

大连理工大学模拟电子线路课题组



模拟电子线路

Analog Electronic Circuits

第一讲 绪论 & PN结

授课人：余隽

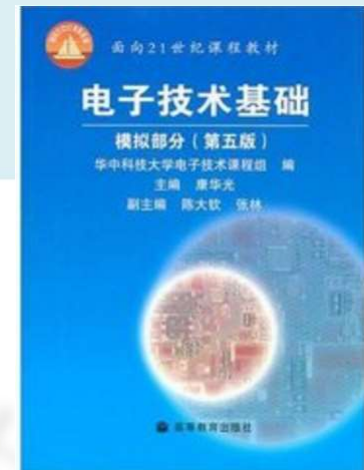
大连理工大学

2018年9-12月

助教：李宝玲

助教：朱思鹏

模拟电子线路 Analog Circuits



教材：《电子技术基础 模拟部分》康华光, 第五版

教材顺序

绪论

2.运算放大器

3.二极管及其基本电路

4.双极结型三极管及放大电路

5.场效应管放大电路

6.模拟集成电路

7.反馈放大电路

8.功率放大电路

9.信号处理与信号产生电路

10.直流稳压电源

教学安排

绪论

3.二极管及其基本电路 (1周)

4.双极结型三极管及放大电路 (2-5周)

5.场效应管放大电路 (6周)

8.功率放大电路 (7周)

6.模拟集成电路 (8周)

7.反馈放大电路 (9-10周)

2.运算放大器 (11周)

9.信号处理与信号产生电路 (12-13周)

10.直流稳压电源 (14周)

期中考试 11月2日
第9周周五9-10节

课程内容较多，知识点多，学习难度较大。

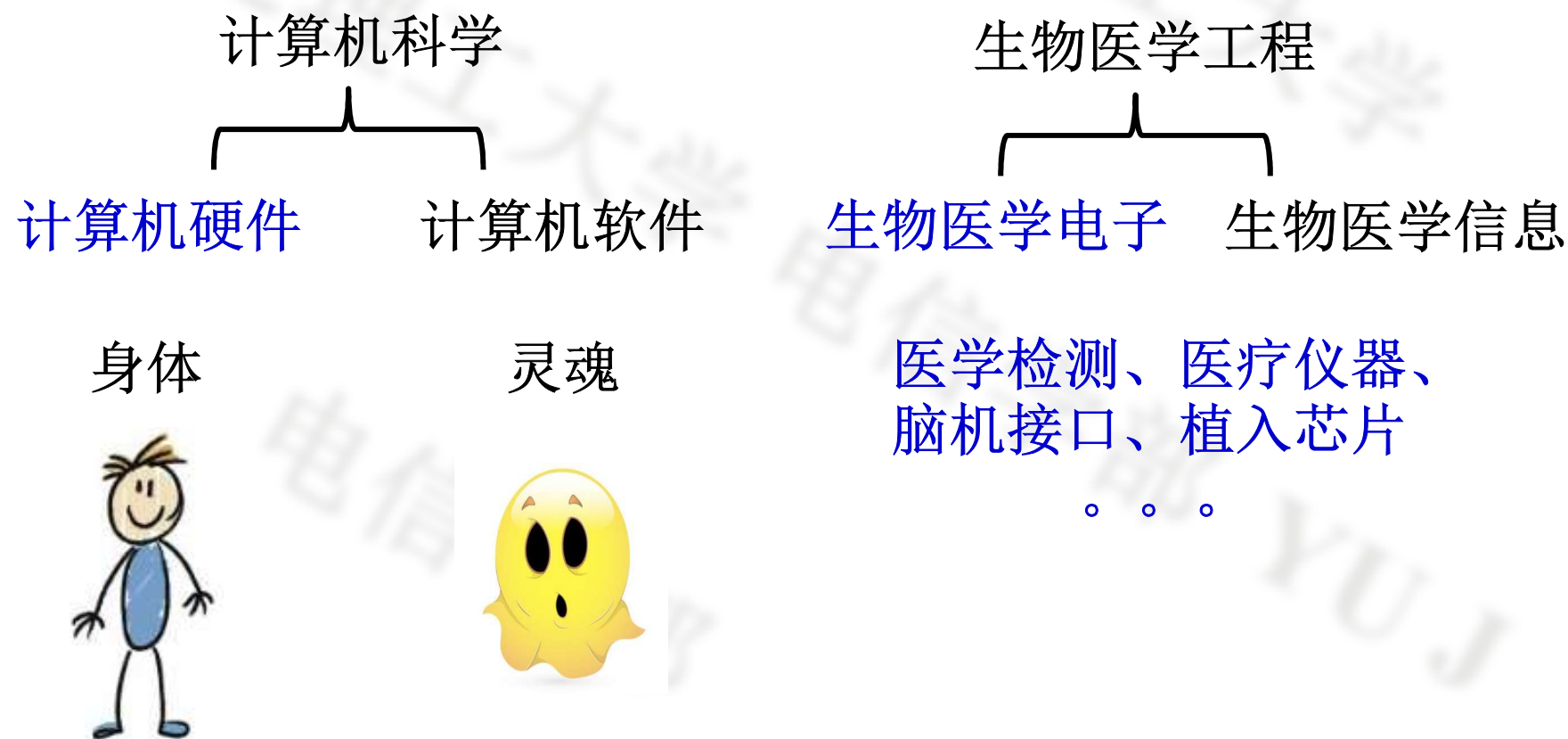
主要参考教材 (References)

- Thomas L. Floyd. **Electronics fundamentals: circuits, devices, and applications**, third edition. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995
- J. Michael McMenamin. **Applied electronic devices and analog ICs**. Albany, NY : Delmar Publishers, 1995
- 童诗白. 模拟电子技术基础. ED3 , 高教出版社
- 王彩杰, 张淑芬, 周日强. 模拟电子技术及其应用. 大工出版社
- 网络视频: 模拟电子线路基础—清华大学, 华成英

模拟电子线路 Analog Circuits

课程性质：电子技术入门阶段的**专业基础课**。

电类专业的**考研专业课**之一。



课程考核

定性分析（读）、定量分析（算）、电路设计（选）

成绩评定：

平时成绩，占10%，每周按时上交作业；随机课堂提问；

期中考试成绩占30%，内容为前八周所学内容

期末考试成绩占60%，包括全部知识点

全部考试为一纸化开卷考试

实验单独开课，要重视实验课。

实践与理论并重才能学好！

1. 绪论

1.1 回顾历史，展望未来

1.2 什么是模拟电子线路

1.3 信号源

1.4 放大电路

1.5 频谱与带宽

1.6 基本电路参数的表达形式

1.7 如何学好模电

1.绪论

1.1 回顾历史，展望未来

电子管（真空管）时代

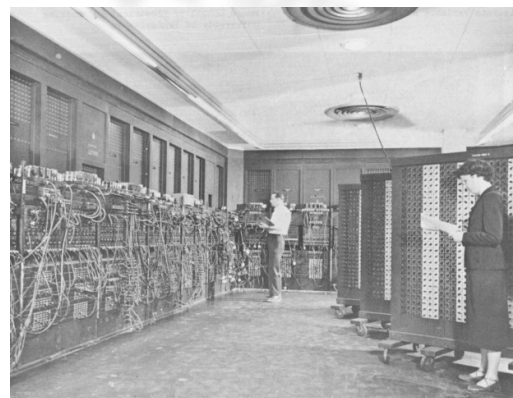
19世纪末，发现电子，爱迪生发明电灯，发现爱迪生效应；

20世纪初，英国弗莱明发明真空二极管；

美国德福雷斯特发明真空三极管；

——电子工业的起点；

1946年，美国，第一台电子计算机



半导体的时代（硅时代）

19世纪末，发现半导体的各种电学特性；

20世纪，逐步建立半导体理论；半导体二极管；

1947年，美国贝尔实验室肖克莱等**3人**发明晶体管（半导体三极管），标志着半导体时代（固体电子时代）来临；
他们因此于**1956年**获得诺贝尔物理奖；

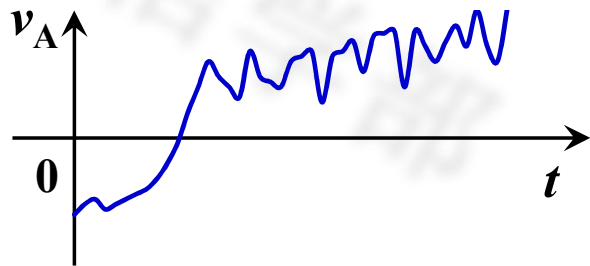
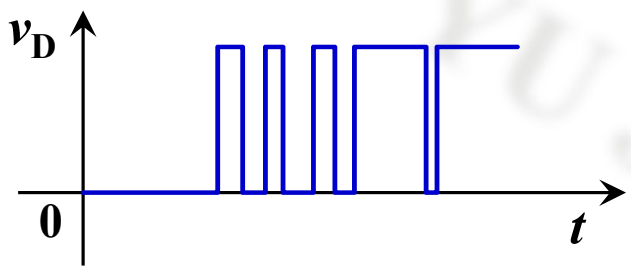
1959年，集成电路诞生；

半导体技术促使现代电子技术飞速发展，人类进入信息时代。

下一个时代：碳时代？生命科学的世纪。。。

1.2 什么是模拟电子线路

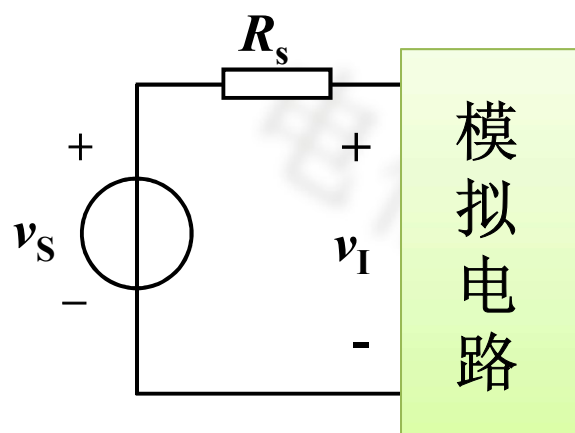
- (1) **电路**: 由金属导线 和 电气或电子部件 组成的导电回路。
- (2) **电气电路**: 强电。交流高压。如, 电能转换与运输系统。
- (3) **电子线路**: 弱电。24V以内。如, 信号调理与通讯系统。
- (4) **模拟电子电路**: 产生和处理**模拟电信号**的电子电路。

分类	模拟信号 (Analog)	数字信号 (Digital)
特点	时间和数值都连续	时间和数值都离散
典型波形		

1.3 信号源

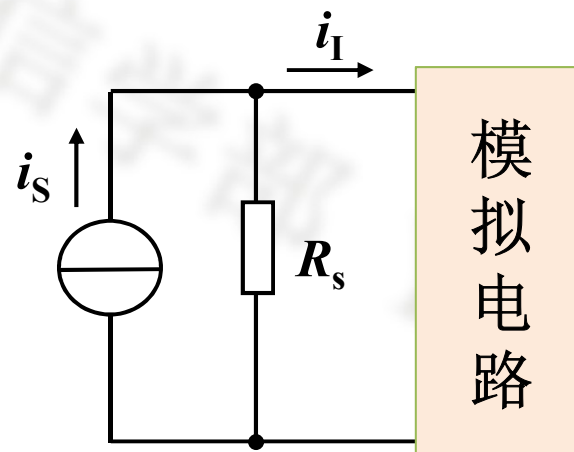
- (1) 信号是信息的载体。
- (2) 信号源：大多数物理信号都需要通过传感器转变成电信号，这时传感器的输出相当于系统的信号源。
- (3) 信号源的等效电路

电压源等效电路



$v_s = V_s + v_s$ 要求设计大输入
阻抗的电路

电流源等效电路



要求设计小输入
阻抗的电路

1.4 放大电路

课程的核心。绝大多数模拟电路内部含有放大电路。

表示方法与部分主要指标：

四种放大电路：

①电压放大电路：

$$\dot{V}_o = \dot{A}_v \dot{V}_i$$

②电流放大电路：

$$\dot{I}_o = \dot{A}_i \dot{I}_i$$

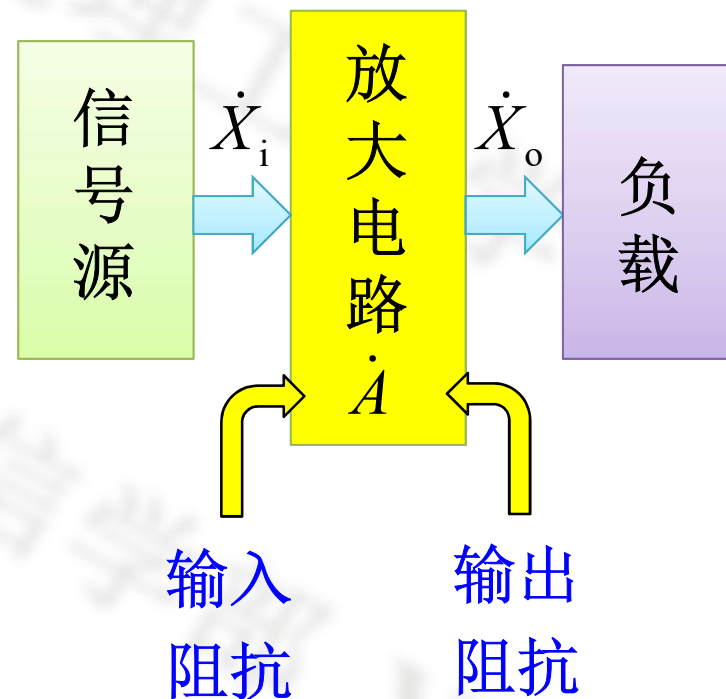
③互阻放大电路：

$$\dot{V}_o = \dot{A}_r \dot{I}_i$$

④互导放大电路：

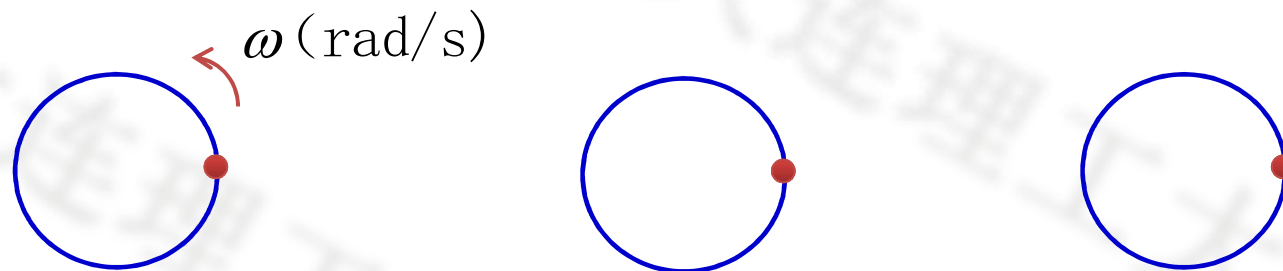
$$\dot{I}_o = \dot{A}_g \dot{V}_i$$

增益



希望增益为常数，
称为线性放大

1.5 频谱与带宽



周期 T (s/cycle, s) : 转一圈所需要的时间。

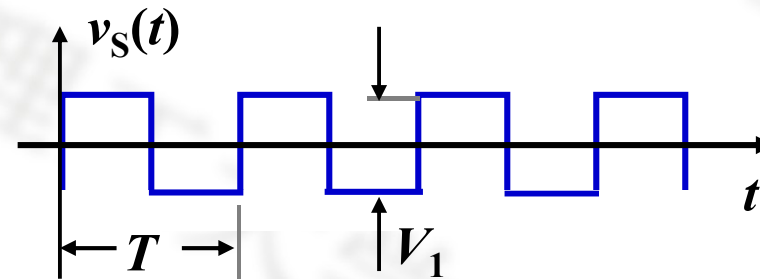
频率 $f = 1/T$ (cycle/s, Hz) : 一秒钟转的圈数。

角频率 $\omega = 2\pi/T$ (rad/s) : 一秒钟转的弧度值。

$$f(\text{Hz}) = \frac{\omega (\text{rad/s})}{2\pi (\text{rad/cycle})}$$

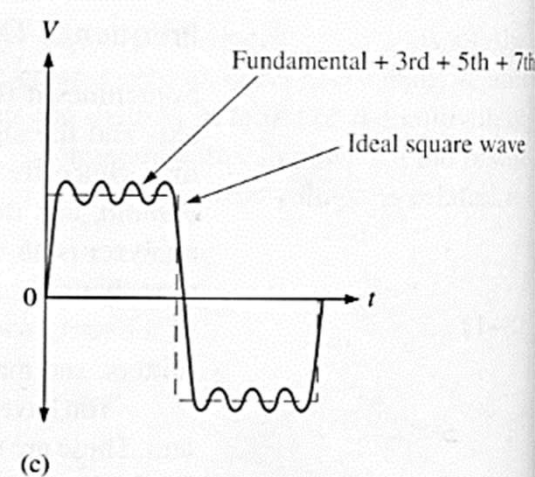
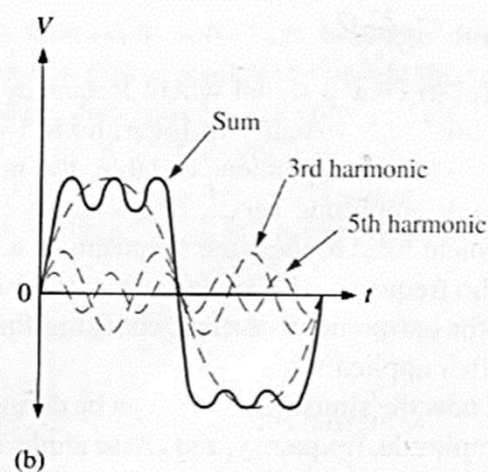
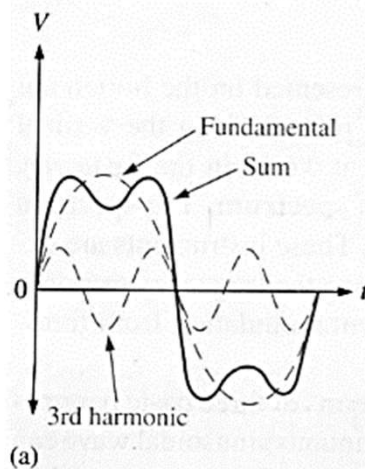
1.5 频谱与带宽——幅频特性

以方波信号为例理解频谱：



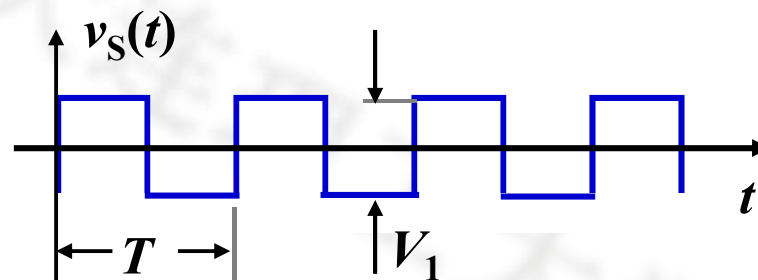
$$\omega_0 = 2\pi / T$$

$$v_s(t) = \frac{2V_1}{\pi} \left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_0 t) + \dots \right)$$

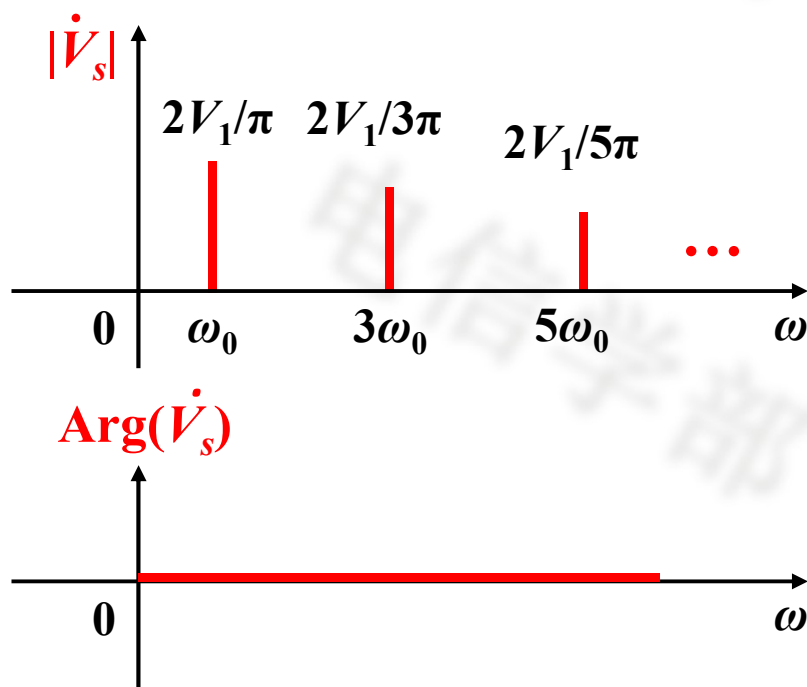


1.5 频谱与带宽——幅频特性

以方波信号为例理解频谱：



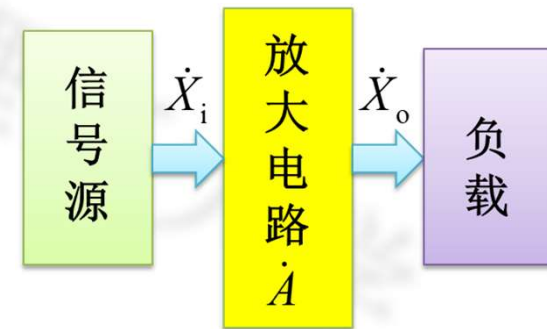
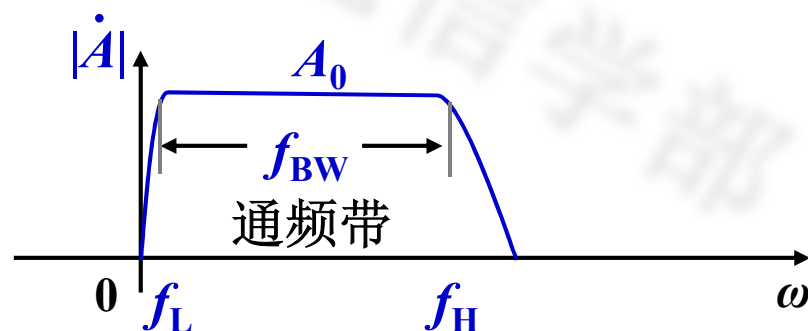
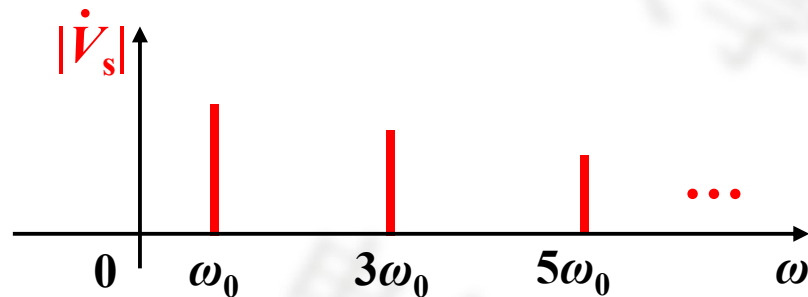
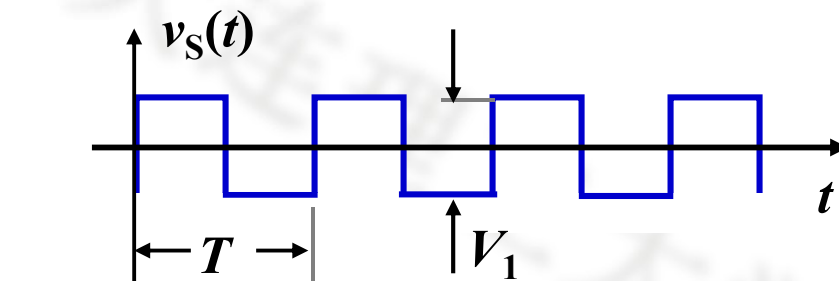
$$v_s(t) = \frac{2V_1}{\pi} \left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_0 t) + \dots \right) \quad \omega_0 = 2\pi / T$$



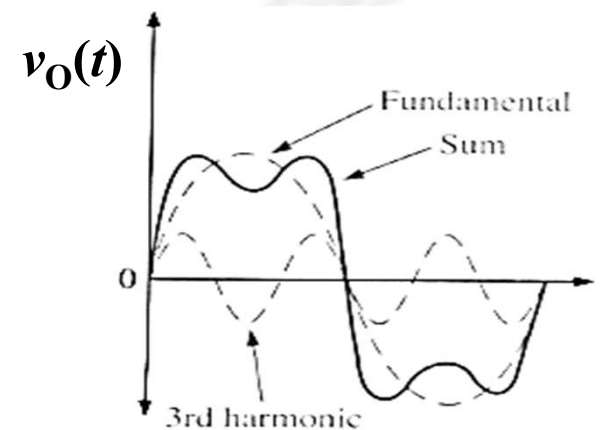
频谱：将一个信号分解为正弦信号的集合，得到其正弦信号幅值和相位随角频率（或频率）变化的分布，称为信号的频谱。包括幅频特性和相频特性。

1.5 频谱与带宽——带宽

以方波信号为例理解放大电路带宽的意义

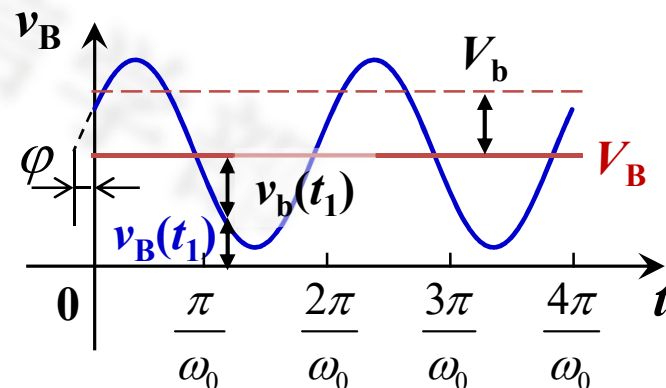


放大电路的带宽 f_{BW} (Hz) :
最大增益的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 对应的最大频率
与最小频率之差.



1.6 基本电路参数的表达形式

符号	特点	表示的物理量
v_B	变量小写，下标大写	总瞬时值
V_B	变量大写，下标大写	直流分量（平均值）
v_b	变量小写，下标小写	交流分量瞬时值
V_b	变量大写，下标小写	交流有效值



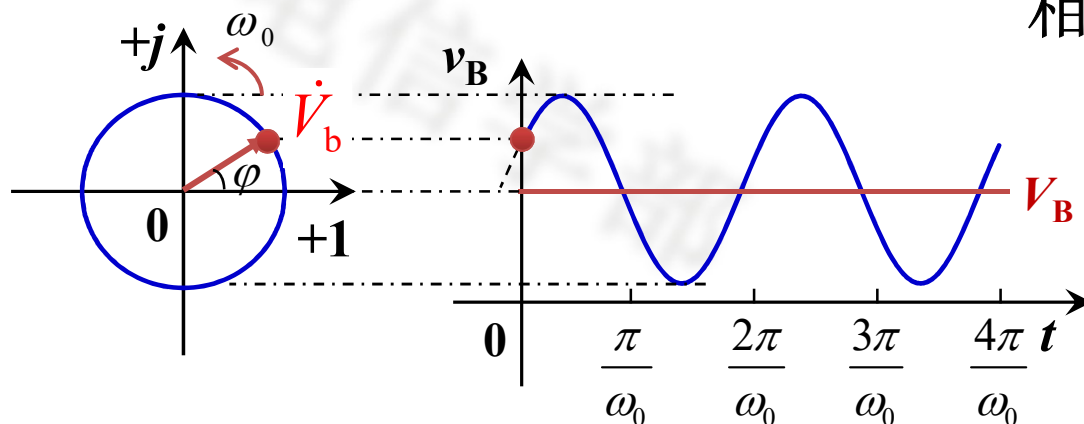
$$v_B = V_B + v_b$$

$$v_b = \sqrt{2} V_b \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

1.6 基本电路参数的表达形式

符号	特点	表示的物理量
v_B	变量小写，下标大写	总瞬时值
V_B	变量大写，下标大写	直流分量（平均值）
v_b	变量小写，下标小写	交流分量瞬时值
V_b	变量大写，下标小写	交流有效值
\dot{V}_b	变量大写加点，下标小写	相量

相量常用于频域分析



$$v_B = V_B + v_b$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

1.7 如何学好模电

1、“三基”

基本概念（物理、数学）

基本原理（元器件、电路单元）

基本分析方法（线路、系统）

2、课内：掌握常识，分清主次

3、课外：拓展学习、勤于实践

电路仿真分析（**SPICE**、**Multisim**）；

进入实验室做实验；

利用网络资源；

参加电子竞赛.....

3 半导体二极管及其基本电路

3.1 半导体基础知识

3.2 PN结的形成及特性

3.3 半导体二极管

3.4 二极管基本电路及其分析方法

3.5 特殊二极管

3.1 半导体的基本知识

3.1.1 本征半导体

导体、半导体和绝缘体的区别？

导电能力由强到弱：

导体 → 半导体 → 绝缘体

半导体： 导电特性处于导体和绝缘体之间，如**Ge**、**Si**、**GaAs**和一些硫化物、氧化物等。

5 硼 B 10.811	6 碳 C 12.011	7 氮 N 14.007
13 铝 Al 26.982	14 硅 Si 28.085	15 磷 P 30.974
31 镓 Ga 69.72	32 锗 Ge 72.5	33 砷 As 74.922
49 铟 In 114.82	50 锡 Sn 118.6	51 锑 Sb 121.7

- 当受热、光、电、磁等的作用时，导电能力改变。
- 往半导体中掺入某些杂质，导电能力改变。

3.1.1 本征半导体-----结构特点

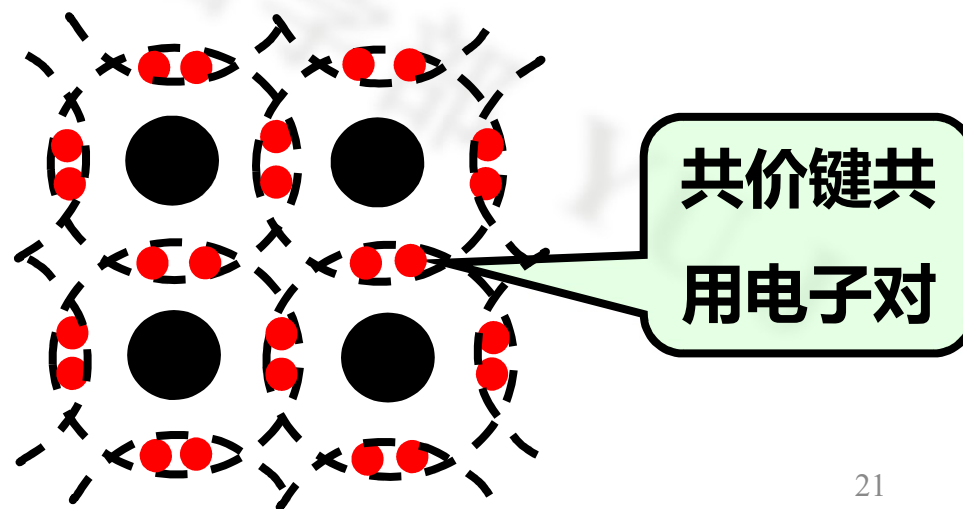
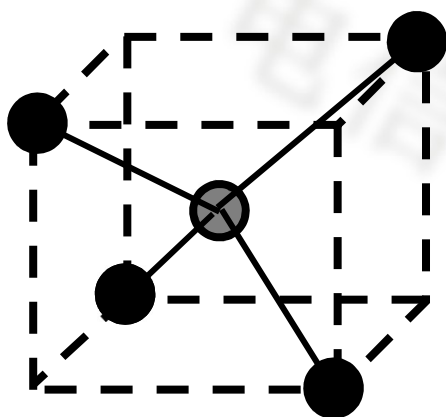
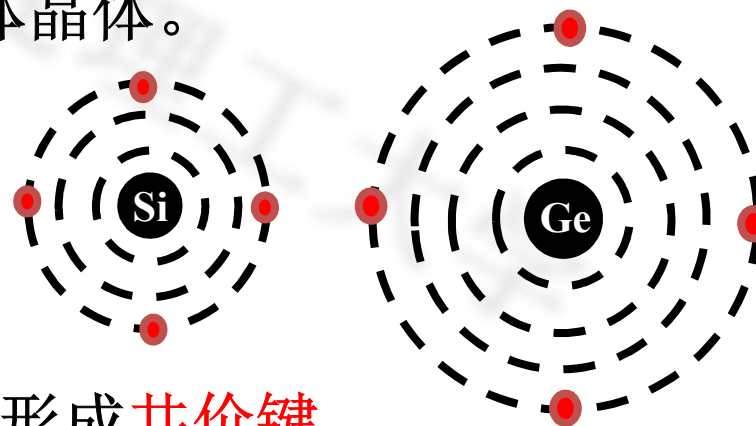
本征半导体：纯净、完美的半导体晶体。

四价元素形成的单元素半导体：

Si, Ge

每个原子与其相邻的**4**个原子之间形成**共价键**。

结构稳定。

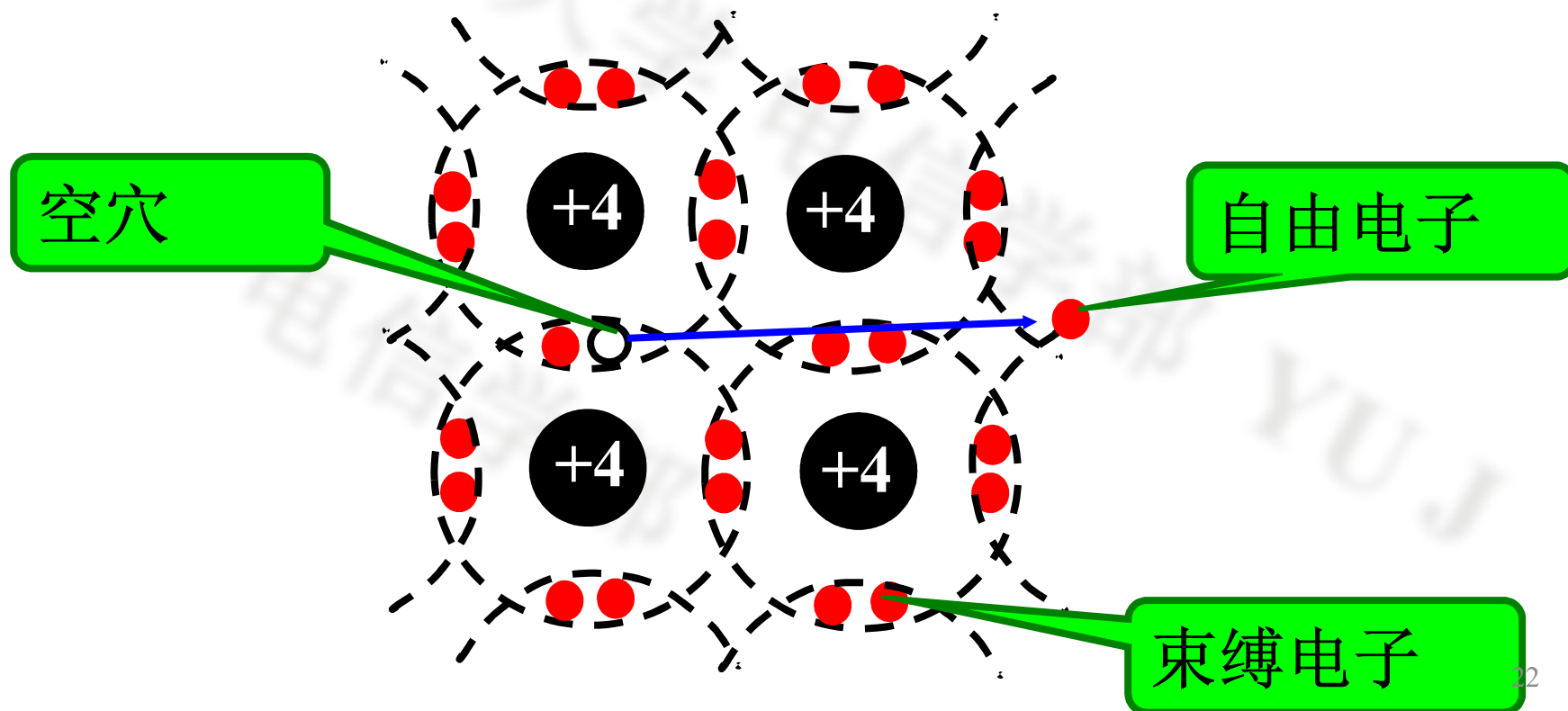


3.1.1 本征半导体-----导电机理

载流子、自由电子和空穴：

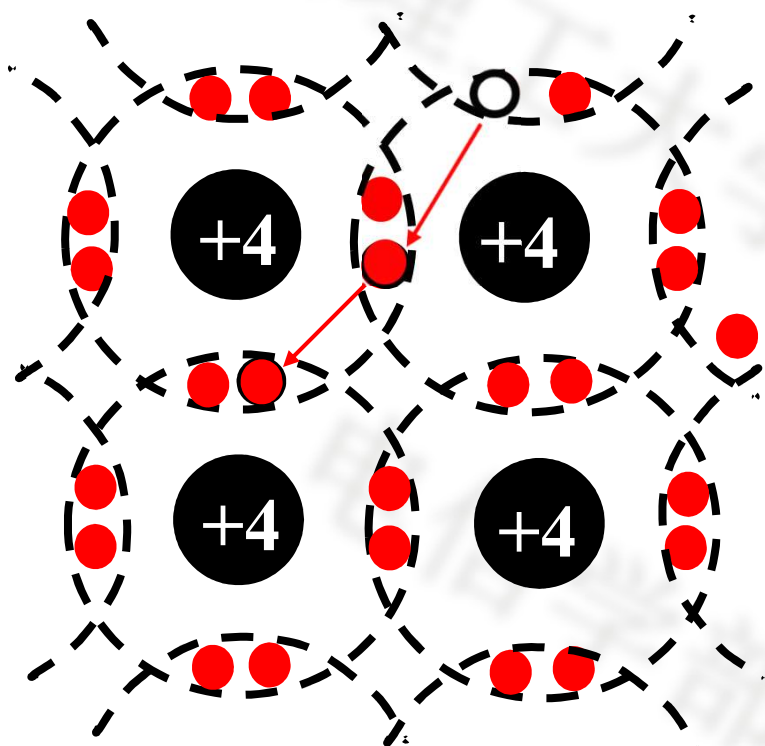
绝对温度为 0 K 时，绝缘。

温度升高，部分价电子挣脱束缚变成自由电子。



3.1.1 本征半导体-----导电机理

本征半导体中存在数量相等的两种载流子，即自由电子和空穴。——电子空穴对



半导体中电流由两部分组成：

- (1) 自由电子移动产生的电流。
- (2) 空穴移动产生的电流。

温度对导电性的影响



温度越高，载流子的浓度越高，本征半导体的导电能力越强。温度是影响半导体性能的一个重要的外部因素。

3.1.2 杂质半导体-----N型半导体 Negative

本征半导体中掺入某些微量杂质，可改变半导体的导电性。

在硅或锗中掺入少量的五价元素（磷或砷）

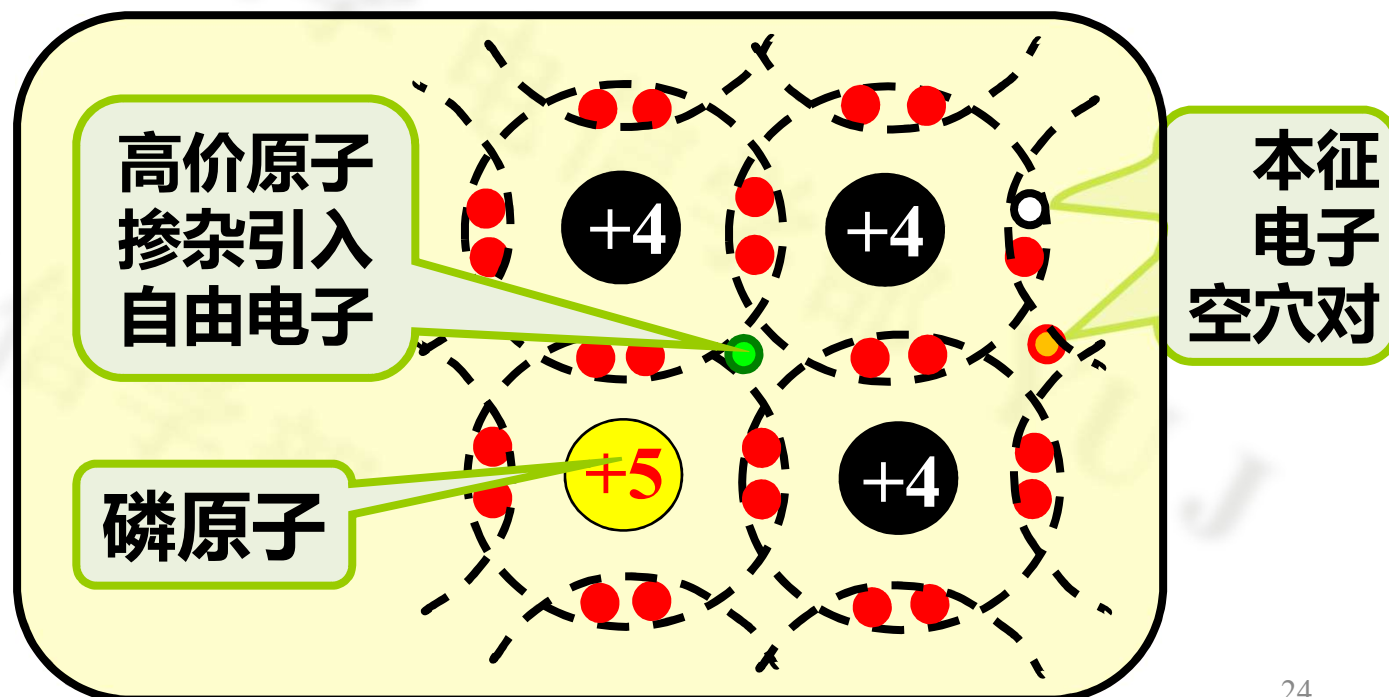
每个磷原子给出一个电子，称为**施主原子**

多子

少子

掺杂浓度 \gg 本征载流子浓度，所以，自由电子浓度 \gg 空穴浓度。

5 硼 B 10.811	6 碳 C 12.011	7 氮 N 14.007
13 铝 Al 26.982	14 硅 Si 28.085	15 磷 P 30.974
31 镓 Ga 69.72	32 锗 Ge 72.5	33 砷 As 74.922
49 铟 In 114.82	50 锡 Sn 118.6	51 锑 Sb 121.7



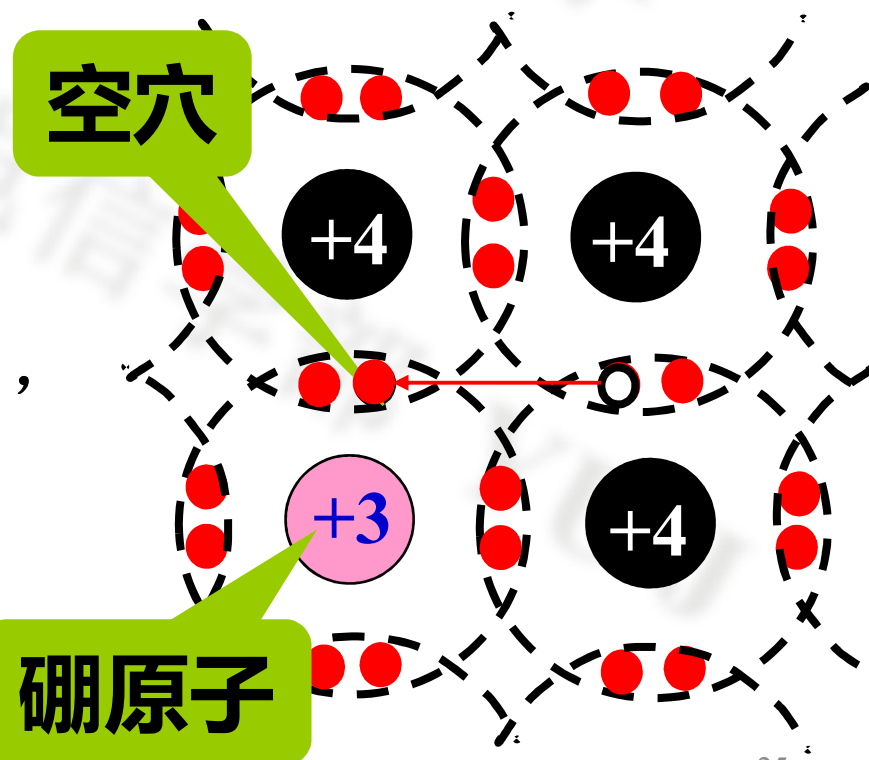
3.1.2 杂质半导体-----P型半导体 Positive

5 硼 B 10.811	6 碳 C 12.011	7 氮 N 14.007
13 铝 Al 26.982	14 硅 Si 28.085	15 磷 P 30.974
31 镓 Ga 69.72	32 锗 Ge 72.5	33 砷 As 74.922

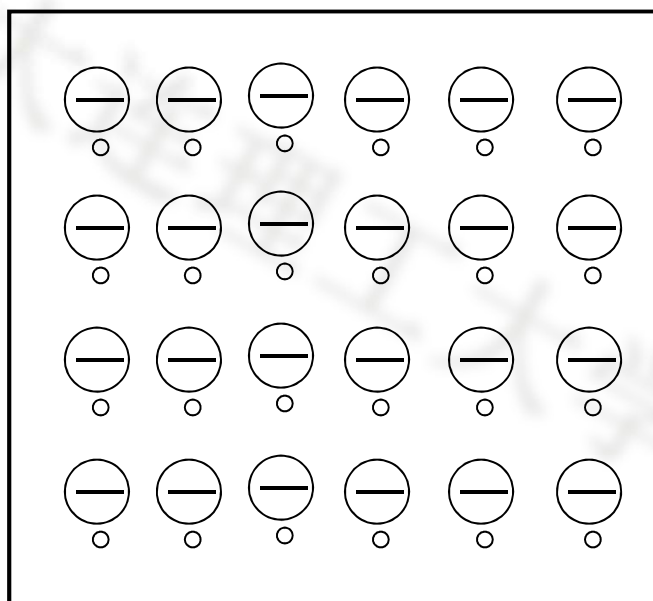
在硅或锗中掺入少量的三价元素（硼或镓）
每个硼原子给出一个空穴，称为受主原子

设计 掺杂浓度 \gg 本征载流子浓度，
所以 空穴浓度 \gg 自由电子浓度。

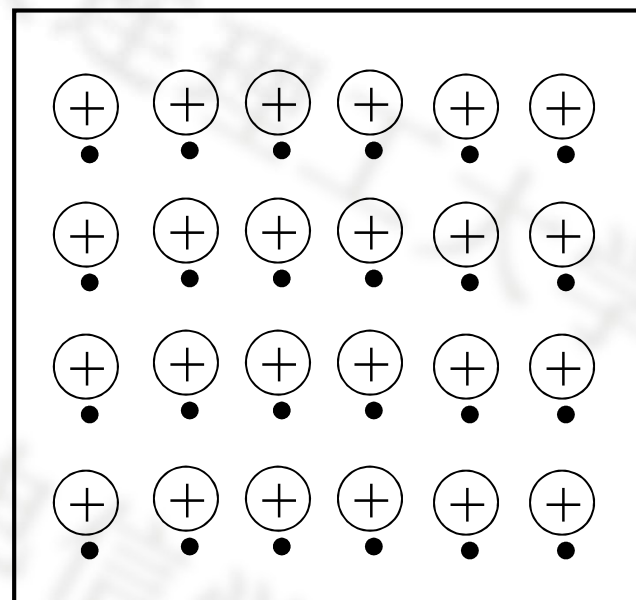
P型半导体中空穴是多子，
电子是少子。



3.1.2 杂质半导体-----示意图



P 型半导体



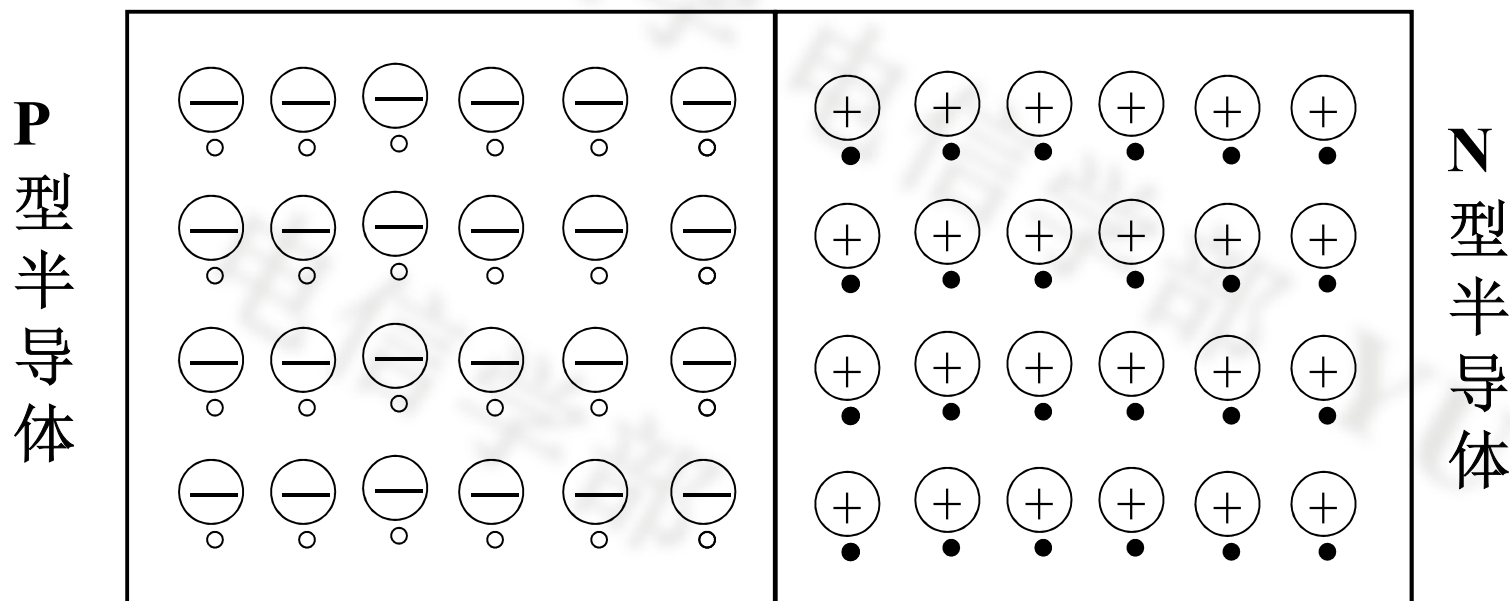
N 型半导体

杂质半导体的多子和少子的移动都能形成电流。
但由于数量的关系，起导电作用的主要是多子。
近似认为：杂质浓度 \approx 多子浓度。

3.2 PN 结

3.2.1 PN结的形成

在同一片半导体基片上，分别制造**P**型半导体和**N**型半导体，经过载流子的移动，在它们的交界面处就形成了**PN**结。



内电场越强，就使漂移运动越强，而漂移使空间电荷区变薄。

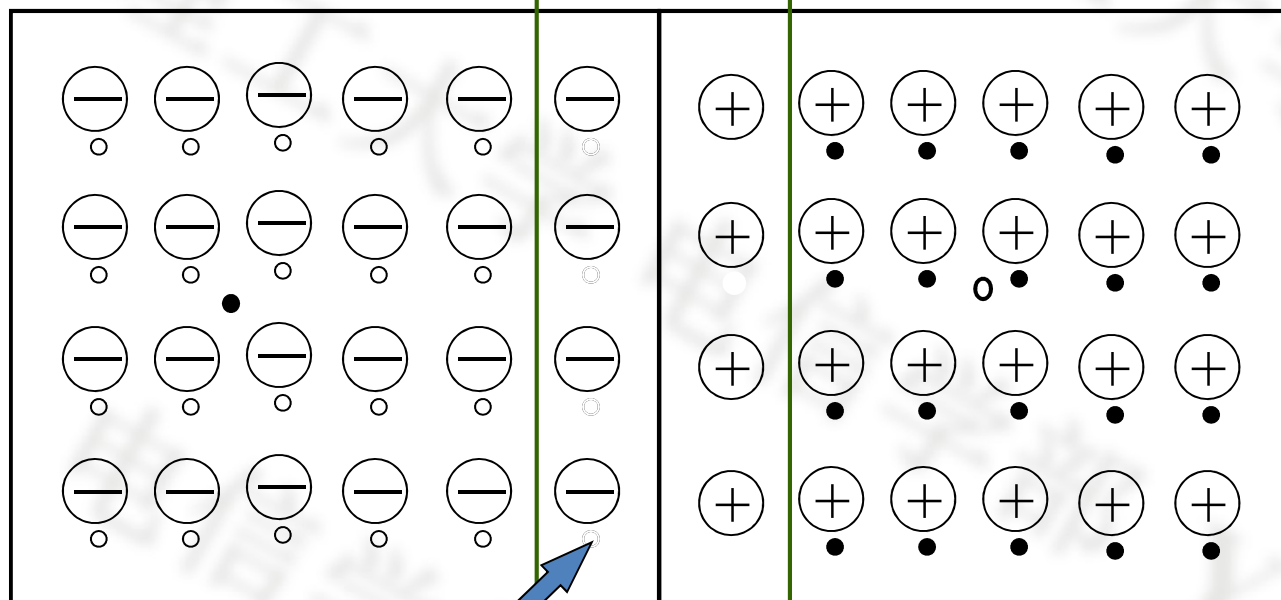
P型半导体

N型半导体

漂移运动



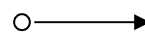
内电场 E 有何种影响？



空间电荷区，也称耗尽层。

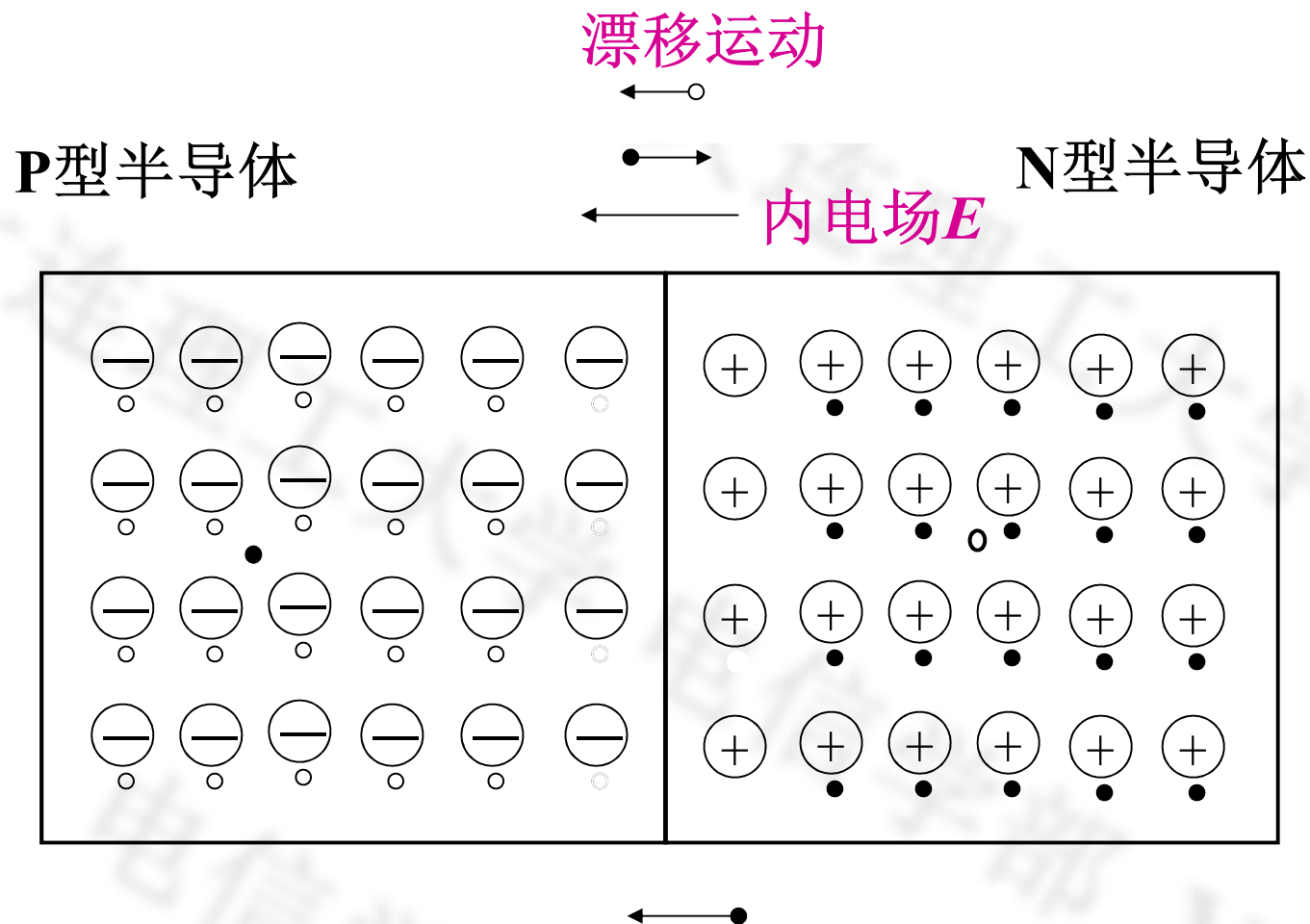
复合

浓度差



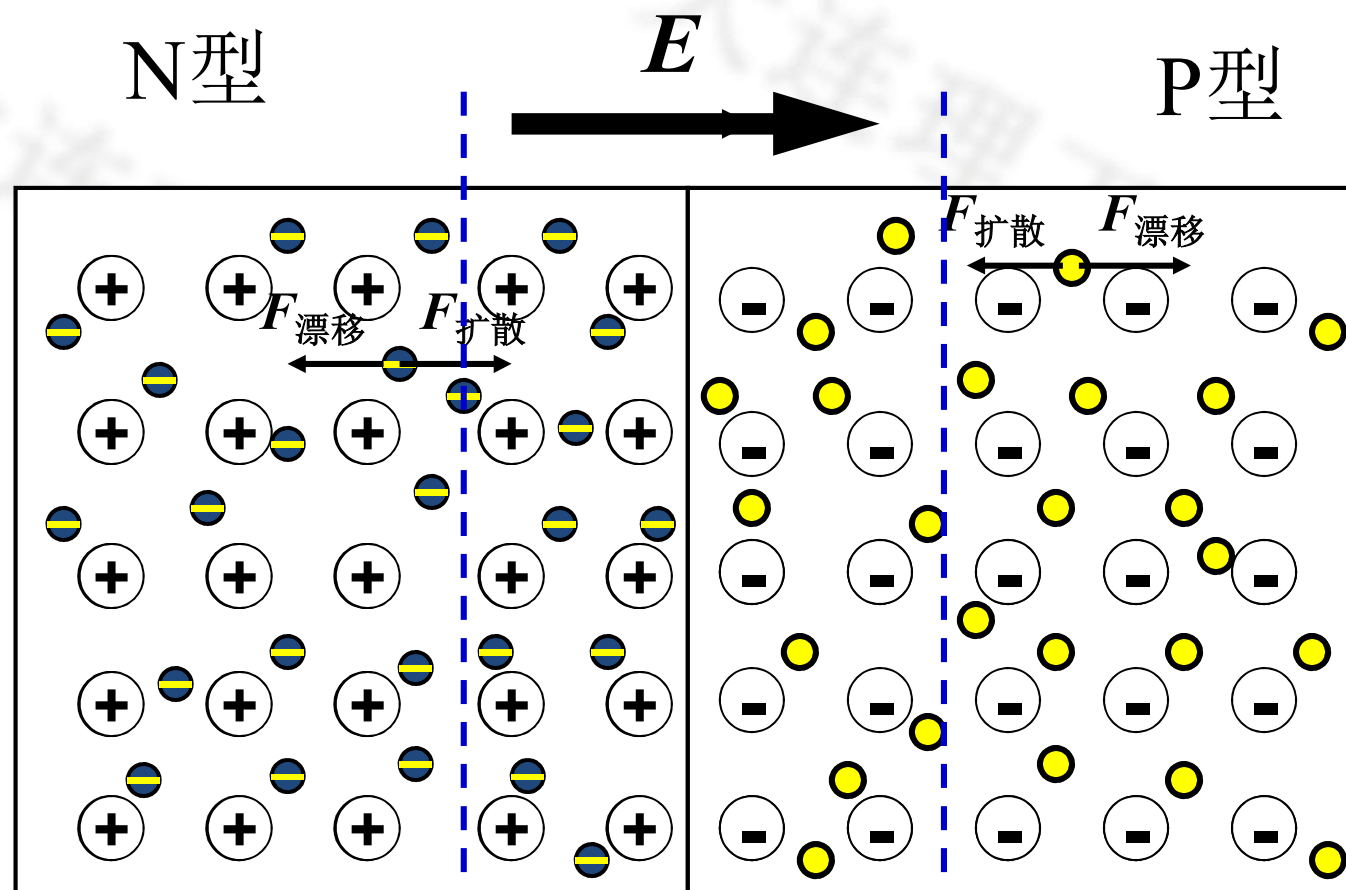
扩散运动

扩散的结果是形成空间电荷区，进而形成内建电场 E 。



所以扩散和漂移这一对相反的运动最终达到平衡，相当于两个区之间没有电荷运动，空间电荷区的厚度固定不变。

无外偏压，热平衡状态下



空间电荷区

扩散与漂移达到动态平衡

阻挡层
耗尽层
势垒

3.2.2 PN结的单向导电性

PN 结加上正向电压、正向偏置的意思都是：

P 区加正、N 区加负电压。

PN 结加上反向电压、反向偏置的意思都是：

P区加负、N 区加正电压。

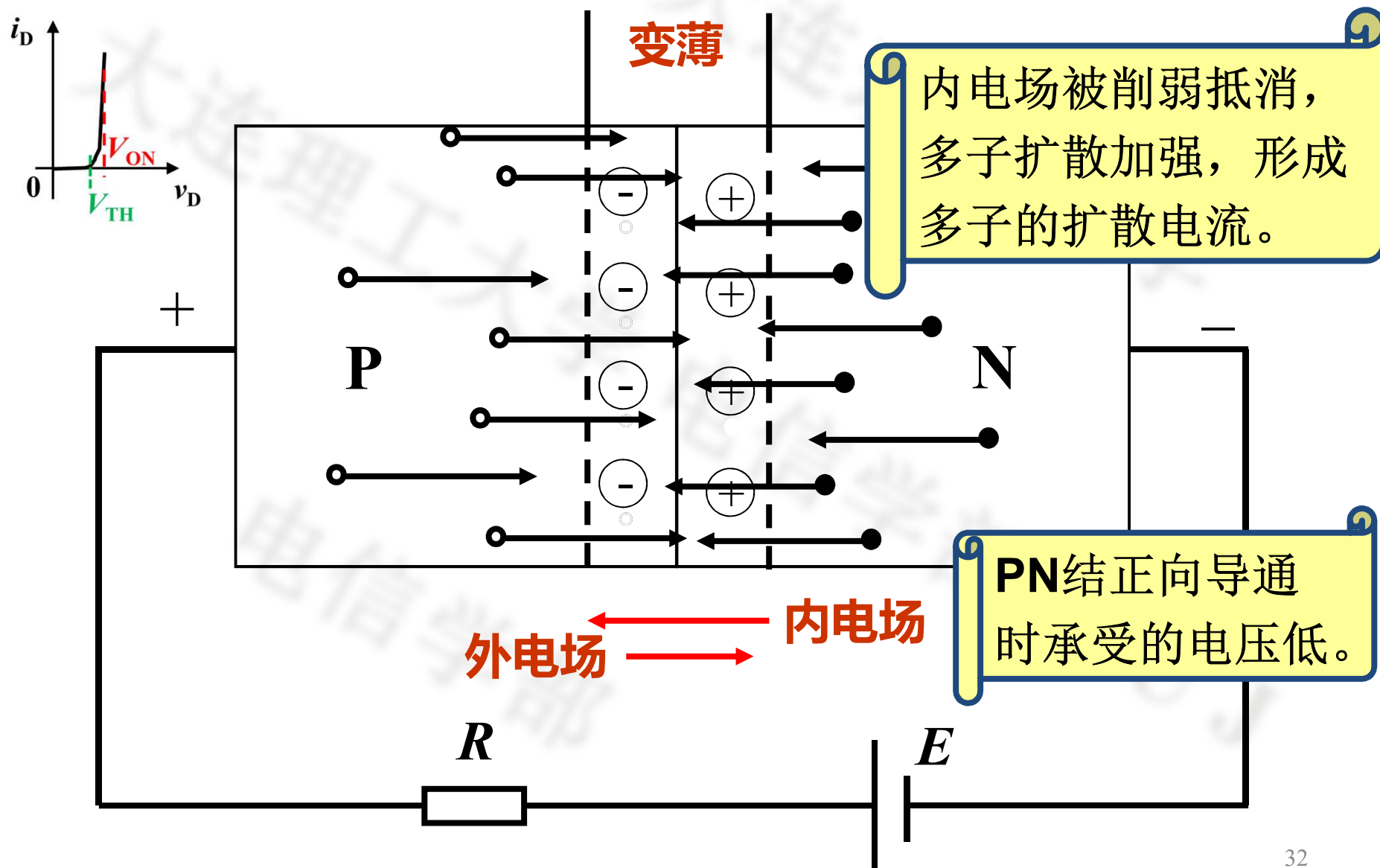
定义参考方向：

$$v_D = v_P - v_N;$$

i_D 参考方向为流入P区的方向。

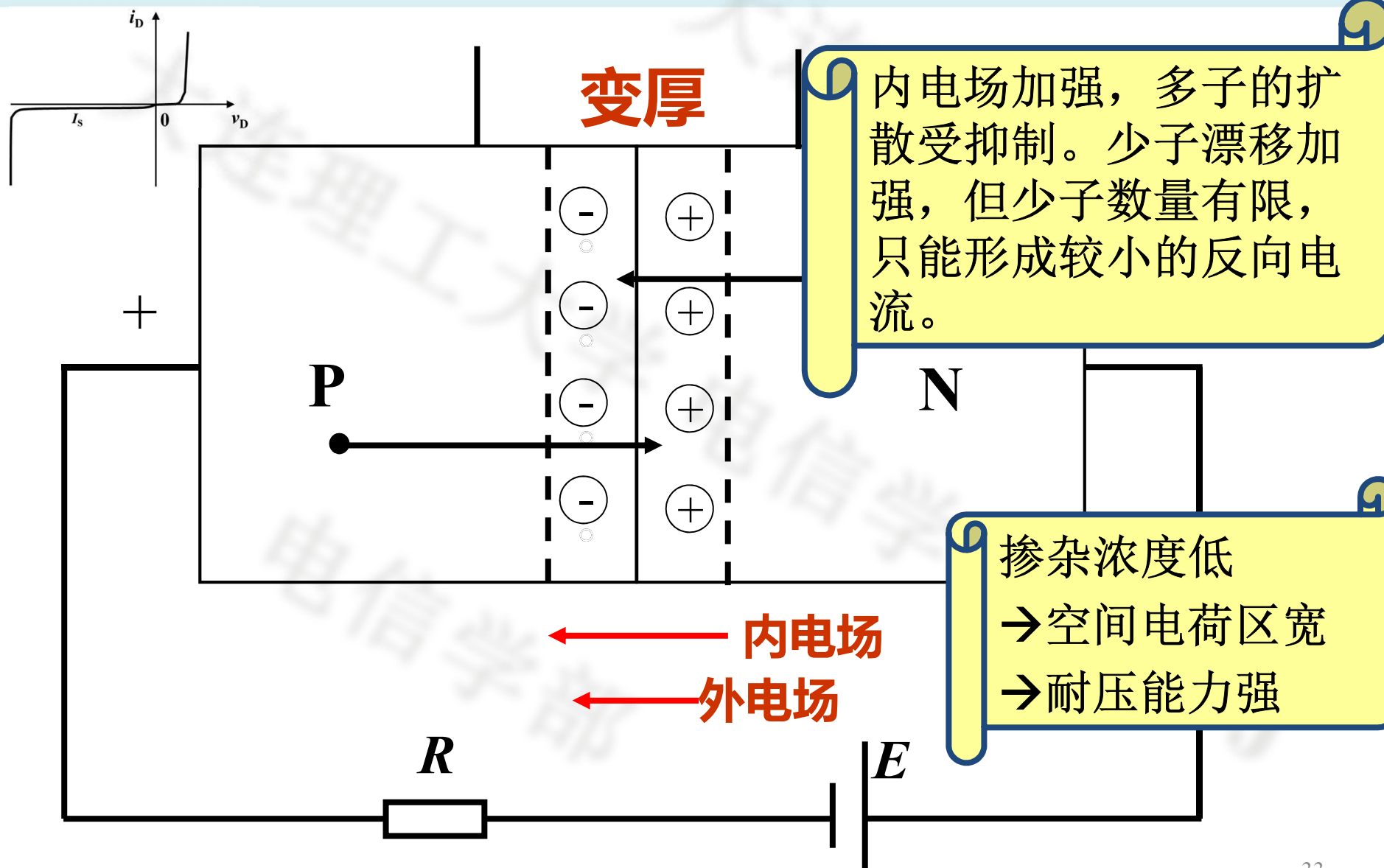
3.2.2 PN结的单向导电性

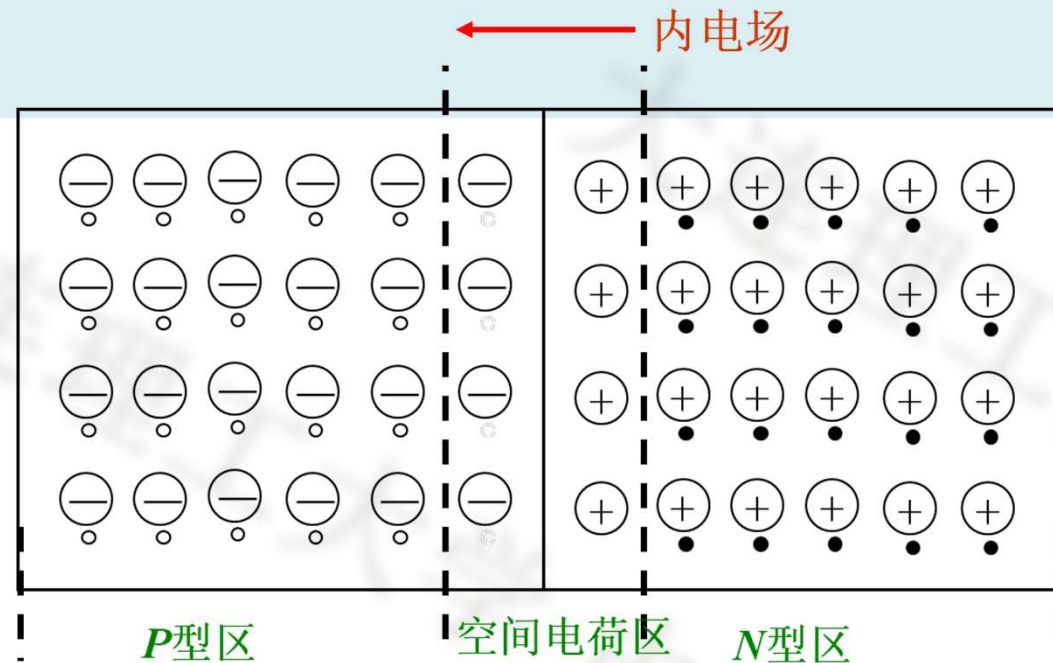
正偏PN结导通，电阻小



3.2.2 PN结的单向导电性

反偏PN结截止，电阻大





PN结正偏： P 加高电平 外电场 → N 加低电平
 抵消自建内电场，
 促进多子扩散，导电！

PN结反偏： P 接低电平 外电场 ← N 加高电平
 增大内电场，抑制多子扩散，
 促进少子漂移，几乎不导电！

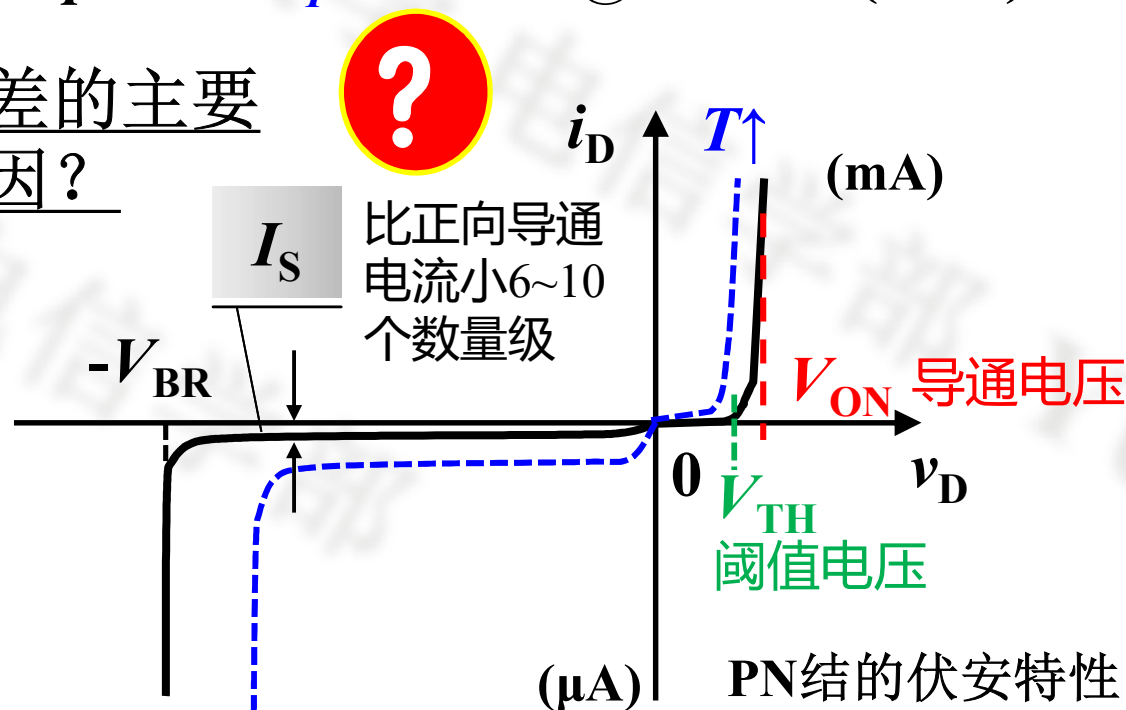
3.2.2 PN结的单向导电性

伏安特性的表达式 $i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1) \begin{cases} \approx I_S e^{v_D/V_T} & \text{正偏} \\ \approx -I_S & \text{反偏} \end{cases}$

反向饱和电流 I_S 与材料、工艺有关，随温度升高而显著上升；

热电压 $V_T = kT/q$ 。 $V_T = 26\text{mV}$ @ $T = 300\text{K}$ (室温)。

温度稳定性差的主要体现及其原因？



3.2.3 PN结的击穿特性

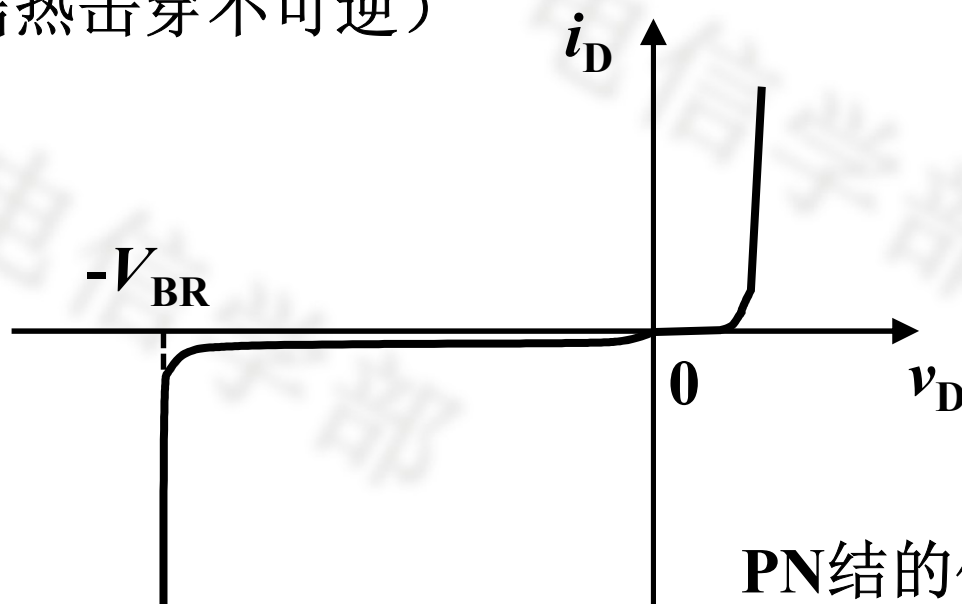
PN结反偏时($V < 0$)存在击穿电压 V_{BR} (Breakdown)

雪崩击穿 Avalanche

齐纳击穿 Zener

(均可逆)

(PN结热击穿不可逆)



PN结的伏安特性

3.1 & 3.2 半导体基础与PN结

本节小结

理解：半导体材料的导电原理

理解：PN结的单向导电性和伏安特性

问题？