



模拟电子技术基础

叶朝辉

清华大学自动化系

2015. 3





课程须知

➤ 课程组成员及联系方式

主讲教师

叶朝辉: yezhaohui@tsinghua.edu.cn

中央主楼703, 电话62772348, 15010255652

助教

陶佳伟: 负责自31、32、33作业批改

tjw200704072056@163.com, 电话18810914973

邹天明: 负责自34、自35、自36及其余同学作业批改

tianming0905@qq.com, 电话13391812363

张成晖: 负责仿真作业、综合论文批改及辅导

jshm.zch@163.com, 电话15210591848



课程须知

➤ MOOC

校内网址：模拟电子技术基础（基础部分 1-6章）已开通

http://tsinghua.xuetangx.com/?iframe=http%3A%2F%2Ftsinghua.xuetangx.com%2Fcourses%2FTSINGHUA%2F20250064X%2F2015_T1%2Fabout

学堂在线：模拟电子技术基础（应用部分7-10章） 3月16日上线

http://www.xuetangx.com/courses/TsinghuaX/20250064_1X/2015_T1/about

本班同学可选择**听MOOC课**，但需**完成本课程全部作业、考试**：

1. 自制能力、自学能力强；
2. 自学本课程课件、参加本课程答疑，每周发简单学习报告；
3. 经过任课教师允许（一周后找我），随时进入或退出。



绪论

0.1 基本概念

0.2 关于本课程



0.1 基本概念

一、电子学(Electronics)、电子技术(Electronic technology)

Electronics is the science and technology that deals with the flow of electrons through semiconductors.

Branch 1 - semiconductor physics: the study of semiconductor devices and related technology.

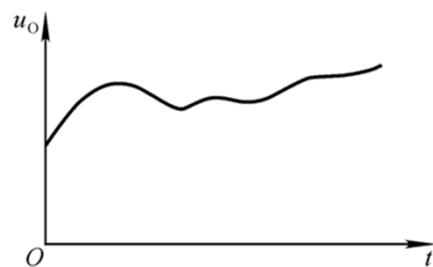
Branch 2 - electronics engineering(electronic technology): the design and construction of electronic circuits to solve practical problems.



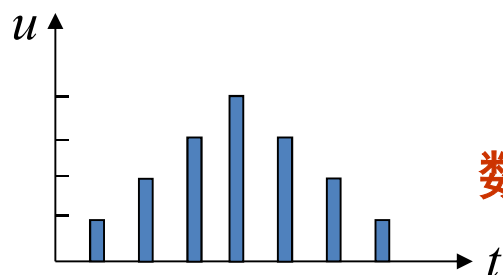
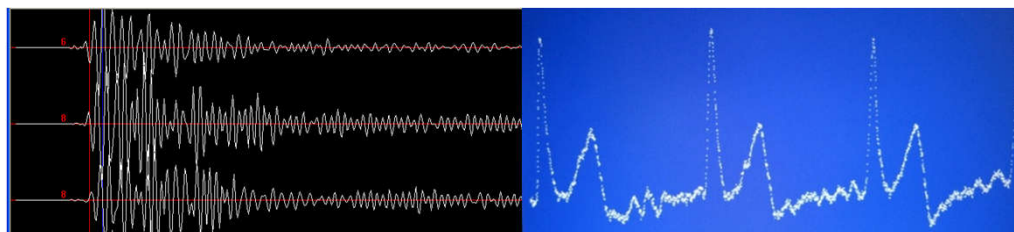
0.1 基本概念

二、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。
- **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、脉搏信号。
- **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、心电等。



模拟信号



数字信号



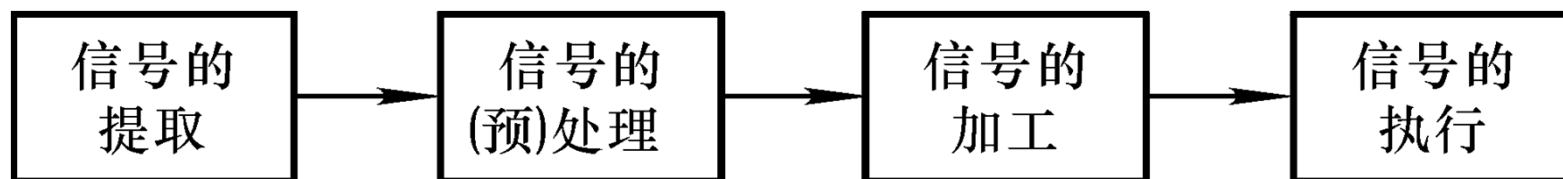
0.1 基本概念

三、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，其最基本的处理为**放大**。

四、电子系统(Electronic System)

是指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。



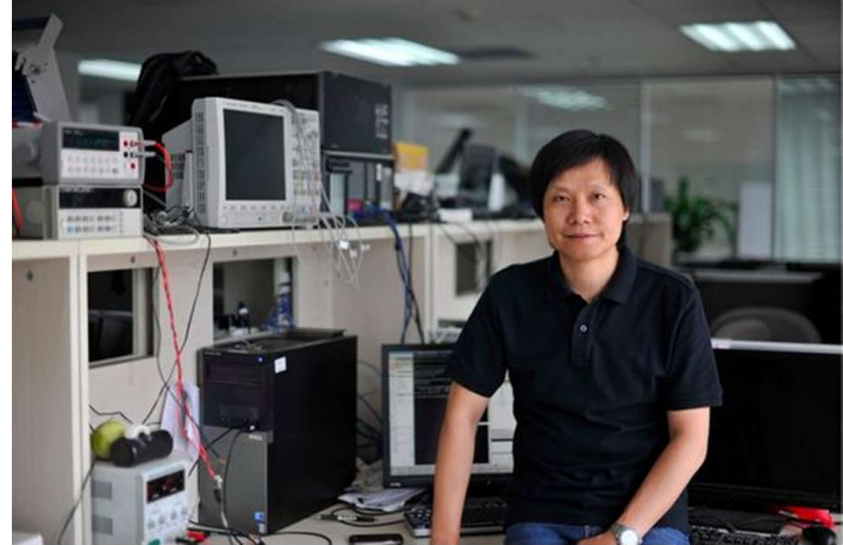
传感器
接收器
发生器

电子信息系统的组成



模拟信号与电子系统

Consumer Electronics



模拟信号来源：
麦克风
加速度传感器
摄像头
温度、压力、光
强、触摸传感器





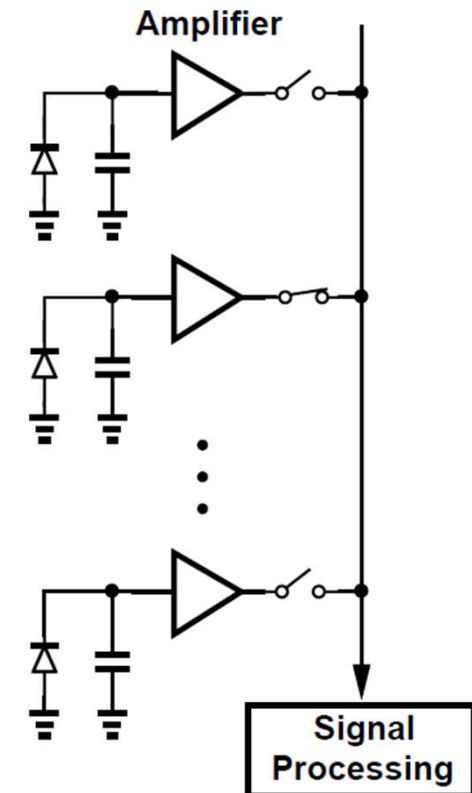
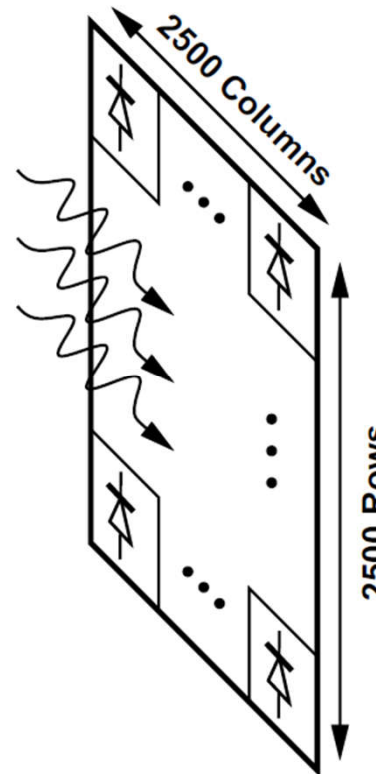
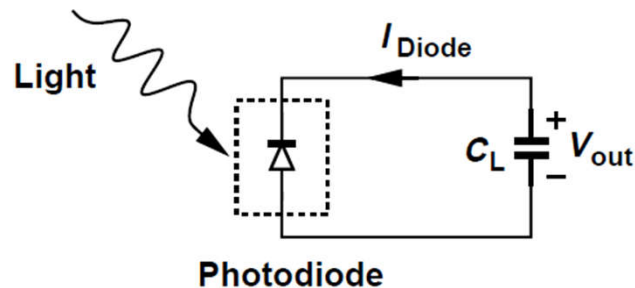
模拟信号与电子系统

声音信号处理:

呼叫方: 声音 → 话筒 (传感器) → 电信号 → 预处理 (放大, 滤波) → 加工 (运算, 比较, 信号变换) → 模拟数字转换

接听方: 数字声音信号 → 数字模拟转换 → 功率放大 → 扬声器

摄像头中的光电传感器





模拟信号与电子系统

Industrial Electronics



声波测井短节

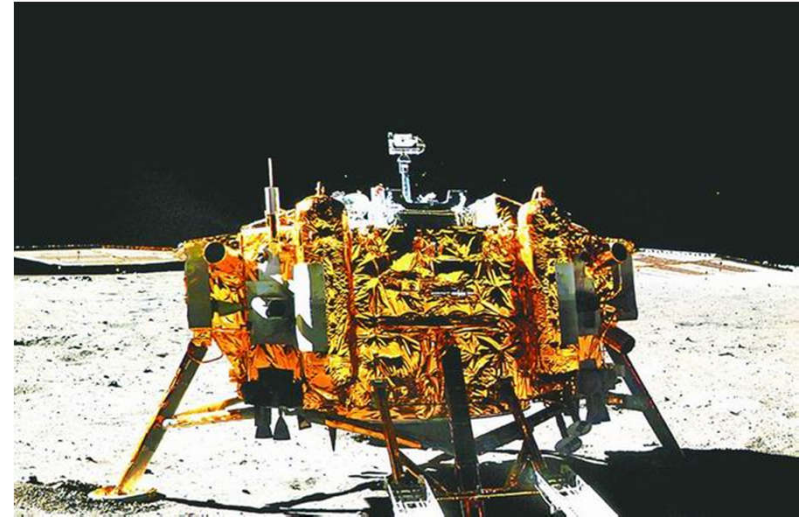
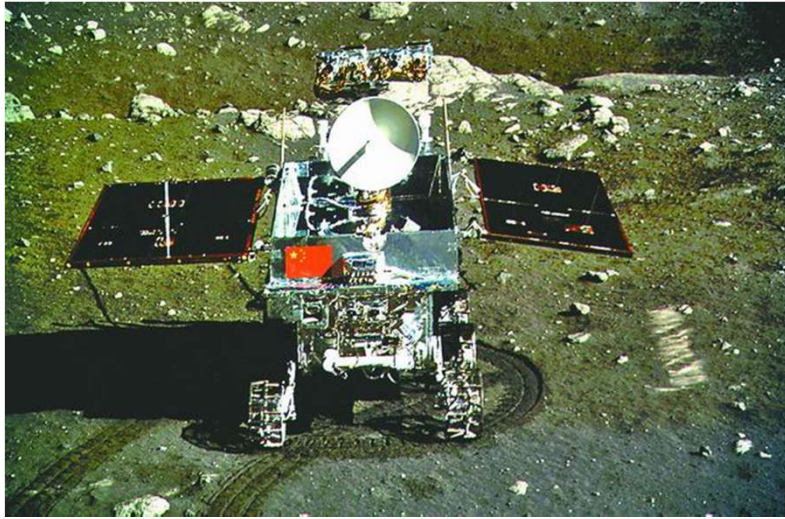
- ✓ 32路声波信号处理
- ✓ 油井深度 > 6000 米
- ✓ 耐温 > 200°C
- ✓ 耐压 > 200Mpa(30000psi)





模拟信号与电子系统

Aerospace Electronics



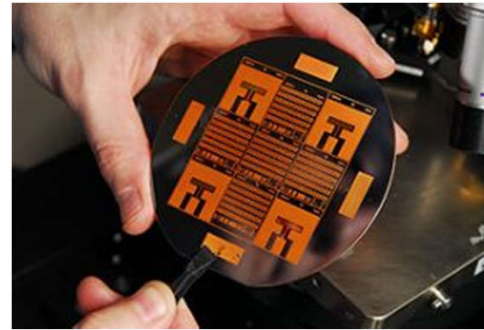
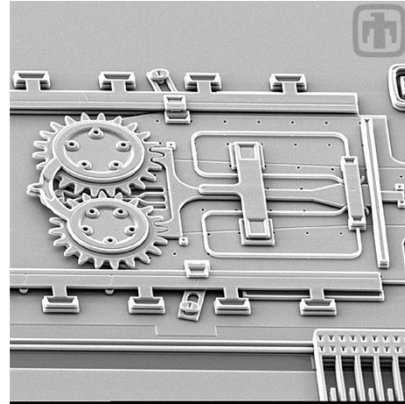
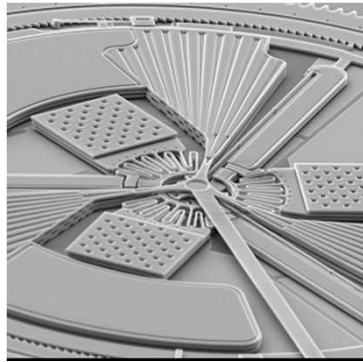
Avionics



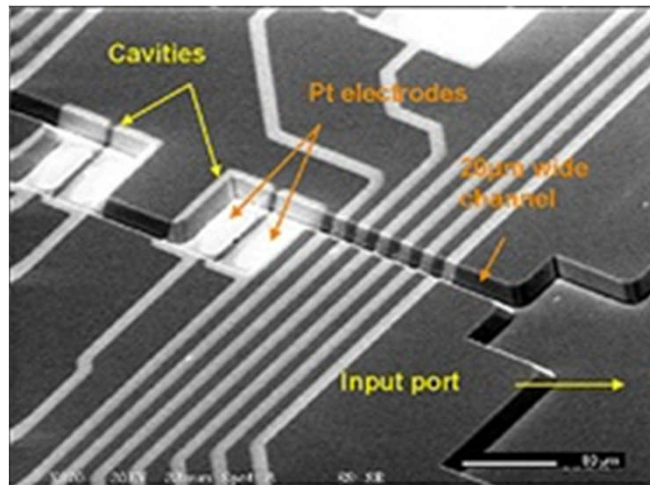


模拟信号与电子系统

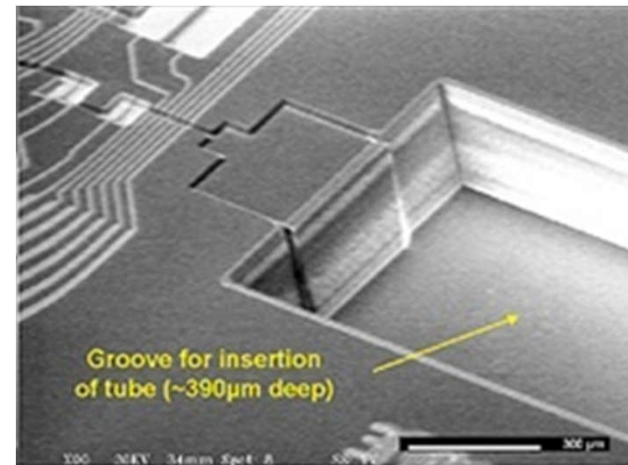
MEMS IC Device



Biochip Lab-on-Chip



HLA分型基因芯片（清华大学程京院士研究组）



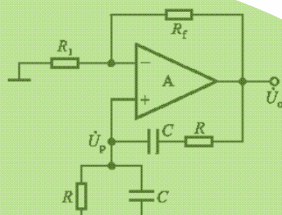


模拟信号与电子系统

电子系统设计和实现

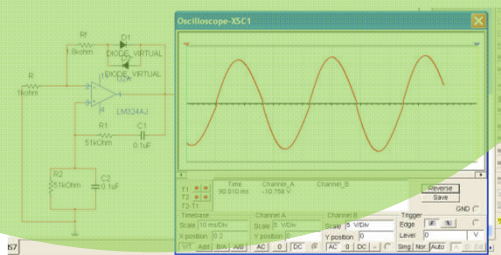
简单、价廉、快速、高性能 折衷！
满足性能要求时，尽可能简单、成本低！

电路分析
和设计



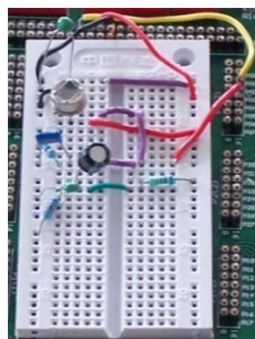
仿真验证
辅助设计

Multisim
PSpice



作业：查找资料，进一步了
解模拟信号、模拟电路、电
子系统

实际验证
(面包板)



制板 焊接 测试
Protel, OrCAD

封装

PCB



制作



0.2 关于本课程

一、课程内容

- 半导体器件（第1章）
- 放大电路（第2、3、4、5、6、9章，是课程的重点、难点）
- 信号的产生及处理（第7、8章）
- 直流电源（第10章）

二、课程培养目标

‘模拟电子技术基础’是电子技术入门性质的技术基础课。

- 初步掌握模拟电子电路的基本理论、基本知识和基本技能；
- 具有能够深入学习电子技术新发展的能力和将所学知识应用于本专业的能力。

考查要求：会识、会选、会算、会调、会设计



0.2 关于本课程

三、课程特点

➤ 实践性：搭建电路、测试电路、仿真电路；

➤ 工程性：

实际工程需要证明其可行性

定性分析；

实际工程需要计算其性能指标等

定量估算，合理估算；

要考虑半导体器件具有非线性、温度敏感性和分散性

➤ 创新性：不断创新推动了电子技术的发展。

创新：创造
再次发现
重新组合

四、学习方法

- 掌握基本概念、基本电路、基本分析方法、重点难点，通过例题帮助理解，通过作业、仿真加深理解。
- 电子电路分析方法的特点：
 - 电子器件具有非线性：合理近似、采用线性模型
 - 电子电路中交直流共存：交流和直流分开来分析
采用EDA软件帮助分析
 - 电子电路之间相互影响：分析问题要全面，注意性能指标之间以及电路各部分之间的相互影响。
- 特别注意电路原理在电子电路分析中的应用
 - 定理：KCL、KVL、戴维南定理、诺顿定理、叠加定理；
 - 方法：一阶RC回路三要素法、相量法、传递函数、拉氏变换；
 - 概念：滤波、谐振、同名端、功率等；
 - 器件： R 、 L 、 C 、变压器。



第一章 半导体器件基础

1.1 半导体

1.2 PN结

1.3 二极管和稳压管

1.4 晶体管及场效应管



1.1 半导体

一、半导体(Semiconductor)

导电能力介于导体和绝缘体之间

1. elemental semiconductor: elements in group IV

硅(Silicon, Si) , 锗(Germanium, Ge)

2. compound(化合物) semiconductor: group III- V

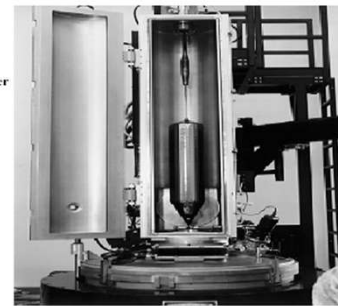
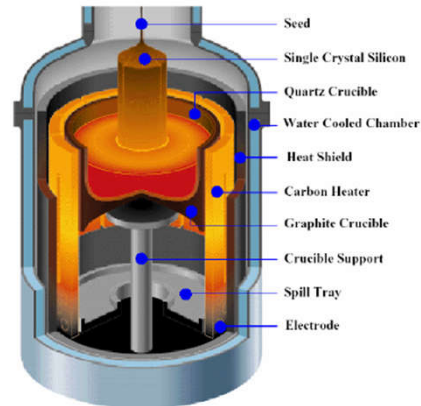
砷化镓(GaAs) , 磷化镓(GaP), 锑化铟(InSb)

IC Fabrication Process 1

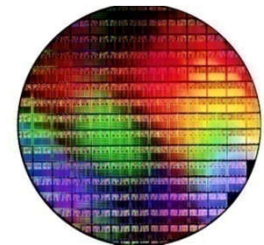
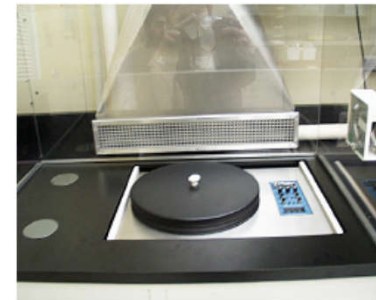
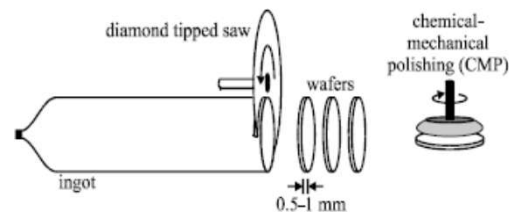
Quartz sand
(石英沙)
reduction and
purification



growth of a
crystalline
semiconductor
called an Si
ingot(纯净的单晶
硅棒)



Sliced into
Wafers
(晶圆片)



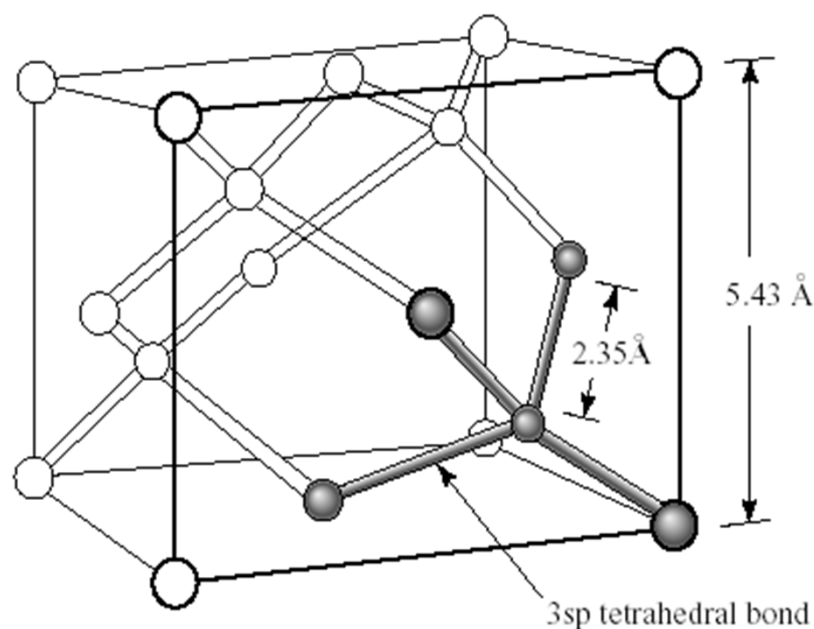


1.1 半导体

二. 本征半导体 (Intrinsic Semiconductor)

纯净的半导体晶体 (single-crystal semiconductor)

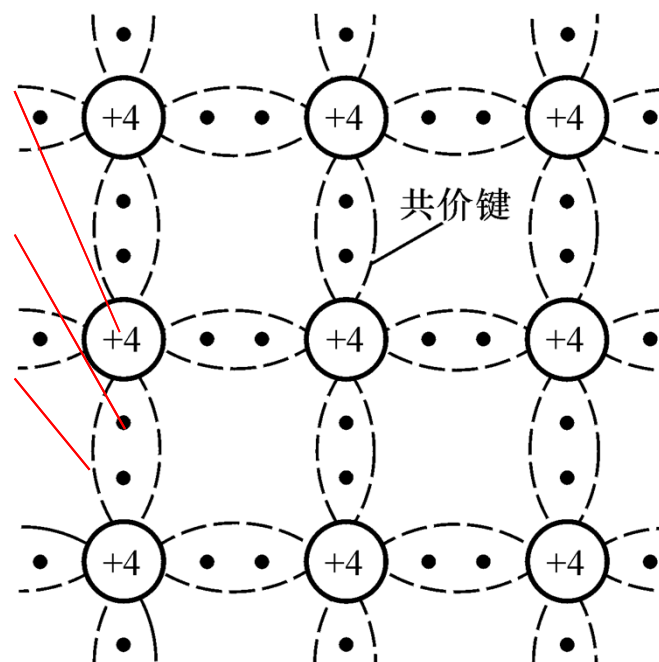
1. 本征半导体的原子结构及其共价键(Covalent bond)



正离子

价电子

共价键

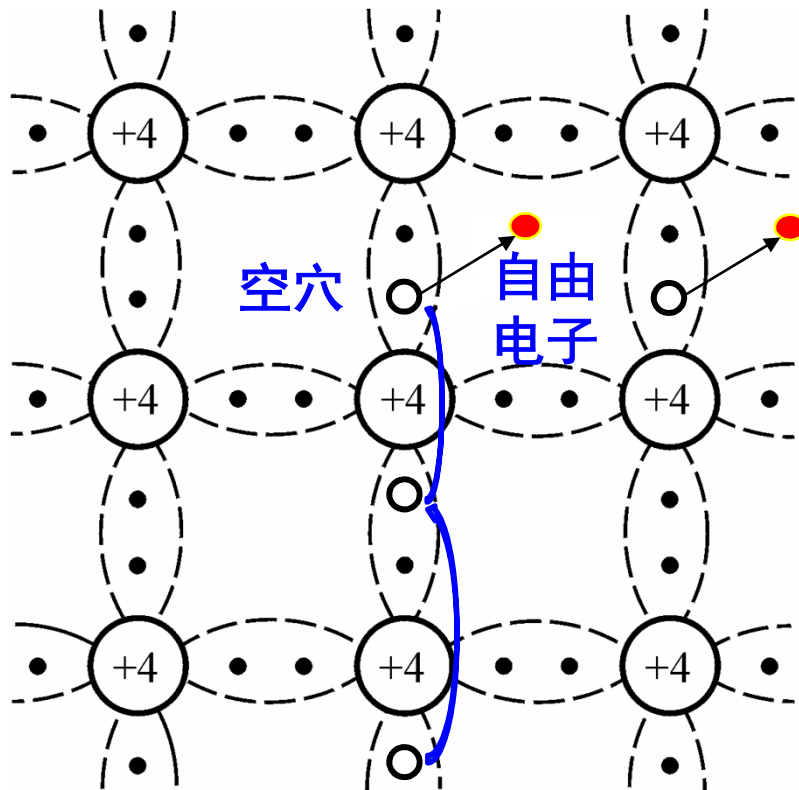




2. 本征半导体中的载流子(Carrier)

bandgap energy

(带隙能量) $E_g = 1.1\text{eV}$ (Si)



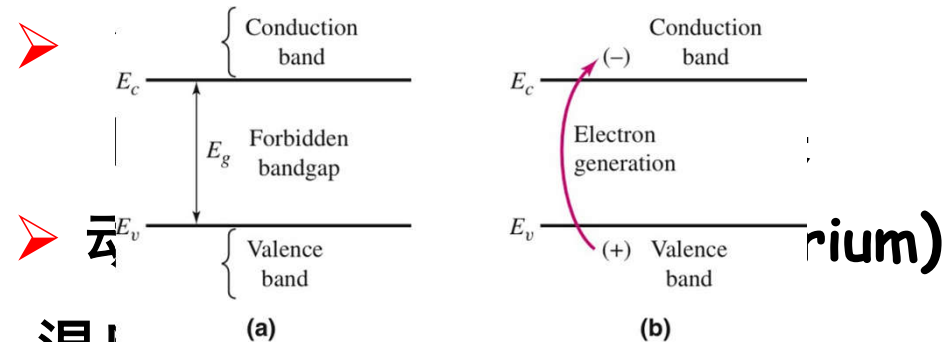
➤ 本征激发

热激发(Thermal generation)

光激发(Optical generation)

产生自由电子和空穴对

free electron, hole



温度

载流子浓度一定 $n = p = n_i = K_1 T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{Go}}{2kT}}$

自由电子带负电，空穴带正电，是两种载流子

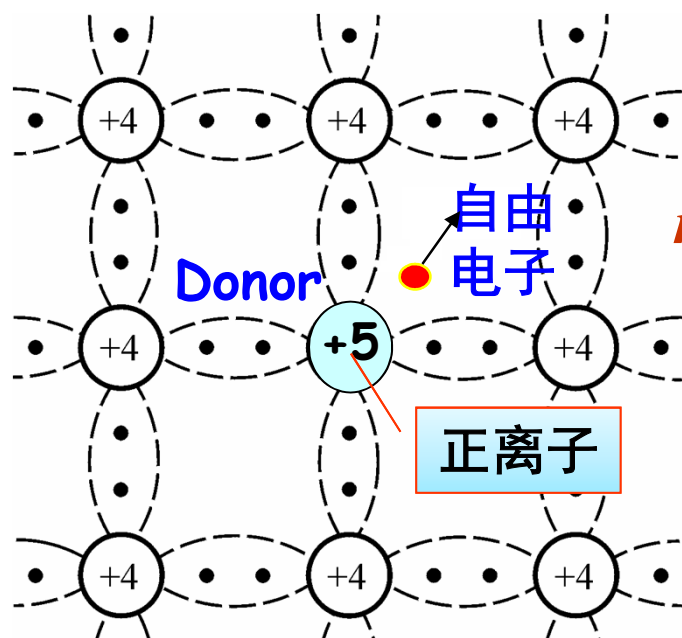
本征半导体载流子浓度低，导电性能很差，并受温度影响。

三、杂质半导体(Extrinsic Semiconductor)

在本征半导体中掺入微量其它元素，改善和控制导电性能

➤ N型半导体

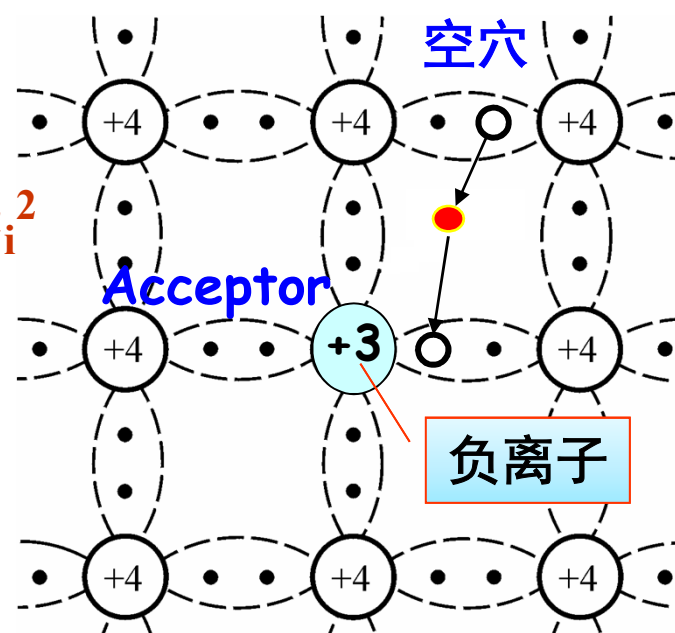
加入少量五价元素如磷(P)



Free electron—majority 多子
Hole—minority 少子 $n_0 \approx N_d$

➤ P型半导体

加入少量三价元素如硼(Boron)



Hole—majority $p_0 \approx N_a$
Free electron—minority

$$n_0 * p_0 = n_i^2$$

少子虽然浓度低，但受温度影响大，将影响半导体器件性能。



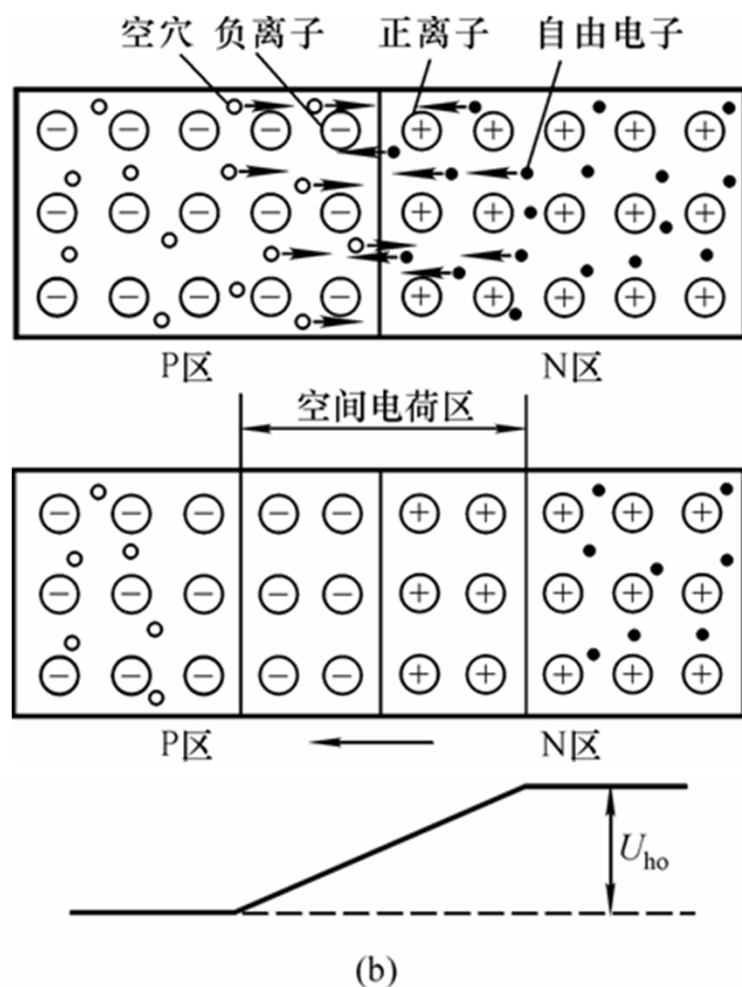
1.2 PN结

一、PN结(PN Junction)的形成

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，在它们的交界面就形成了PN结。



一、PN结(PN Junction)的形成



参与扩散运动的多子
==参与漂移运动的少子
→动态平衡状态，多子
与少子的电流和为零
→形成了PN结

多子扩散

形成
空间电荷区
(耗尽层)

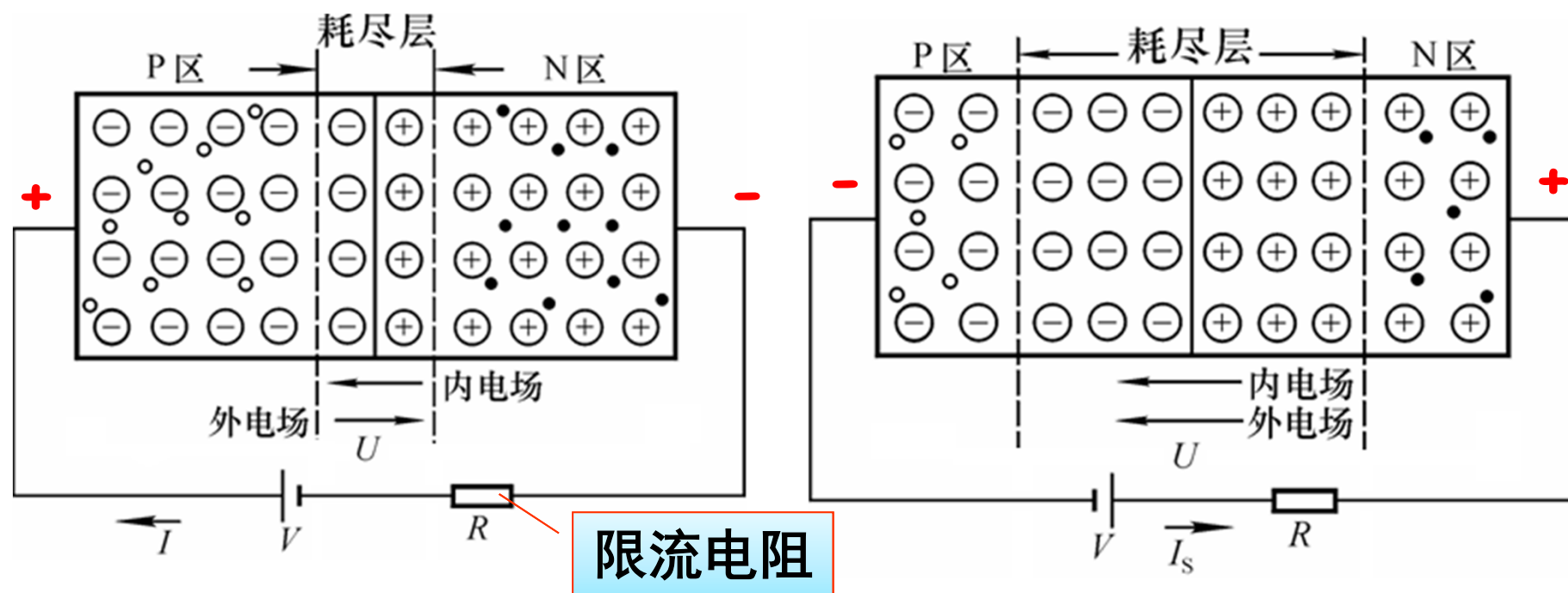
产生
内电场

阻止多子扩散

有利于少子漂移

扩散运动(Diffusion): 由于浓度差而产生的载流子(多子)的运动
漂移运动(Drift): 在电场力作用下载流子(少子)的运动

二、PN结的单向导电性



正向偏置(Forward bias):
以多子的扩散电流为主，PN结呈现出很小的电阻，称为**导通**工作状态。

反向偏置(Reverse bias):
以少子的漂移电流为主，反向饱和电流 I_s 很小，PN结呈现出很大的电阻，称为**截止**工作状态。
 I_s : Reverse-bias saturation current

三、PN结的电流方程和伏安特性

1. 电流方程(Ideal Current-Voltage relationship)

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

PN结外加电压

温度电压当量
(常温27°C时为26mV)

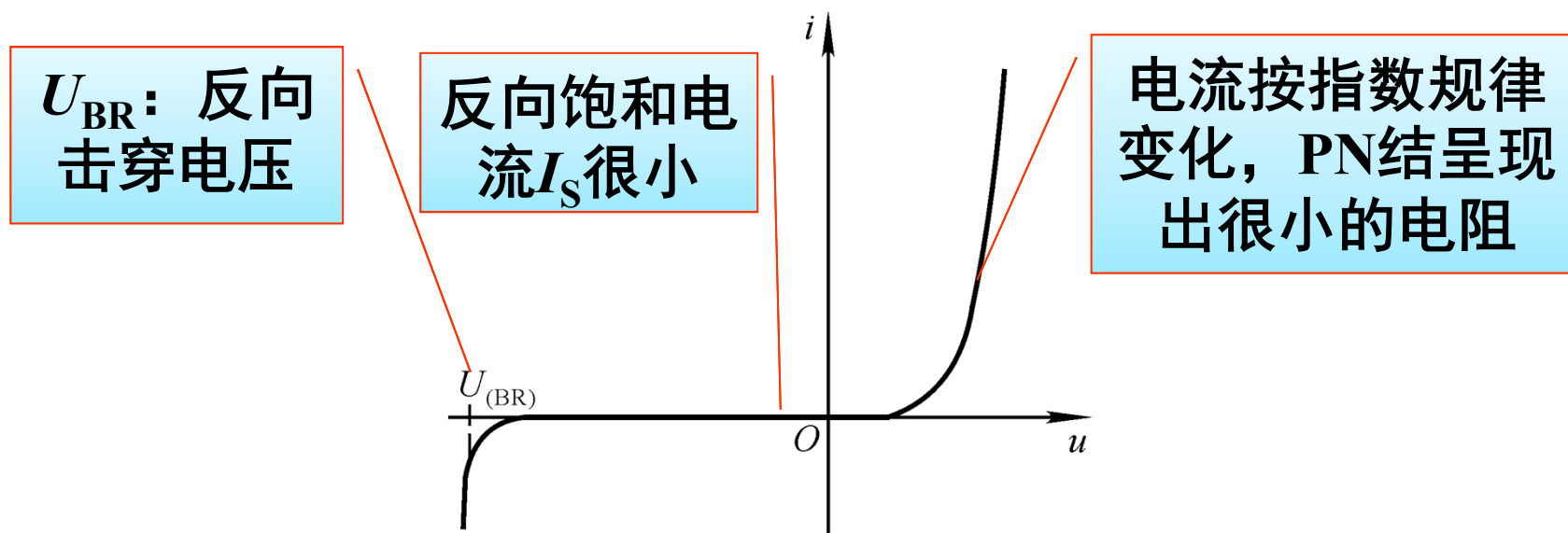
正向偏置且 $U \gg U_T$ 时, $i \approx I_S e^{U/U_T}$

反向偏置且 $U \ll -U_T$ 时, $i \approx -I_S$

三、PN结的电流方程和伏安特性

2. 伏安特性(Ideal I - V Characteristics)

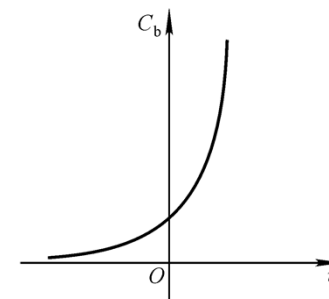
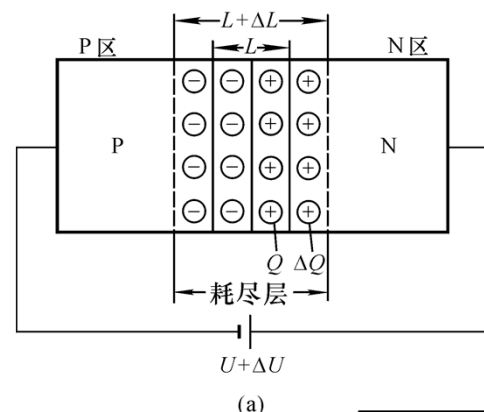
流过PN结的电流与端电压之间的关系曲线称为伏安特性曲线



四、PN结的电容效应

1. 势垒电容 C_b (Depletion layer capacitance)

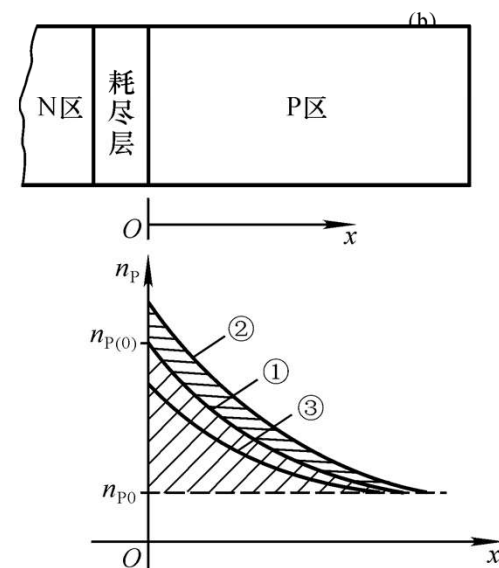
空间电荷区宽度随外加电压而变化所等效的电容。



2. 扩散电容 C_d (Diffusion capacitance)

PN结正向偏置时，多子扩散到另一区时，在结附近其浓度是按梯度分布的。

结电容：
$$C_j = C_b + C_d$$



正向偏置以 C_d 为主，反向偏置以 C_b 为主。 C_j : 1到几百pF，低频时阻抗很大，而高频时将使二极管失去单向导电性。

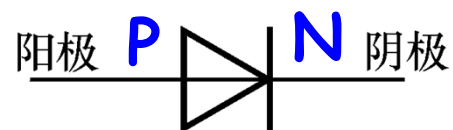
3. 反向恢复时间 t_{rr} 高频时影响开关电路的一个重要参数



1.3 半导体二极管

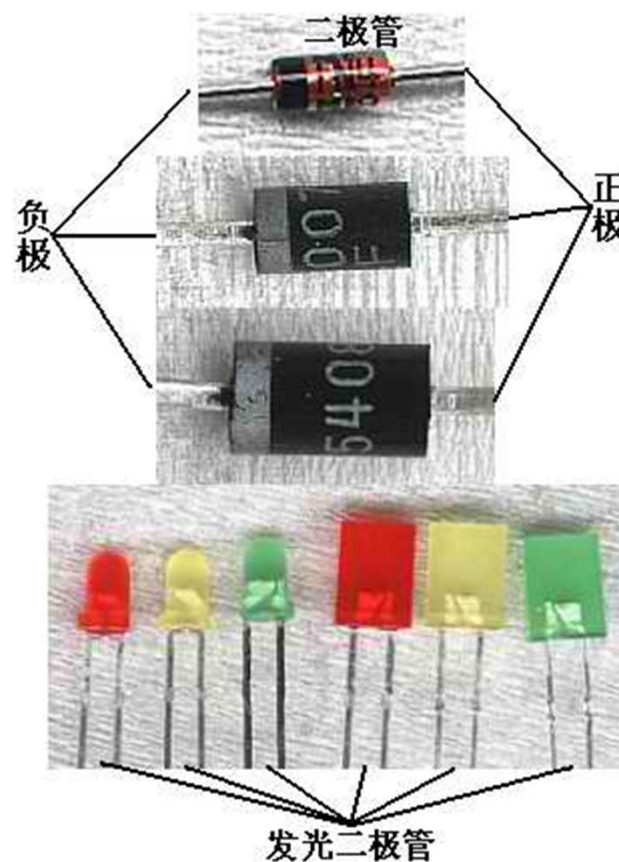
将PN结用外壳封装起来，加上电极引线就构成了二极管

一、二极管(Diode)符号、外形

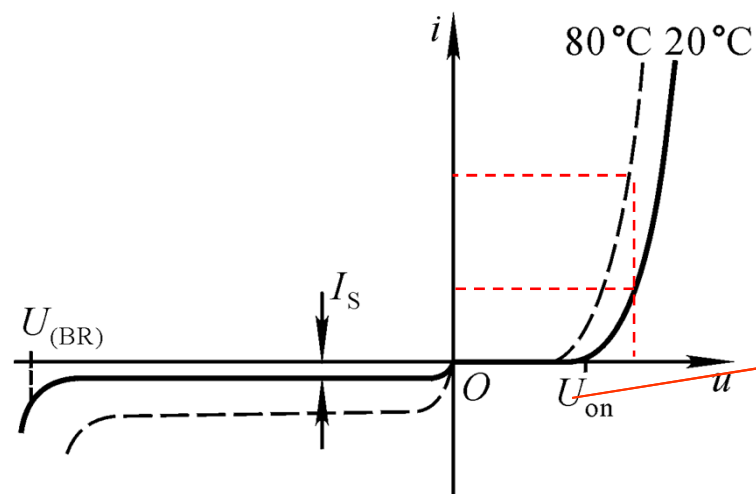


符号

外形



二、伏安特性(Ideal I - V Characteristics)



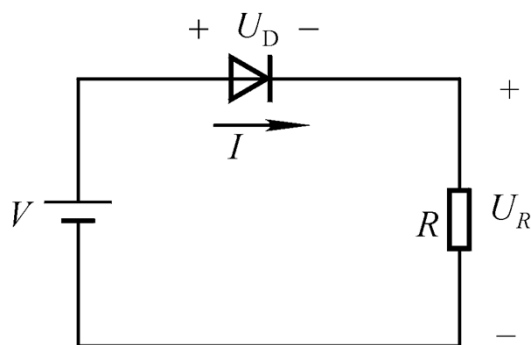
温度对输出特性的影响:

$$T \uparrow \rightarrow U_{on} \downarrow, I_S \uparrow$$

U_{on} : 开启电压

材料	开启电压 U_{on}	导通电压 U_D	反向饱和电流 I_S	反向击穿电压 $U_{(BR)}$
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	10pA	高
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	1 μ A	低
GaAs	1.0V	1.0~1.2V	1pA	较高

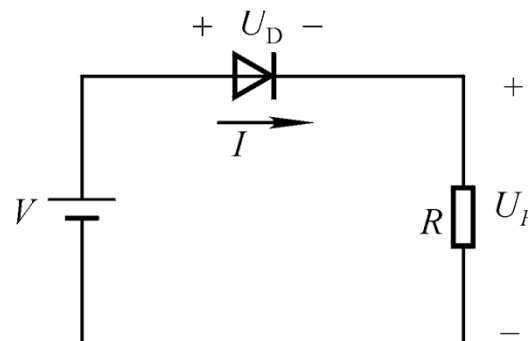
三、 二极管电路的分析方法 (Analysis Technique)



1. 解析法：利用电流方程求解
2. 图解法：利用伏安特性
3. 等效电路法 用线性化模型代替非线性二极管，合理进行近似分析

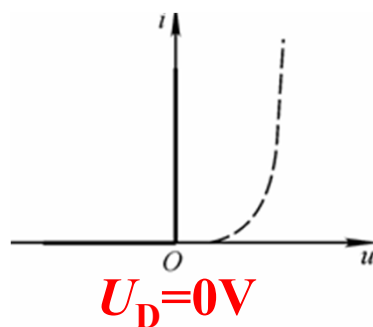
四、二极管的等效电路

1. 直流、低频大信号等效电路 (又称为折线化模型)



➤ 理想等效电路

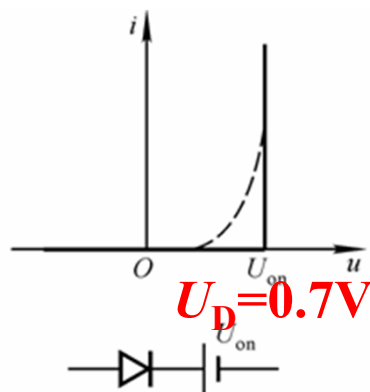
条件：二极管电路外加幅值较大的电压($V \geq 7V$, Si)



理想二极管

➤ 恒压等效电路

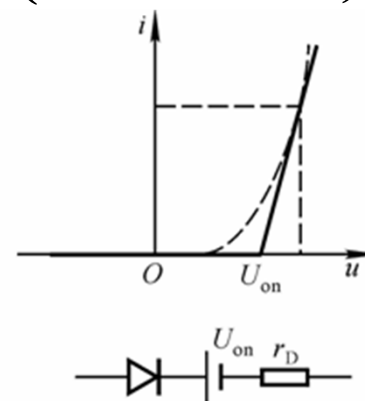
条件：二极管电路外加幅值较大的电压($V > 1V$, Si)



模型的选择取决于精度要求，第二种最常用，第三种最精确。

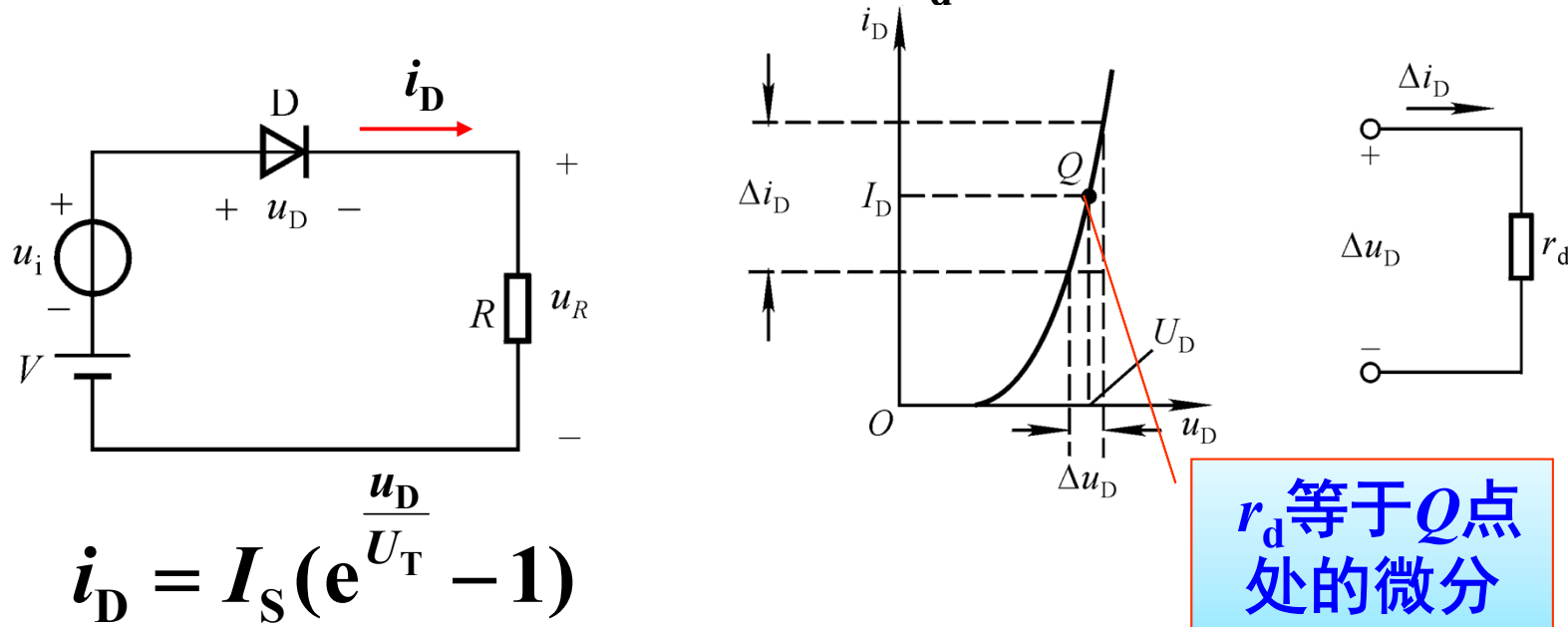
➤ 线性等效电路

条件：二极管电路外加幅值较小的电压($0.5 < V \leq 1V$, Si)



2. 微变等效电路(AC Equivalent Circuit)

二极管两端电压在某一直流值上叠加一个微小交流信号时，等效为电阻 r_d 。



$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{du_D}{di_D} = \frac{1}{\frac{di_D}{du_D}} \approx \frac{1}{\frac{I_S}{U_T} \cdot e^{\frac{u_D}{U_T}}} \approx \frac{U_T}{I_D}$$