

Zoom录制提醒

电子电路与系统基础I

习题课第二讲 电子学基础

(物质、价电子、半导体、PN结二极管)

李国林

清华大学电子工程系

电子学基础 大纲

- 物质基础 **附录9**
 - 原子模型
 - 价电子
 - 物质分类
 - 导体、半导体、绝缘体
- 半导体基础 **附录9、10**
- **PN**结二极管 **附录10**
- 半导体二极管分类 **附录11**

1.1 物质

		实体物质	场物质
基本特性	质量	具有质量	没有质量
	能量	$E = mc^2$	$E = h\nu$
共性		从能量角度看，都是能量的表现形式 物质（能量）不能消灭，只能转化，能量守恒	
区别	空间占据	占据空间不容其他实体物质进入	可进入其他物质占据空间，具有可叠加性
	粒子	原子	光子

电路器件由实体物质构成，实体物质和进入实体物质的电磁场相互作用，交换能量，使得器件中的电场和磁场具有某种约束关系，这种关系在器件端口的表象（端口电压、电流关系）被称为是电路器件的电特性，称为元件约束条件

原子核外的电子

- 原子 (**atom**) 由原子核 (**atom nucleus**) 和围绕原子核运动的电子 (**electron**) 构成
- 核外电子分层排布, 其排布规律为
 - 第n层轨道最多排 $2n^2$ 个电子, 最外层不超过8个
 - 次外层不超过18个, ...

元素	原子序数 电子数目	第1层	第2层	第3层	第4层
Cu 铜	29	2	8	18	1
Si 硅	14	2	8	4	
O 氧	8	2	6		
Ne 氖	10	2	8		

1.2 价电子

- 能够和其它原子形成化学键的电子被称为价电子
 - **valence electron**
 - 价电子数目决定了原子物理化学稳定性
- 主族元素最外层电子为价电子
- 最外层电子数目最多为8
 - 当最外层电子数目为8时，其物理化学性质是稳定的：惰性气体
 - 最外层电子数目不是8时，其价电子则有可能脱离轨道，成为自由电子（**free electron**），留下带正电的正离子；最外层的价电子层也有可能获得外界电子，成为带负电的负离子
 - 自由电子是在物质内部空间可自由移动的电子

1.3 导体

Cu29: 2, 8, 18, 1
Ag47: 2, 8, 18, 18, 1
Au79: 2, 8, 18, 32, 18, 1
Fe26: 2, 8, 14, 2
Zn30: 2, 8, 18, 2
Al13: 2, 8, 3

- 导体**conductor**

- 原子最外层电子数目为**1、2、3**时，价电子易于脱离价电子层轨道成为自由电子。由于有大量的自由电子存在，这些物质很容易导电：如金属，都是导体，包括**Cu, Au, ...**

- 导电因自由电子的移动

- 离子键（**ionic bond**）化合物在溶液中溶解后，有可移动的正、负离子存在，也可导电

- 离子键：阴阳离子通过静电作用形成的化学键

- 因溶液中正负离子的移动而形成导电

导电：具有可移动的带电粒子

Electric conductive

绝缘体

N7: 2, 5

O8: 2, 6

F9: 2, 7

Ne10: 2, 8

- 绝缘体insulator

- 主族元素原子的价电子数为5、6、7时，价电子和原子核联系紧密，元素之间易形成共价键（**covalent bond**），价电子很难脱离原子核成为自由电子，故而这些物质不容易导电：如O, S, ...
 - 共价键：原子间通过共用电子形成的化学键
- 绝缘体指那些物理化学性质很稳定的物质，包括惰性气体
- 不容易导电的化合物，也是绝缘体：如玻璃（主要成分**SiO₂**）、橡胶

半导体

Si₁₄: 2, 8, 4

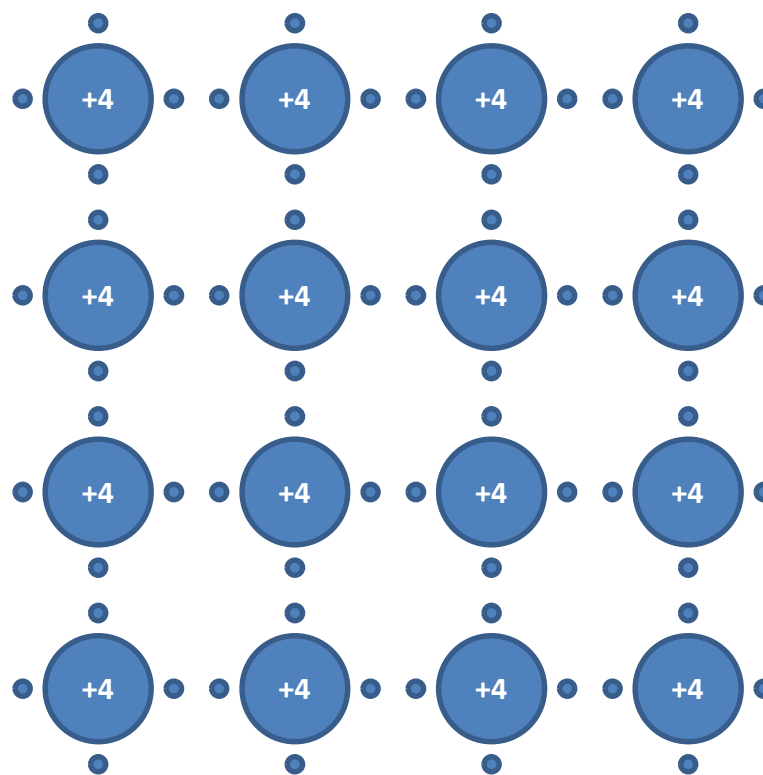
Ge₃₂: 2, 8, 18, 4

- 半导体 **Semi-conductor**

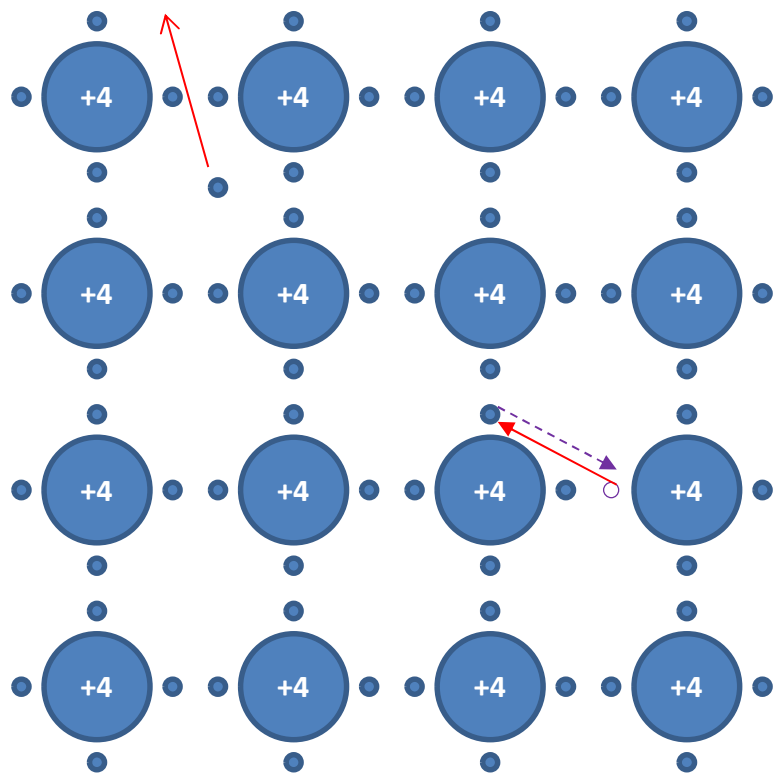
- 主族元素原子价电子数为**4**时，其稳定性和导电性介于导体和绝缘体之间：如**Si**，**Ge**都是半导体元素
- 半导体原子之间以共价键连接

- 本征半导体指纯净的半导体晶体

- **T=0K**，没有外界影响情况下，价电子被束缚在共价键中，此时半导体不导电



电子、空穴导电



- 环境温度升高，或者半导体晶体受到光照，价电子将获得能量，挣脱共价键束缚，成为自由电子，留下的空位称为空穴 (hole)
- 自由电子带一个负电荷，离开电子轨道后，原子带一个正电荷，可认为这个正电荷就是空穴所带的电荷
- 空穴带正电荷，很容易吸引邻近共价键中的电子填补这个空穴，效果是空穴移动了，相当于正电荷移动
 - 自由电子、空穴均可移动
- 在外加电场作用下，自由电子定向移动形成电子电流，空穴移动形成空穴电流
 - 本征半导体中的电流是这两种电流之和

电导率conductivity

- 电导率 σ 是描述材料导电性能的一个参数，导体导电率最大，半导体次之，绝缘体最小

材料	电导率 S/m	备注
银 Silver	6.30×10^7	导电率最好的材料
铜 Copper	5.80×10^7	最常用导体材料，价格低
金 Gold	4.52×10^7	不易腐蚀，PAD焊接点常用
碳 Carbon	$\sim 3 \times 10^5$	石墨
海水Sea Water	4.8	盐分35g/kg，20°C
硅 Silicon	$\sim 10^{-3}$	最常见的集成电路基片
FR4	0.004	常见PCB板介质材料，1GHz
玻璃Glass	$10^{-7} \sim 10^{-13}$	主要成分SiO ₂
空气Air	$0.3 \sim 0.8 \times 10^{-14}$	
硫 Sulfur	5×10^{-16}	无定形硫
聚四氟乙烯 Teflon	$\sim 10^{-23}$	电缆常用介质材料

电子导电性和空穴导电性

- **mobility:** 迁移率

- 对带电离子在物质内部移动能力的一个参量

$$\mu_e = 0.13 \text{ m}^2 / \text{V} \cdot \text{s}, \mu_h = 0.05 \text{ m}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$$

$$v = \mu E$$

速度=迁移率*电场强度

- **Conductivity:** 电导率

$$\sigma_e = ne\mu_e \quad \sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$$

$$\sigma_h = pe\mu_h$$

n: 电子浓度
p: 空穴浓度

电路基材—导体、绝缘体

- 电路器件是由导体、半导体和绝缘体构成的某种结构，这种结构和叠加其中的电磁场相互交换能量，形成器件的电特性
 - 端口电压电流所具有的关系为该器件的电特性
- 导体是所有电路器件中都必须用的材料，这是由于电路器件中的传导电流必须通过导体流通，电路器件的连接端口、导线或传输线都是导体连接关系
 - 绝大多数为金属导体材料
- 绝缘体用于支撑导体和半导体材料，使得它们不至于接触，从而形成需要的器件结构。同时绝缘体和电磁场也相互作用，对器件的电特性有重要影响

电路基材—半导体

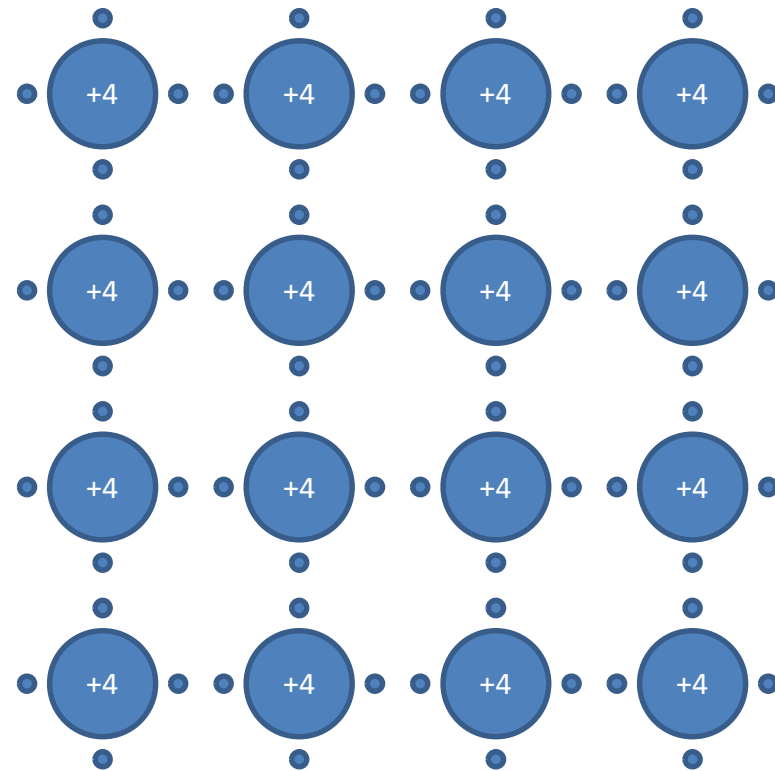
- 半导体是最重要的电路器件晶体管的基材
- 半导体被作为晶体管基材的根本原因在于半导体的电子、空穴浓度是可控的，从而它的导电性能可控，于是可以通过调控半导体材料的导电性来实现晶体管的受控特性，从而形成有源器件，具有将直流电能转换为交流电能的能力
 - 外界供能：温度变化、光照
 - 掺杂：调节电子浓度或空穴浓度
 - 不同掺杂半导体连接关系，形成非线性特性
 - PN结，BJT
 - 通过电容结构，极板累积电荷调控半导体导电特性
 - MOSFET

电子学基础 大纲

- 物质基础
 - 原子模型、价电子、物质分类
- 半导体基础
 - 电子与空穴
 - **N**型半导体与**P**型半导体
- **PN**结二极管
- 半导体二极管分类

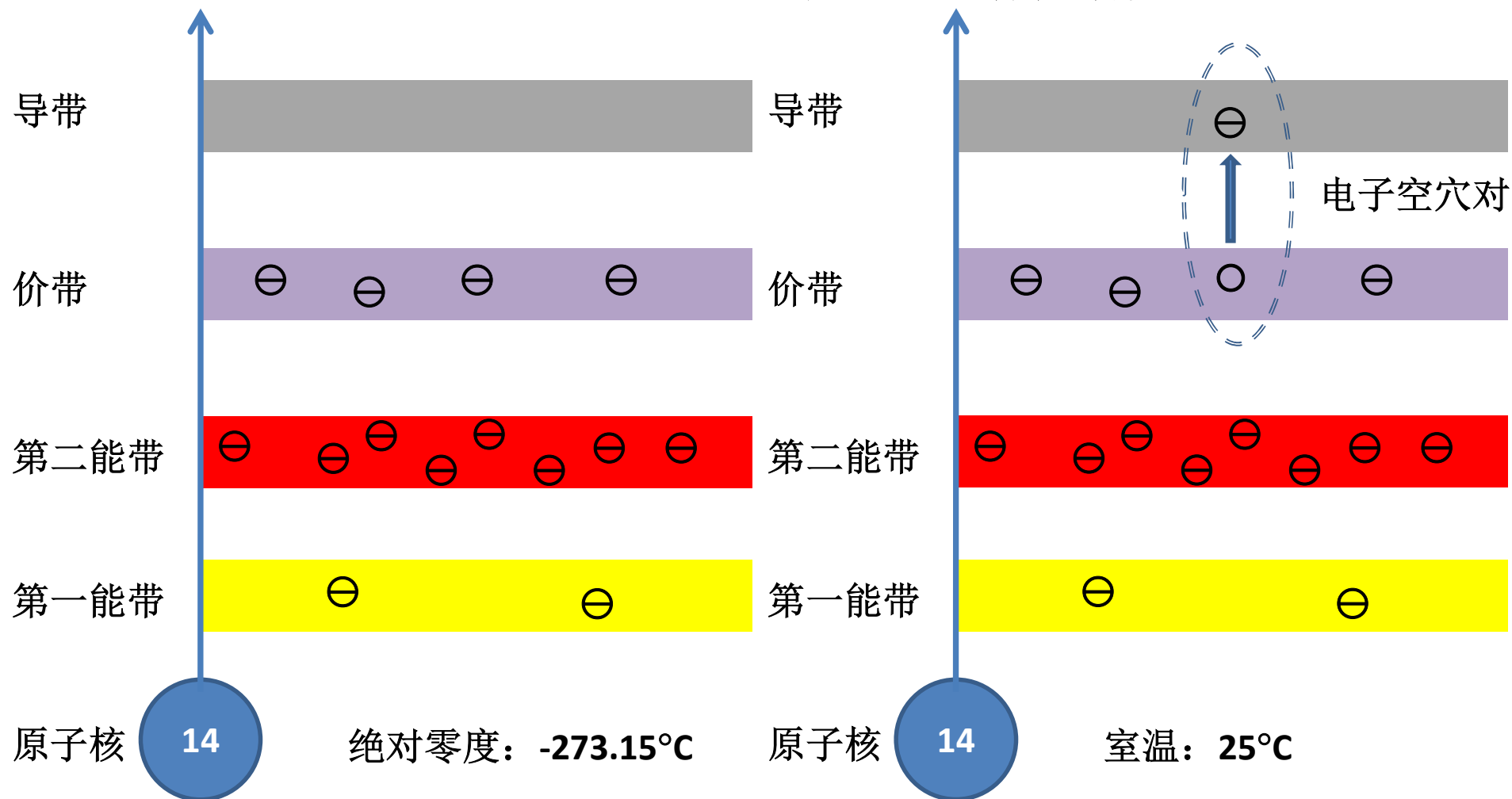
半导体

- 硅Si、锗Ge，砷化镓GaAs，碳化硅SiC等是最常用的半导体材料
- 硅Si、锗Ge原子有四个共价电子
- 硅原子通过共价键结合为硅晶体

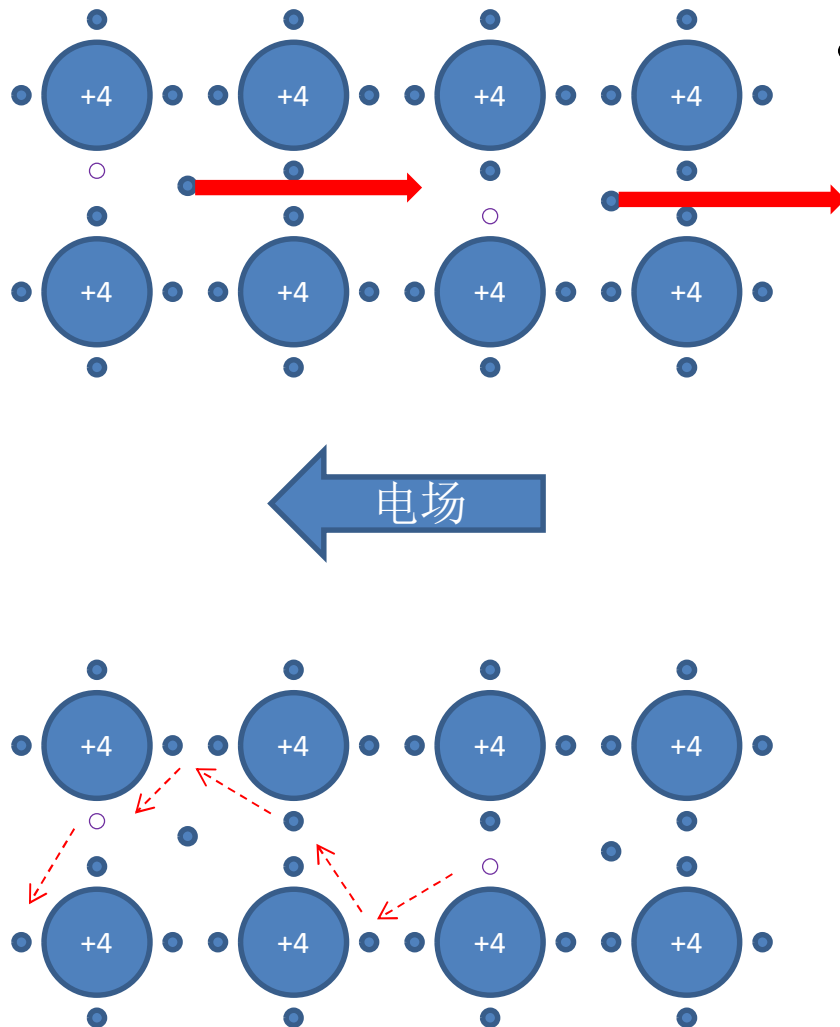


电子与空穴

- 室温下，本征半导体中由于存在自由电子和空穴，因而可以导电
- 热能使得电子和空穴随时产生，但同时伴随着复合



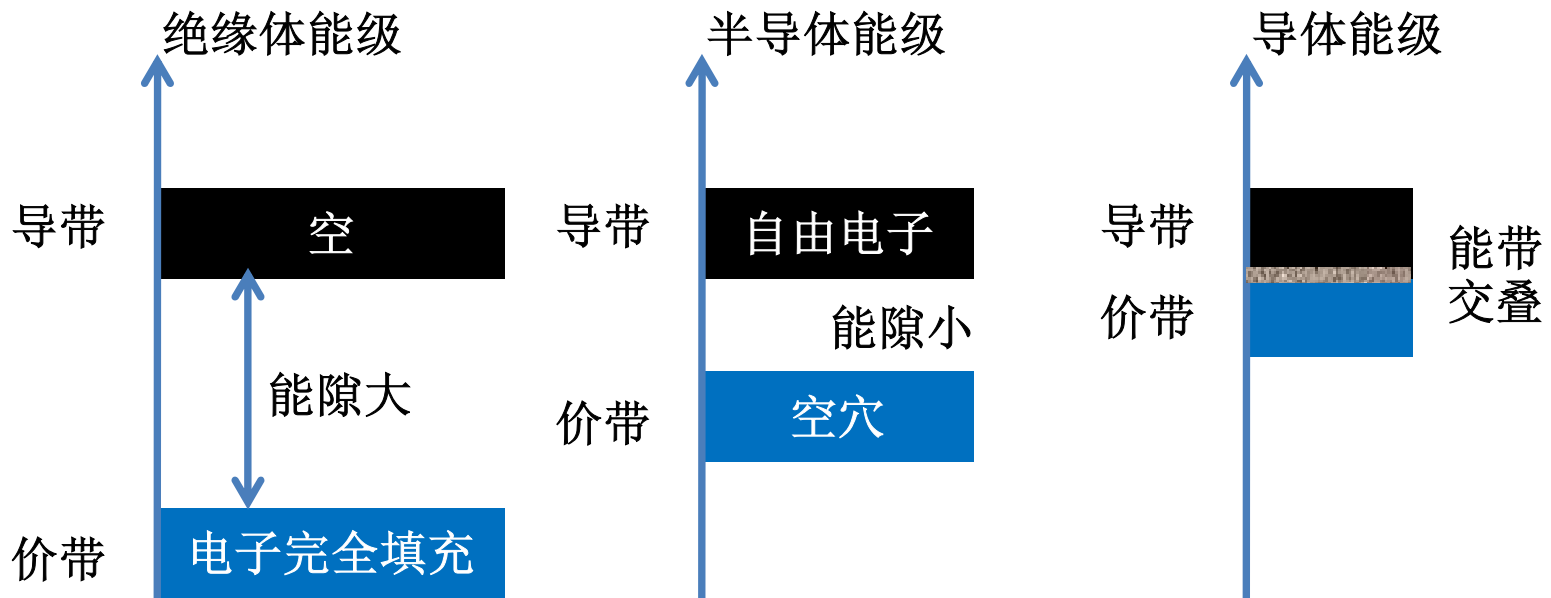
电子电流和空穴电流



- 在一片硅晶体两端施加电压（电场）后
 - 导带内的电子反电场方向移动，形成电子电流 **electron current**
 - 价带内有空穴，空穴邻近的价带电子受到电场作用，反电场方向移动到空穴位置，在原位置形成新的空穴，犹如空穴在价带朝电场方向运动，故而称其为空穴电流 **hole current**
 - 并非空穴在移动，而是电子在价带移动，电子移动形成新的空穴
 - 晶体内的总电流为电子电流和空穴电流之和

纯净半导体

- 纯净半导体中，自由电子数目少，其本征状态对导电没有太大用处
 - 电导率直接取决于自由电子数目 $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$



掺杂半导体

- 纯净半导体导带自由电子数目很少，导电性不好
 - 纯净半导体空穴数目和自由电子数目一样的少

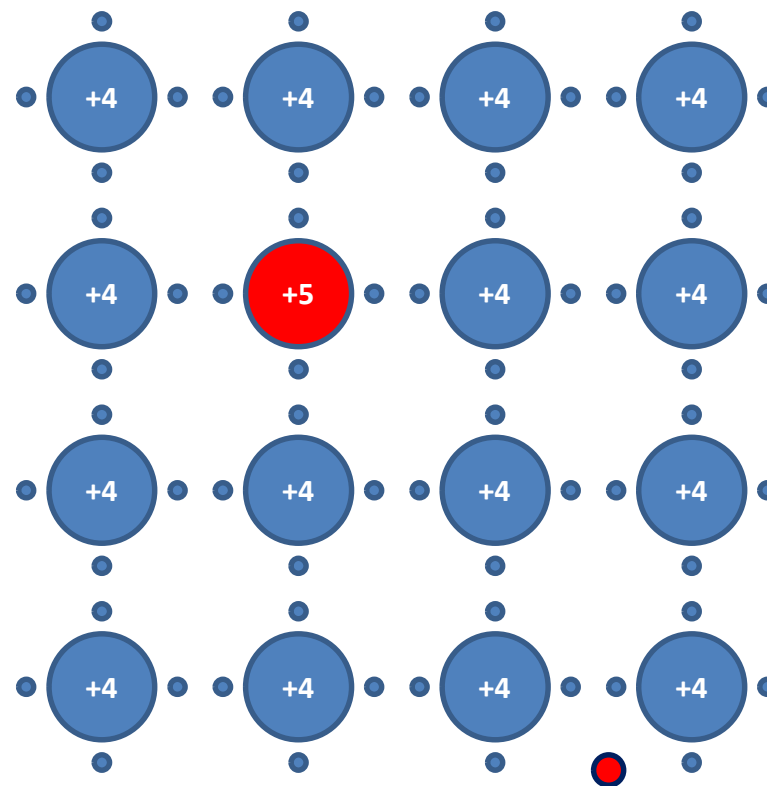
$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad p = n$$

- 可以通过掺杂（**doping**）的方法，即向本征半导体内添加杂质，使得其内部自由电子数目或者空穴数目增加，从而提高其导电性
 - 如果掺杂半导体内的空穴数目多于自由电子，则称为**P型半导体（Positive）** $p \gg n$
 - 如果掺杂半导体内的自由电子数目多于空穴，则称为**N型半导体（Negative）** $n \gg p$

N型半导体

$$\sigma \approx ne\mu_e$$

- 要想让掺杂半导体内的自由电子数目多于空穴，则添加五价（**pentavalent**）杂质原子
 - 拥有**5**个价电子：砷**As**，磷**P**，锑**Sb**
 - 可提供一个电子，故被称为施主（**donor**）
 - 调整掺杂浓度实现电导率的调整

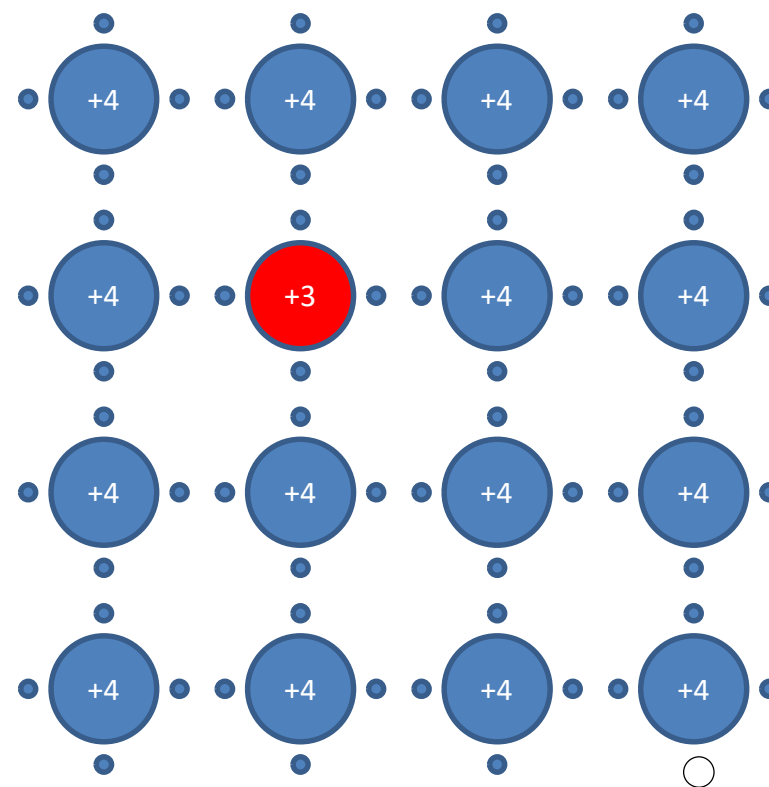


电子是多数载流子，称为多子：**majority carrier**
空穴是少数载流子，称为少子：**minority carrier**

P型半导体

$$\sigma \approx p e \mu_h$$

- 要想让掺杂半导体内的空穴数目多于自由电子，则添加三价（**trivalent**）杂质原子
 - 拥有3个价电子：铝**Al**，硼**B**，镓**Ga**，铟**In**
 - 可接受一个电子，故被称为受主（**acceptor**）
 - 调整掺杂浓度实现电导率的调整



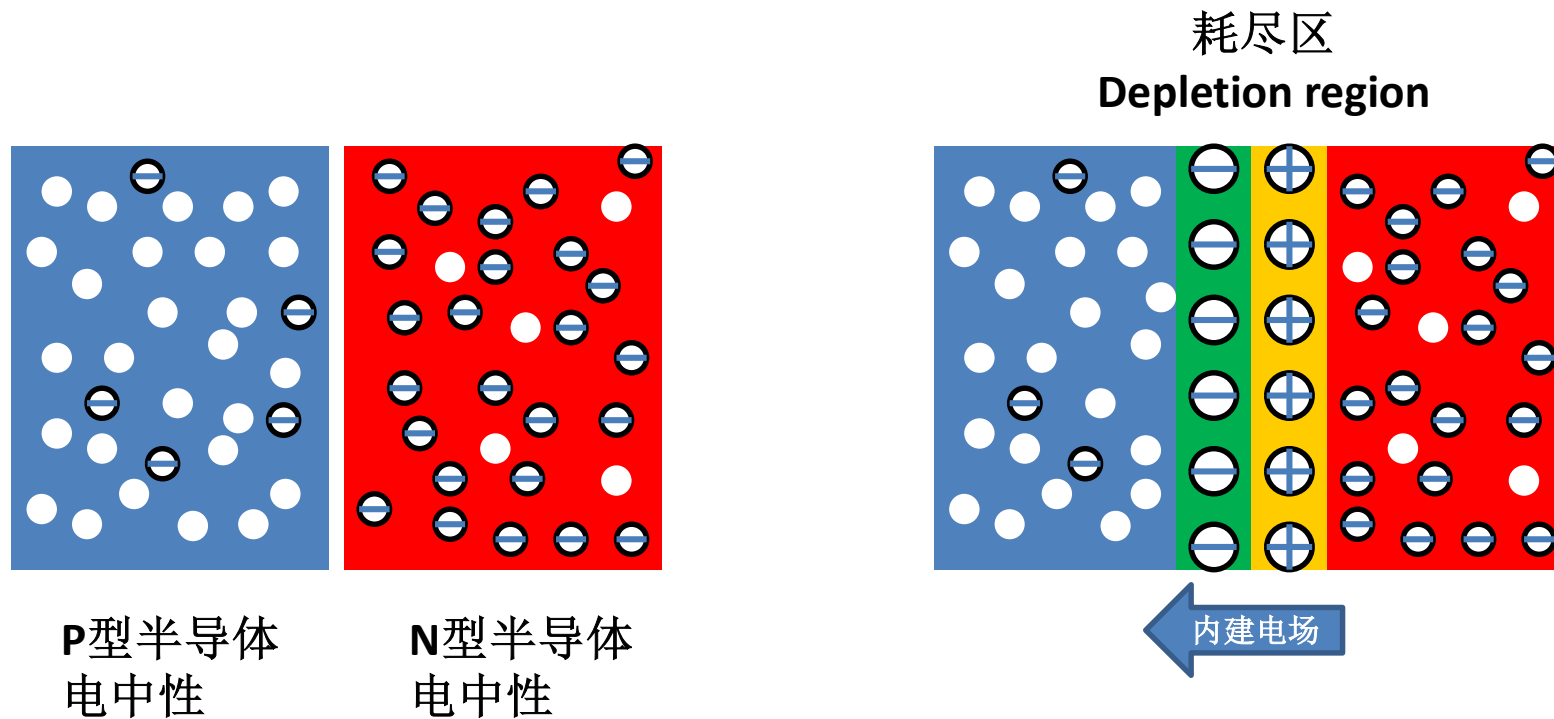
空穴是P型半导体中的多子
电子是P型半导体中的少子

电子学基础 大纲

- 物质基础
 - 原子模型、价电子、物质分类
- 半导体基础
 - 电子与空穴、N型半导体与P型半导体
- PN结二极管
 - PN结形成
 - 二极管特性
 - 非线性描述
 - 简化电路模型
- 半导体二极管分类

3.1 PN结形成

- 当P型半导体和N型半导体接触后，接触面附近则会形成PN结（PN Junction），并可因此形成二极管（diode）特性



平衡

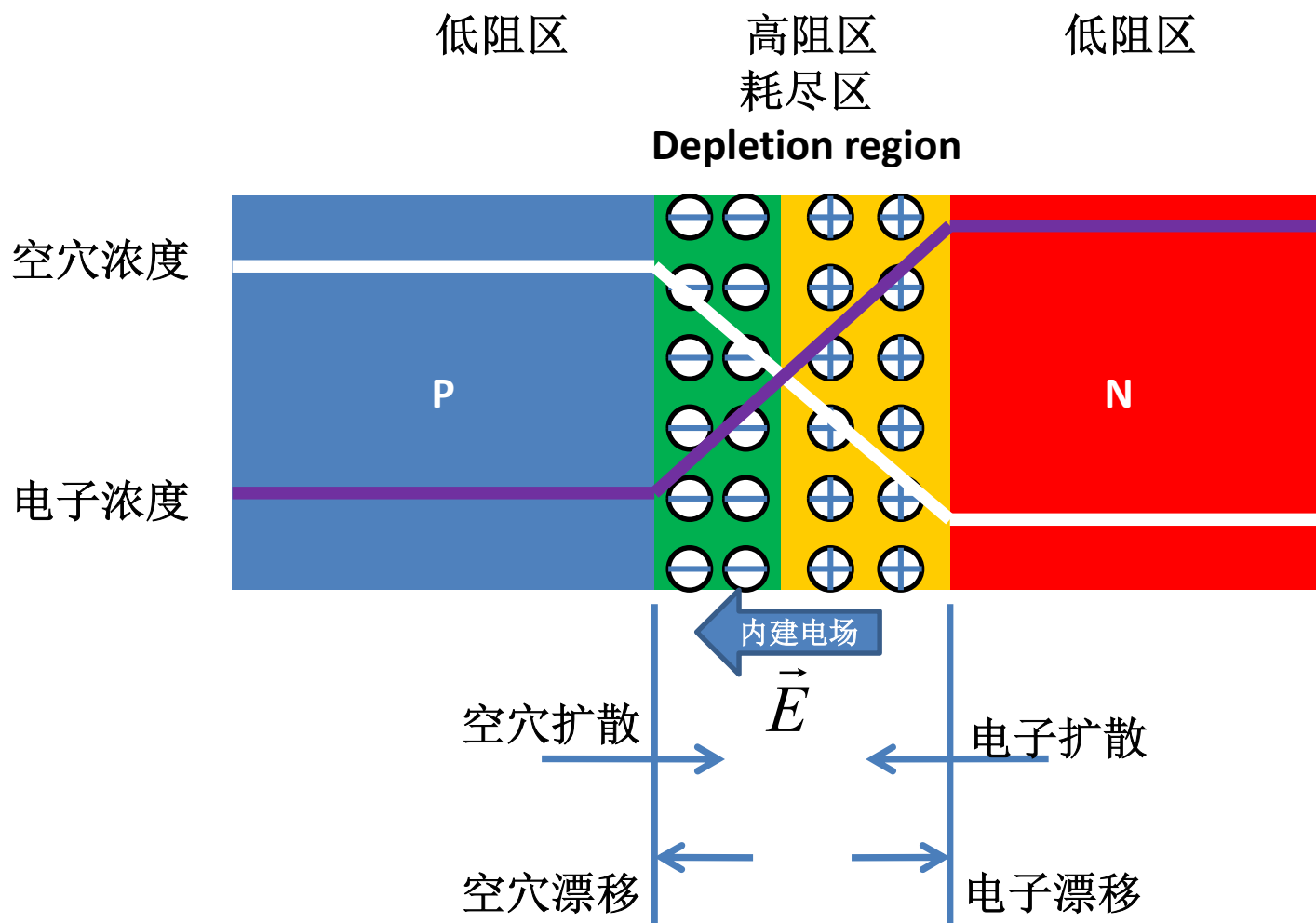
Equilibrium

- 扩散diffusion

- 载流子从高浓度区向低浓度区扩散
 - 浓度差导致势差，产生了力，推动载流子运动

- 漂移drift

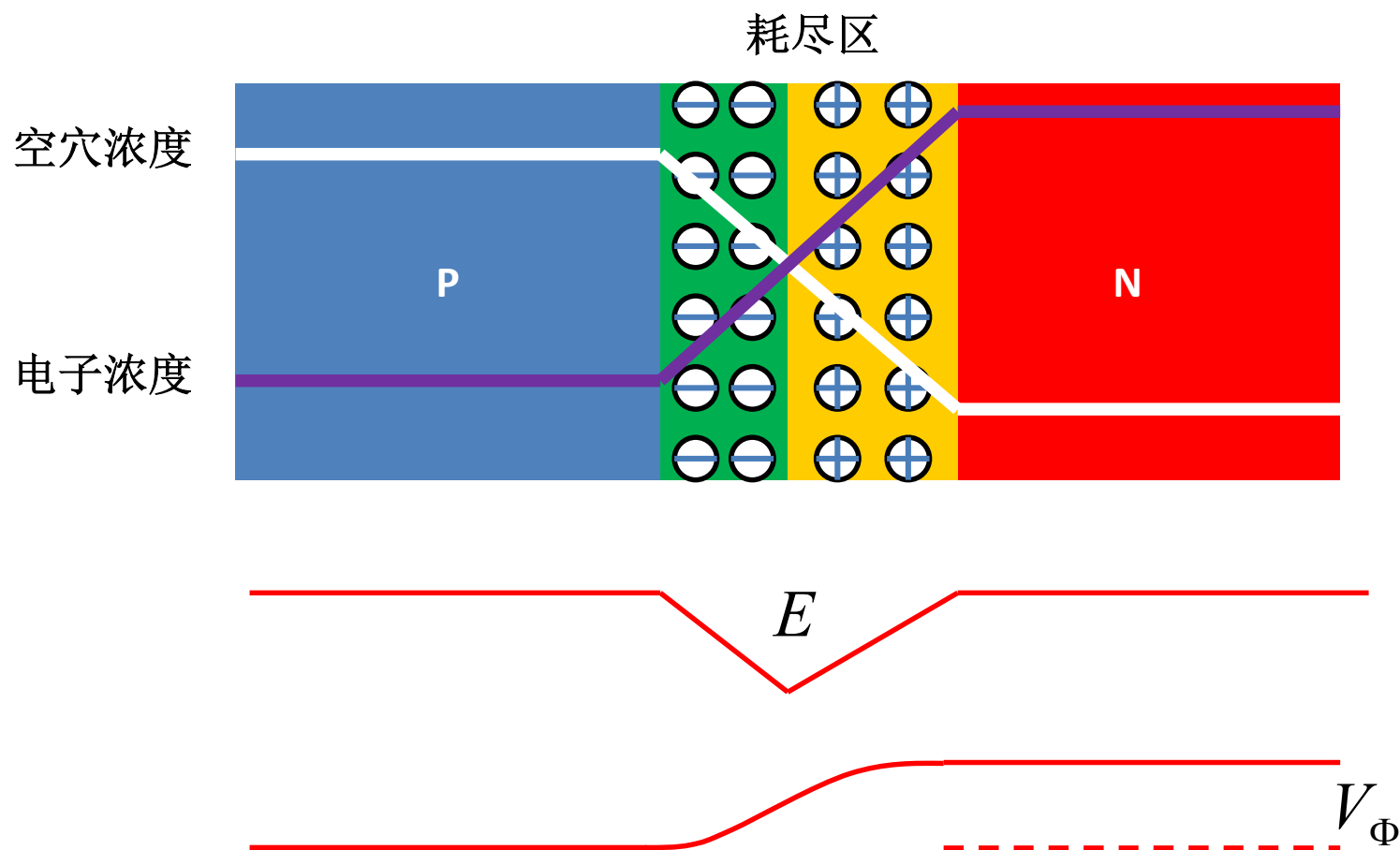
- 在电场作用下，电荷运动
 - 电场导致电势差，产生了力，推动电荷运动



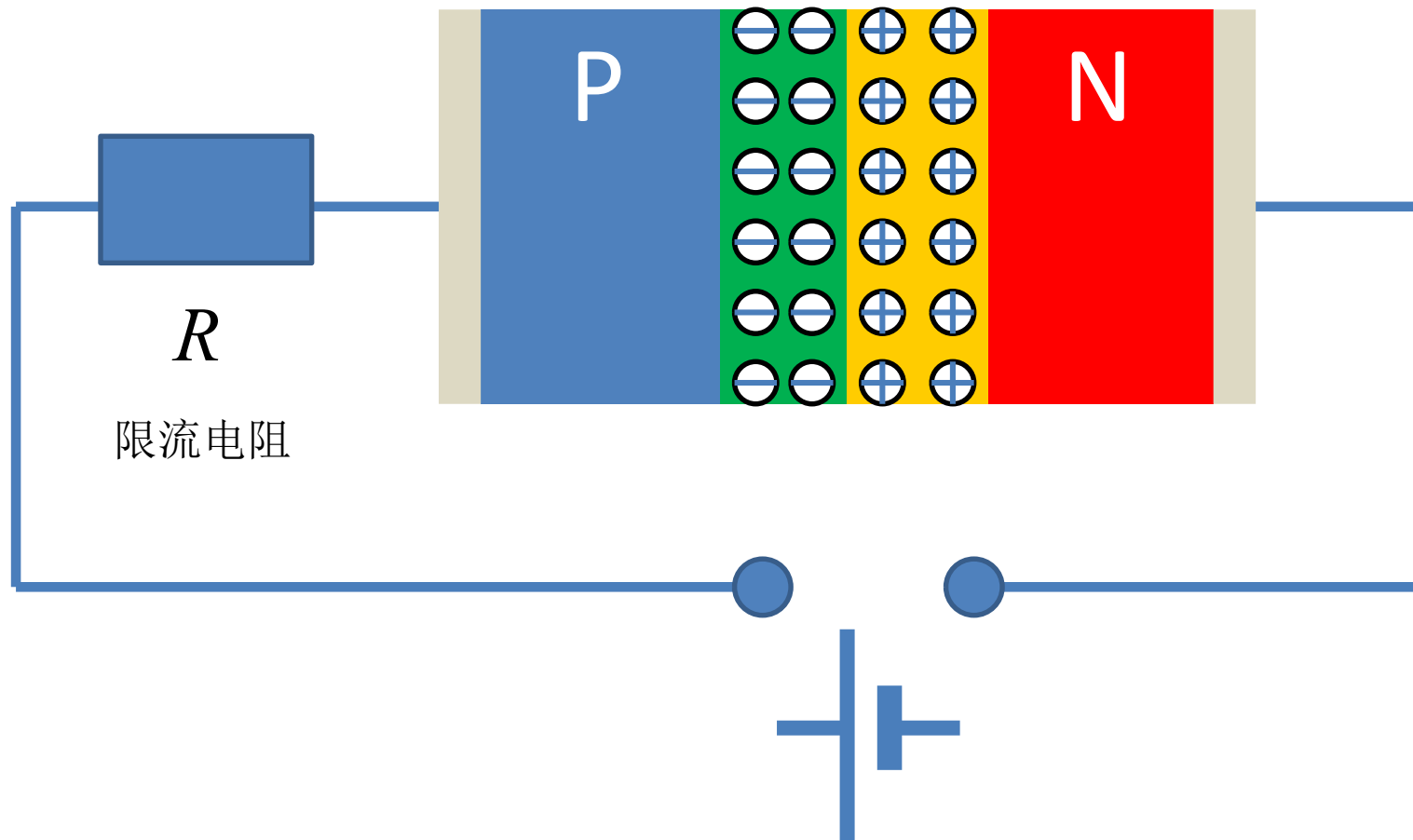
- 内建电场意味着内建电位差 V_{Φ}
 - 温度为 25°C 时
 - 硅PN结 $V_{\Phi}\approx 0.5\sim 0.7\text{V}$
 - 锗PN结 $V_{\Phi}\approx 0.2\sim 0.3\text{V}$

内建电位差

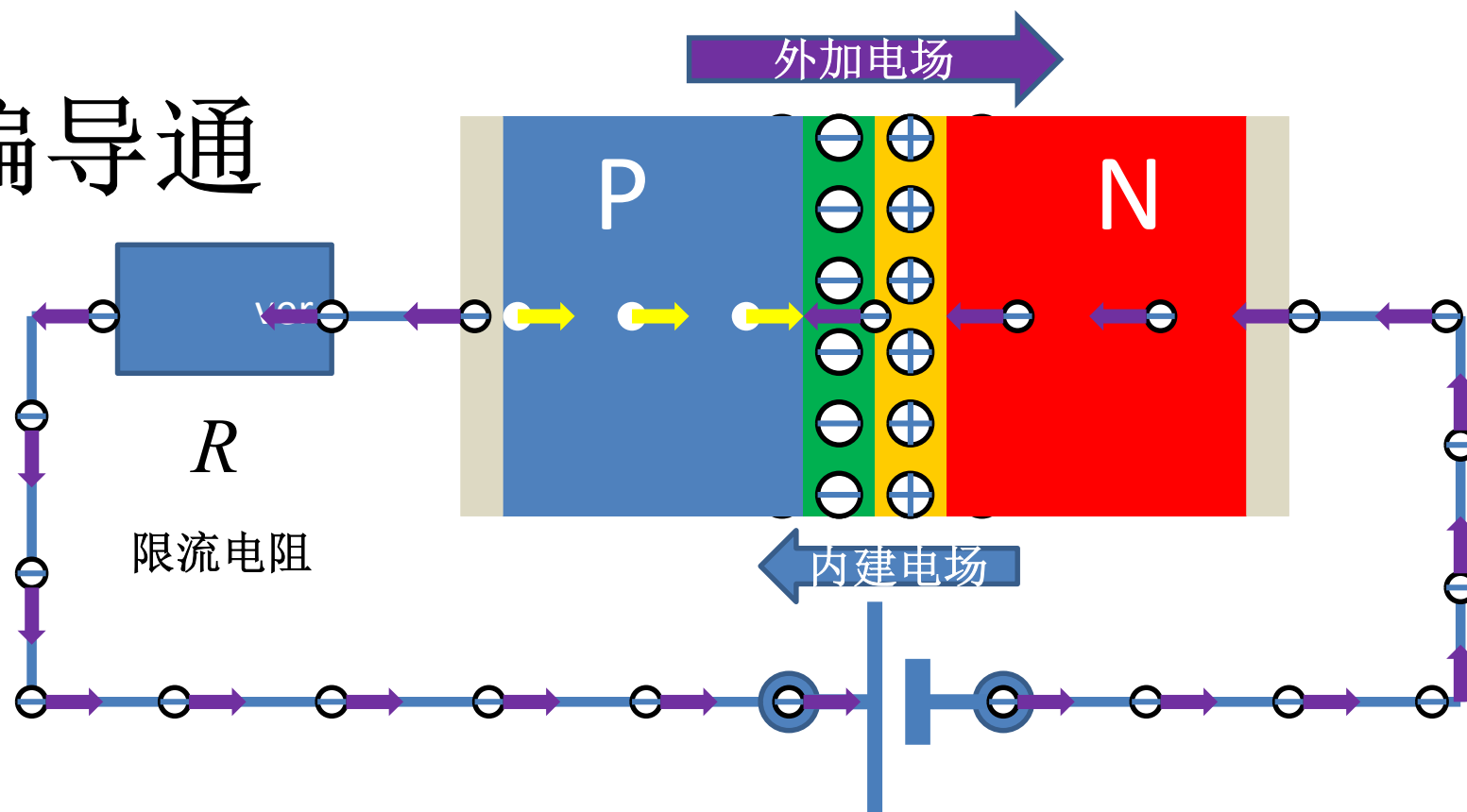
势垒电压



正向偏置 forward bias

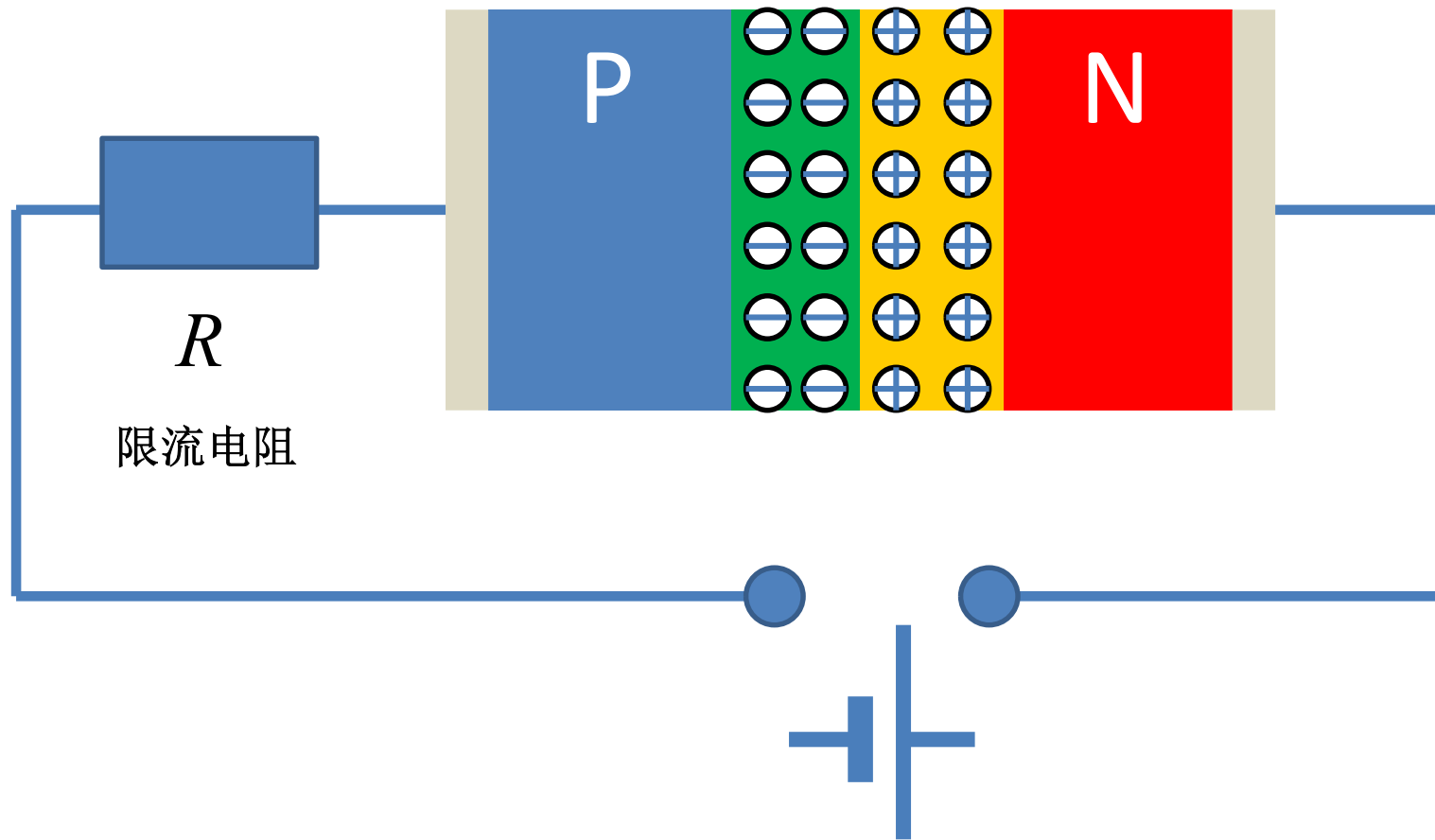


正偏导通

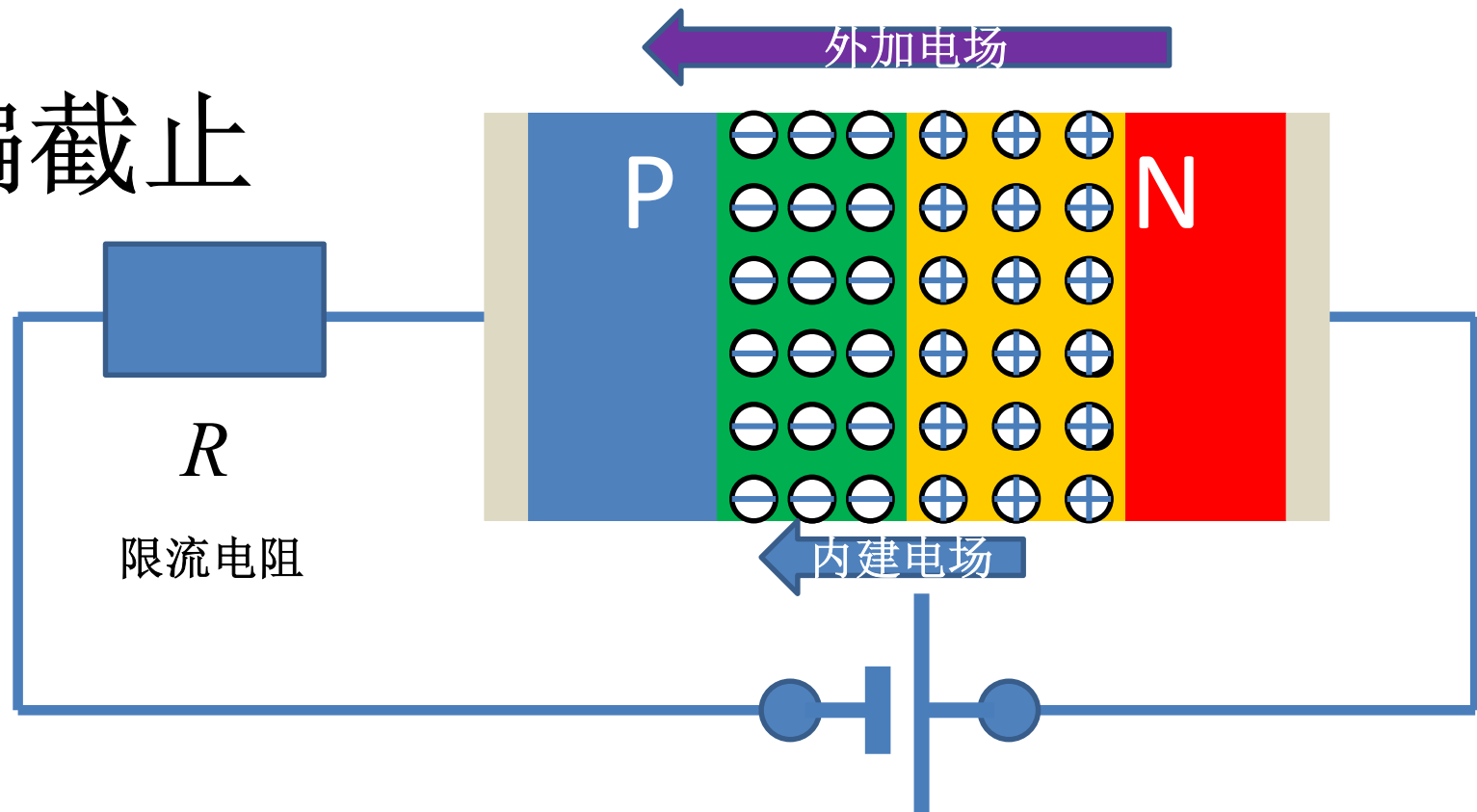


- 正向偏置电压克服内建电位差对多子扩散的阻力，使得多子在耗尽区的扩散得以继续
- 在电源电动势作用下，从电源负极流出的电子，经导线流入N区，经过N区（低阻区），到达结区，电子扩散通过结区，和P区的多子空穴复合
- P区端点每流出一个电子，P区内就生成一个空穴，该空穴在电源电动势作用下，向结区运动，在结区向N区扩散，可以视为和N区扩散过来的电子复合
 - 正向电流是多子扩散电流
- P区端点流出的电子，沿导线移向电源正极
- 限流电阻使得电流不至于太大，过大的电流有可能烧毁PN结

反向偏置 reverse bias



反偏截止



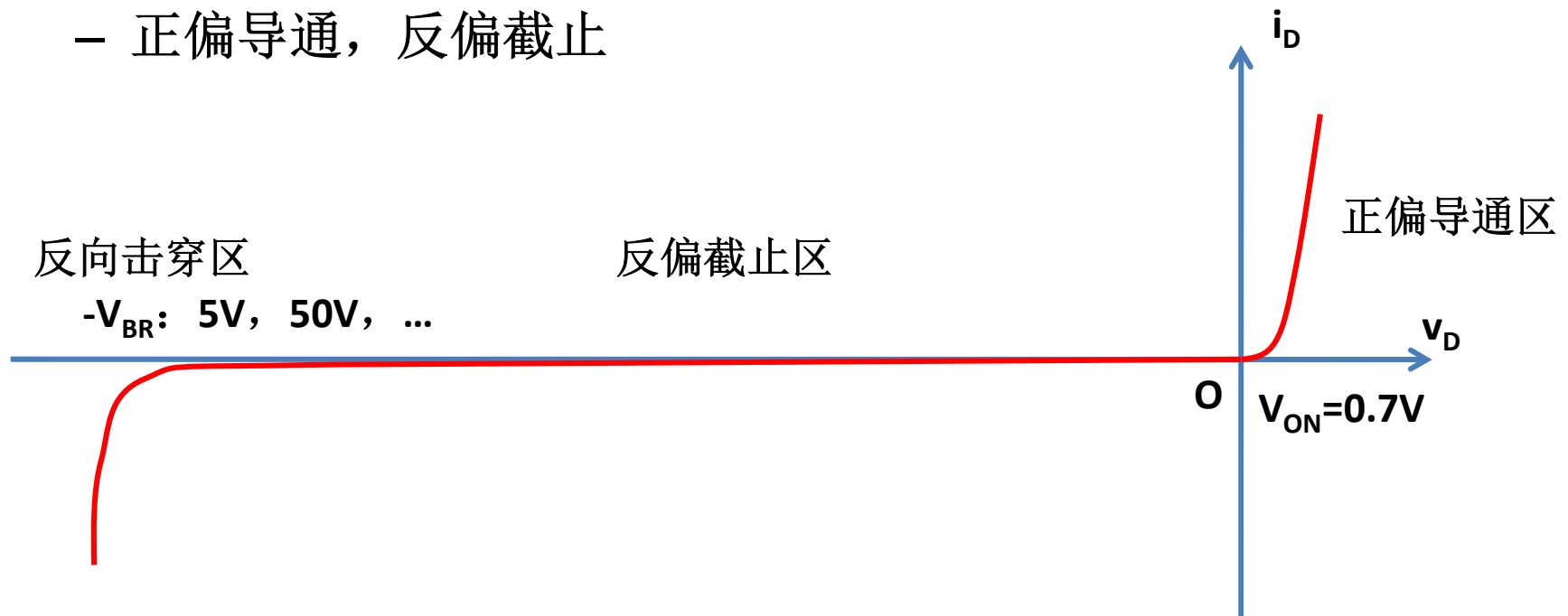
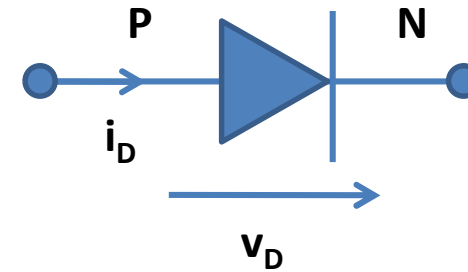
- 电源负极向P区推入电子，从N区抽出电子，电荷在结区积累，使得PN结耗尽区加宽
- 在外加电场作用下，N区空穴向P区漂移，P区电子向N区漂移，存在反向电流
 - 反向电流是少数载流子漂移电流，少数载流子数目少，电流极小，可视为开路
- 二极管呈现高阻特性，限流电阻不起作用

反向击穿 breakdown

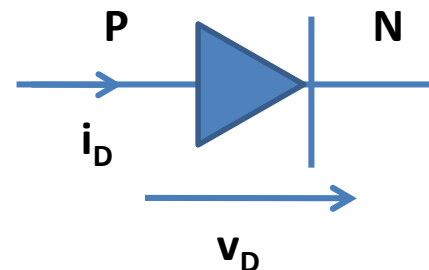
- 持续增加反向电压，PN结则可能**反向击穿**
 - 在未超过允许功率值前，击穿是可逆的
 - 一旦超过，能量转化为热能，热量没有及时耗散出去，则会出现不可逆的**热击穿**
- **齐纳击穿 Zener breakdown**
 - 掺杂浓度高的PN结，结区窄，电场强，易引发齐纳击穿
 - 结区电场足够强，强电场直接将原子的价电子从共价键中拉出来，在结区产生大量的电子空穴对，PN结反向电流急剧增加
- **雪崩击穿 avalanche breakdown**
 - 掺杂浓度低的PN结，结区宽，随着外加反向电压增加，结区电场增强，在尚未引发齐纳击穿时
 - 电子在电场作用下漂移速度越来越快，碰撞结区原子，将结区原子的价电子撞出价带，形成电子空穴对
 - 新生成的电子被强场加速，继续撞击原子，产生更多的电子空穴对
 - 如是**1生2，2生4，4生8**，犹如雪崩，PN结反向电流急剧增大

3.2 PN结二极管特性

- **PN结二极管**是将一个**PN结**封装后的二端器件（单端口网络）
- 二极管伏安特性曲线
 - 正偏导通，反偏截止



分段一：零偏压附近



- v_D 在零附近，伏安特性满足指数律关系

$$i_D = I_{S0} \left(e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right) \quad v_T = \frac{kT}{q} = 26mV \quad T = 25 + 273.15$$

I_{S0} : PN结反向饱和电流: fA量级

$k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$: 玻尔兹曼常数

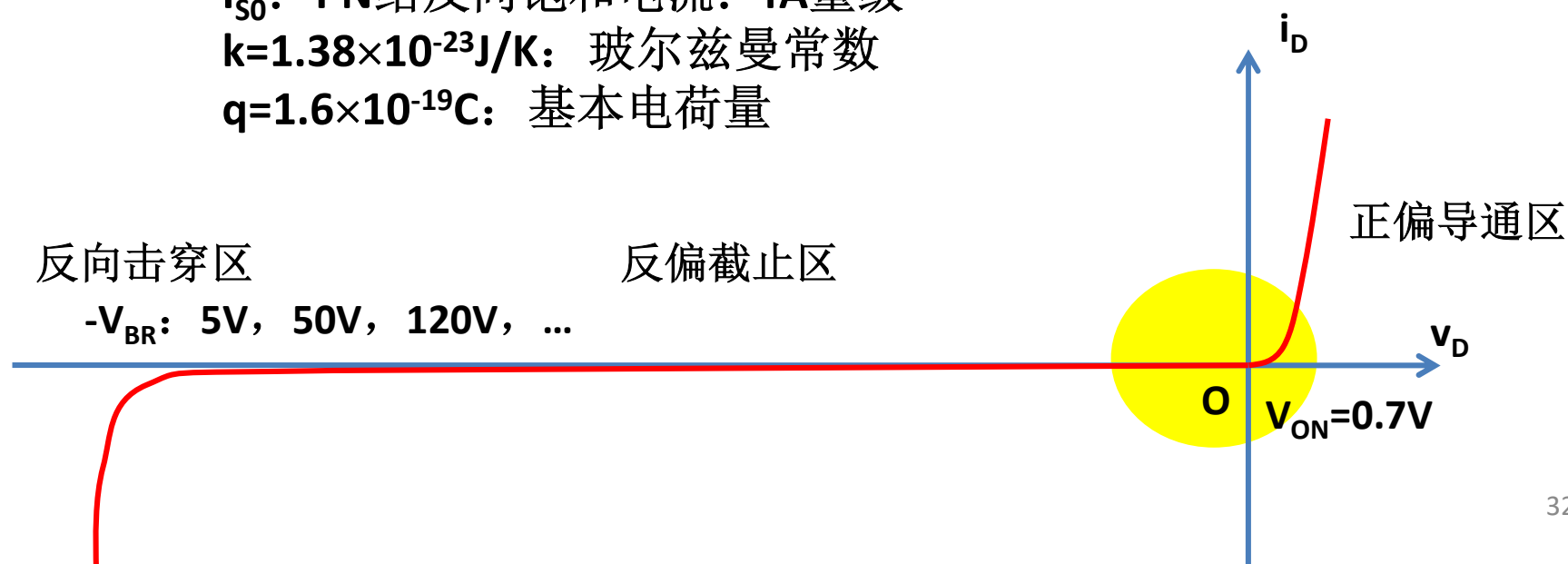
$q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$: 基本电荷量

反向击穿区

$-V_{BR}$: 5V, 50V, 120V, ...

反偏截止区

正偏导通区



热电压

thermal voltage

- 玻尔兹曼常数
Boltzmann constant

– 联系宏观物理量与微观物理量的常数

$$\frac{PV}{T} = kN$$

$k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$: 玻尔兹曼常数
 $q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$: 电子电荷量

$T=(25+273.15)\text{K}$: 室温
 $v_T=26\text{mV}$

$$qv_T = kT$$

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

$$\frac{PV}{N} = kT = 4.11 \times 10^{-21} \text{J}$$

单个理想气体分子的热能

电压 (V)	电流
-0.4	-1.00fA
-0.3	-1.00fA
-0.2	-1.00fA
-0.1	-0.98fA
0	0
0.1	47.85fA
0.2	2.39pA
0.3	0.12nA
0.4	5.69nA
0.5	0.28uA
0.6	13.59uA
0.7	0.66mA
0.8	32.42mA
0.9	1.58A

$$i_D = I_{S0} \left(e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right)$$

指数律

- 反向偏置电流恒等于反向饱和电流
- 正向偏置电流上升极快
 - 0.5V尚是uA量级
 - 0.7V则是mA量级
 - 0.9V则是A量级
- 一般认为开启电压为**0.7V**

分段二：正偏启动电压之后

- 启动电压近似等于内建电位差
 - 可以认为二极管两端正偏电压大于内建电位差后，即可克服内部势垒作用，二极管启动导通
- **PN**结犹如开关，启动前，是高阻状态，启动后则是低阻状态
 - 启动前，二极管特性几乎由**PN**结指数律特性决定
- 启动后，**PN**结就是低阻状态，随着正偏电压增加，**PN**结电阻变得很小，此时，对二极管电流起作用的主要就是**PN**结两侧**P**区和**N**区的欧姆电阻，两个欧姆电阻之和被称为体电阻（**bulk resistance**）
 - 此时，二极管伏安特性几乎是线性的，线性斜率由体电阻决定

$$R_B = R_P + R_N$$

正偏线性段

- 可以从**datasheet**中粗略估计体电阻大小，只要假设估计点位于线性段

$$R_B = \frac{1.1V - 0.7V}{4A - 0A} = 0.1\Omega$$

反向击穿区

$-V_{BR}: 5V, 50V, \dots$

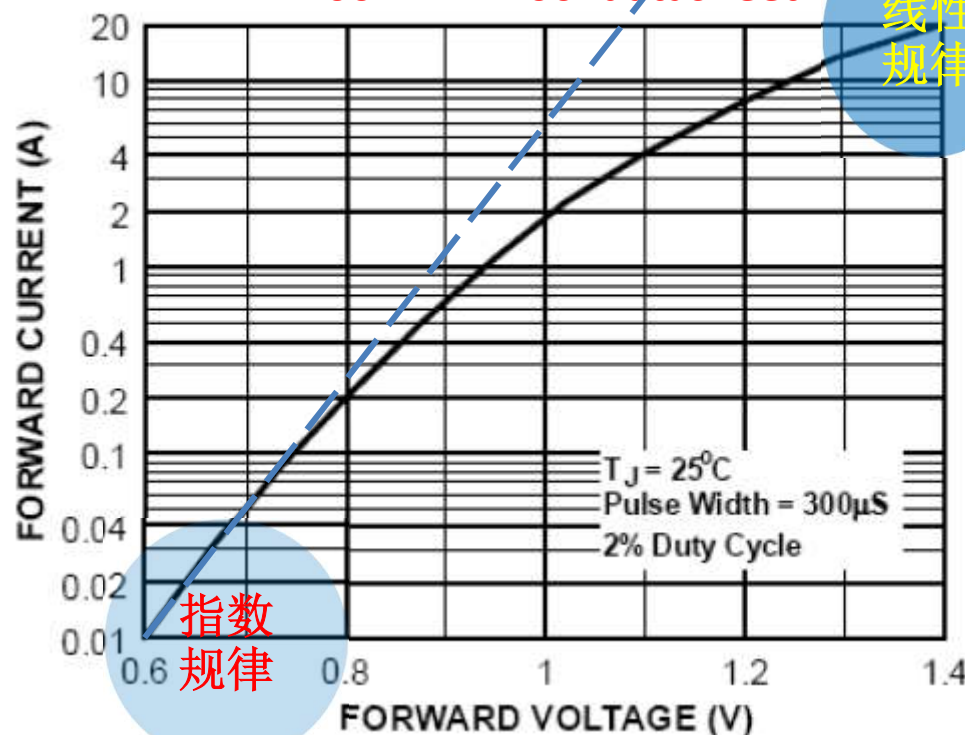
反偏截止区

正偏导通区

$V_{ON} = 0.7V$

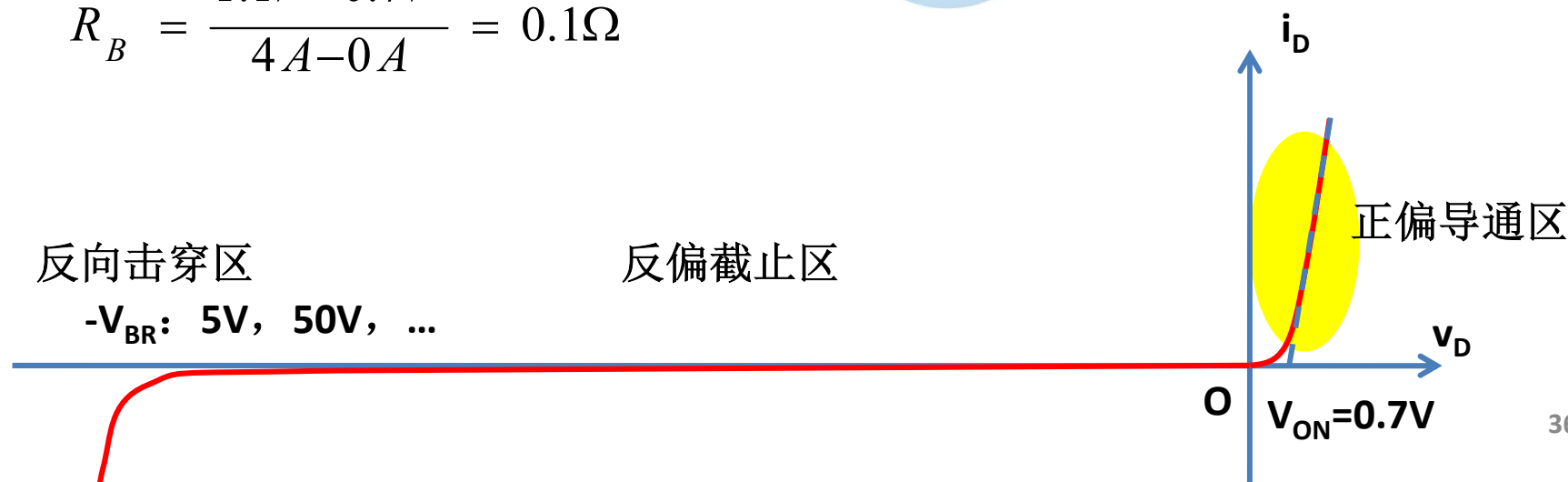
Figure 2. Forward Characteristics

1N4001—1N4007datasheet



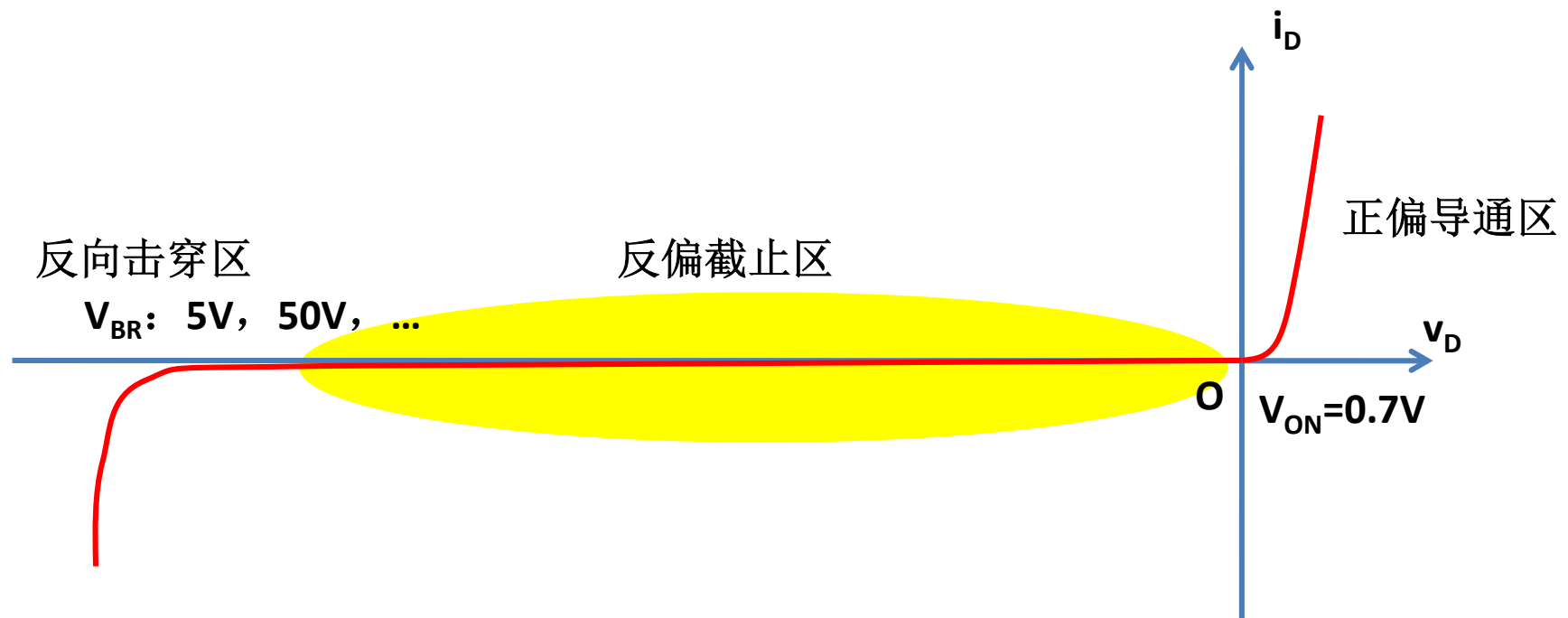
线性规律

指数规律



分段三：反偏截止区

- 基本认为是开路的



分段四：反向击穿区

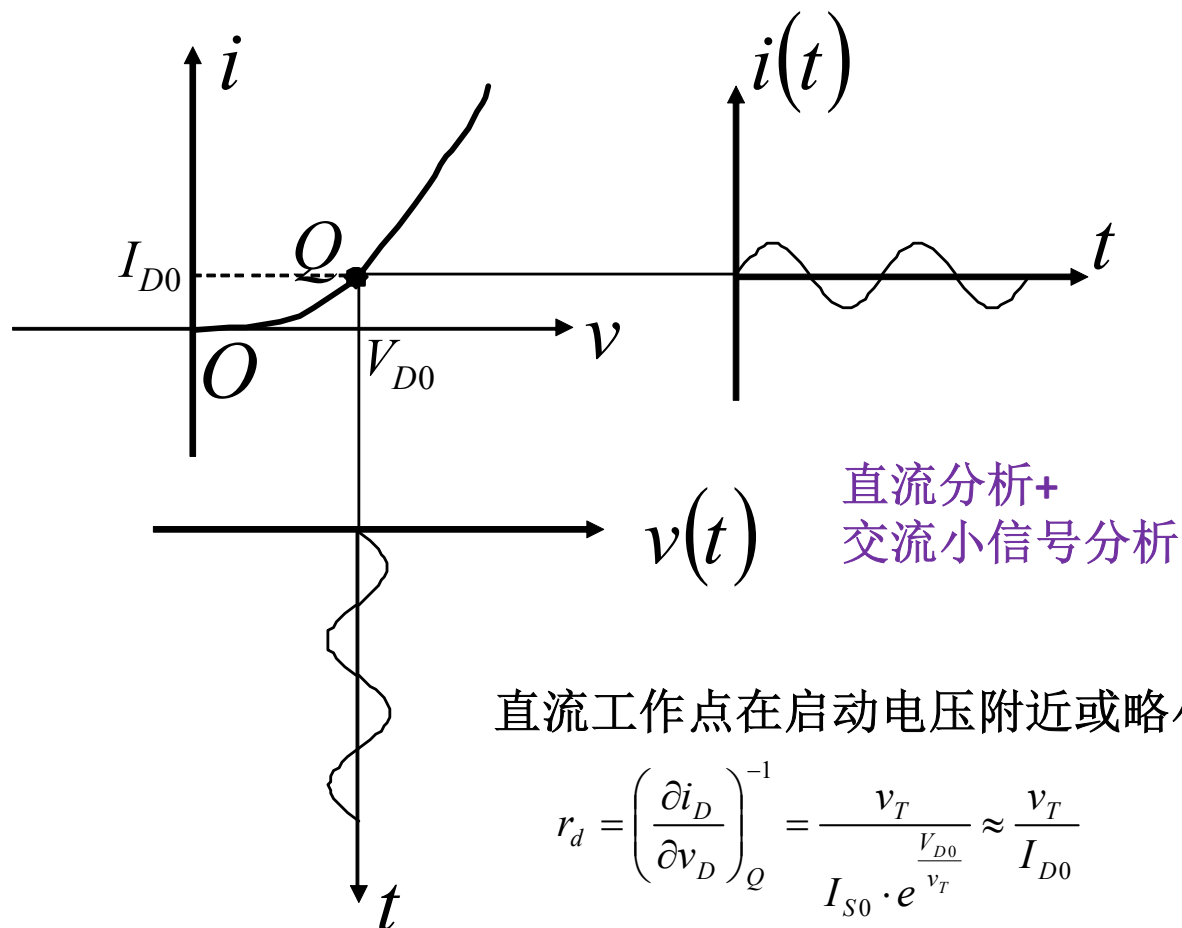
- 一般二极管不应工作在反向击穿区
- 经过特殊设计的二极管，反向击穿区可用于直流稳压
 - 稳压二极管（齐纳二极管，**Zener Diode**）
 - 可视为恒压源



3.3 非线性描述：交流小信号分析

- 当输入为直流加交流小信号时，对交流小信号而言，可以用线性模型

— 电流和电压波形按电阻线性关系对应



直流工作点在启动电压附近或略小

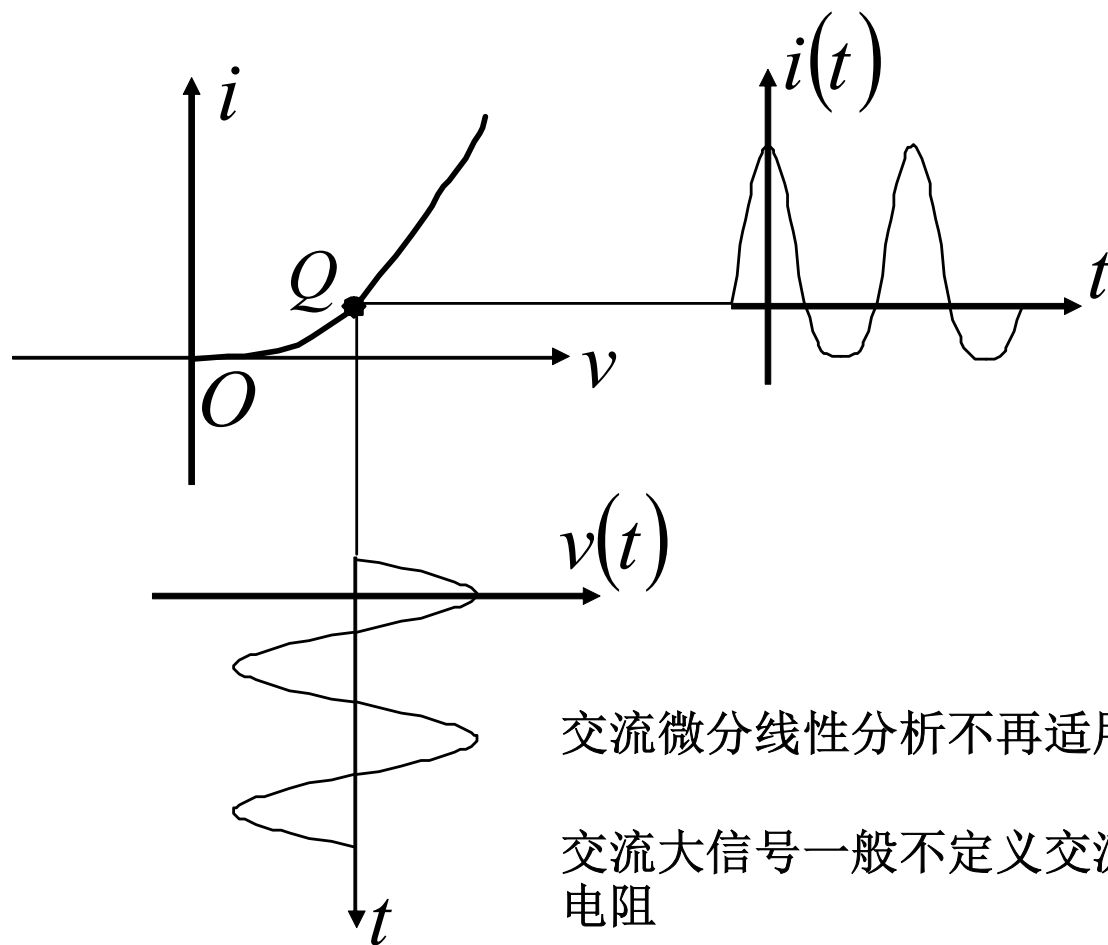
$$r_d = \left(\frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right)_Q^{-1} = \frac{v_T}{I_{S0} \cdot e^{\frac{v_{D0}}{v_T}}} \approx \frac{v_T}{I_{D0}}$$

直流工作点高于启动电压稍多

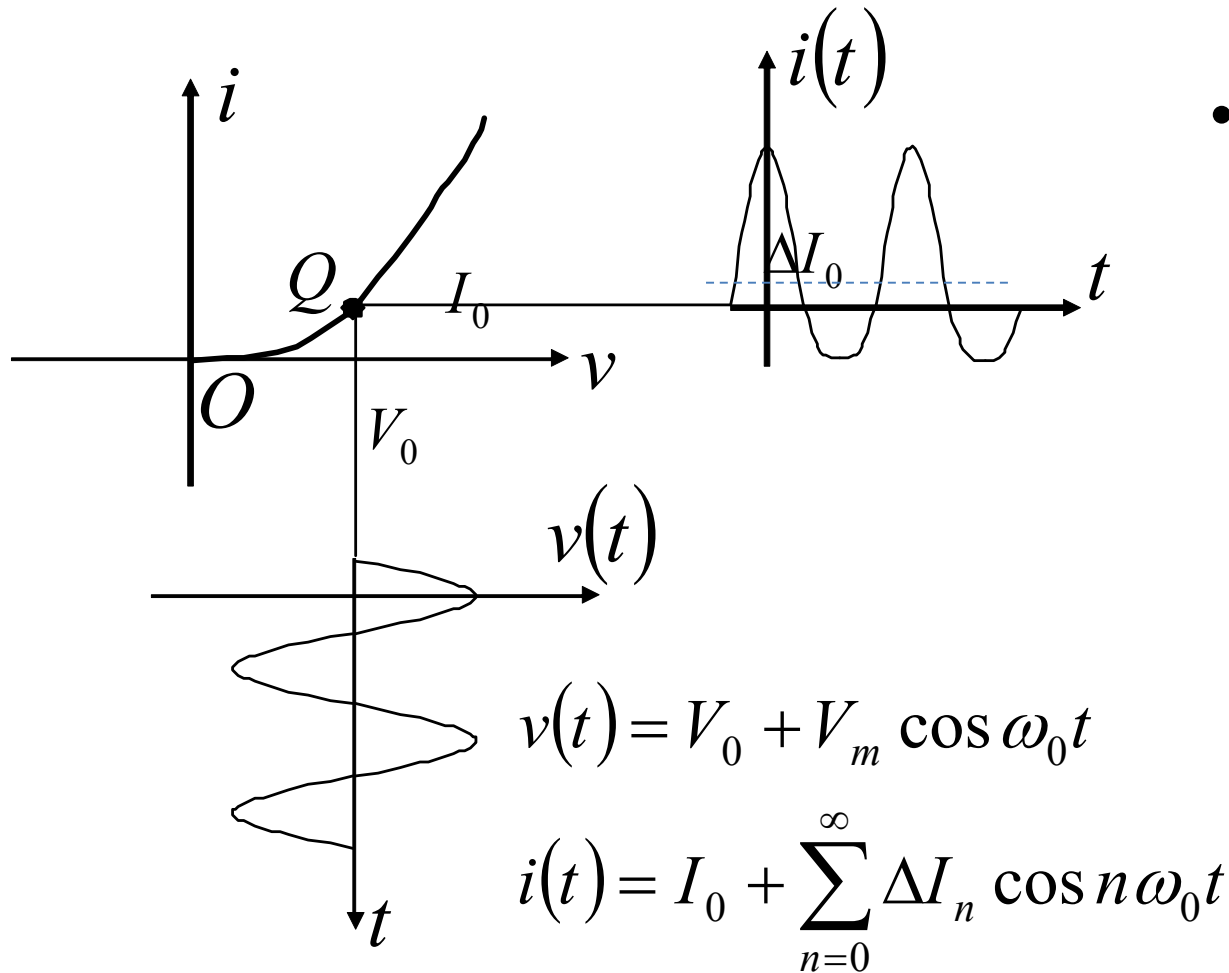
$$r_d \approx R_B \gg \frac{v_T}{I_{D0}}$$

非线性描述：交流大信号分析

- 大信号则会出现严重的波形失真，这种失真被称为非线性失真



非线性失真表现：谐波分量



- 输入为单频正弦信号，输出则为非单频周期信号，其中包含了丰富的高次谐波分量，这些高次谐波分量是非线性失真的一个体现

– 称为谐波失真，**Harmonic Distortion**

非线性失真描述：总谐波失真

- 大多数线性系统，都会存在某种程度的非线性，尤其是大信号工作时，如何描述非线性失真大小呢？
- 总谐波失真：**Total Harmonic Distortion**

$$v(t) = V_0 + V_m \cos \omega_0 t$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \Delta I_n \cos n\omega_0 t = (I_0 + \Delta I_0) + I_{1m} \cos \omega_0 t + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos n\omega_0 t$$

直流分量 基波分量 高次谐波分量
↓ ↓ ↓
线性系统期望输出 非理想线性系统输出
理想线性系统不期望

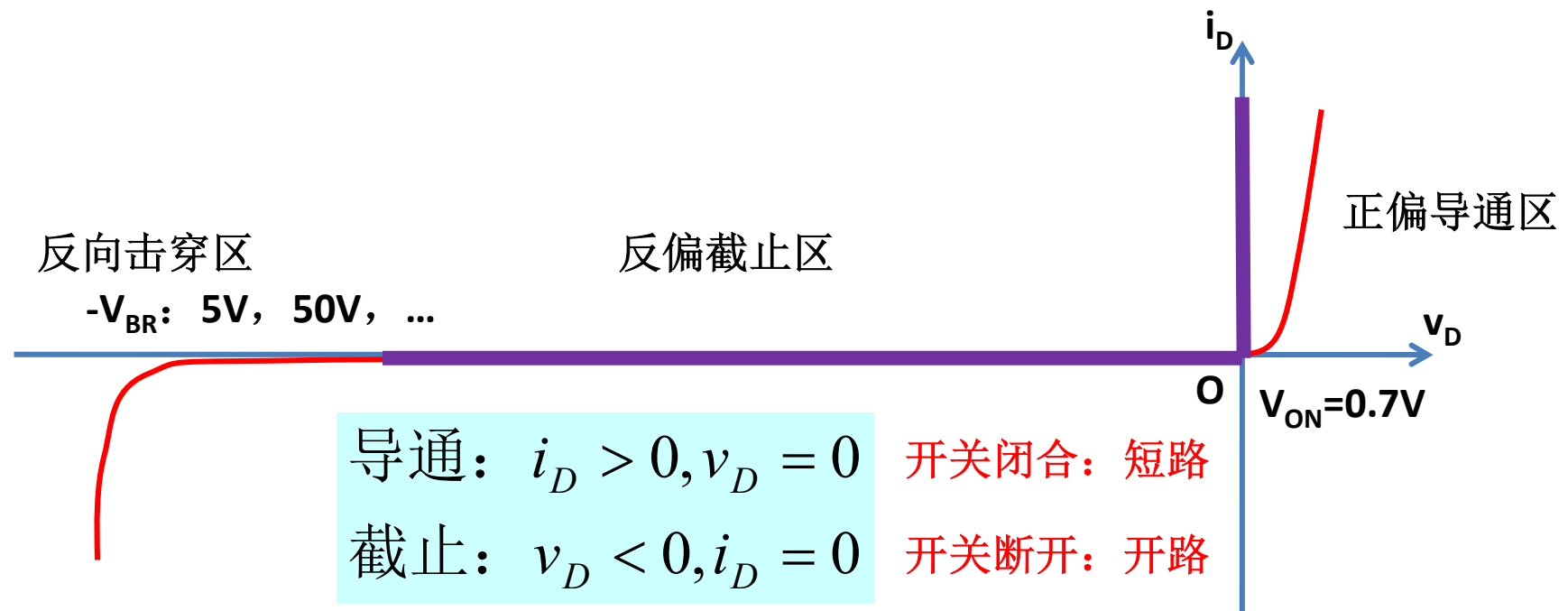
$$HD_k = 20 \log_{10} \left| \frac{I_{km}}{I_{1m}} \right| \quad \text{k次谐波失真}$$

$$THD = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nm}^2}{I_{1m}^2} \quad \text{总谐波失真}$$

4.1 简化电路模型

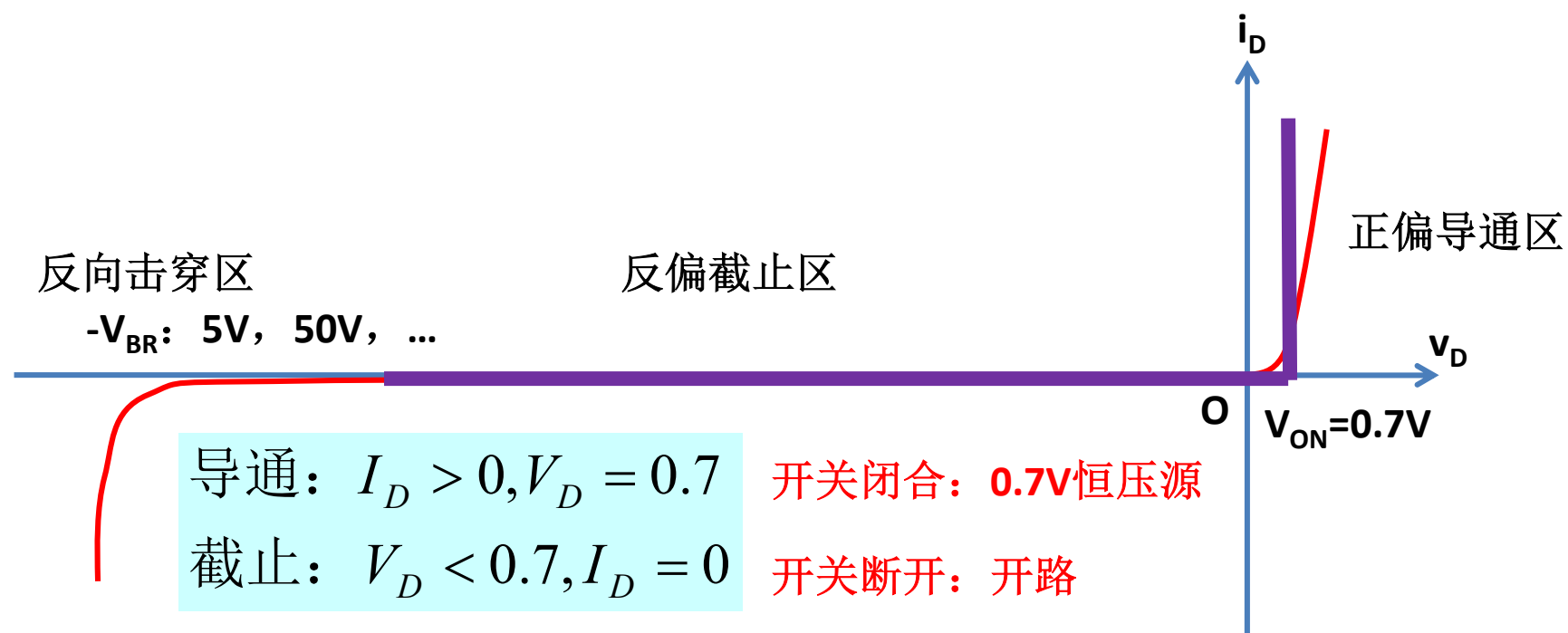
零阶模型：理想整流二极管

- 实际特性
 - 正向导通，反向截止
 - 导通即短路，截止即断路
 - 开关模型



一阶模型

- 考虑内建电位差影响
 - 低于内建电位差则截止



电子学基础 大纲

- 物质基础
 - 原子模型、价电子、物质分类
- 半导体基础
 - 电子与空穴、N型半导体与P型半导体
- PN结二极管
 - PN结形成、二极管特性、非线性描述、简化电路模型
- 半导体二极管分类
 - 依结分类
 - 依伏安特性分类
 - 依应用分类

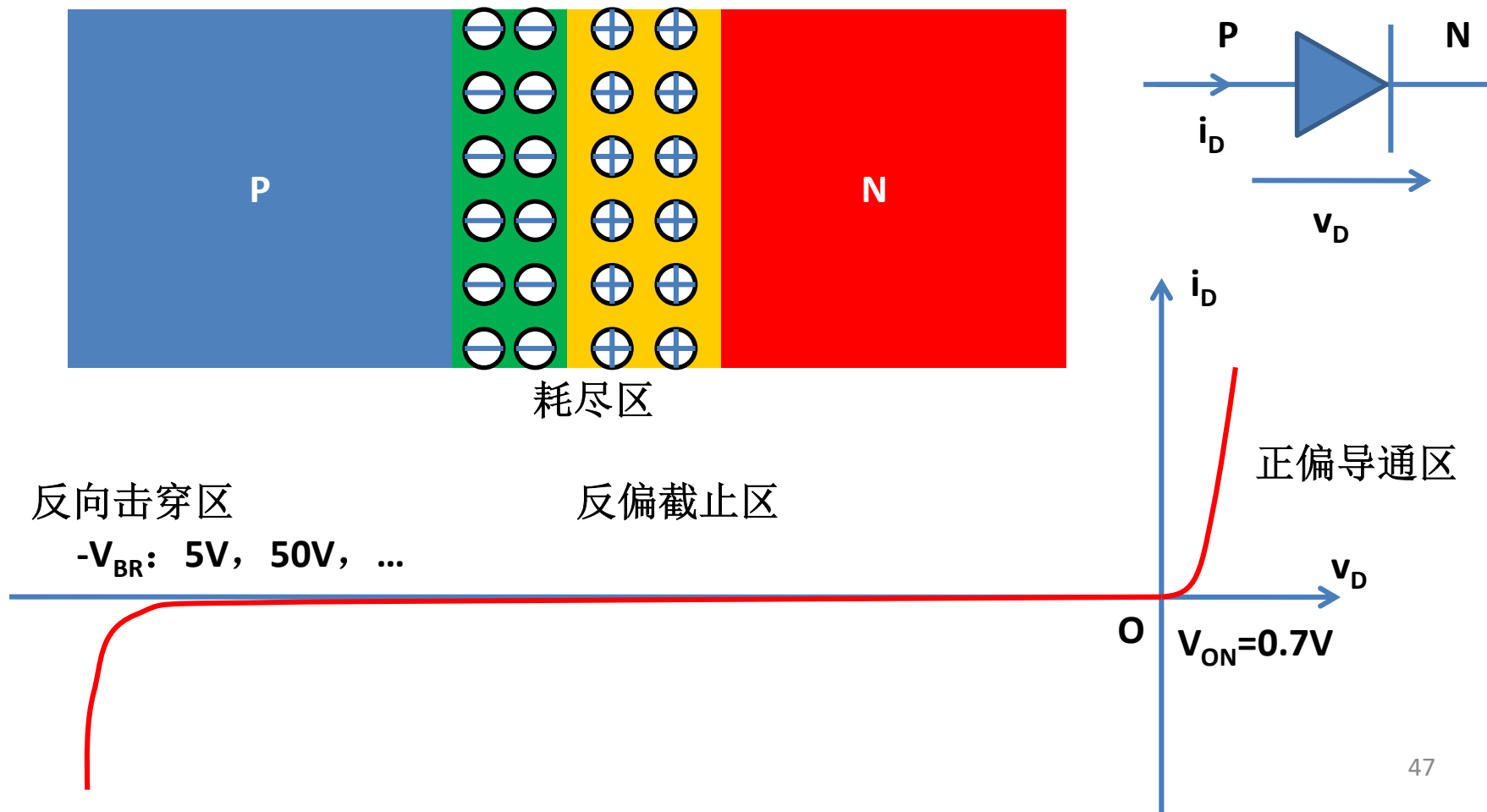
四、半导体二极管分类

- 结的形成
 - PN结、肖特基结、异质结
- 伏安特性
 - 整流特性、负阻特性（N型、S型、动态）
- 应用
 - 整流、稳压、变容、发光、光电、...

4.1 PN结

正偏时以扩散电流为主 $i_D = I_{S0} \left(e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right)$

- P型和N型半导体材料紧密接触所形成的结



PIN

正偏时，两类载流子被注入到本征层
电流以空穴电子的复合电流为主

$$i_D = I_{S0} \left(e^{\frac{v_D}{2v_T}} - 1 \right)$$

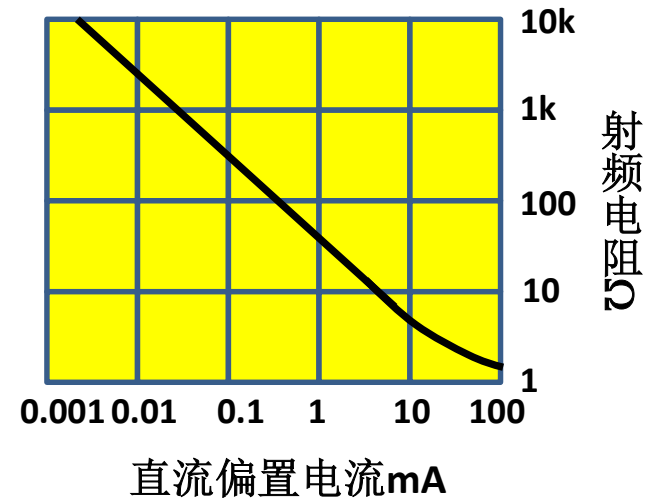
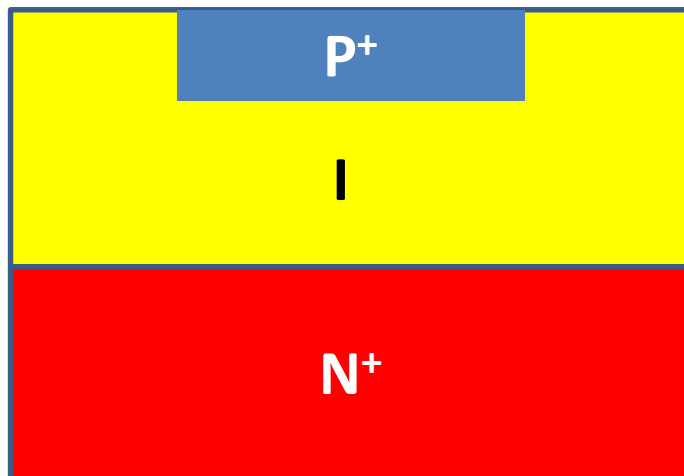
- **PIN是PN结的改进**

- **PN结之间夹一层本征层**

- 低频高功率整流，提高反偏击穿电压
- 射频：开关、压控电阻

伏安特性曲线和**PN结**类同，但反偏击穿电压很高，可以用作大功率整流器

射频电阻：频率很高时，射频信号变化快于载流子寿命，使得本征层内的载流子未完全复合，于是不存在整流，**PIN**二极管就是一个由直流偏置电流确定的纯电阻



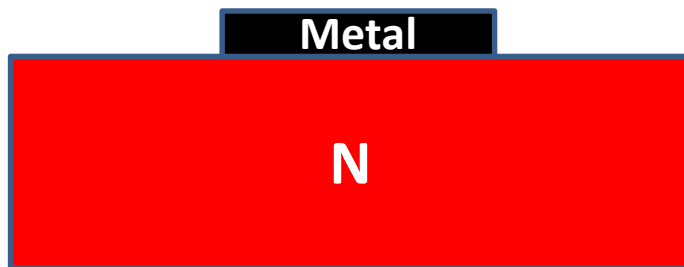
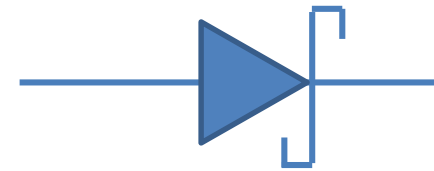
射频开关，射频衰减器，调制器，大功率整流器，光电探测器

肖特基势垒

Schottky Barrier Diode

$$i_D = I_{S0} \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (n \geq 1)$$

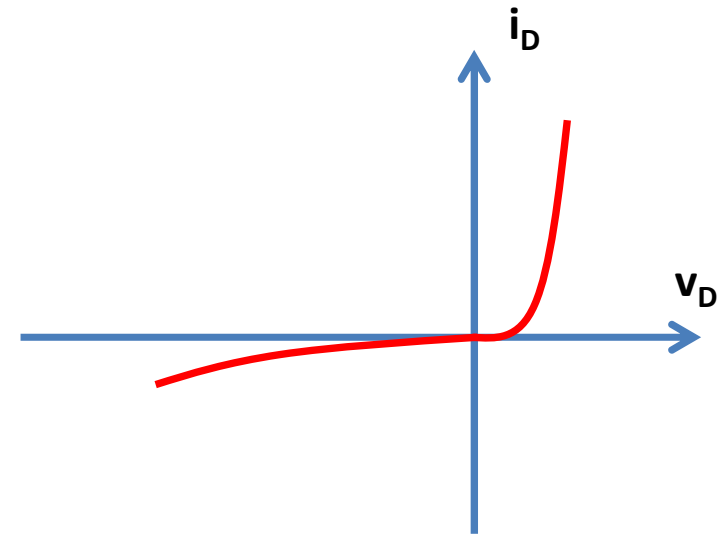
- 金属半导体结（MS结）
 - 正向压降低：**0.2-0.4V**
 - 高频性能好
 - **100GHz/PN结1GHz**



通用整流器
微波混频器、检波器
非线性电阻
变容二极管
光电探测、太阳能电池基本结构单元
...

异质结

- 常说的**PN结**属同质结，半导体材料是相同的，如都是**Si**材料
 - **homojunction**
- 异质结是用不同的半导体材料形成的结
 - **heterojunction**
 - **Ge/GaAs, InP/GaAs, Ge/GaAsP, GaAs/AlGaAs**
 - 同型异质结：**NN**异质结，**PP**异质结
 - 异型异质结：**PN**异质结



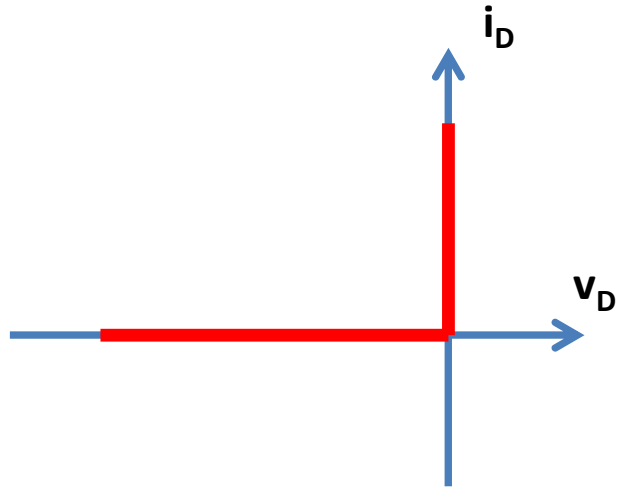
同型异质结反向电流没有饱和特性，不能用于整流

4.2 伏安特性分类

- 结的形成
 - PN结、肖特基结、异质结
- 伏安特性
 - 整流特性
 - 负阻特性
 - N型负阻
 - 隧道二极管、耿氏二极管、...
 - S型负阻
 - 肖克利二极管、异质结构热电子二极管、晶闸管、...
 - 动态负阻
 - IMPATT
 - BARITT
- 应用
 - 整流、稳压、变容、发光、光电、...

理想整流特性

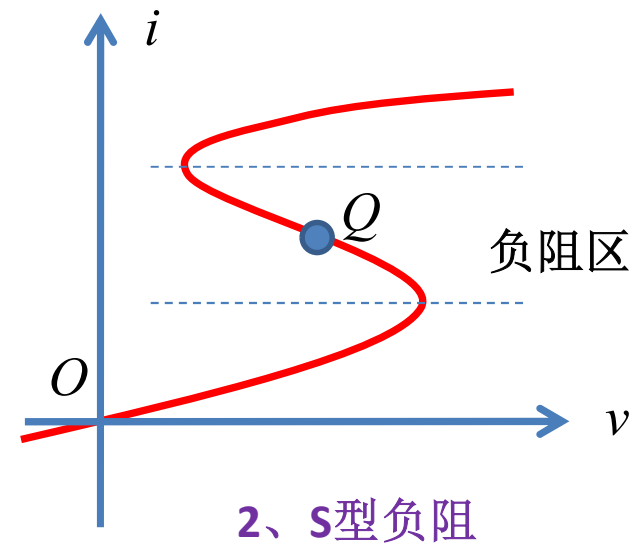
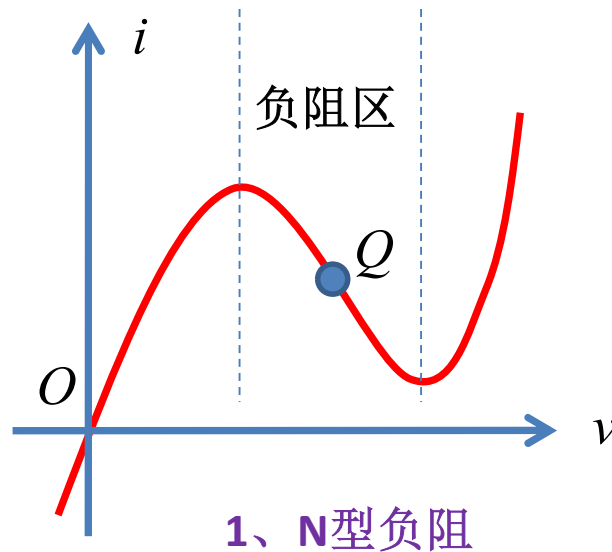
rectification



- 正偏导通、反偏截止特性就是整流特性
 - 很多二极管都具有整流特性或整流功能
 - 整流：将交流转换为直流
 - 下节理论课讨论

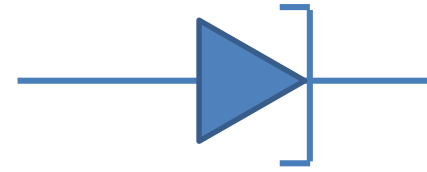
微分负阻特性

NDR: Negative Differential Resistance



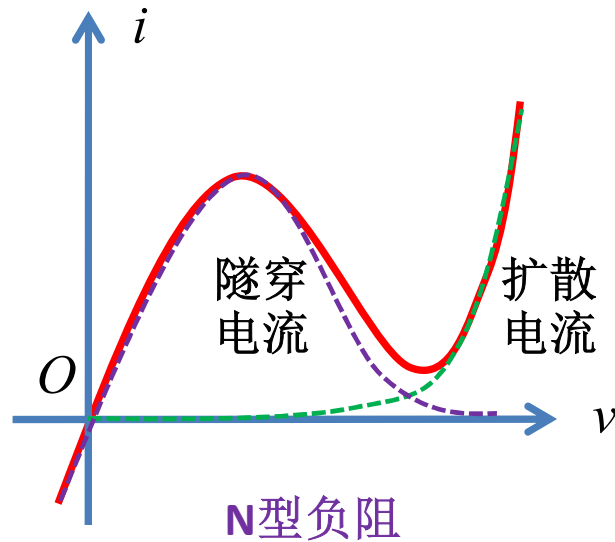
3、动态负阻：从伏安特性上找不到负阻区，是高频动态效应形成的等效负阻

隧道二极管 Tunnel Diode

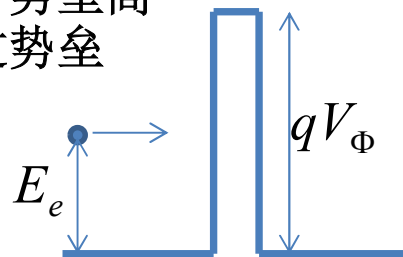


重掺杂PN结，10nm厚的耗尽层：
电子隧穿效应

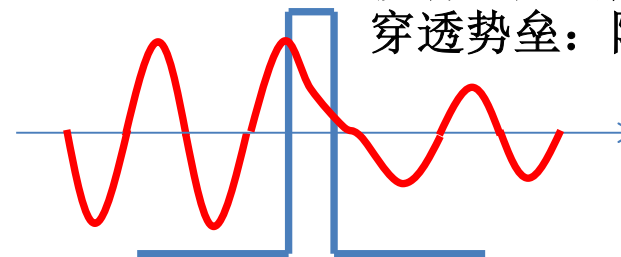
电子隧穿是一种量子力学现象：
经典力学中，当电子撞击到较高电势的势垒上时，它是完全被势垒所约束。量子力学中，电子是波，波可以按一定的概率穿透势垒。



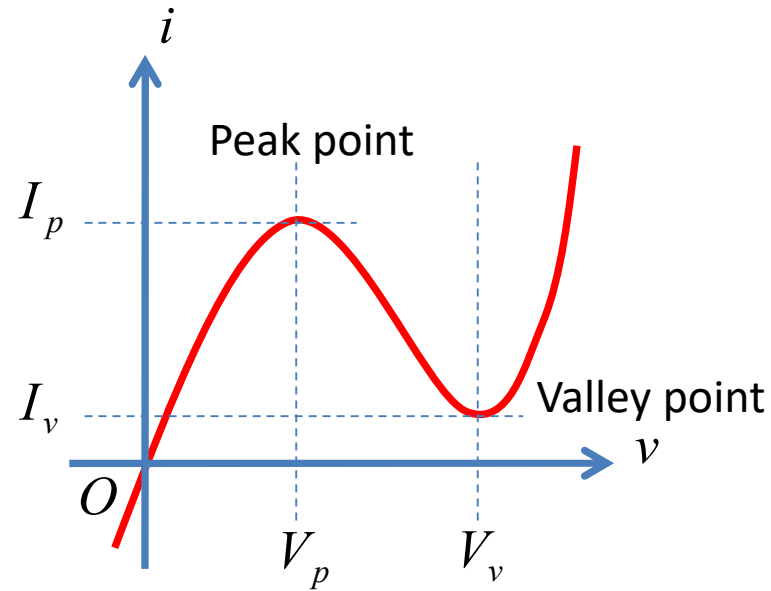
电子能量小于势垒高度，不能越过势垒



波有一定的几率
穿透势垒：隧穿



特性曲线描述



	Ge	GaAs	Si
I_p/I_v	10-15	10-20	3-5
V_p (mV)	40-70	90-120	80-100
V_v (mV)	250-350	450-600	400-500

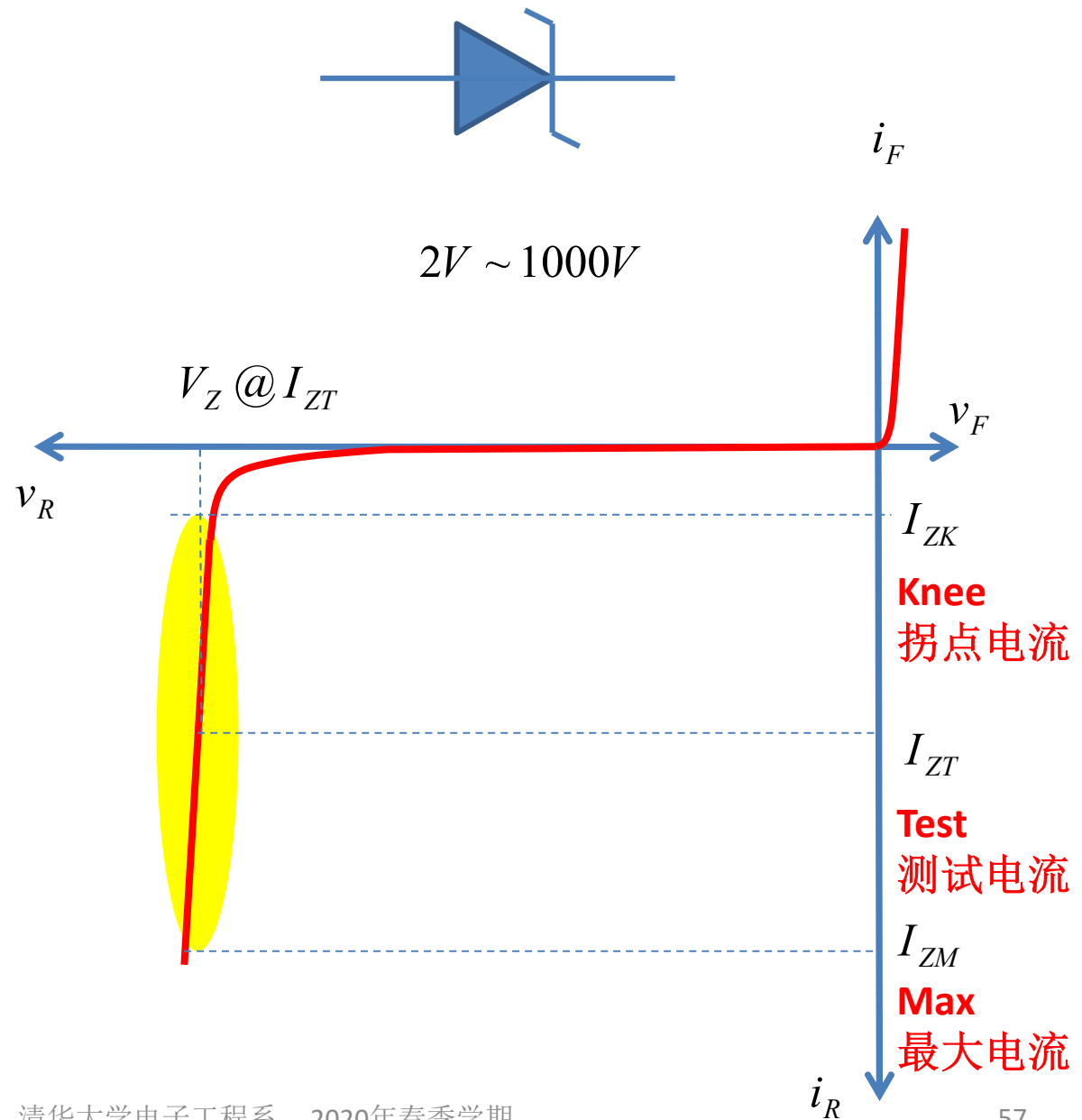
4.3

应用分类

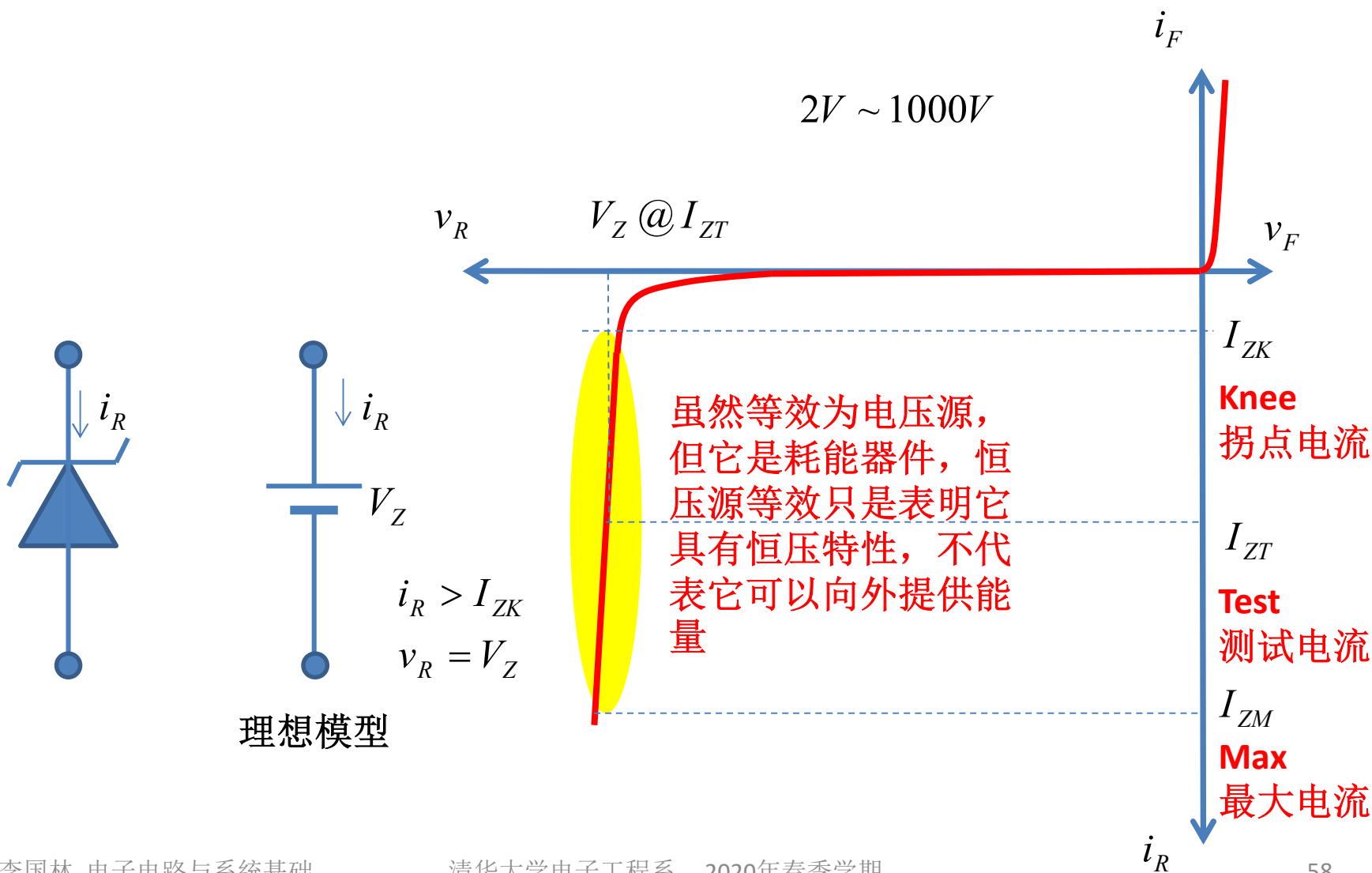
- 结的形成
 - PN结、肖特基结、异质结
- 伏安特性
 - 整流特性、负阻特性
- 应用
 - 整流二极管
 - 整流特性
 - 稳压二极管
 - 反向击穿恒压特性
 - 变容二极管
 - 反偏截止，空间电荷区电荷累积效应
 - 发光二极管
 - 光电二极管
 - 光伏（太阳能电池）
 - ...

齐纳二极管 Zener diode

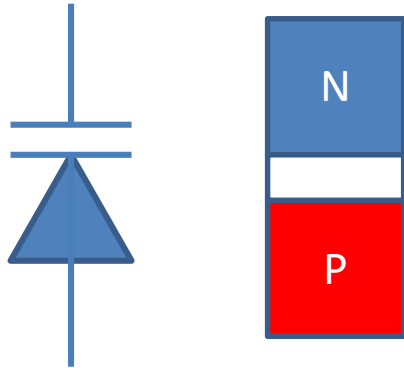
- 齐纳二极管被优化设计为工作在击穿区，由于击穿电压基本恒定不变，它可作为稳压电路使用



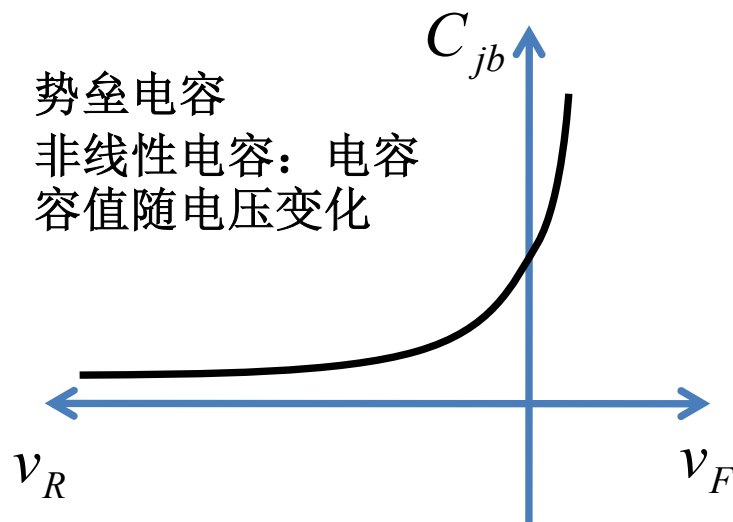
等效电路：恒压源（耗能）



变容二极管



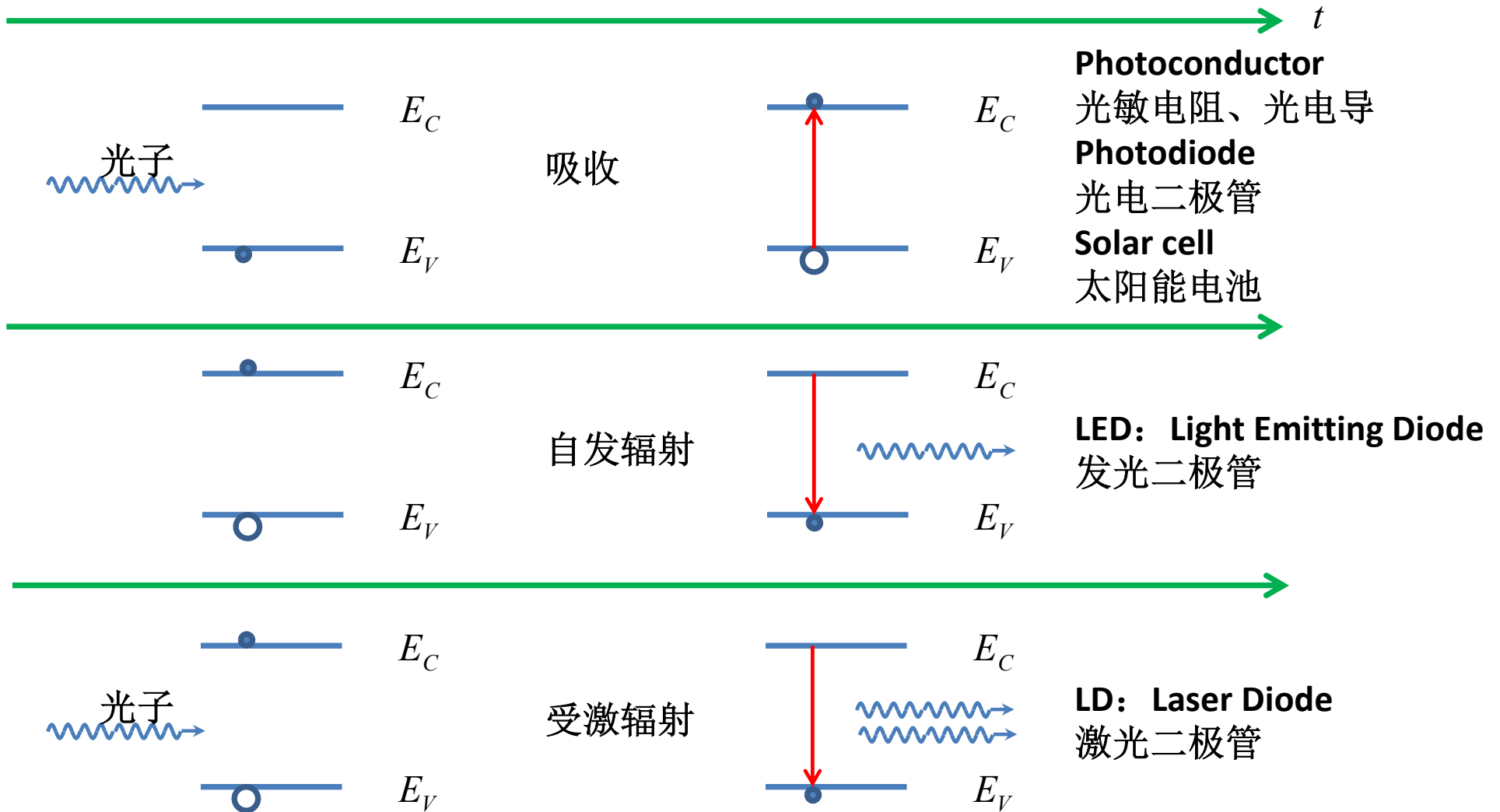
- **PN结反偏截止**，耗尽层加宽，空间电荷区电荷积累，可视为电容的电荷积累效应



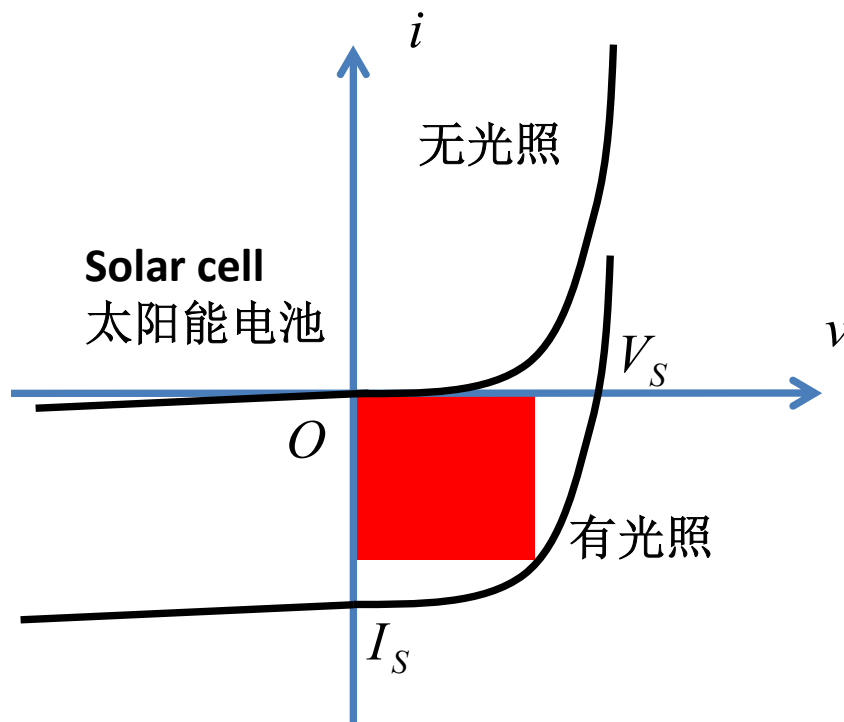
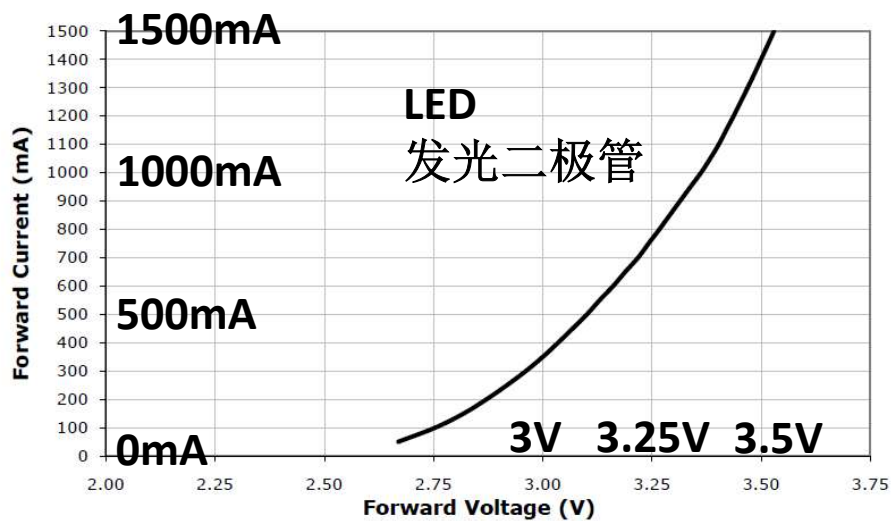
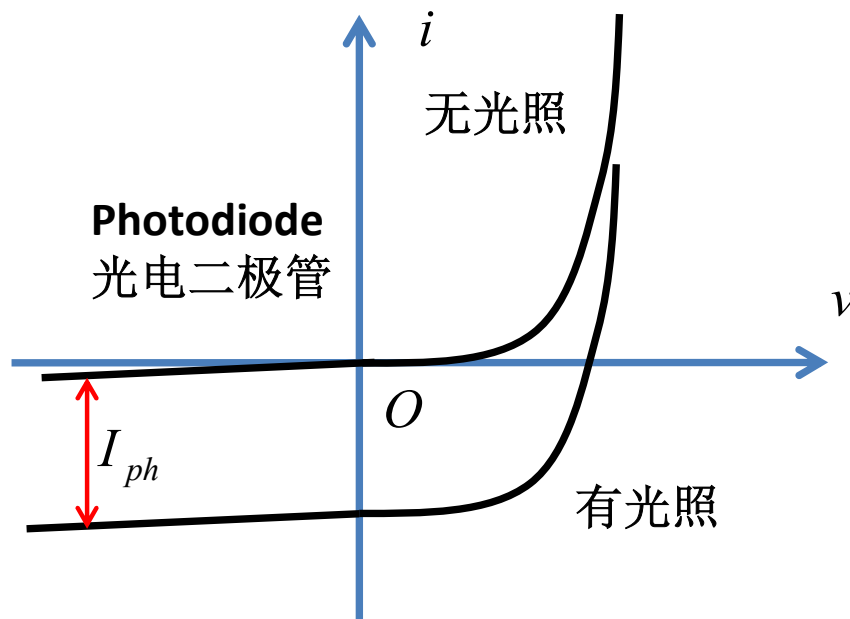
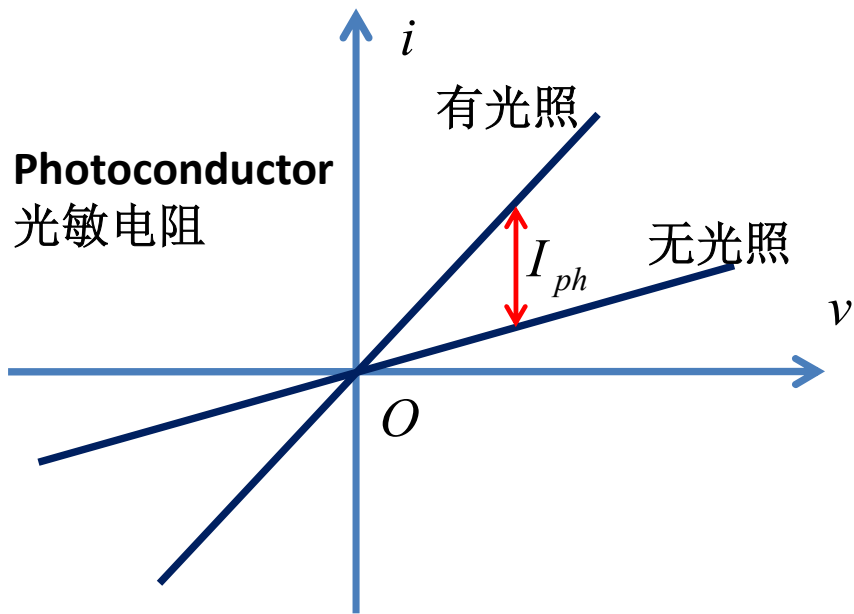
$$C = \frac{Q}{V} \quad C = \frac{dQ}{dV}$$

$$C_{jb} = \frac{dQ_D}{dV_R} = \frac{C_{jb0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_\Phi}\right)^\gamma}$$

光电、电光转换二极管



伏安特性



本节习题课说明

- 本这节课是电子学基础，在后续专业课程中会继续深入学习
 - 了解即可，看到不感到陌生即可
- 本课程只要求理解到器件端口伏安特性即可，不要要求理解其内部工作原理
 - 不知道器件内部工作原理，不影响本课程学习，只需知道器件端口伏安特性（电特性）的形成是器件自身特性和电磁场相互作用、能量交换共同形成这个结论即可
 - 这个结论需要在专业课学习中进一步理解