



# 模拟电子线路 B

(课程号: B0400101S)

储鹏

QQ群号: 765311153

## 本课程的性质

- ❖ 是工科类学生的重要基础课程
- ❖ 是工程师训练的基本入门课程
- ❖ 是很多重点大学的考研课程

## 本课程的主要任务

掌握有关模拟电路的基本概念、基本电路及基本分析方法，最终达到可以对图做定性分析，对参数做定量计算，自行选择电路和参数。

## 参 考 书

[1] 康华光 《电子技术基础--模拟部分》 第五版

高等教育出版社，2006年。

[2] 华成英 《模拟电子技术基础》 第四版

高等教育出版社，2006年。

[3] 谢嘉奎 《电子线路--线性部分》 第四版

高等教育出版社，1999年。

[4] 谢嘉奎 《电子线路—非线性部分》 第四版

高等教育出版社，1999年。

## 考试成绩评定

平时成绩占 30%

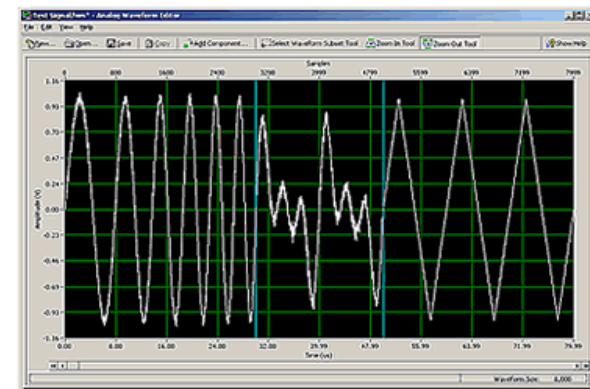
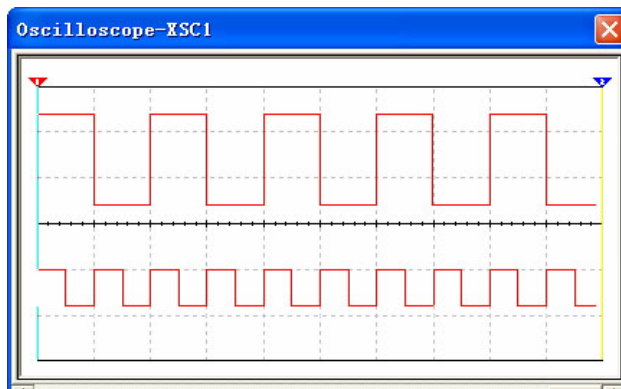
(无期中考试)

期末成绩占 70%

## 两种电信号

**数字信号 (Digital signal)**：指幅度的取值是离散的。如开关信号、计算机处理的二进制信号等。

**模拟信号 (Analog signal)**：指幅度的取值是连续的。如声音、图像、温度、压力等转化的电信号。“**模拟**”二字主要指**电压（或电流）**对于真实信号**成比例的再现**，它最初来源于希腊词汇，意思是“成比例的”。



# 第一章 半导体二极管及其应用

## 基本要求:

- (1) 了解本征半导体、杂质半导体和PN结的形成及其特性。
- (2) 掌握晶体二极管的特性和主要参数。
- (3) 掌握普通二极管、稳压二极管构成的基本电路的组成、工作原理及分析方法。

## §1.1 半导体物理基础知识

### 一、导体、绝缘体、半导体

1.导体(Conductor) :  $\rho < 10^{-4} \Omega \cdot m$

如铝、金、钨、铜等金属，镍铬等合金。

2.绝缘体(Insulator):  $\rho > 10^9 \Omega \cdot m$

如二氧化硅、氮氧化硅、氮化硅等。

3.半导体(Semiconductor) :  $10^9 \Omega \cdot m < \rho < 10^{-4} \Omega \cdot m$

如硅、锗、砷化镓、磷化铟、碳化镓等。

注：  $\rho$  为电阻率



半导体器件是导体、半导体和绝缘体的有机组合体。

半导体是构成当代微电子的基础材料，常见+4价元素。

半导体的导电机理不同于其它物质，它会随温度、光照或掺入某些杂质而发生显著变化。

## 一、结构特点

现代电子学中，最常见的半导体是硅(Si)和锗(Ge)，它们的最外层电子（价电子）都是4个。

（原子核和内层电子的整体）

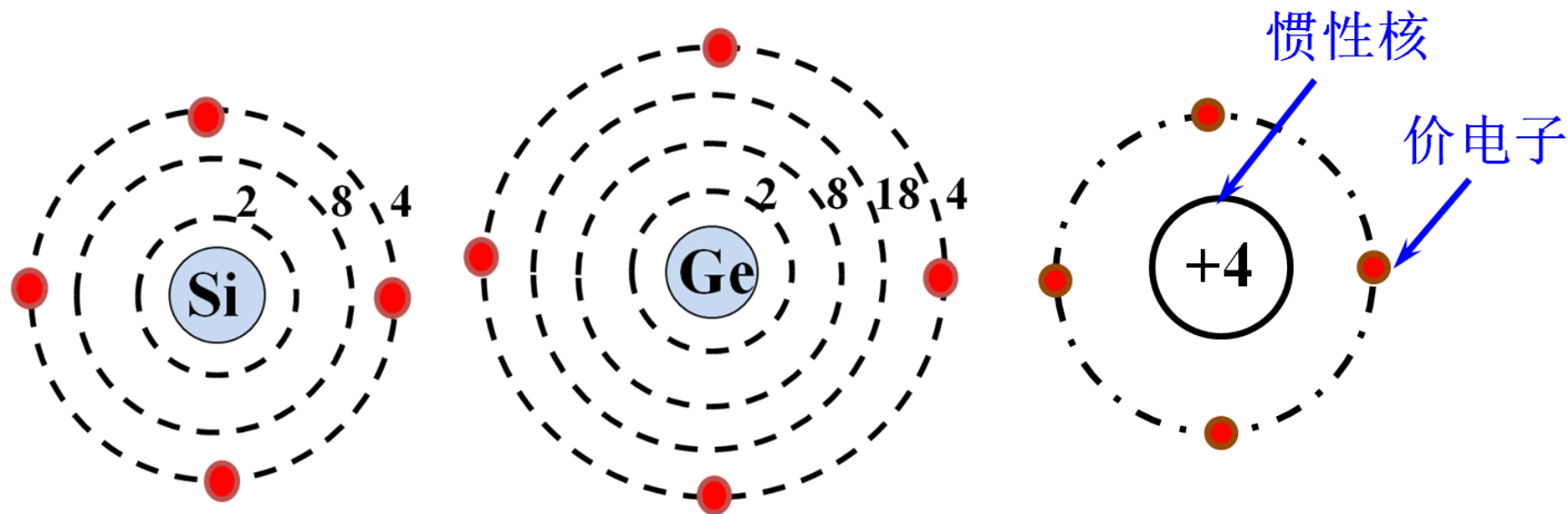


图 1. 硅(Si)和锗(Ge)原子的电子结构和简化模型

## 1. 本征半导体: 纯净的单晶半导体

## 二、导电机理

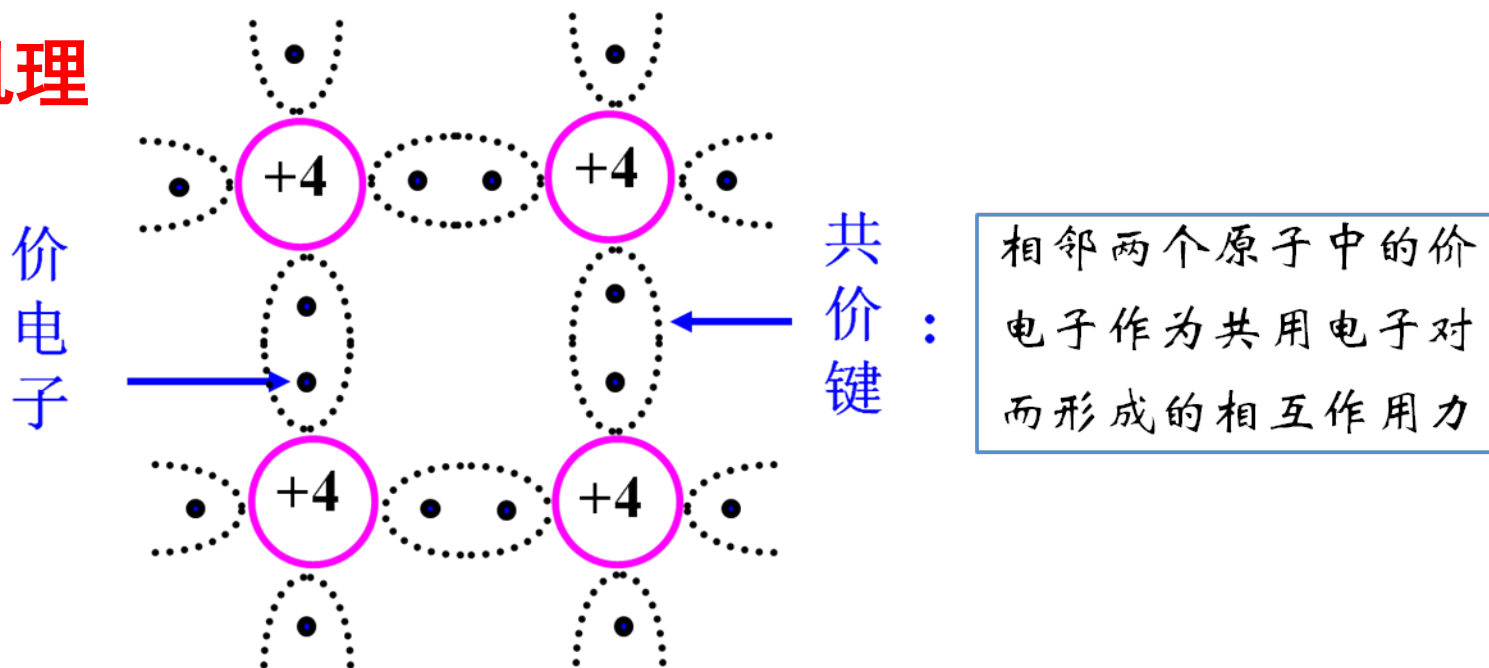


图 2. 单晶硅和锗共价键结构示意图

形成共价键后，每个原子的最外层电子是8个，构成稳定结构。价电子被紧紧束缚在共价键中(被称为束缚电子)，低温下很难脱离共价键成为自由电子参与导电，所以低温下，本征半导体的导电能力很弱。

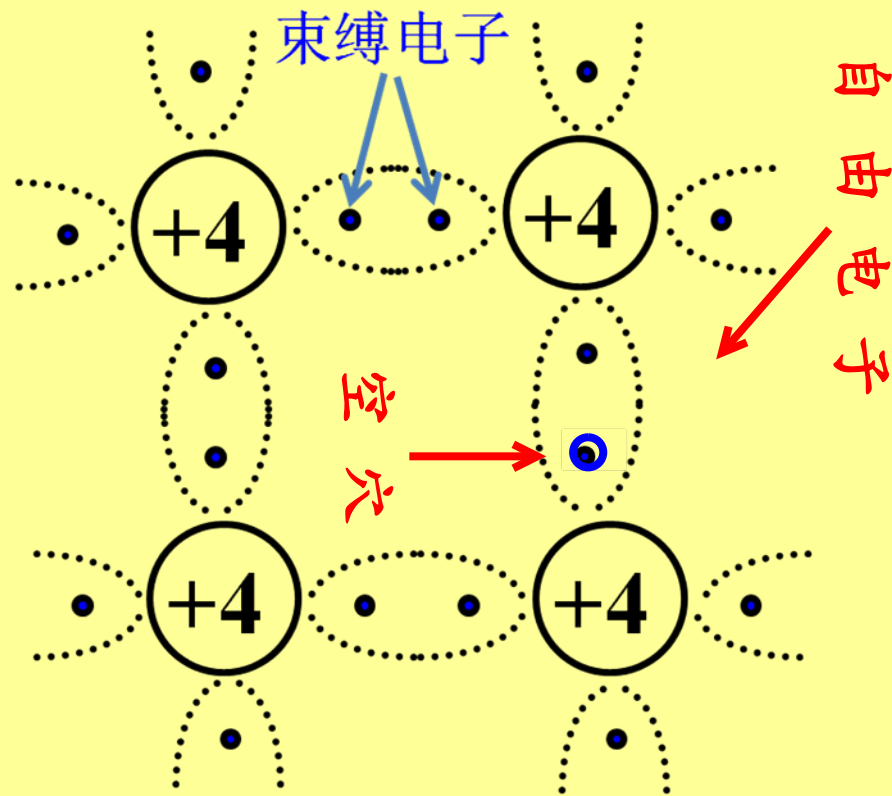
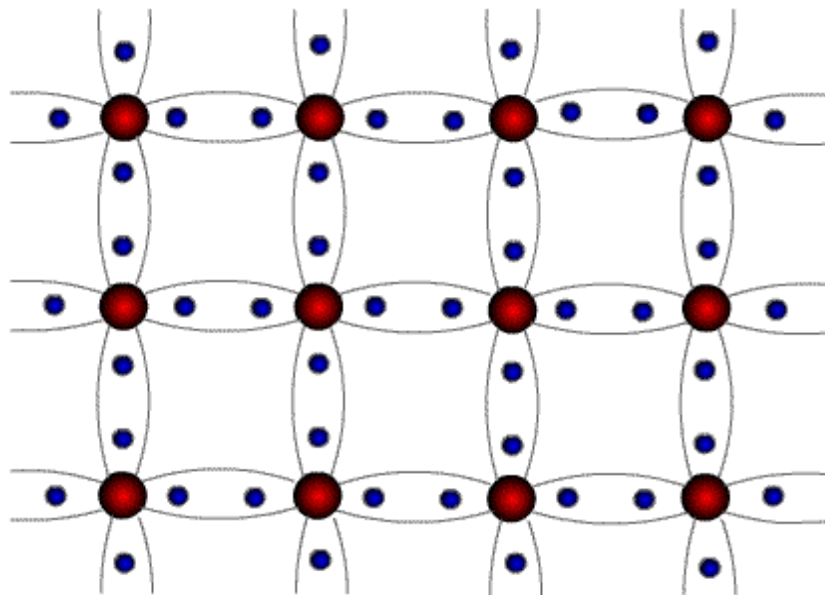


图 3. 本征激发产生电子和空穴

但是，半导体中的价电子不像绝缘体中束缚得那样紧，如在一定**温度或光照**下，一些**价电子**获得足够的能量而脱离共价键的束缚，**成为自由电子（负电荷）**，同时共价键上**留下**一个空位，称为**空穴（正电荷）**。——**本征激发**



导电机理示意图

1. 在空穴的吸引下，相邻原子的**价电子**会来**填补**这个**空穴**，而使该价电子原来所在共价键中出现一个新的空穴，这个空穴又可能被相邻原子的价电子填补，再出现新的空穴。依此类推…
2. 价电子填补空穴的这种运动无论在形式上还是效果上都相当于带正电荷的空穴在运动，且运动方向与价电子运动方向相反。
3. 为了区别于自由电子的运动，把这种运动称为空穴运动，并把空穴看成是一种带正电荷的载流子。

## 注意:

1. 一个空穴的运动实际上是许多价电子（不是自由电子）作相反运动的结果。但是一个空穴运动所引起的电流的大小只与空穴的多少有关，与多少个价电子运动无关。
2. 若没有空穴，价电子不会运动，即使互换位置也不会带来电荷的迁移。

## 结论

由于本征激发，在半导体中产生出数量相的两种载流子：自由电子（负电荷）和空穴（正电荷）（即电子-空穴对），使载流子浓度增加。

由于正负电荷的吸引作用，自由电子在运动的过程中也会落入空穴，结果

?

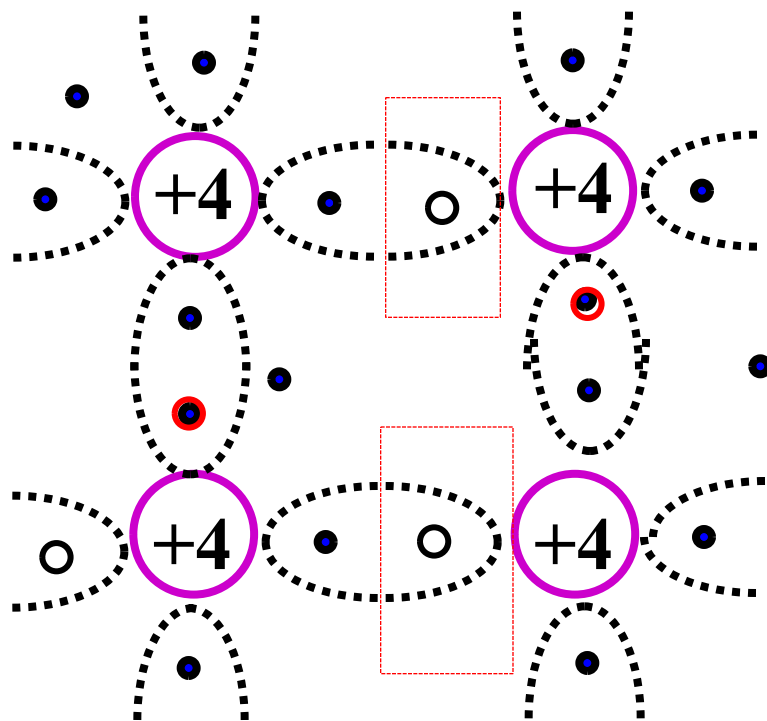


图 5. 本征激发与复合过程示意图

**复合：**由于正负电荷的吸引作用，**自由电子**在运动过程中会落入空穴成为价电子，从而消失一对电子、空穴，恢复一个共价键，这一过程称为复合。



**本征激发：**一分为二，载流子浓度**增加**。

**复合：**合二为一，载流子浓度**减少**。

在一定温度下，电子-空穴对的产生与复合同时存在并达到动态平衡时，半导体中的载流子浓度一定。

当**温度升高**时，将产生更多的电子-空穴对，**载流子**浓度增加，电阻率减小。

无晶格缺陷的纯净半导体的电阻率较大，实际应用不多。

## 2. 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素（称为杂质）会使半导体中的某一种载流子浓度增加，因而会使其导电性能发生显著变化。与提高温度的原因不同

提高温度会同时增加电子和空穴两种载流子的数量，电子和空穴是成对出现的。

根据掺入杂质的不同可分为 { N型半导体  
P型半导体

## 一、N型半导体

在本征Si中掺入少量**五价磷**(P)元素，因P原子的最外层有五个价电子，故就多出一个**键外电子**。这个电子受P原子的束缚很弱，很容易被激发而成为**自由电子**，这样每个P原子因给出一个电子，成了不能移动的**带正电的离子**，故**P原子**被称为**施主原子**。

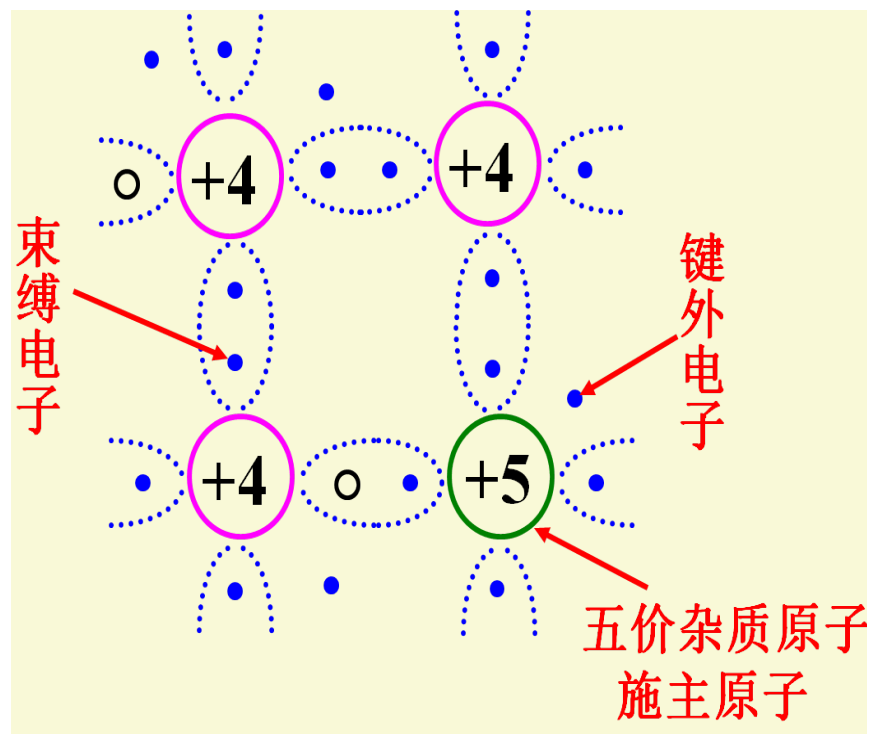


图 6. N型半导体原子结构示意图

A yellow five-pointed star is positioned to the left of the first text block.

这种杂质(N型)半导体中的载流子就有以下两种:

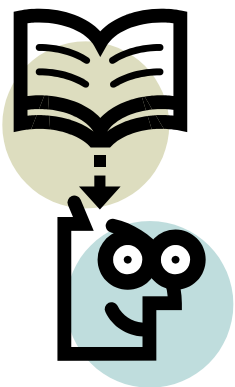
1. 由施主原子电离产生的电子, 浓度与施主正离子相同
2. 本征激发成对产生的电子和空穴

因为掺杂浓度远大于本征激发的载流子浓度, 所以,

在N型半导体中:

自由电子--多数载流子, 简称多子;

空穴--少数载流子, 简称少子



**问题：**N型半导体是带正电还是带负电？

**答：**N型半导体是电中性的。因为，虽然自由电子数远大于空穴数，但由于施主正离子的存在，使正、负电荷数相等，即

**自由电子数=空穴数 + 施主正离子**

## 二、P型半导体

在本征Si中掺入少量**三价**硼(B)元素，因B原子的最外层有三个价电子，故出现一个**空位**。这个空穴可以吸引邻近Si原子共价键中的**束缚电子**来填补，这样**B原子**因接受一个电子而成为不能移动的**带负电的离子**，同时在邻近**产生一个空穴**。B原子称为**受主原子**。

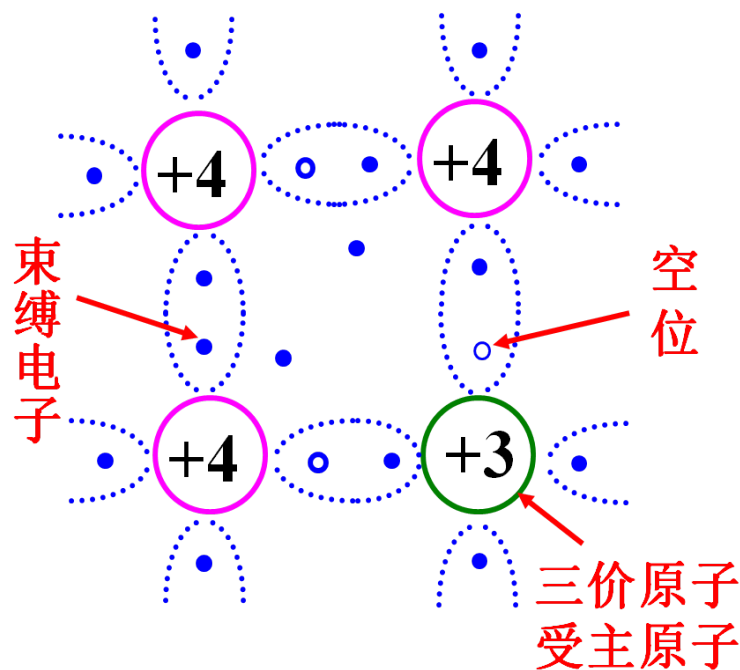



图 7. P型半导体原子结构示意图



在P型半导体中：

空穴——多数载流子，简称多子；

自由电子——少数载流子，简称少子

P型半导体是电中性的。

空穴数=自由电子数 + 受主负离子

杂质半导体中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。

### 三、杂质半导体的载流子浓度



#### ❖ 多子的浓度

在杂质半导体中，多子的浓度主要由掺杂浓度决定  
与温度几乎无关

#### ❖ 少子的浓度与温度密切相关

少子主要由本征激发产生，因掺杂不同，会随多子浓度的变化而变化。

在热平衡下，多子浓度值与少子浓度值的乘积恒等于本征载流子浓度值 $n_i$ 的平方。即 $n \cdot p = n_i^2$



## §1.2 PN结

### 1. PN结的形成

#### 一、PN结的概念

P型半导体和N型半导体结合在一起时，**交界面**处会形成一个很薄的特殊物理层称为PN结

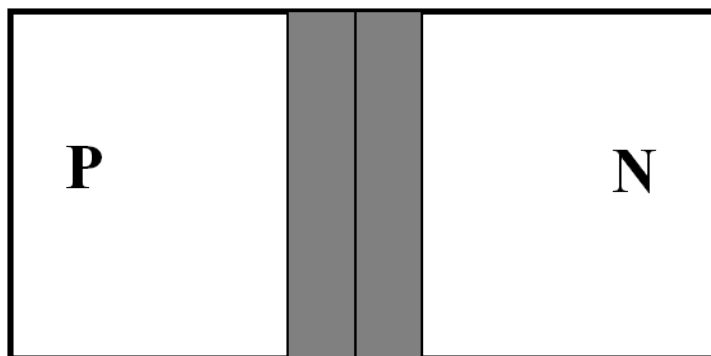



图 8. PN结结构示意图

## 半导体中的电流

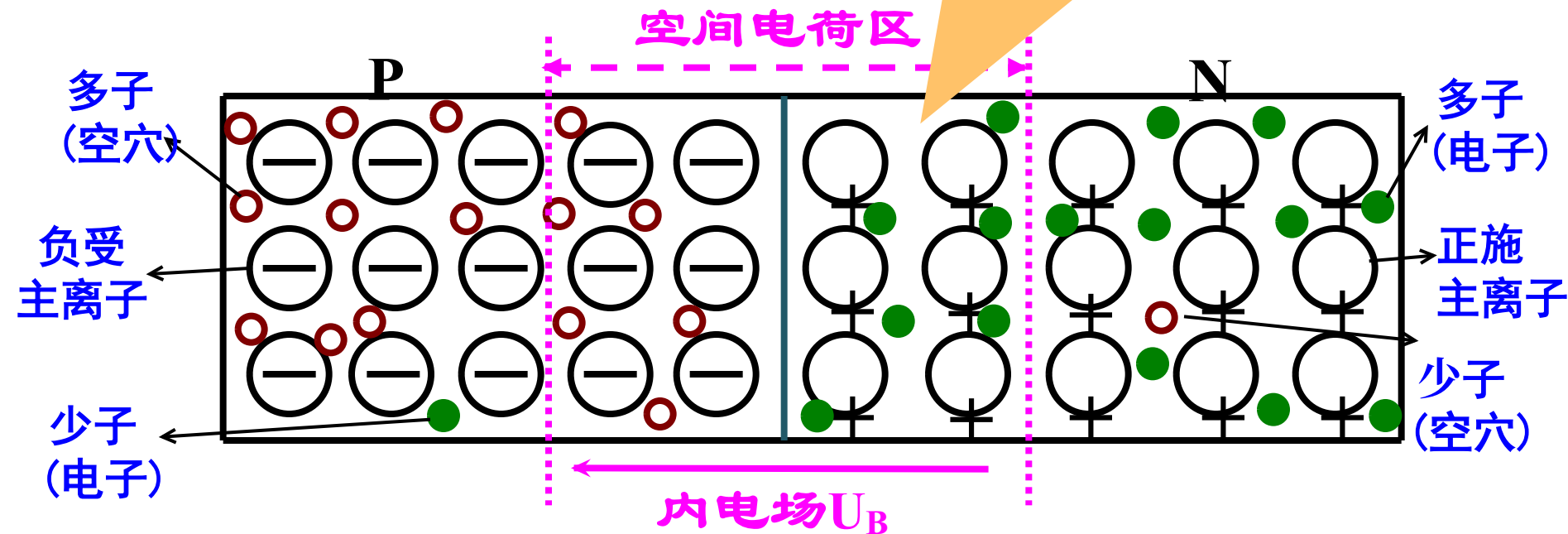
两种载流子(自由电子和空穴)的移动。

- 
1. 电子/空穴会在电场的作用下作定向的漂移运动，产生漂移电流。
  2. 电子/空穴会因浓度梯度或浓度差做扩散运动，即由浓度高的位置向浓度低的位置运动，产生扩散电流。

## 二、PN结的形成 ★

多子因为浓度差作扩散运动

扩散的继续会使空间电荷区变宽



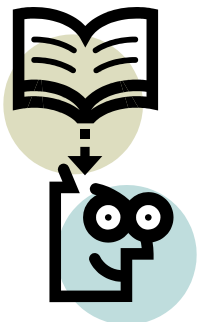
内电场会阻碍扩散运动，但利于漂移运动，空间电荷区就会变窄。



## PN 结的形成步骤

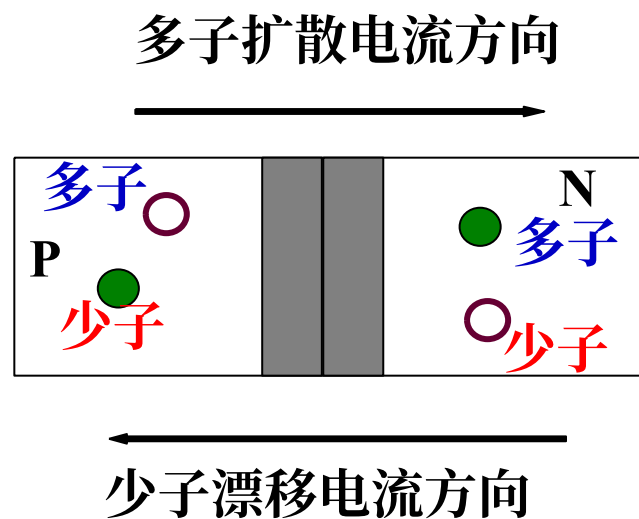
浓度差 ➡ 多子扩散, 形成杂质离子电荷区 ➡  
内电场形成 ➡ 促使少子漂移, 阻止多子扩散

最终, 多子的扩散和少子的漂移这一对相反的运动达到平衡, 空间电荷区的厚度固定不变。由于这个空间电荷区缺少载流子, 所以也称耗尽层。



**问题：**达到动态平衡时，在 PN 结流过的总电流为多少，方向是什么？

**答：**多子的扩散电流方向为从左到右，少子的漂移电流方向从右到左。在达到动态平衡时，两者大小相等，而方向相反。所以，流过 PN 结的总电流为零。相当于在 PN 结没有电荷运动。



### 三、PN结的类型

- 1. 对称PN结：**如果P区和N区的掺杂浓度相同，则耗尽区相对界面对称，称为对称结。
- 2. 不对称PN结：**两边掺杂浓度不相等时形成的PN结称为不对称结，PN结伸向轻掺杂区。

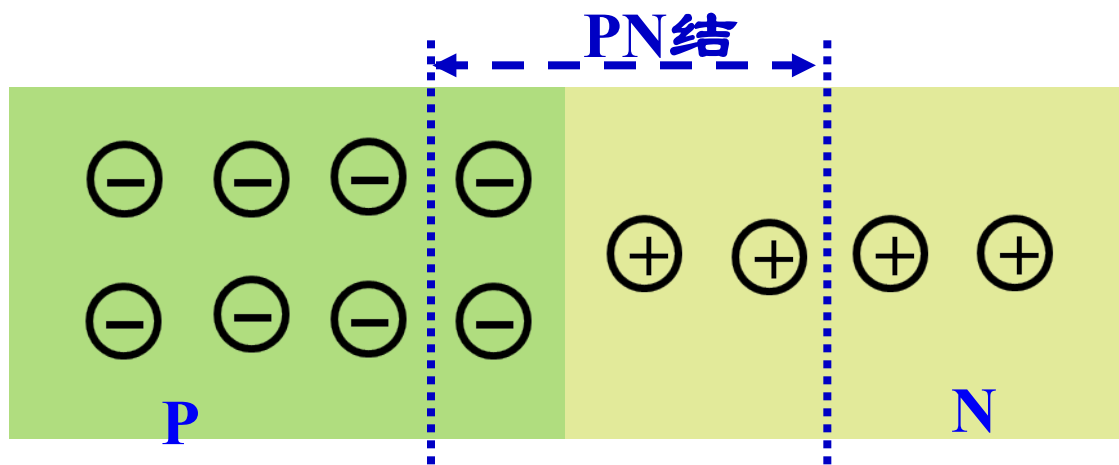


图 10. 不对称P<sup>+</sup>N结

## 2. PN结

### 一、PN结

耗尽层宽度减小, 内电场减弱(外电场与内电场方向相反, 削弱了内电场), 动态平衡被打破, 扩散运动超过漂移运动, 与此同时, 电源不断向P区补充正电荷, 向N区补充负电荷, 结果在电路中形成了较大的正向扩散电流 $I_F$ , 且 $I_F$ 随正向电压的增大而增大

正向PN结表现为一个很小的电阻

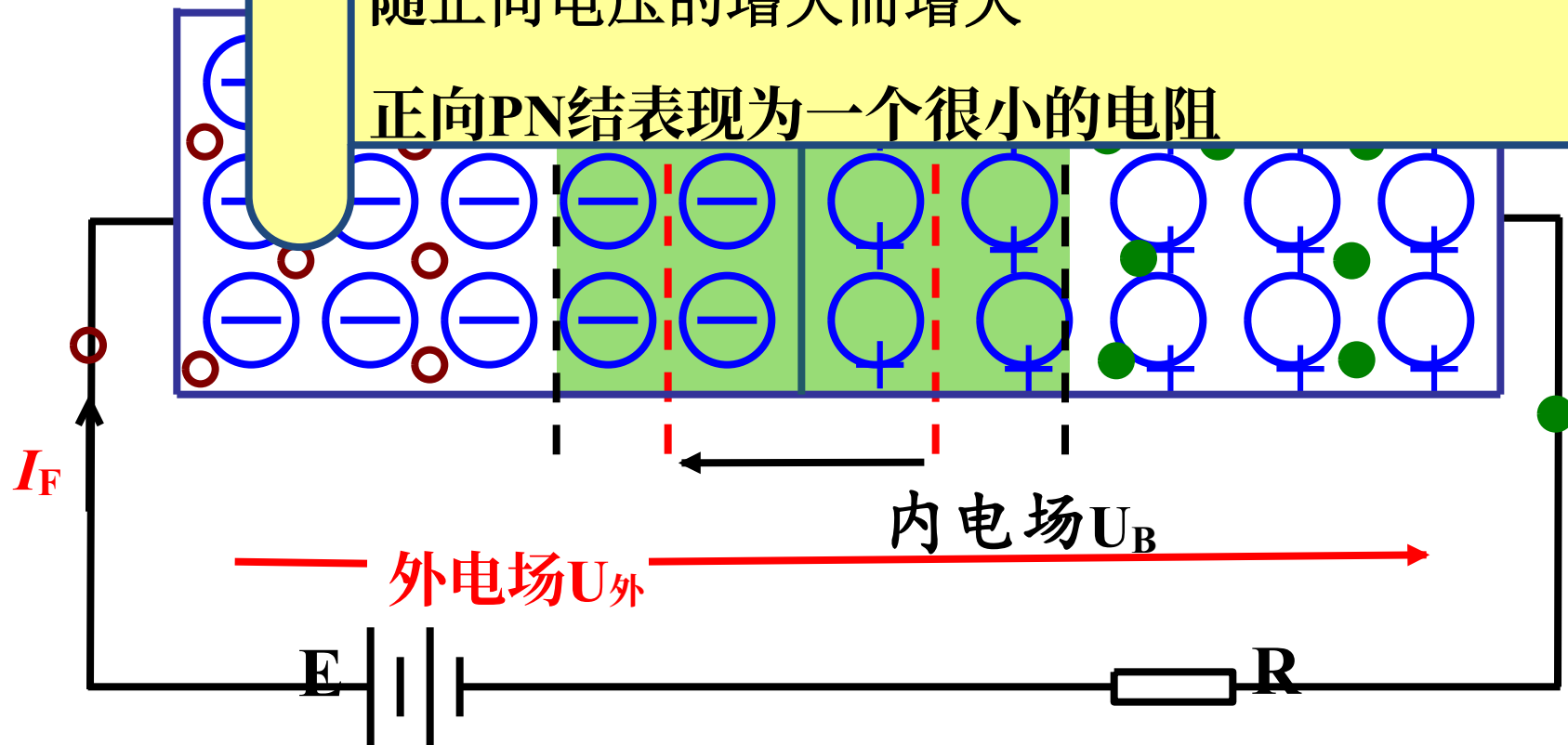


图 11. 正向偏置的PN结

## 二、PN结

耗尽层变宽, 内电场增强, 动态平衡被打破, 漂移运动超过扩散运动, 因此流过PN结的主要电流是漂移电流, 但因为少子浓度很低, 所以形成的漂移电流很小 $I_s$ , 且固定温度下, 少子浓度一定不随着外电压变化, 故被称为反向饱和电流。

反向PN结表现为一个很大的电阻

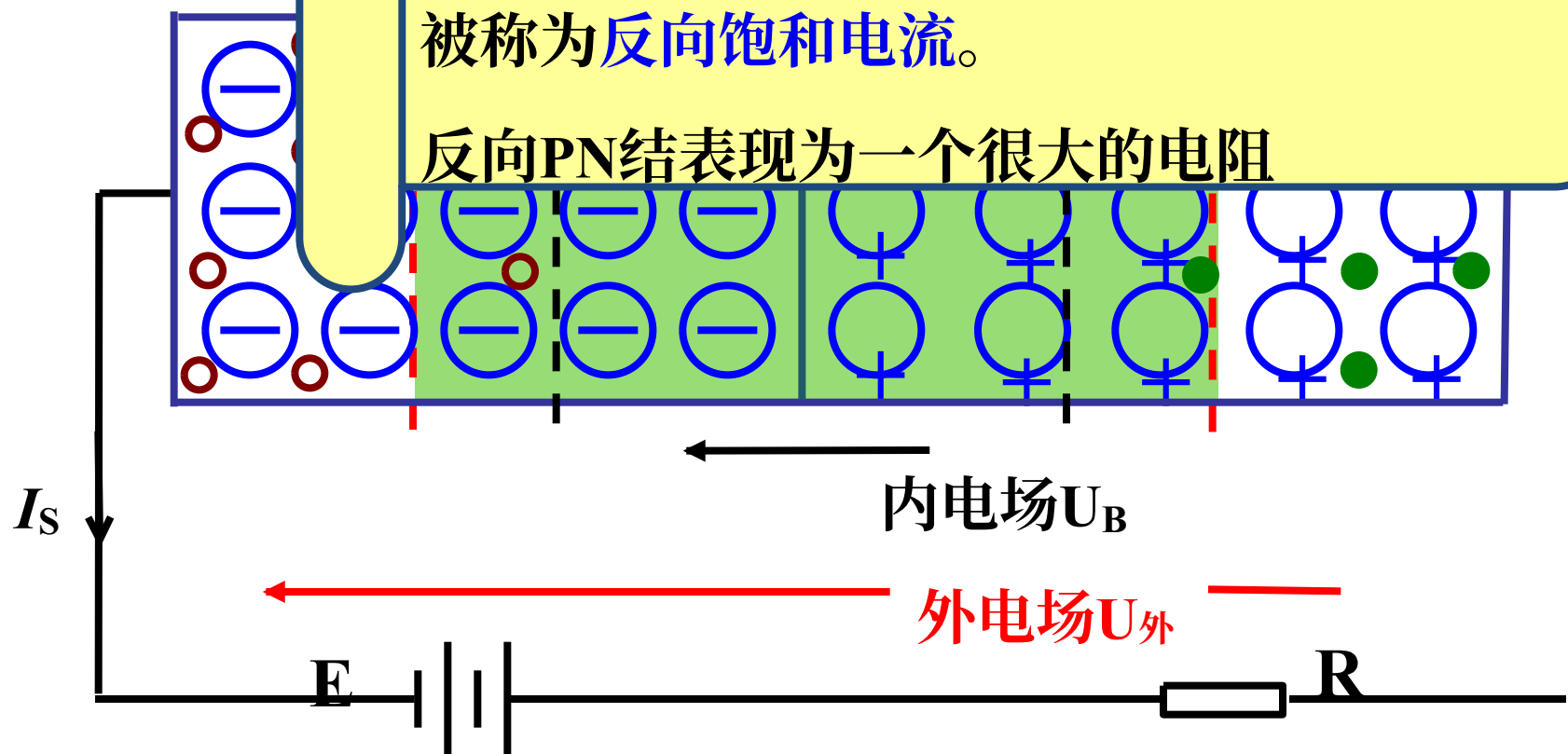


图 12.反向偏置的PN结



## 小结：★

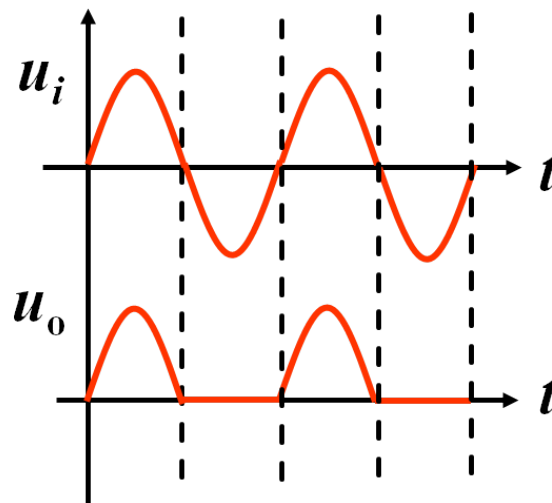
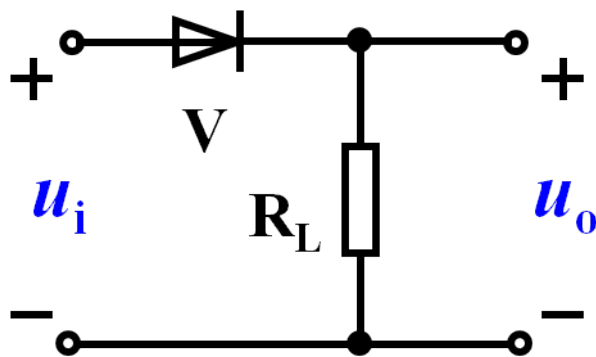
PN结加正向电压时，具有较大的正向扩散电流，呈现低电阻态，相当于PN 结导通；

PN结加反向电压时，具有很小的反向漂移电流，呈现高电阻态，相当于PN 结截止。

**结论：PN结具有单向导电性。**

利用PN结的单向导电性可以制作整流二极管、检波二极管和开关二极管。

整流二极管：把交流电变成直流电。



### 三、PN结电流方程

□ PN结两端所加电压 $u$ 与流过它的电流 $i$ 的关系为：

$$i = I_s \cdot (e^{qu/kT} - 1)$$

其中， $I_s$ 为反向饱和电流， $k$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 为热力学温度， $q$ 为单位电子电荷量

□ 取 $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量，则

$$i = I_s \cdot (e^{u/U_T} - 1)$$

室温( $T=300\text{K}$ )下， $U_T=26\text{mV}$

## 四、PN结伏安特性

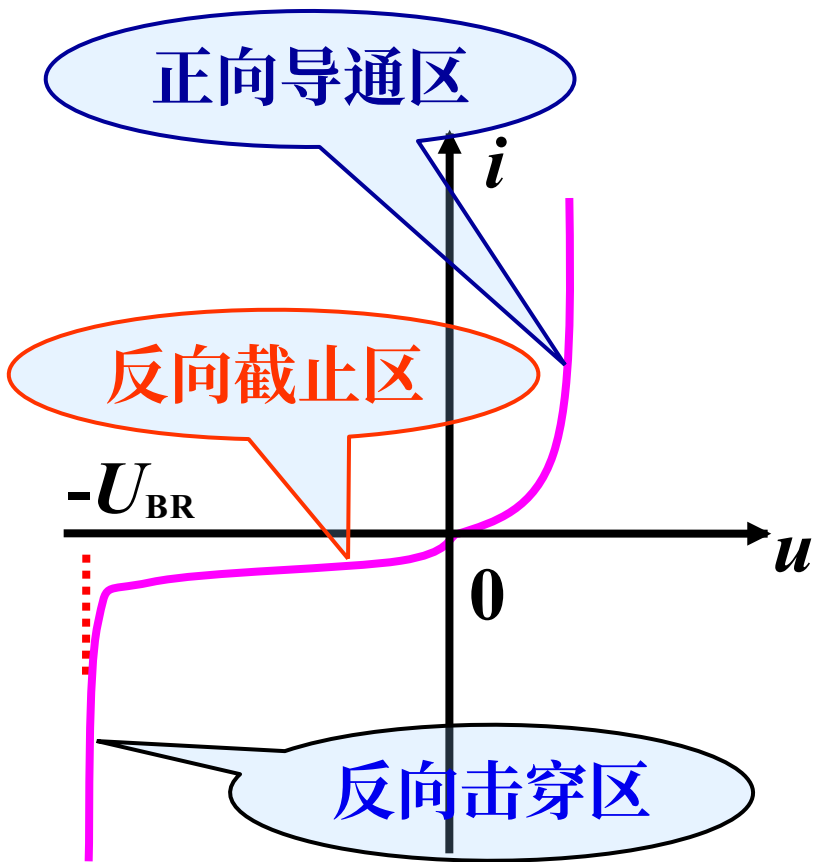


图 13. PN结的伏安特性曲线

$$i = I_s \cdot (e^{u/U_T} - 1)$$

- ① 当u为正，且u >>  $U_T$ 时

$$i \approx I_s \cdot e^{u/U_T}$$

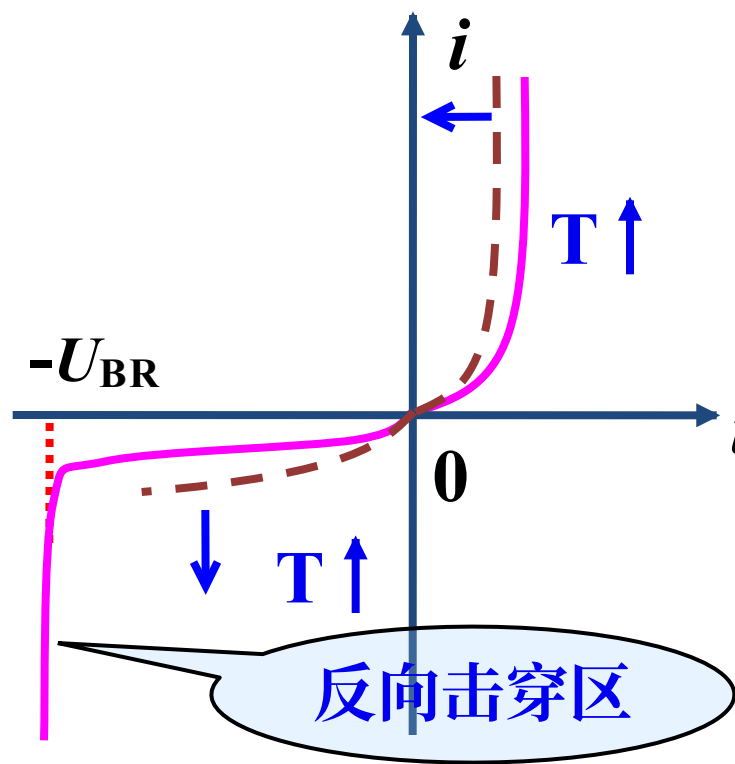
即加正电压时，电流是正电压的 $e$ 指数关系。

- ② 当u为负时，且 $|u|$  >>  $U_T$ 时

$$i \approx -I_s$$

即加负电压时，电流是一个常数，PN结反向截止。

### 3. PN结的反向击穿特性



反向击穿：

当PN结的外加反向电压超过一定值 $U_{BR}$ ，反向电流急剧增大。

这破坏了PN结的单向导电特性。

两种击穿机理：



击穿种类	掺杂情况	耗尽层宽度	击穿机理
齐纳击穿	一般来说，对硅材料的PN结， $U_{BR}>7V$ 时为雪崩击穿； $U_{BR}<5V$ 时为齐纳击穿； $U_{BR}$ 介于5~7V时，两种击穿都有。		
雪崩击穿	轻掺杂	宽	较小的反偏电压无法产生击穿，但当加较大的反偏电压时就会使在结内作漂移运动的 <u>少子获得很大的动能，把结内原子的价电子撞出共价键</u> ，产生新的电子—空穴对。这些新的电子—空穴对被强场加速后再去碰撞其它原子，如此连锁反应使结内载流子数目剧增

正偏时，PN结(耗尽层)变窄，  
结中空间电荷量减少，相当于电容“放电”

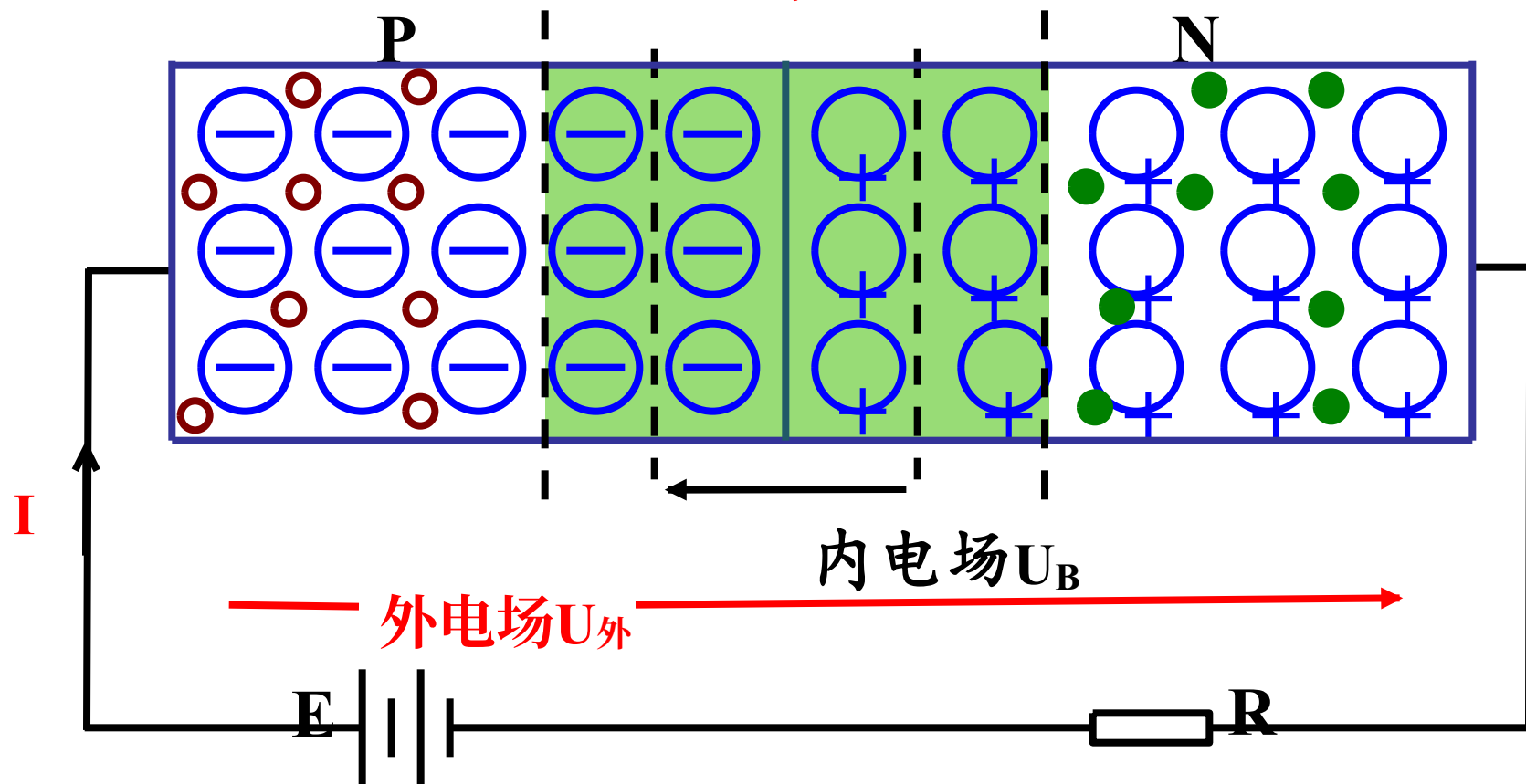


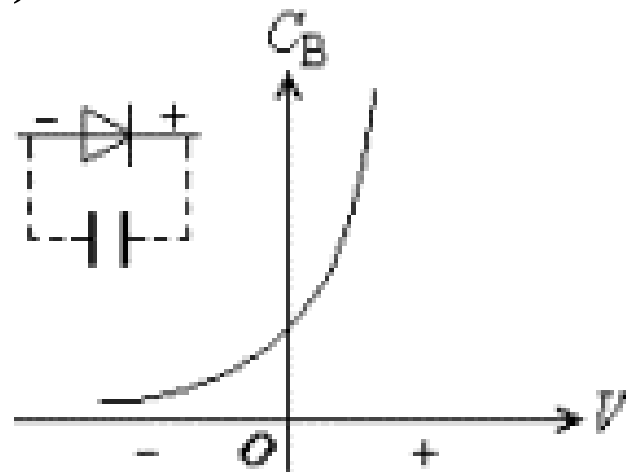
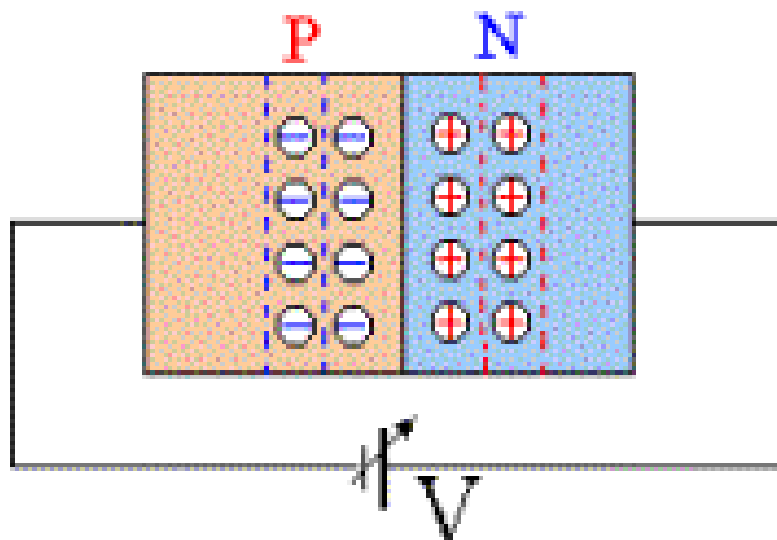
图 11. 正向偏置的PN结

## 4. PN结的电容特性

### 一、势垒电容 $C_T$

与平板电容器相似，外加电压变化时，耗尽区的宽度和其中的正负离子数目均发生变化。

势垒电容与普通电容不同之处在于它的电容量并非常数，而是与外加电压有关 ( $C=\epsilon S/d$ )。





## 二、扩散电容 $C_D$

多子扩散 → 在对方区形成非平衡少子的浓度分布曲线 → 偏置电压变化 → 分布曲线变化 → 非平衡少子变化 → 电荷变化

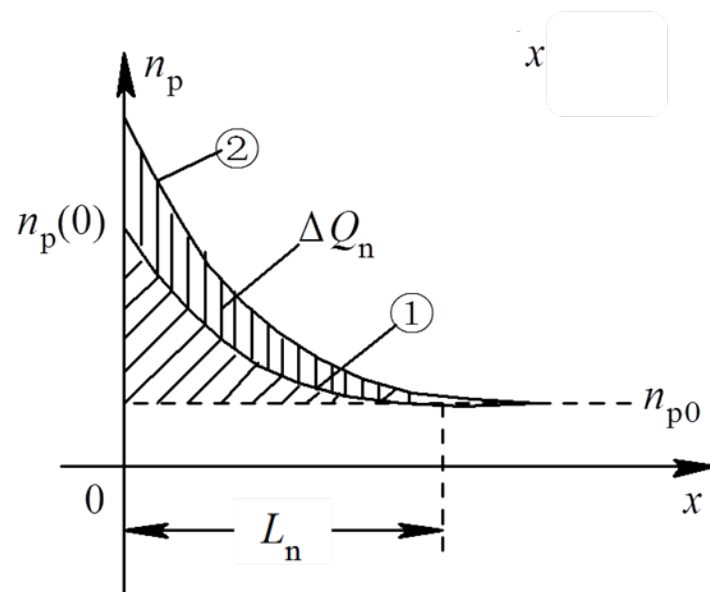
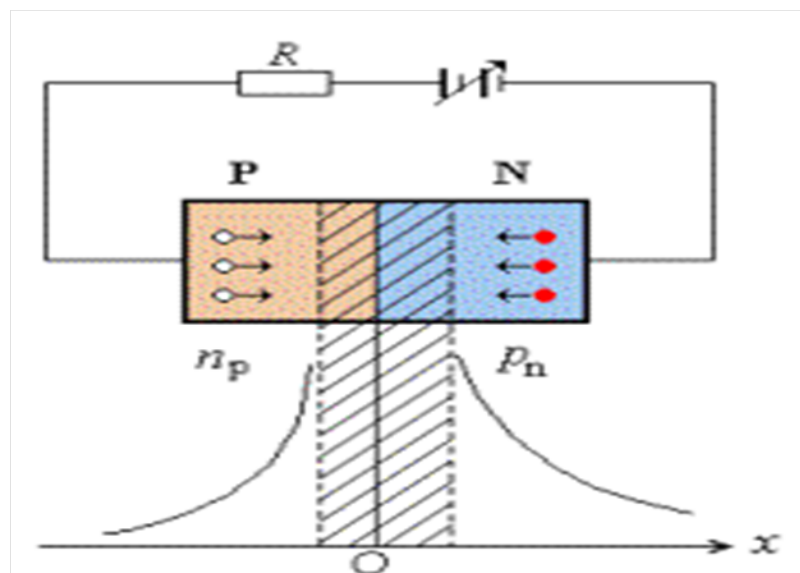


图 15. 少子浓度分布曲线

## 结 论

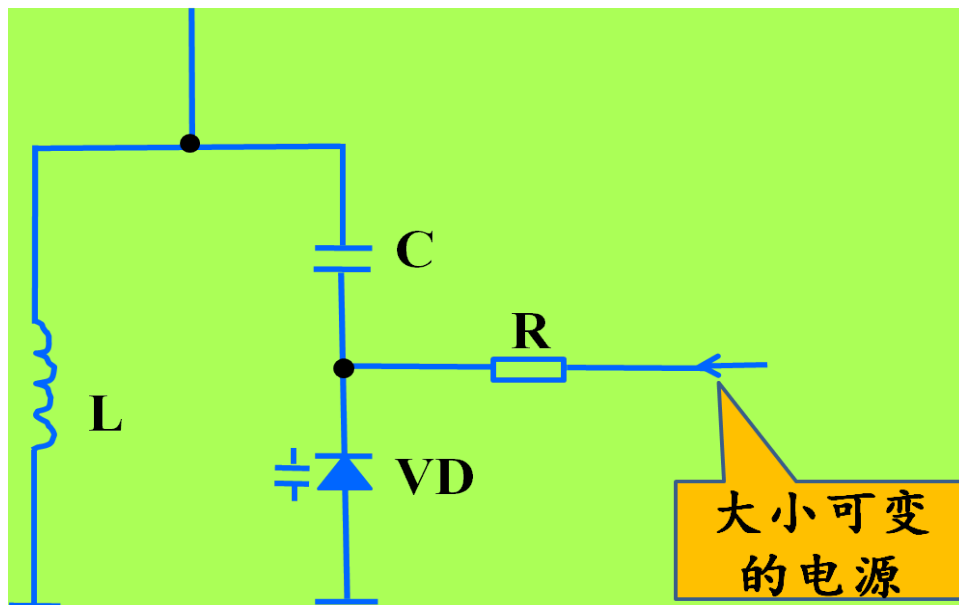
$$\text{结电容 } C_j = C_T + C_D$$

1. 正偏时以扩散电容 $C_D$ 为主,  $C_j \approx C_D$ , 其值通常为几十至几百pF;

2. 反偏时以势垒电容 $C_T$ 为主,  $C_j \approx C_T$ , 其值通常为几至几十pF。(如: 变容二极管)

因为 $C_T$ 和 $C_D$ 并不大, 所以在高频工作时, 才考虑它们的影响。

利用结电容随外电压变化效应制作变容二极管也称压控变容器，用于高频调谐、通信等电路。电源通过电阻 $R$ 加到 $VD$ 上，当这电源大小变化时， $VD$ 的偏压大小就会改变，其结电容大小也就改变，这样 $LC$ 并联谐振电路的谐振频率也随之改变。



## 本节课知识点归纳：

本征半导体、杂质半导体、PN结

## 本节课任务：

掌握本征、杂质半导体的导电特性，  
PN结中载流子的运动及单向导电性

## 本节思考题

1. 空穴是一种载流子吗？空穴导电时电子运动吗？
2. 什么是N型半导体？什么是P型半导体？当两种半导体制作在一起时会产生什么现象？
3. PN结上所加端电压与电流符合欧姆定律吗？它为什么具有单向性？在PN结中加反向电压时真的没有电流吗？

# 作业

## 1.1