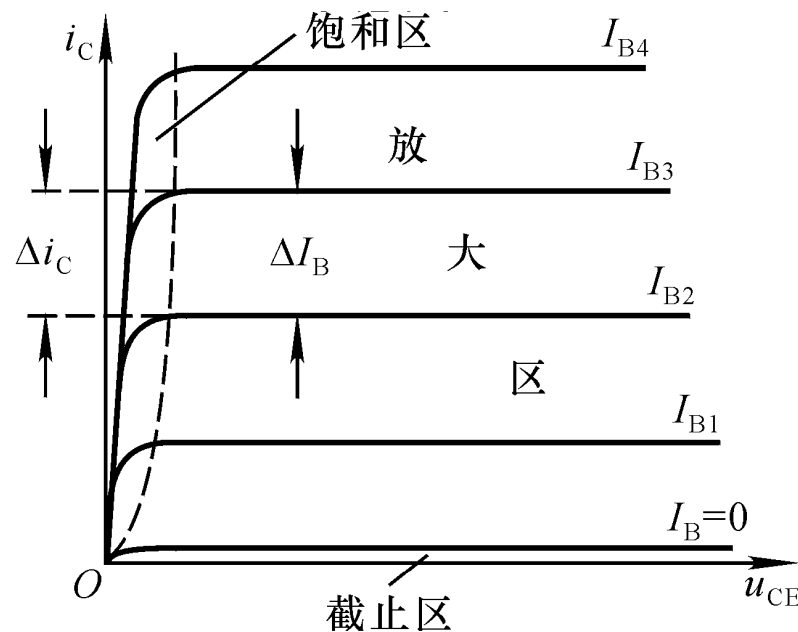
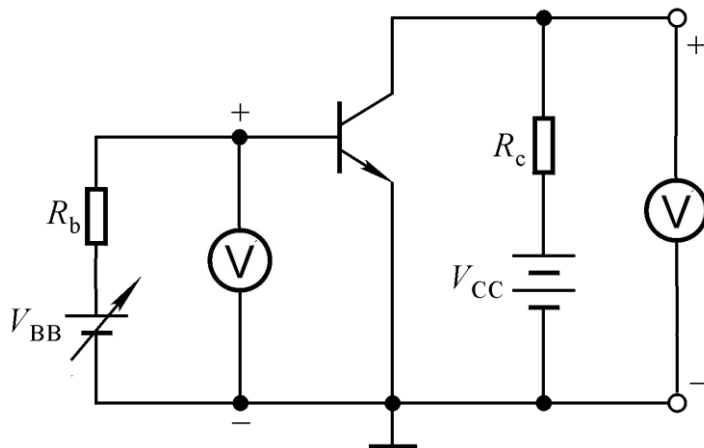
$$i_C \approx i_B \approx 0$$

CE饱和
电压 U_{CES}



✓ β 是常数吗？什么是理想晶体管？什么情况下 $\beta = \bar{\beta}$ ？

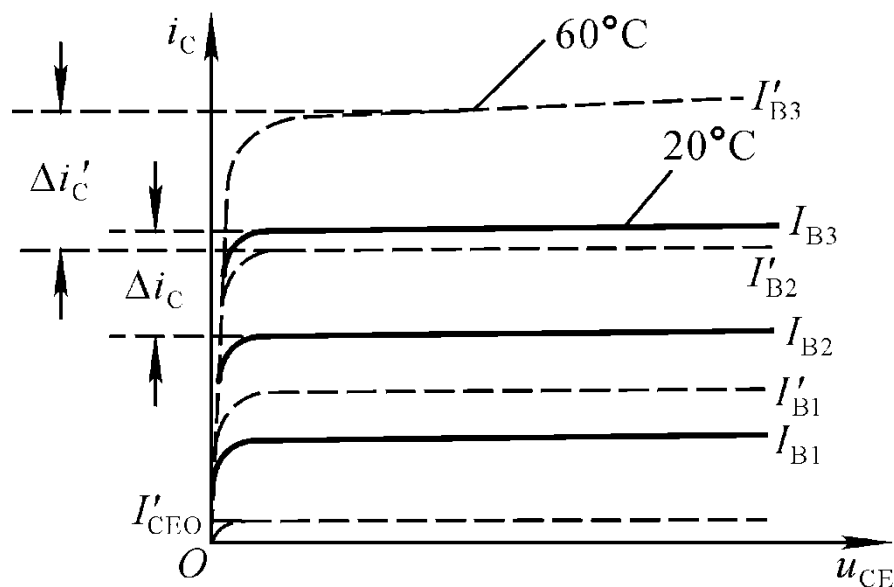
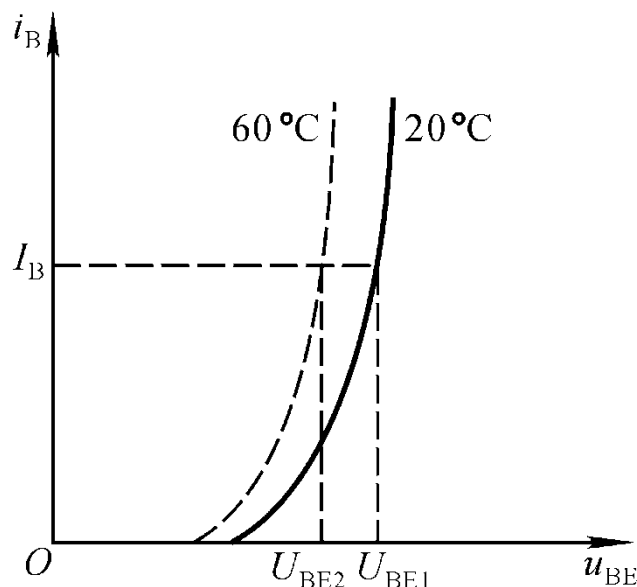
晶体管的三个工作区域



状态	u_{BE}	i_C	u_{CE}
截止	$< U_{on}$	I_{CEO}	V_{CC}
放大	$\geq U_{on}$	βi_B	$\geq u_{BE}$
饱和	$\geq U_{on}$	$< \beta i_B$	$< u_{BE}$

✓放大区：输出回路电流 i_C 几乎仅决定于输入回路电流 i_B ，可将输出回路等效为电流 i_B 控制的电流源 i_C

四、温度对晶体管特性的影响



✓输入特性: $T \uparrow \rightarrow$ 特性曲线左移

✓输出特性: $T \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow, I_{CBO} \uparrow, I_{CEO} \uparrow$
 \rightarrow 特性曲线上移, 间距加大

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow u_{BE}$ 不变时 $i_B \uparrow$, 即 i_B 不变时 $u_{BE} \downarrow$

五、主要参数

➤ 直流参数： $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$ 、 I_{CBO} 、 I_{CEO} 、 U_{CES}

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E}, \alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

➤ 交流参数： α 、 β 、 f_T （使 $\beta=1$ 的信号频率）

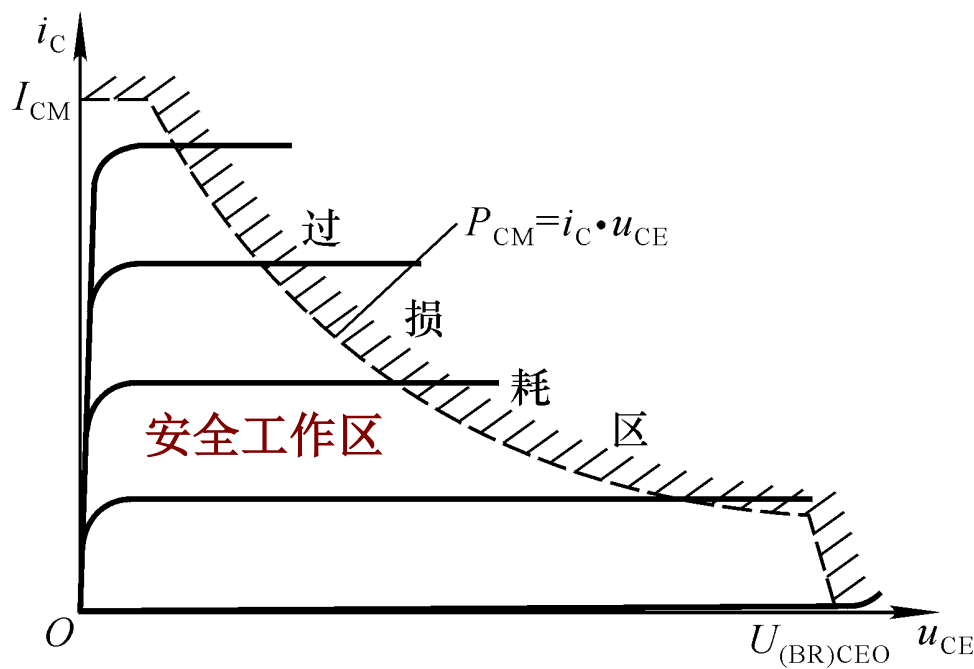
会选： β 越大，温度特性越差

➤ 极限参数： I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$

最大集电极
电流

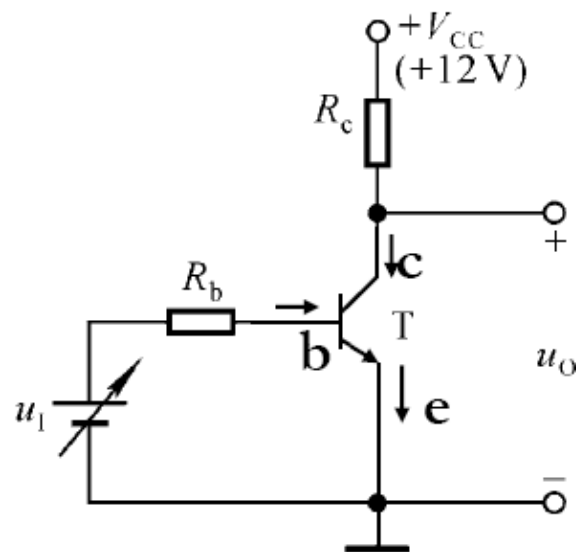
最大集电极耗散功率，
 $P_{CM} = i_C u_{CE}$

c-e间击穿电压



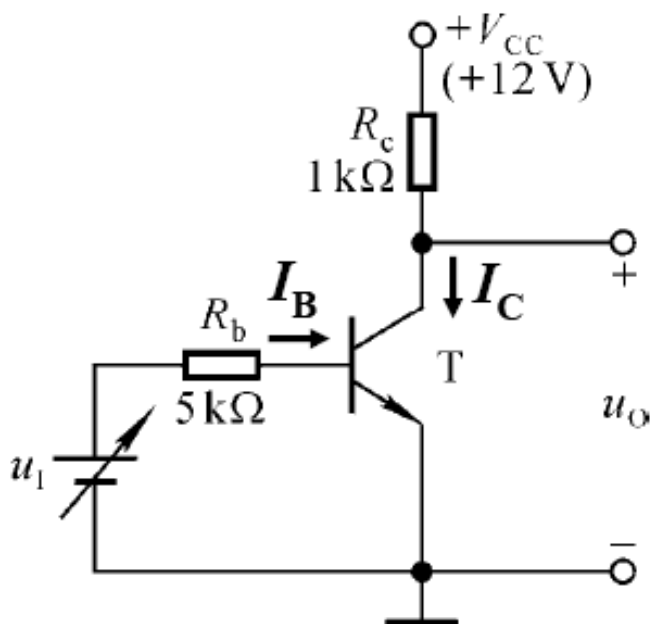
试分析：以下哪个条件下，晶体管
T（Si管）可能处于放大状态

- ☐ A $u_i = 0$
- ☒ B $u_i = 1V$
- ☒ C $u_i = 5V$
- ☒ D $u_i = 15V$



➤ 讨论

- 已知晶体管发射结导通时 $U_{BE}=0.7V$, $\beta=100$, 试分析 $u_I=-1$ 、 1 、 $5V$ 时 T 的工作状态



$u_I = -1V$ 时, 截止;

$u_I = 1V$ 时,

假设 T 处于放大状态

$$I_B = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = \frac{1 - 0.7}{5000} = 0.06mA$$

$$U_{CE} = V_{cc} - R_c \beta I_B = 6V > U_{BE}$$

则假设成立;

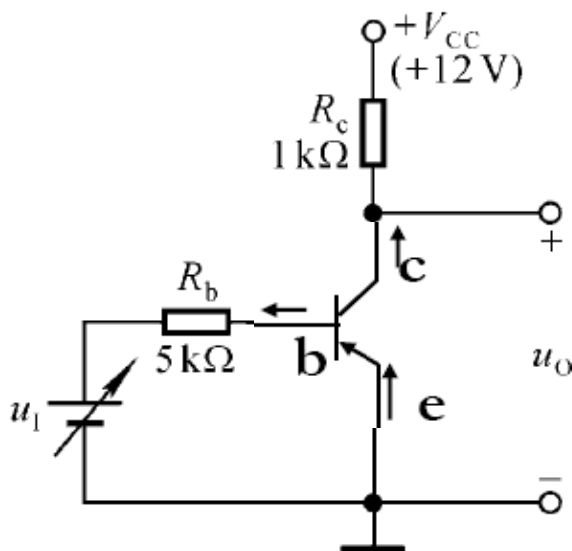
$u_I = 5V$ 时,

假设 T 处于放大状态...

则假设不成立;

讨论

试分析晶体管T是否工作在放大状态？如若不是，则请说明T处于放大状态的必要条件。



必要条件：

$$V_{CC} < 0, u_i < 0$$

方法：已知电源极性和电路结构：

✓ $U_{BE} < U_{on}$ (NPN) , $U_{EB} < U_{on}$ (PNP) 截止状态

✓ $U_{BE} > U_{on}$ (NPN) , $U_{EB} > U_{on}$ (PNP)

NPN: $U_C > U_B > U_E$ 放大状态

PNP: $U_E > U_B > U_C$ 放大状态

第一章 半导体器件基础

半导体及器件结构图

