



# 第三章 半导体二极管 及其基本电路

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.3.21



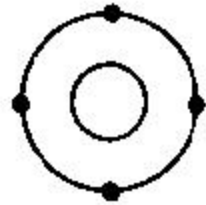


## § 3-1 半导体的基本知识

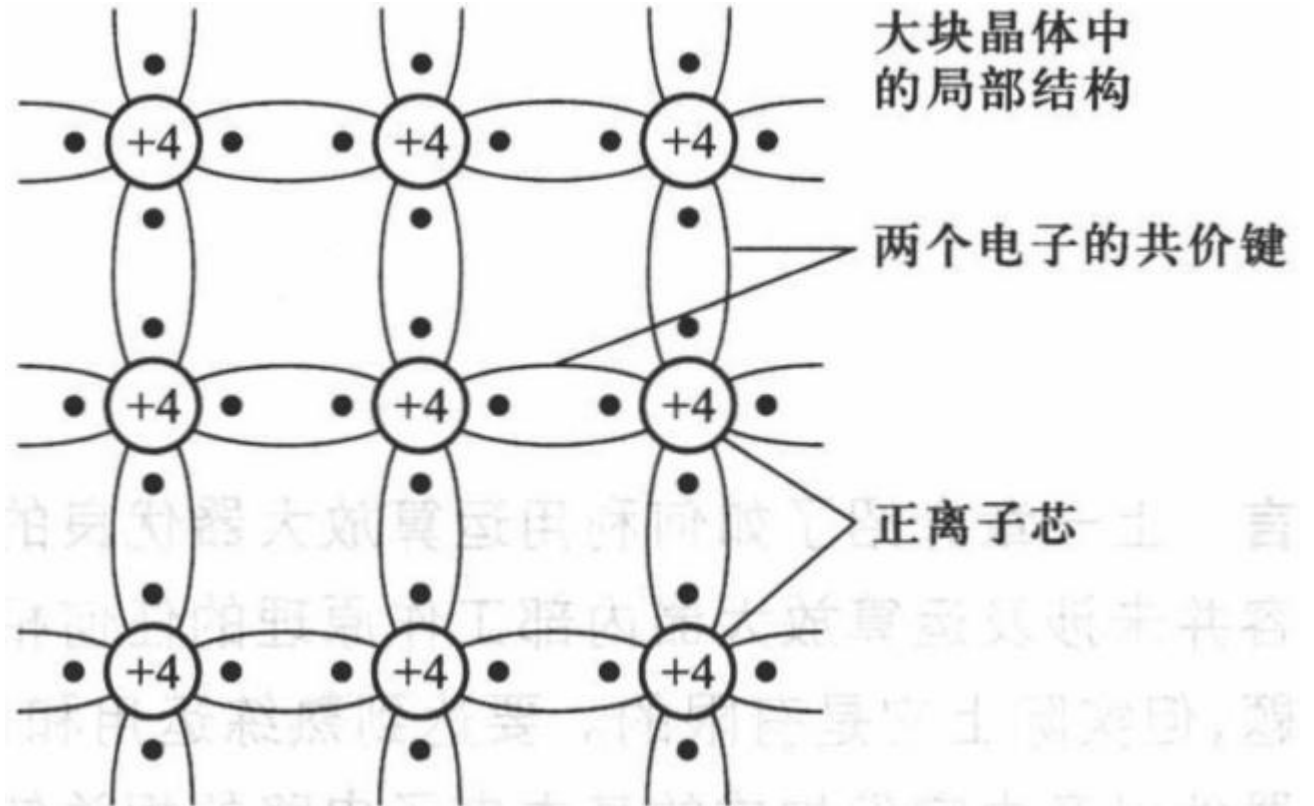
- 现代电子器件是由性能介于导体与绝缘体之间的半导体材料制造而成的。
- 常用的半导体材料有：
  - 元素半导体，如硅(Si)、锗(Ge)等；硅是最常用的半导体材料。
  - 化合物半导体，如砷化镓(GaAs)等；
  - 以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料，如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。
- 除了导电能力方面与导体和绝缘体不同外，还具有不同于其他物质的特点，如，
  - 当半导体受到外界光和热的刺激时，其导电能力将发生显著的变化；
  - 在纯净的半导体中加入微量的杂质，其导电能力也会有显著的增加。

# 半导体的共价键结构

- 硅和锗都是四价元素，最外层原子轨道上具有四个电子，称为价电子。由于原子呈中性，原子核用带圆圈的+4符号表示。物质的化学性质由价电子决定，半导体的导电性质与价电子有关。



硅和锗的原子结构简化模型



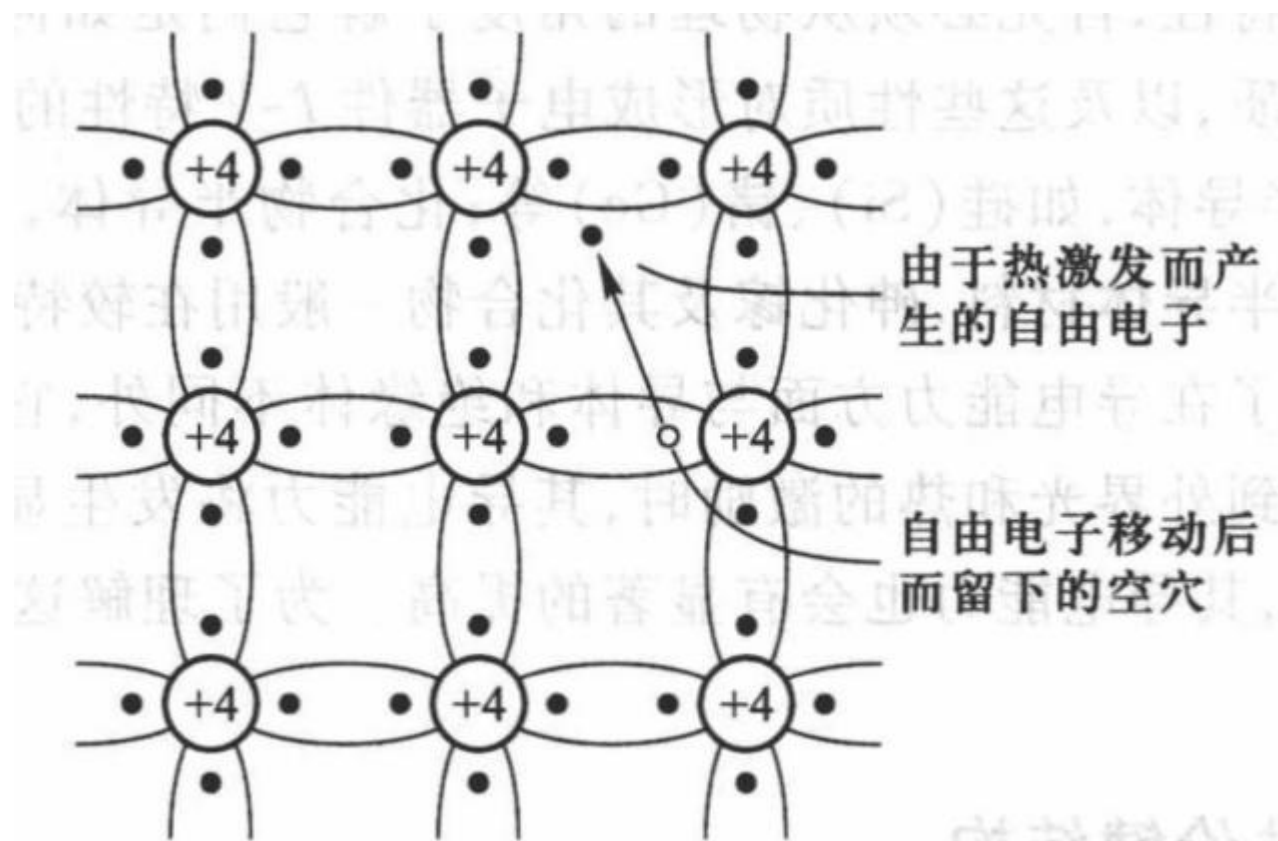


# 本征半导体

- 本征半导体是一种完全纯净的结构完整的半导体晶体。
- 在 $T=0$  K和没有外界激发时，由于每一原子的外围电子被共价键所束缚，这些束缚电子对半导体内的传导电流没有贡献。
- 半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧。在室温下，价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，这种现象称为本征激发。
- 半导体中能够自由移动的带电粒子成为载流子。
- 电导率是半导体的重要物理特性，与材料内单位体积中所含的载流子的数目有关，载流子的浓度愈高，其电导率愈高。
- 半导体内载流子的浓度取决于许多因素，包括材料的基本性质、温度以及所含的杂质。

# 空穴

- 当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，这个空位叫做空穴。空穴是半导体区别于导体的一个重要特点。





# 空穴导电

- 由于共价键中出现了空穴，在外加电场的作用下，邻近价电子就可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，其他电子又可转移到这个新的空穴，这样就使共价键中出现电荷迁移。
- 共价键中空穴或束缚电子移动产生电流的根本原因
  - 由于共价键中出现空穴引起的。
- 把空穴看成是一个带正电的粒子，所带的电量与电子相等，符号相反，在外加电场作用下，可以自由地在晶体中运动，从而和自由电子一样导电。因此空穴是一种载流子，空穴越多，半导体中的载流子数目就越多，因此形成的电流就愈大。



# 杂质半导体

- 在本征半导体中掺入微量的杂质，就会使半导体的导电性能发生显著的改变。
- 因掺入杂质的性质不同，杂质半导体可分为空穴(P)型半导体和电子(N)型半导体两大类。



# P型半导体

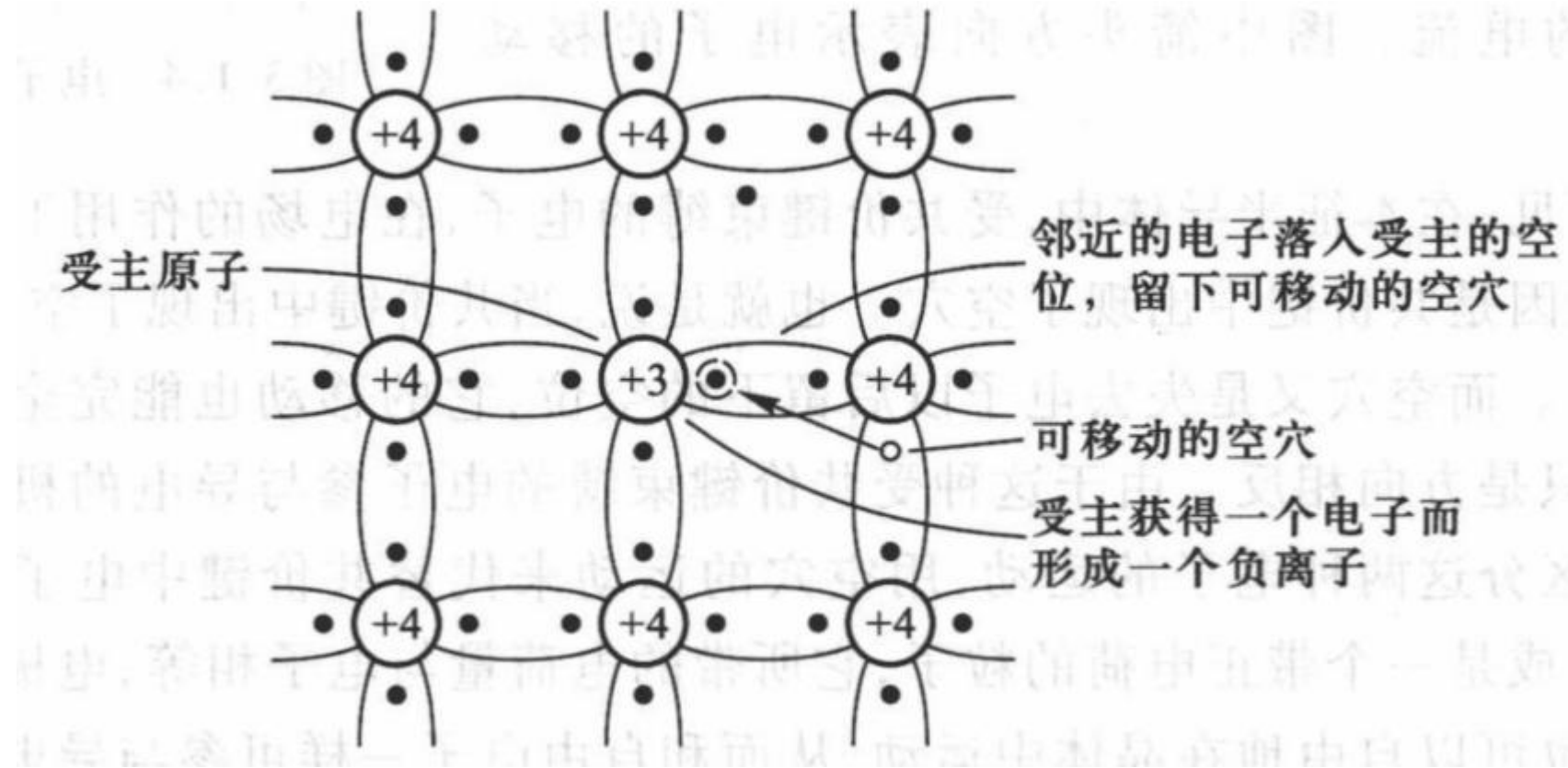
- 在硅或锗的晶体内渗入少量三价元素杂质，如硼(或铟)等，因硼原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位。
- 当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发获得能量时，有可能填补这个空位，使硼原子成为不能移动的负离子；而原来硅原子的共价键，则因缺少一个电子，形成了空穴。
- 因为硼原子在硅晶体中能接受电子，故称硼为受主杂质或P型杂质，受主杂质除硼外尚有铟和铝。
  - 砷化镓工艺中的受主原子包括元素周期表中的II族元素(作为镓原子的受主)或IV族元素(作为砷原子的受主)。



# P型半导体的共价键结构

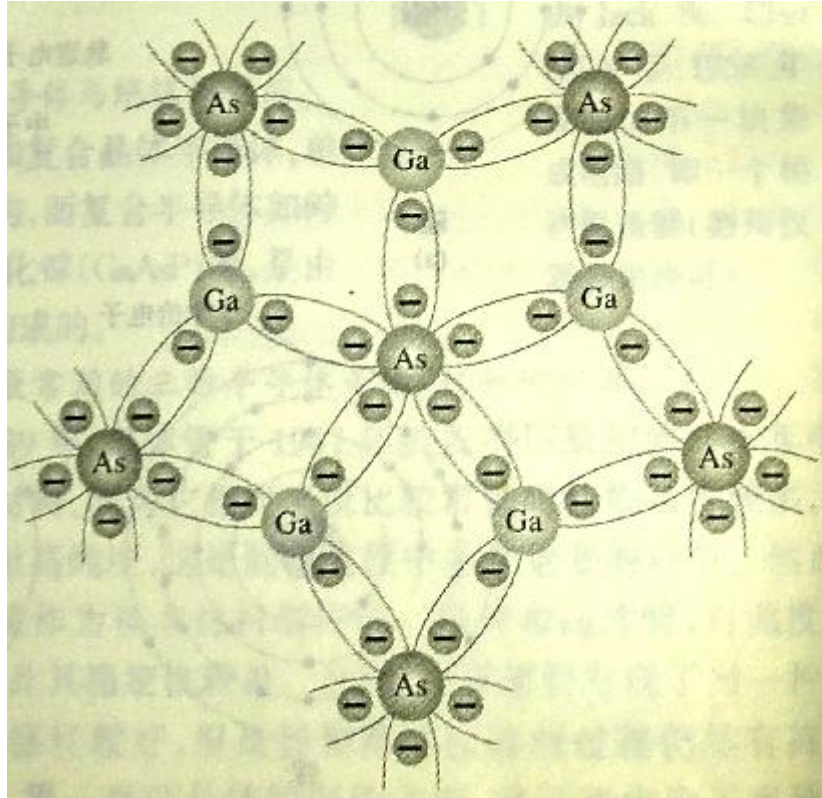
- P型半导体在产生空穴时，不产生新的自由电子。控制掺入杂质的多少，便可控制空穴数量。

❖ 在P型半导体中，空穴数远大于自由电子数，在这种半导体中，以空穴导电为主，因而空穴为**多数载流子**，自由电子为**少数载流子**。





# 砷化镓晶体的共价键



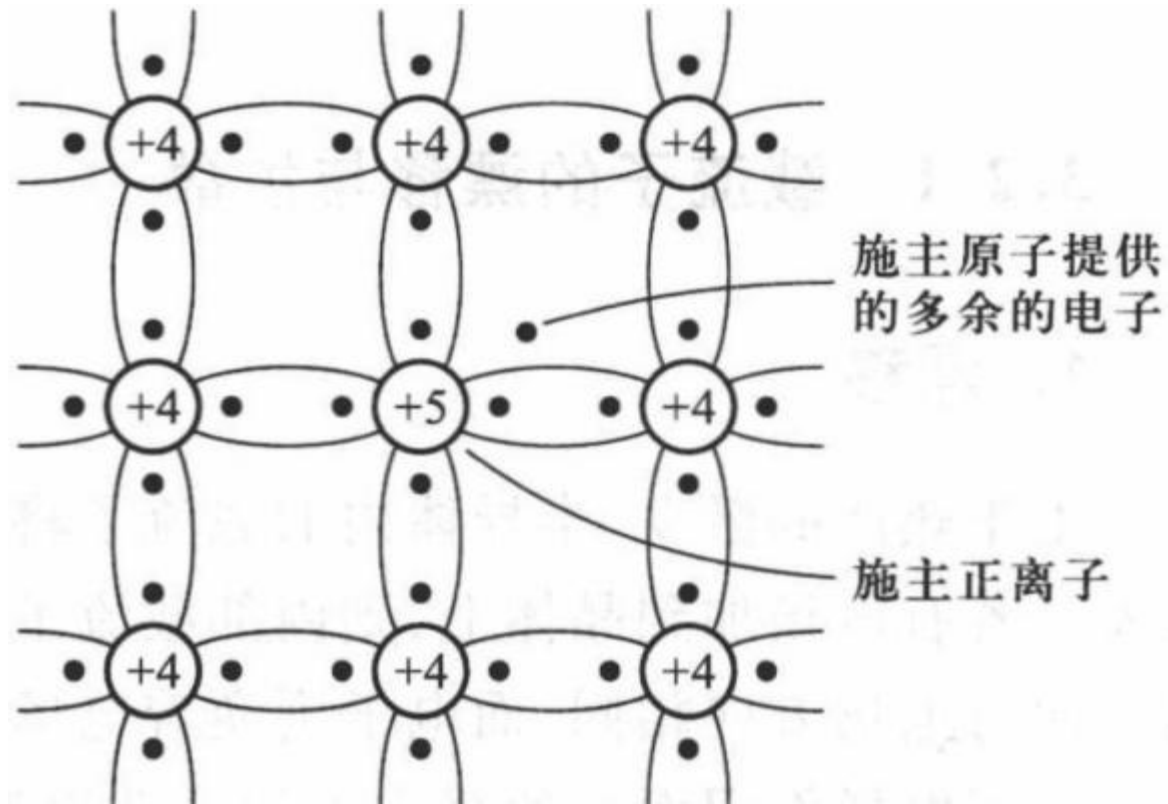


# N型半导体

- 为了在半导体内产生多余的电子，可以将一种叫做**施主杂质**或**N型杂质**掺入硅(或锗)的晶体内。
- 施主原子在掺杂半导体的共价键结构中多余一个电子。典型的施主原子有磷、砷和锑。
  - 在砷化镓工艺中，施主原子包括元素周期表中的VI族元素(作为砷原子的施主)或IV族元素(作为镓原子的施主)。
- 当一个施主原子加入半导体后，其多余的电子易于受热激发而成为自由电子参与传导电流，它移动后，在施主原子的位置上留下一个固定的、不能移动的正离子。
- 在产生自由电子的同时，并不产生相应的空穴。称为**电子型半导体**或**N型半导体**。在N型半导体中，电子为多数载流子，空穴为少数载流子。

# N型半导体的共价键结构

- 在掺入杂质后，载流子的数目都有相当程度的增加。若每个受主杂质都能产生一个空穴，或者每个施主杂质都能产生一个自由电子，则尽管杂质含量很微，但它们对半导体的导电能力却有很大的影响。



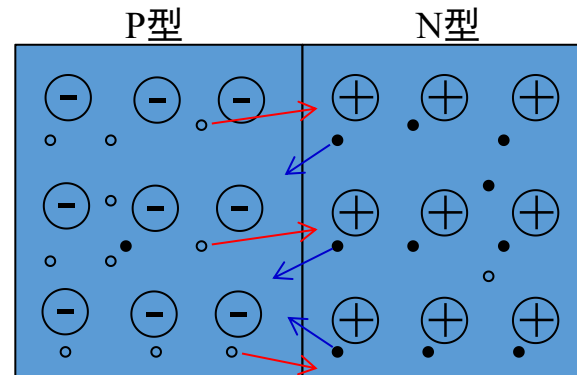


## § 3-2 PN结的形成及特性

- 在室温下，P型半导体中含有的受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主离子。N型半导体中含有的施主杂质电离为带负电的电子和带正电的施主离子。
- P型和N型半导体中还有少数受本征激发产生的电子和空穴，通常本征激发产生的载流子要比掺杂产生的少得多。
- 半导体中的正负电荷数是相等的，它们的作用互相抵消，因此保持电中性。

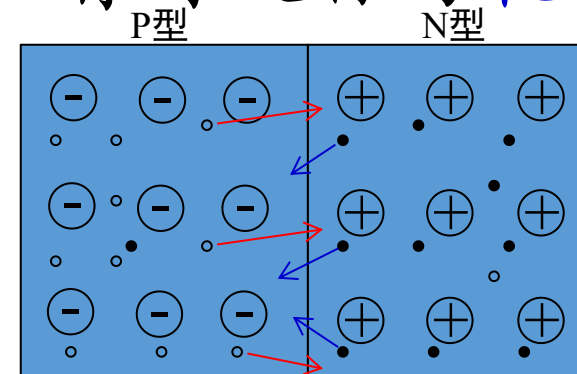
# PN结的形成

- P型半导体和N型半导体结合后，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别，N型区内电子多而空穴少，P型区内则相反，空穴多而电子少。
- 电子和空穴都要从浓度高的地方向着浓度低的地方扩散。电子要从N型区向P型区扩散，空穴要从P型区向N型区扩散。
- 电子和空穴都是带电的，它们扩散的结果就使P区和N区中原来保持的电中性被破坏了。



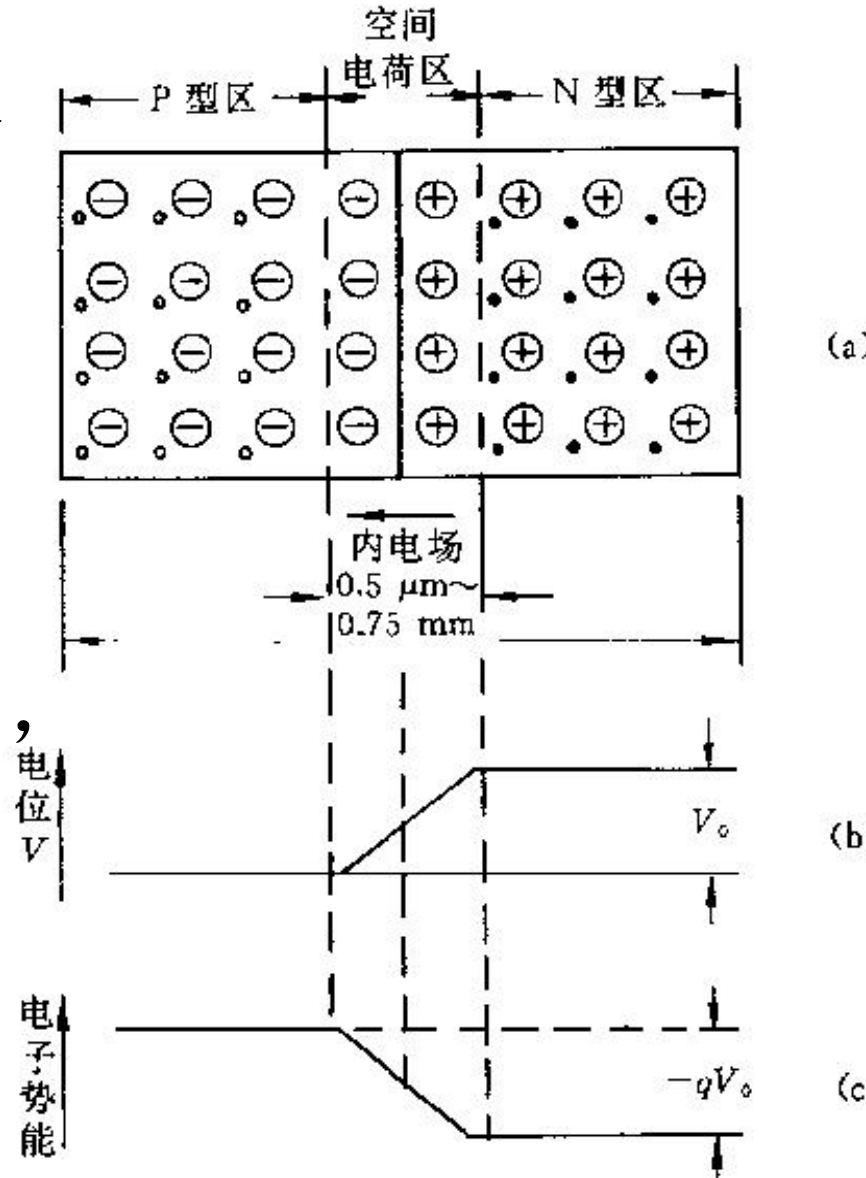
# 耗尽区

- P区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子；N区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子。
- 半导体中的离子虽然带电，但由于物质结构的关系，它们不能任意移动，因此不参与导电。这些不能移动的带电粒子通常称为**空间电荷**，集中在P区和N区交界面附近，形成了一个很薄的**空间电荷区**，这就是**PN结**。
- 在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此空间电荷区有时又称为**耗尽区**。扩散越强，空间电荷区越宽。



# 扩散运动

- 出现空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区中就形成了一个电场，其方向是从带正电的N区指向带负电的P区。
- 电场是由载流子扩散运动形成的，称为**内电场**。
- 显然，这个内电场的方向是阻止扩散的，因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反。





# 漂移运动

- 另一方面，根据电场的方向和电子、空穴的带电极性，这个电场将使N区的少数载流子空穴向P区**漂移**，使P区的少数载流子电子向N区**漂移**，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。
- 从N区漂移到P区的空穴补充了原来交界面上P区失去的空穴，从P区漂移到N区的电子补充了原来交界面上N区所失去的电子，这就使空间电荷减少。
- **漂移运动**的结果是使空间电荷区变窄，其作用正好与扩散运动相反。
- 当漂移运动达到和扩散运动相等时，便处于动态平衡状态。

## 因浓度差

多子的扩散运动 → 由杂质离子形成空间电荷区



空间电荷区形成内电场



内电场促使少子漂移



内电场阻止多子扩散



减小空间电荷区

→ 有利多子的扩散运动

最后,多子的扩散和少子的漂移达到动态平衡。



# 第三章 半导体二极管 及其基本电路

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.3.24





## 因浓度差

多子的扩散运动 → 由杂质离子形成空间电荷区



空间电荷区形成内电场



内电场促使少子漂移



内电场阻止多子扩散



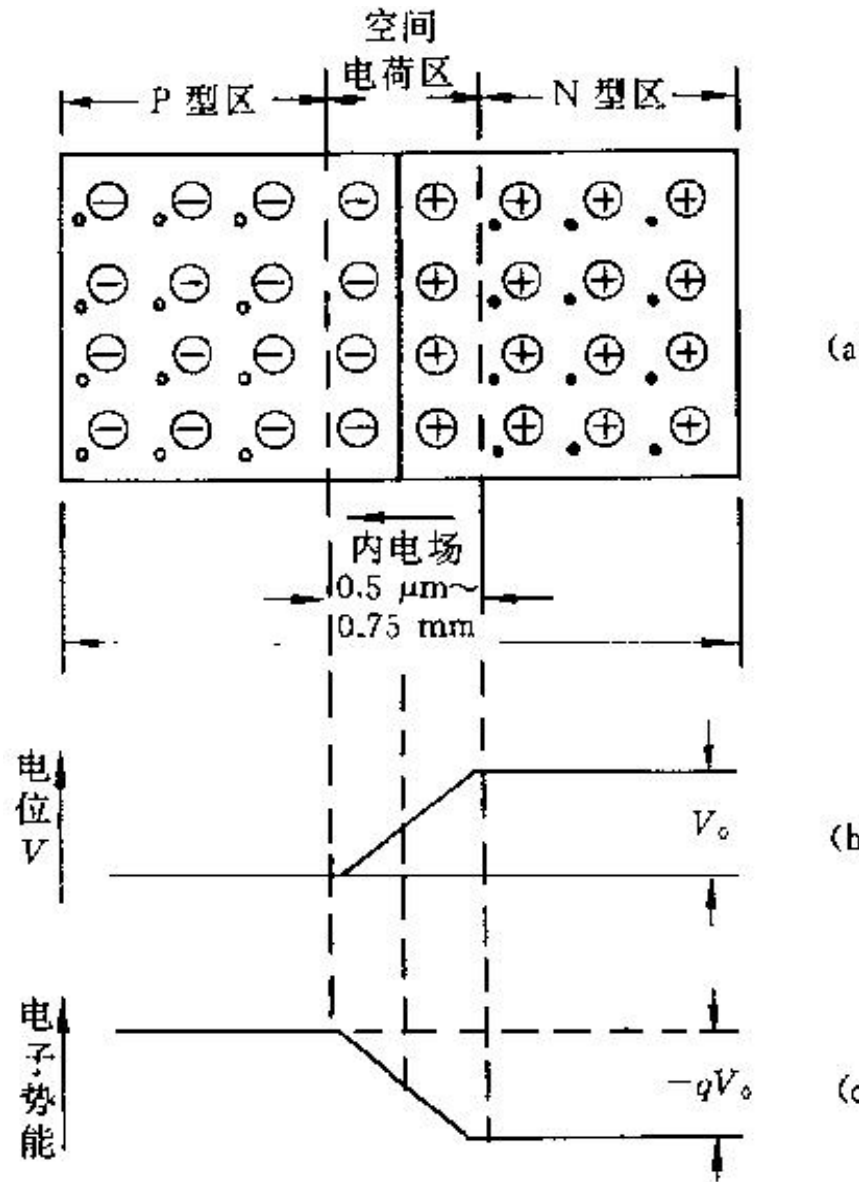
减小空间电荷区

→ 有利多子的扩散运动

最后,多子的扩散和少子的漂移达到动态平衡。

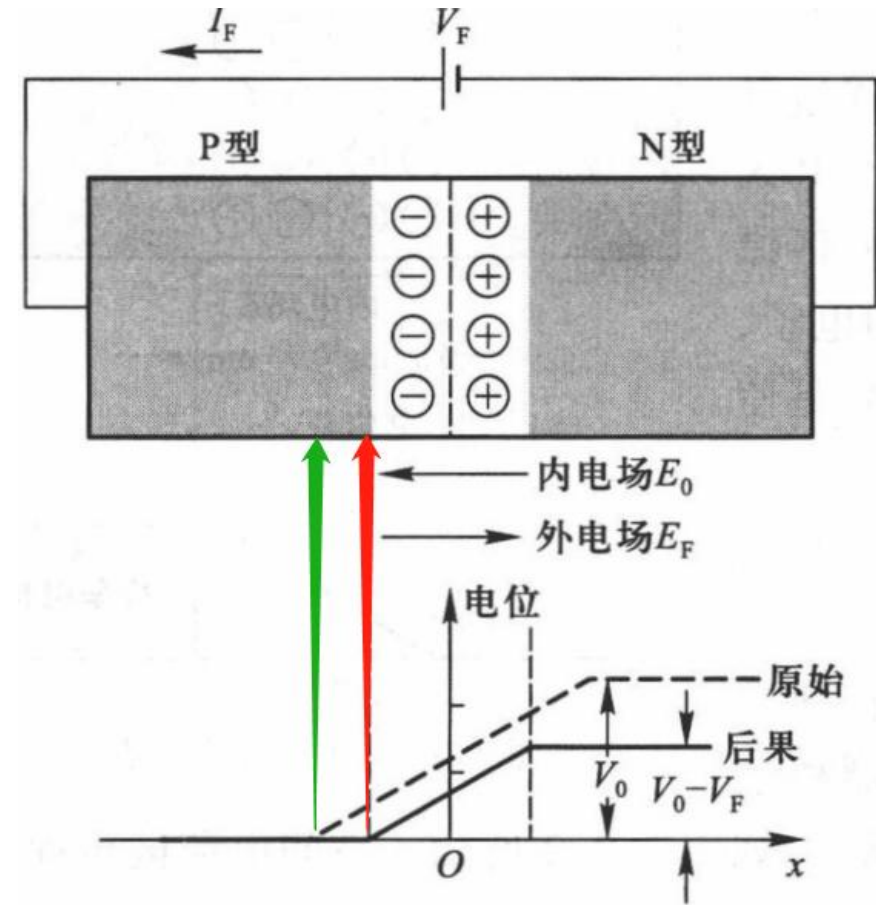
# 势垒区

- PN结的空间电荷区存在电场，电场的方向是从N区指向P区的，这说明N区的电位要比P区高，高出的数值用 $V_0$ 表示，这个电位差称为**接触电位差**，一般为零点几伏。
- 在PN结空间电荷区内，电子势能 $(-qV_0)$ 发生了变化，电子要从N区到P区必须越过一个能量高坡，一般称为**势垒**，因此又把空间电荷区称为**势垒区**。



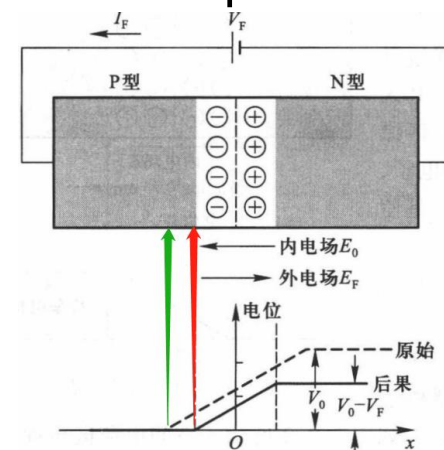
# PN结的单向导电性（正向）

- (1) 外加正向电压
- 当 $V_F$ 的正端接P区，负端接N区时，外加电场与PN结内电场方向相反。
- 在外场作用下，PN结的平衡状态被打破，P区的多数载流子空穴和N区的多数载流子电子都要向PN结移动。
- 当空穴进入PN结后，就要和一部分负离子中和，使P区的空间电荷量减少；当电子进入PN结时，中和了部分正离子，使N区的空间电荷量减少，结果使PN结变窄。



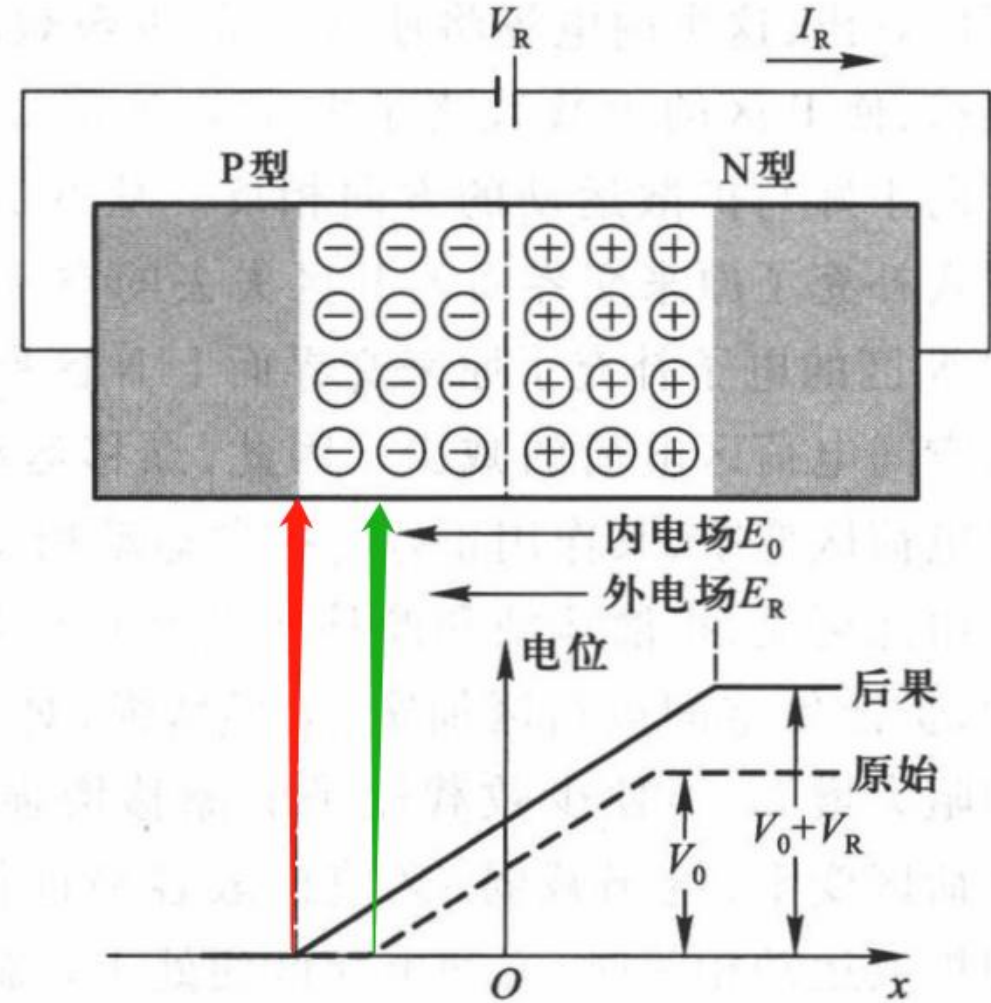
# PN结的单向导电性（正向）

- 耗尽区厚度变薄，耗尽区中载流子增加，因而电阻减小，所以这个方向的外加电压称为**正向偏置电压**。
- 半导体的体电阻和PN结电阻相比是很小的，外加电压将集中在PN结上。外加电压将使PN结的电场由 $E_0$ 减小到 $E_0 - E_F$ ，电子的电势能将由 $-qV_0$ 减为 $-q(V_0 - V_F)$ ，势垒降低了，P区和N区中能越过势垒的多数载流子大大增加，形成**扩散电流**。
- 扩散运动将大于漂移运动，N区电子不断扩散到P区，P区空穴不断扩散到N区。PN结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定，在外电路上形成一个流入P区的电流，称为**正向电流** $I_F$ 。外加电压只要稍有变化，便能引起电流的显著变化。
- 正向的PN结表现为一个很小的电阻。



# PN结的单向导电性（反向）

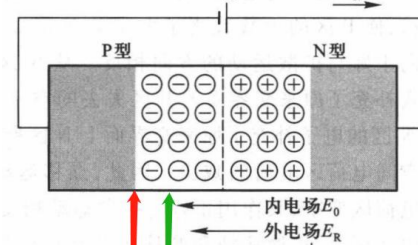
- (2) 外加反向电压
- 当外加电压 $V_R$ 的正端接N区，负端接P区时，外加电场方向与PN结内电场方向相同。在这种外电场作用下，P区中的空穴和N区中的电子都将进一步离开PN结，使耗尽区厚度加宽，这时PN结处于反向偏置。







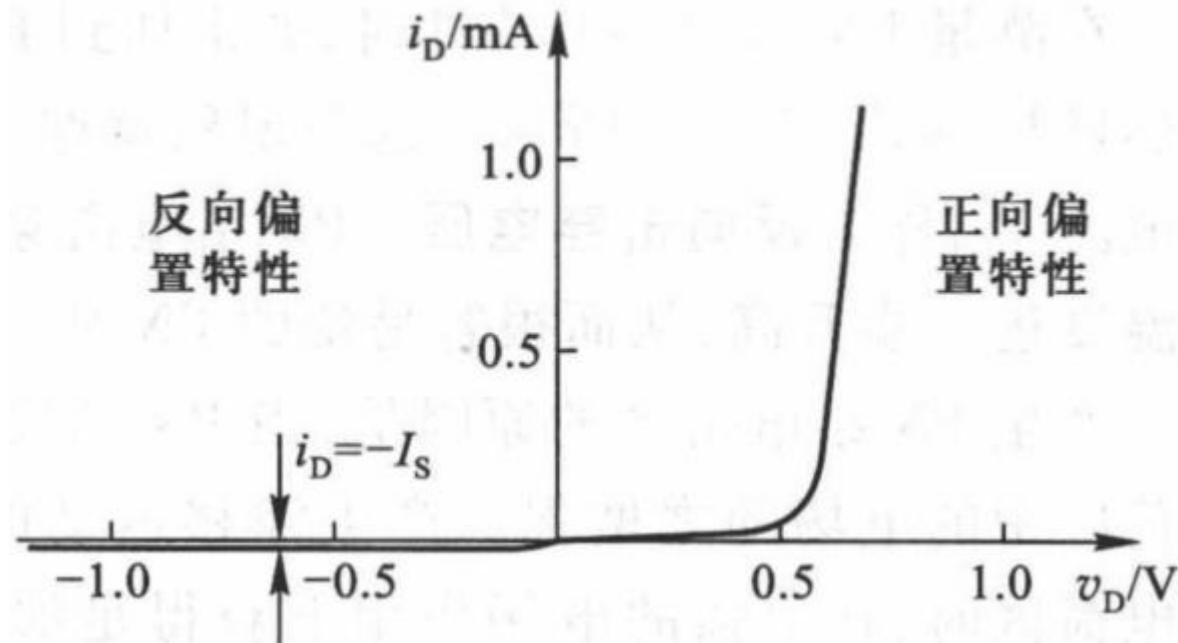
# PN结的单向导电性（反向）



- 外加电压将使PN结电场由 $E_0$ 增加到 $E_0+E_R$ ，电子的电势能将由 $-qV_0$ 增至 $-q(V_0+V_R)$ ，使P区和N区中的多数载流子很难越过势垒，因此扩散电流趋近于零。
- 由于结电场的增加，使N区和P区中的少数载流子更容易产生漂移运动，PN结内的电流由漂移电流决定。
- 漂移电流的方向与扩散电流相反，表现在外电路上有一个流入N区的反向电流 $I_R$ ，由少数载流子的漂移运动形成。由于少数载流子浓度很小，所以 $I_R$ 很微弱，一般为微安数量级。
- 少数载流子由本征激发产生，其数值决定于温度，几乎与外加电压 $V_R$ 无关。在一定温度 $T$ 下，由于热激发而产生的少数载流子的数量是一定的，电流的值趋于恒定，反向电流 $I_R$ 就是反向饱和电流，用 $I_s$ 表示。

# PN结的单向导电性 (小结)

- 由于 $I_s$ 很小，所以PN结在反向偏置时，呈现出一个很大的电阻，可认为它基本是不导电的。
- PN结的正向电阻很小，反向电阻很大，这就是它的单向导电性。PN结的单向导电性关键在于耗尽区的存在，且其宽度随外加电压而变化。



# PN结V-I特性的表达式

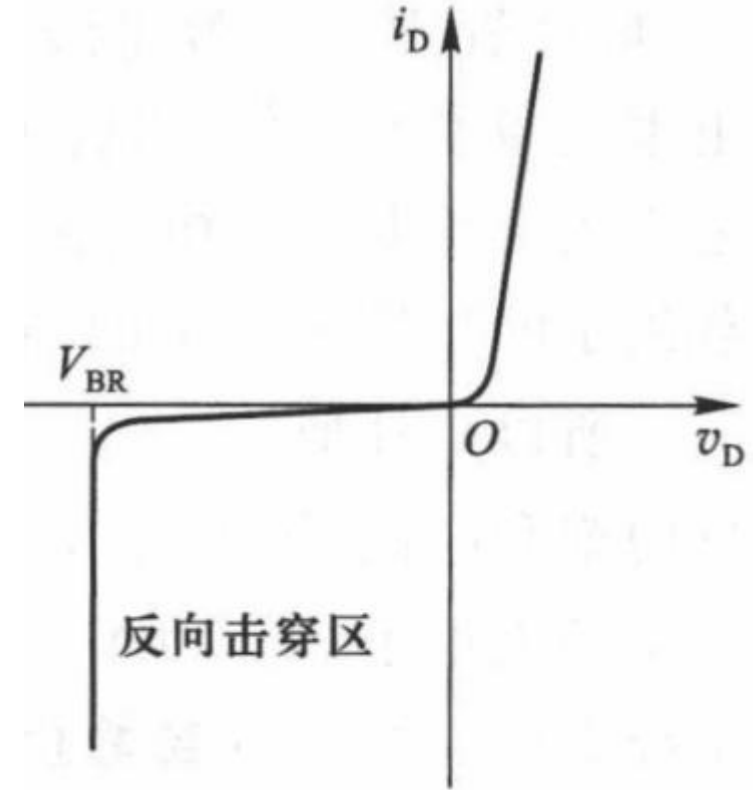
- 在硅二极管PN结的两端，施加正、反向电压时，根据理论分析，PN结的V-I特性可表达为

$$\begin{aligned}i_D &= I_S \left( e^{V_D/V_T} - 1 \right) \\ &= I_S \left( e^{V_D q/kT} - 1 \right)\end{aligned}$$

式中 $i_D$ 为通过PN结的电流， $V_D$ 为PN结两端的外加电压， $V_T$ 为温度的电压当量=0.026V， $k$ 为波耳兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23} J/K$ )， $T$ 为热力学温度（例如，室温300K）， $q$ 为电子电荷( $1.6 \times 10^{-19} C$ )； $e$ 为自然对数的底； $I_S$ 为反向饱和电流。

# PN结的反向击穿

- 如果加到PN结两端的反向电压增大到一定数值时，反向电流突然增加，这个现象就称为PN结的**反向击穿**。
- 发生击穿所需的反向电压 $V_{BR}$ 称为**反向击穿电压**。
- PN结电击穿后电流很大，电压又很高，因而消耗在PN结上的功率是很大的，容易使PN结发热超过它的耗散功率。
- 在强电场的作用下，大大地增加了自由电子，和空穴的数目，引起分为**雪崩击穿**和**齐纳击穿**这两种类型。





# 雪崩击穿

- 雪崩击穿的物理过程为：当PN结反向电压增加时，空间电荷区中的电场增强，空间电荷区的电子和空穴，在电场作用下获得的能量增大，当与晶体原子发生碰撞，可使共价键中的电子激发形成自由电子-空穴对，这种现象称为碰撞电离。
- 新产生的电子和空穴与原有的电子和空穴一样，在电场作用下，又获得能量，又可通过碰撞再产生电子-空穴对，产生倍增效应。当反向电压增大到某一数值后，载流子的倍增情况就像积雪山坡上发生雪崩一样，载流子急剧增加，使反向电流急剧增大，于是PN结就发生雪崩击穿。

# 齐纳击穿

- 在加有较高的反向电压下，PN结空间电荷区中存在一个强电场，它能够破坏共价键将束缚电子分离出来造成电子-空穴对，形成较大的反向电流，形成齐纳击穿。
- 发生齐纳击穿需要的电场强度约为 $2 \times 10^5 \text{V/cm}$ ，只有在杂质浓度特别大的PN结中才能达到，因为杂质浓度大，空间电荷区内电荷密度也大，空间电荷区很窄，电场强度就可能很高。
- 两种电击穿过程是可逆的，当加在PN结两端的反向电压降低后，PN结可以恢复原来的状态。但要求反向电流和反向电压的乘积不超过PN结容许的耗散功率，超过了就会因为热量散不出去而使PN结温度上升，直到过热而烧毁，这种现象就是热击穿。



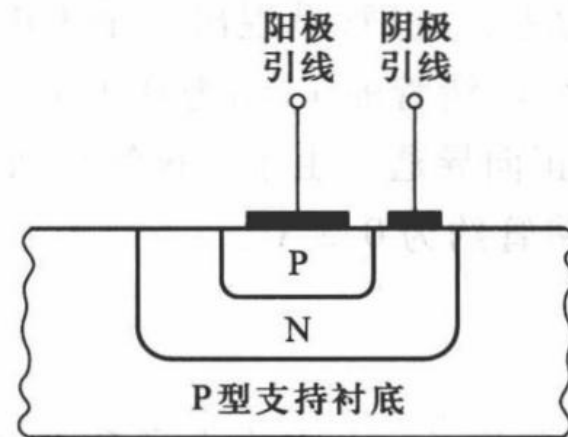
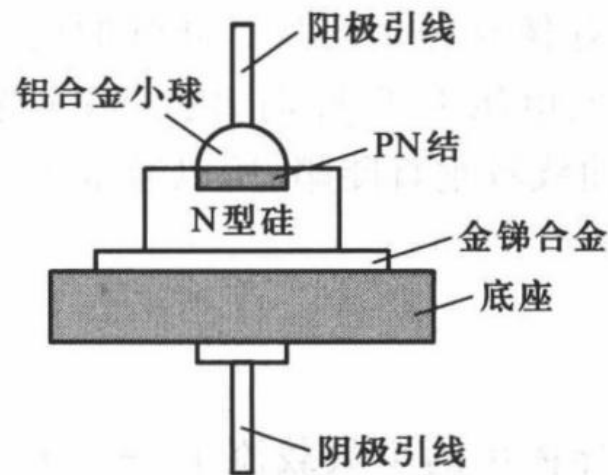
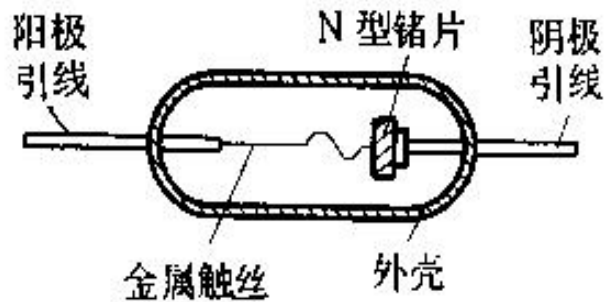
# § 3-3 半导体二极管

- 半导体二极管的结构：半导体二极管按其结构的不同可分为点接触型和面接触型两类。

(a) 点接触型

(b) 面接触型

(c) 平面型



# 常见二极管图示:

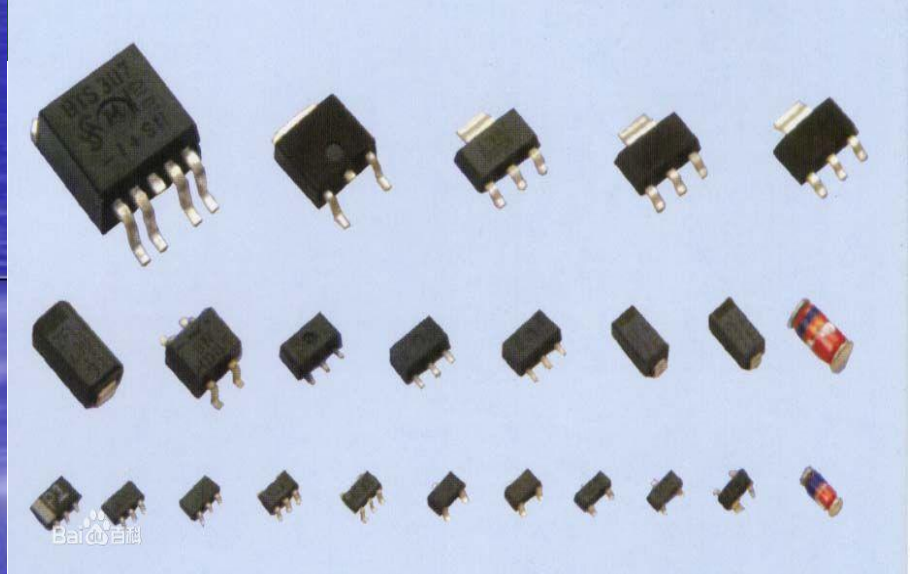
LED



红外光发射管



红外光接收管



同轴封装 AXIAL PACK



贴片封装 SMD PACK



大功率封装 POWER PACK



桥式整流器 BRIDGE RECTIFIER



双二极管



BAV99





# 二极管的V-I特性

- 二极管的V-I特性和PN结的V-I特性基本上是不同的。

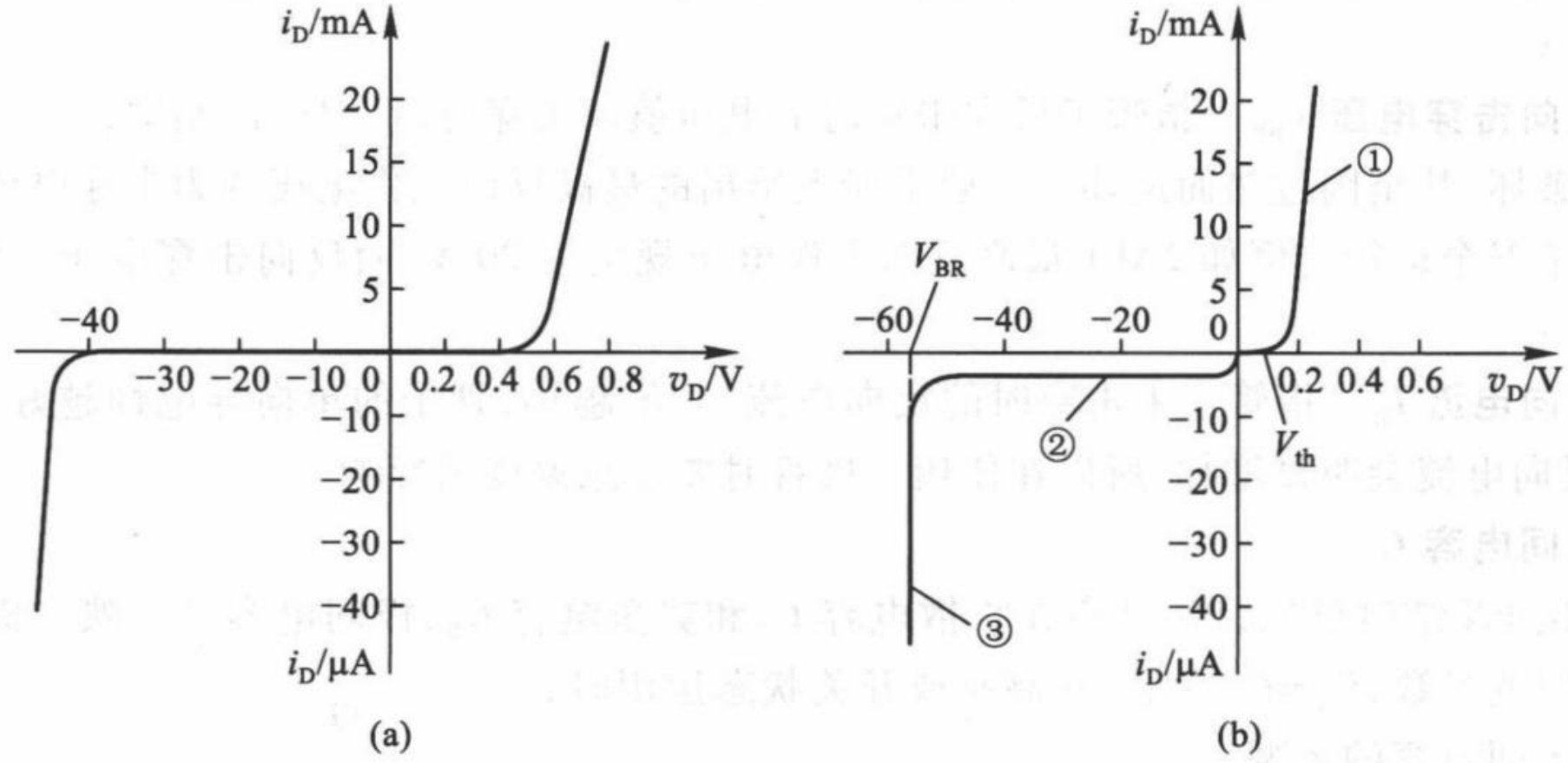
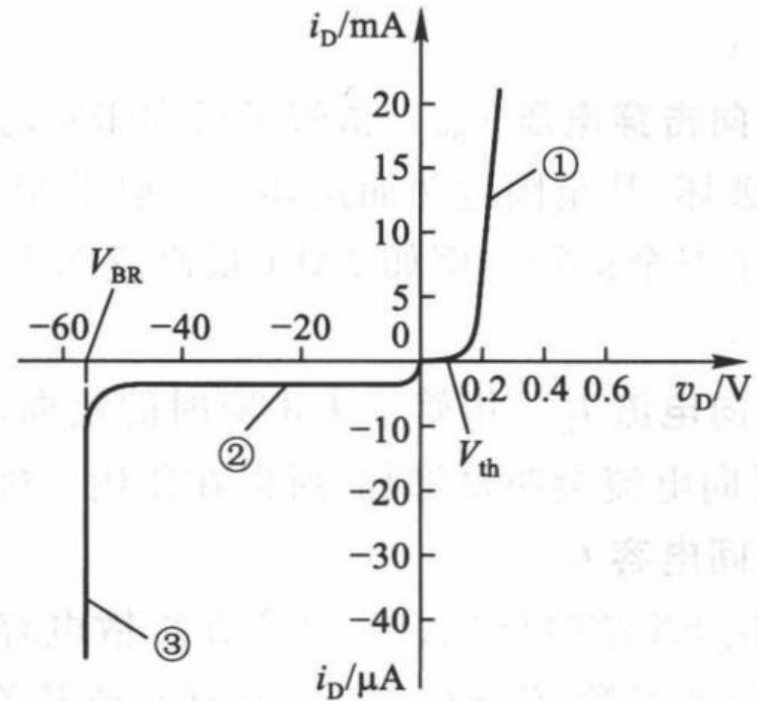


图 3.3.2 实际二极管的  $I$ - $V$  特性  
(a) 硅二极管 2CP10 (b) 锗二极管 2AP15

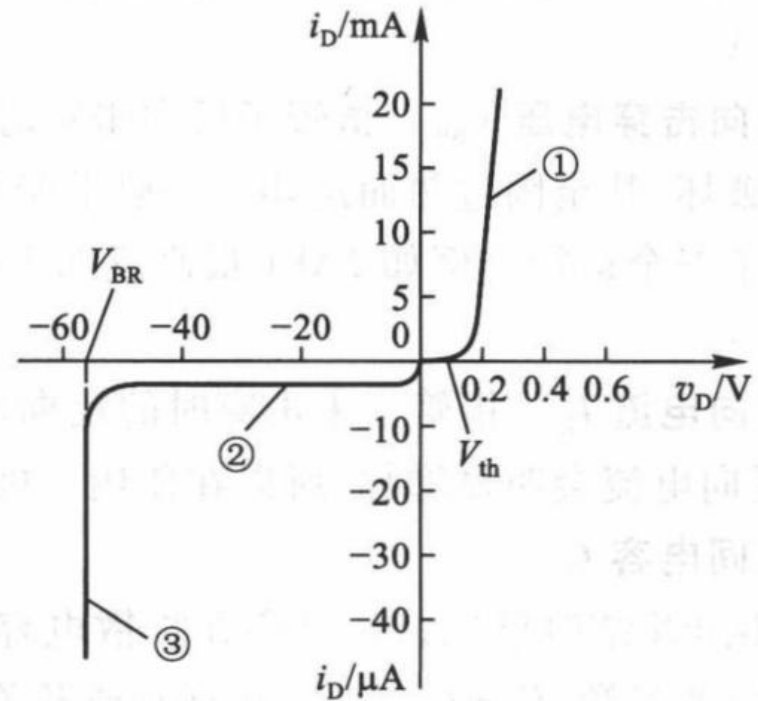
# 正向特性

- 加于二极管的正向电压只有零点几伏，但流过管子的电流却很大，因此管子呈现的正向电阻很小。
- 在起始部分，由于正向电压较小，外电场还不足以克服PN结的内电场，这时的正向电流几乎为零。
- 硅管的门坎电压 $V_{th}$ 约为0.5V；锗管的 $V_{th}$ 约为0.1V。当正向电压大于 $V_{th}$ 时，内电场大为削弱，电流迅速增长。



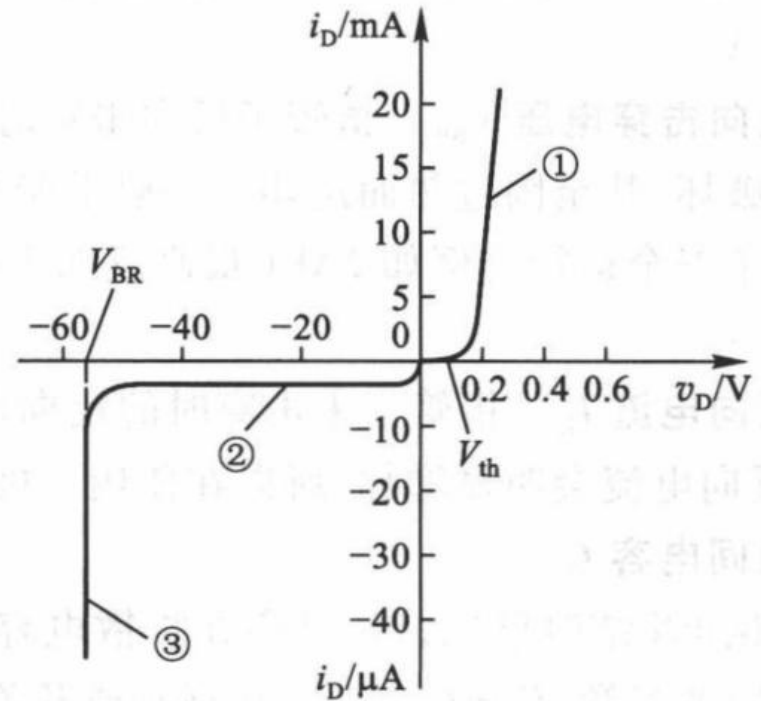
# 反向特性

- P型半导体中的少数载流子-电子和N型半导体中的少数载流子-空穴，在反向电压作用下很容易通过PN结，形成反向饱和电流。
- 由于少数载流子的数目较少，所以反向电流很小，硅管的反向电流比锗管小得多。
- 温度升高时，由于少数载流子增加，反向电流将随之急剧增加。



# 反向击穿特性

- 当增加反向电压时，在一定温度条件下，少数载流子数目有限、故起始一段反向电流没有多大变化。
- 当反向电压增加到一定大小时，反向电流剧增，这叫做二极管的**反向击穿**，其原因和PN结击穿相同。



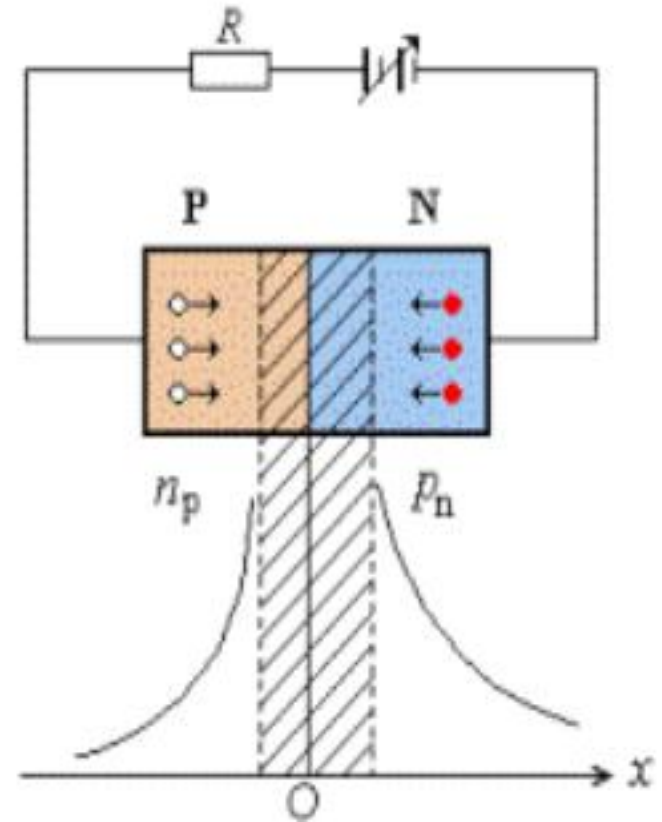


# 二极管的参数

- 最大整流电流  $I_F$ : 长期运行时, 允许通过的最大正向平均电流。
- 反向击穿电压  $V_{BR}$ : 反向击穿时的电压值。一般手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半。
- 反向电流  $I_R$ : 未击穿时的反向电流, 值愈小, 单向导电性愈好。
- 极间电容  $C_d$ :
  - (1) 势垒电容  $C_B$ ;
  - (2) 扩散电容  $C_D$

# 极间电容

- **势垒电容 $C_B$** : PN结交界处形成的势垒区, 是积累空间电荷的区域, 当PN结两端电压改变时, 就会引起积累在PN结的空间电荷的改变。
- **扩散电容 $C_D$** : 为了要使P区形成扩散电流, 注入的少数载流子电子沿P区必须有浓度差, 在结的边缘处浓度大, 离结远的地方浓度小, 也就是说在P区有电子的积累。同理, 在N区也有空穴的积累。





# 国产半导体二极管参数(常识性了解, 4页)



(1) 2AP1~7 检波二极管 (点接触型锗管, 在电子设备中作检波和小电流整流用)

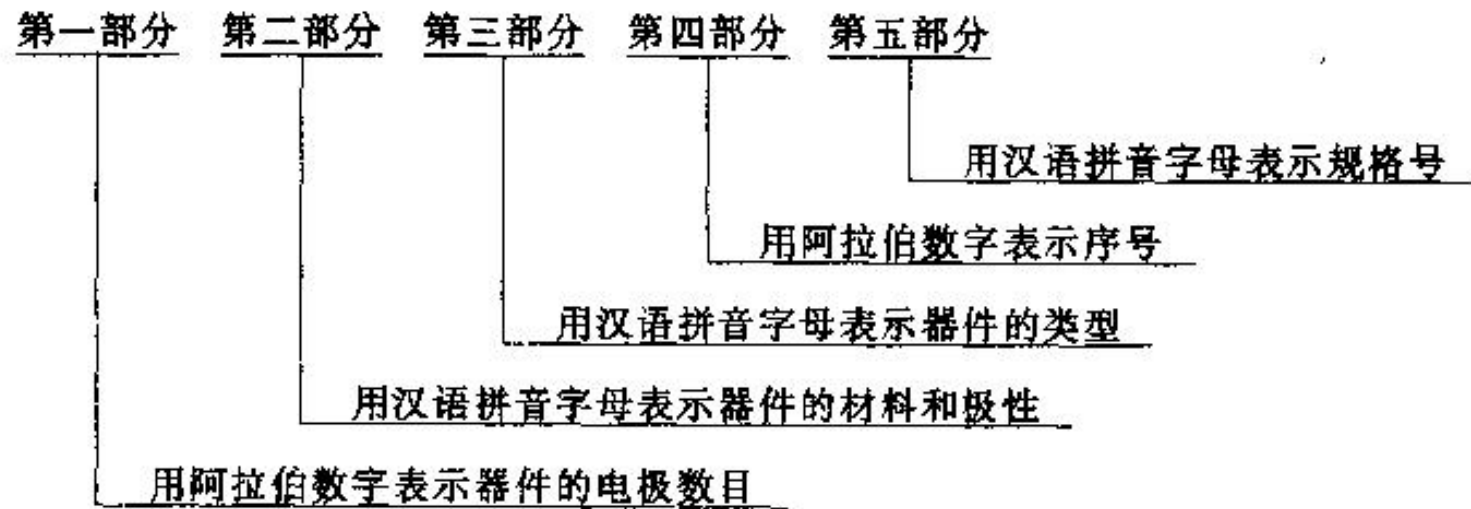
参 数 型 号	最大整 流电流	最高反向 工作电压 (峰值)	反向击穿电压 (反向电流为 400 $\mu$ A)	正向电流 (正向电压 为 1 V)	反向电流 (反向电压分别为 10, 100 V)	最高工 作频率	极间 电容
	mA	V	V	mA	$\mu$ A	MHz	pF
2AP1	16	20	$\geq 40$	$\geq 2.5$	$\leq 250$	150	$\leq 1$
2AP7	12	100	$\geq 150$	$\geq 5.0$	$\leq 250$	150	$\leq 1$

(2) 2CZ52~57 系列整流二极管, 用于电子设备的整流电路中。

系 数 型 号	最大整 流电流	最高反向工作 电压(峰值)	最高反向工作电压下的 反向电流(125 $^{\circ}$ C)	正向压降 (平均值)(25 $^{\circ}$ C)	最高工 作频率
	A	V	$\mu$ A	V	kHz
2CZ52	0.1	25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800,	1000	$\leq 0.8$	3
2CZ54	0.5	900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200,	1000	$\leq 0.8$	3
2CZ57	5	2400, 2600, 2800, 3000	1000	$\leq 0.8$	3

# 国产半导体路件型号命名方法

• 2AP7





# 型号组成部分的符号及意义



第一部分		第二部分		第三部分				第四部分	第五部分		
用数字表示器件的电极数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件的类型				用数字表示器件序号	用汉语拼音字母表示规格号		
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义				
2	二极管	A	N型, 锗材料	P	普通管	D	低频大功率管 ( $f_a < 3 \text{ MHz}$ , $P_c \geq 1 \text{ W}$ )				
		B	P型, 锗材料	V	微波管						
		C	N型, 硅材料	W	稳压管	A	高频大功率管 ( $f_a \geq 3 \text{ MHz}$ , $P_c \geq 1 \text{ W}$ )				
		D	P型, 硅材料	C	参量管						
3	三极管	A	PNP型, 锗材料	Z	整流管	T	半导体闸流管 (可控整流器)				
		B	NPN型, 锗材料	L	整流堆						
		C	PNP型, 硅材料	S	隧道管	Y	体效应器件				
		D	NPN型, 硅材料	N	阻尼管	B	雪崩管				
		E	化合物材料	U	光电器件	J	阶跃恢复管				
				K	开关管	CS	场效应器件				
				X	低频小功率管  ( $f_a < 3 \text{ MHz}$ , $P_c < 1 \text{ W}$ )	BT	半导体特殊 器件				
						FH	复合管				
						PIN	PIN型管				
						JG	激光器件				

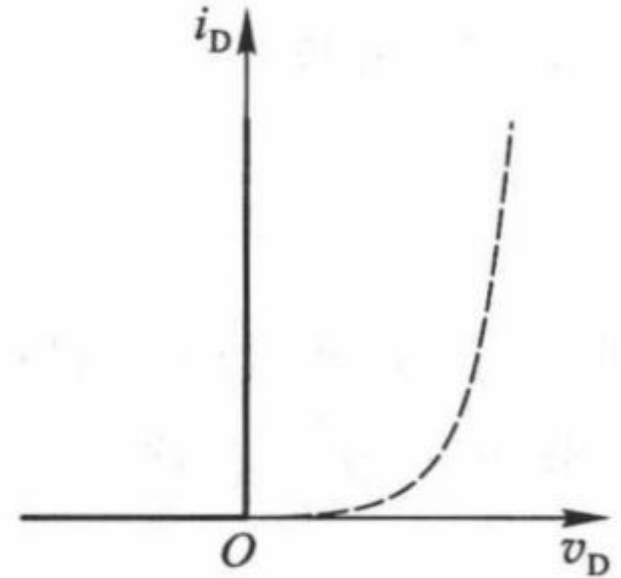
# 美国半导体器件型号命名及含义

第一部分：类别		第二部分：美国电子工业协会（EIA）注册标志		第三部分：美国电子工业协会（EIA）登记号	第四部分：器件规格号
数字	含义	字母	含义		
1	二极管	N	该器件已在美国电子工业协会（EIA）注册登记	用多位数字表示该器件在美国电子工业协会（EIA）的登记号	用字母A、B、C、D……表示同一型号器件的不同档次
2	晶体管				
3	三个PN结器件				
n	n个PN结器件				

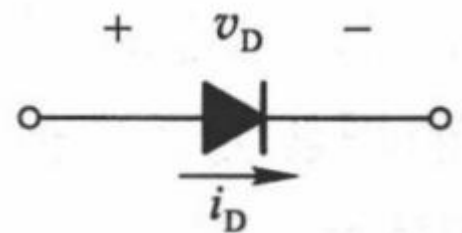
例：1N 4007 2N 2907 A

# § 3-4 二极管基本电路及分析方法

- 二极管是一种非线性器件，
  - 二极管电路一般要采用非线性电路的分析方法。
- **理想模型：**
  - 在正向偏置时，其管压降为0V，而当二极管处于反向偏置时，认为它的电阻为无穷大，电流为零。
  - 虚线表示实际二极管的V-I特性。
- 在实际的电路中，当电源电压远比二极管的管压降大时，利用此法来近似分析是可行的。



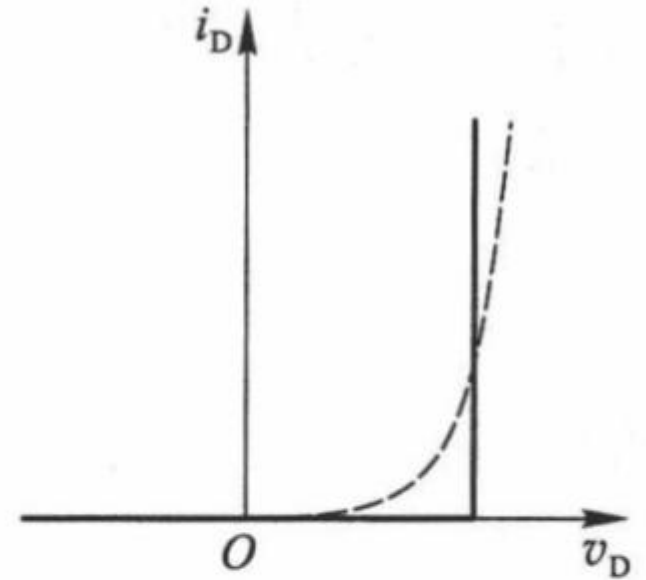
(a)



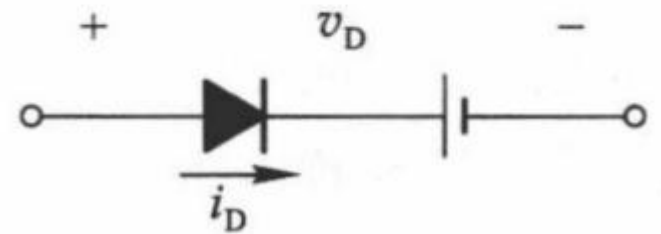
(b)

# 恒压降模型

- 当二极管导通后，其管压降认为是恒定的，且不随电流而变，典型值为0.7V。
  - 只有当二极管的电流 $i_D$ 近似等于或大于1mA时才是正确的。
- 该模型提供了合理的近似，因此应用也较广。



(a)

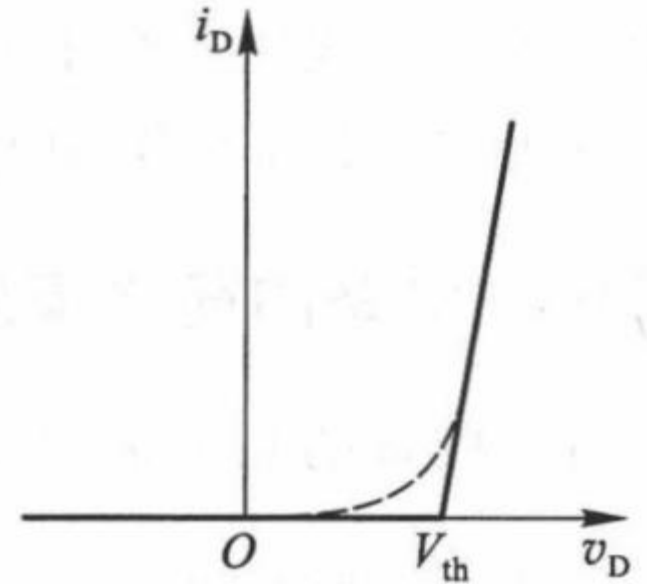


(b)

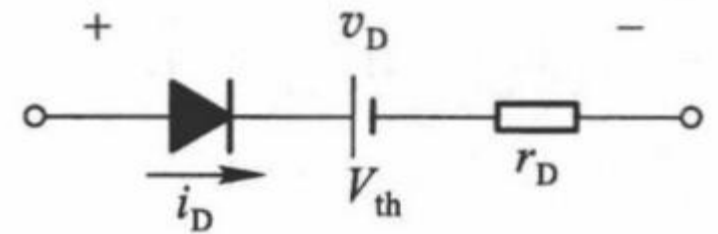
# 折线模型

- 为了较真实地描述二极管V-I特性，认为二极管的管压降不是恒定的，而是随着流过二极管电流的增加而增加，所以在模型中用一个电池和一个电阻 $r_D$ 来作进一步的近似。
- 电池的电压选定为二极管的门坎电压 $V_{th}$ ，约为0.5V。 $r_D$ 的值为当二极管的导通电流为1mA时，管压降为0.7V的值

$$r_D = \frac{0.7V - 0.5V}{1mA} = 200 \Omega$$



(a)

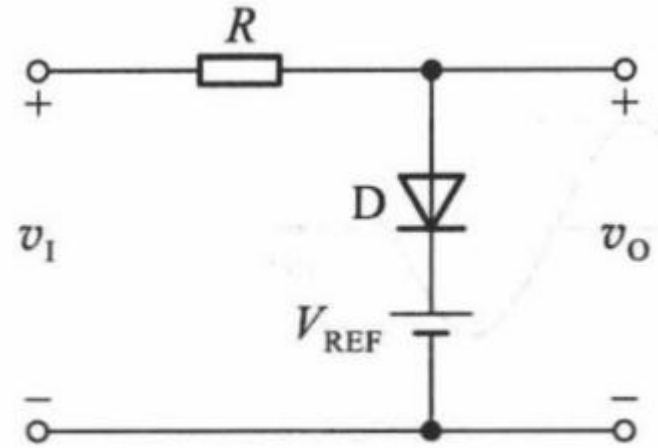


(b)



# 例3.4.4

- 一限幅电路， $R=1k\Omega$ ， $V_{REF}=3V$ 。
- (1)  $v_I=0V$ 、 $4V$ 、 $6V$ 时，求相应的输出电压 $v_o$ 的值；
- (2) 当 $v_I=6\sin\omega t$ 时，绘出相应的输出电压 $v_o$ 的波形。



解：(1) 选用折线模型来分析，其等效电路如图b，

设 $V_{th}=0.5V$ ， $r_D=200\Omega$ 。

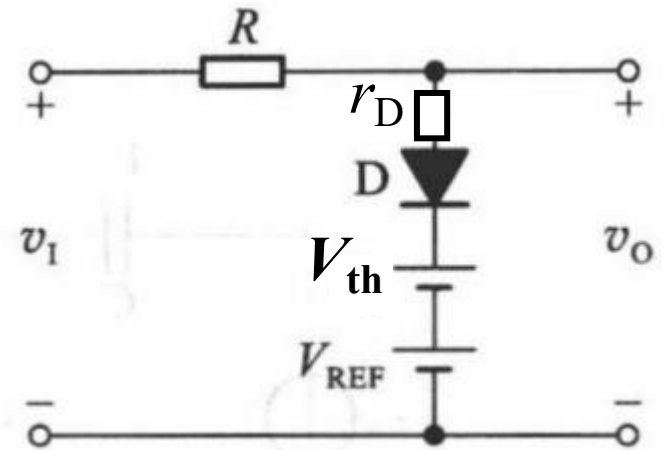
当 $v_I=0V$ 时，二极管截止， $v_o=v_I$

当 $v_I=4V$ 时，

$$v_o = V_{REF} + V_{th} + (v_I - V_{REF} - V_{th}) \frac{r_D}{r_D + R} = 3.583V$$

当 $v_I=6V$ 时，

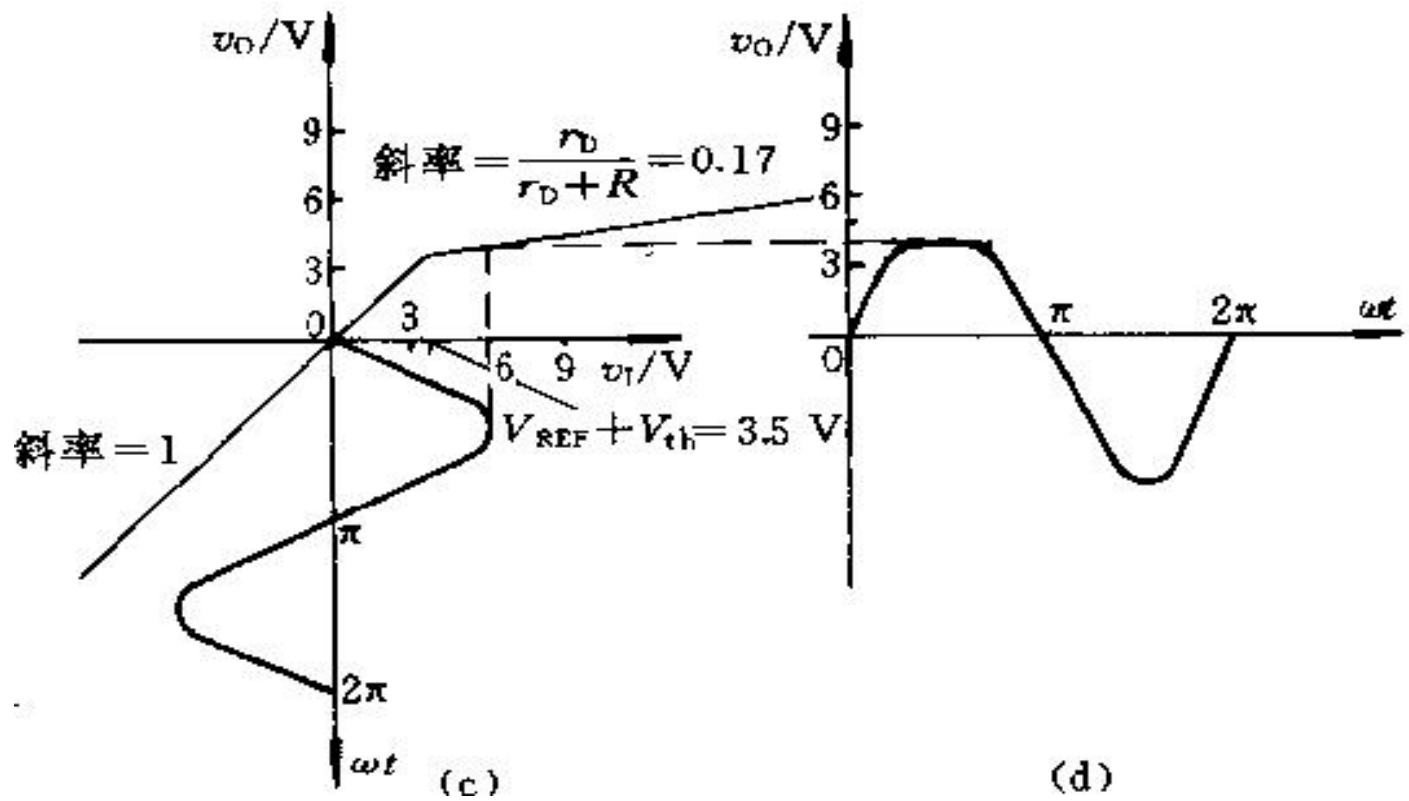
$$v_o = V_{REF} + V_{th} + (v_I - V_{REF} - V_{th}) \frac{r_D}{r_D + R} = 3.917V$$





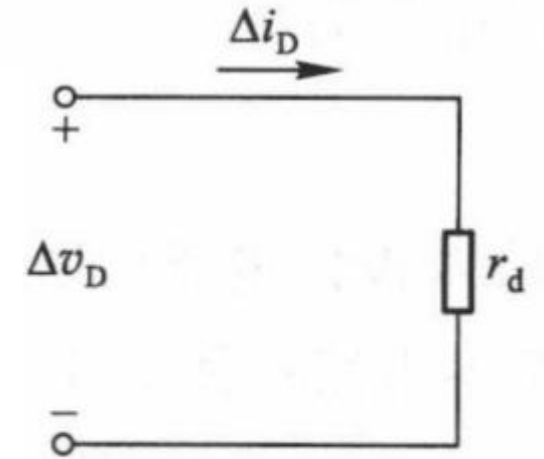
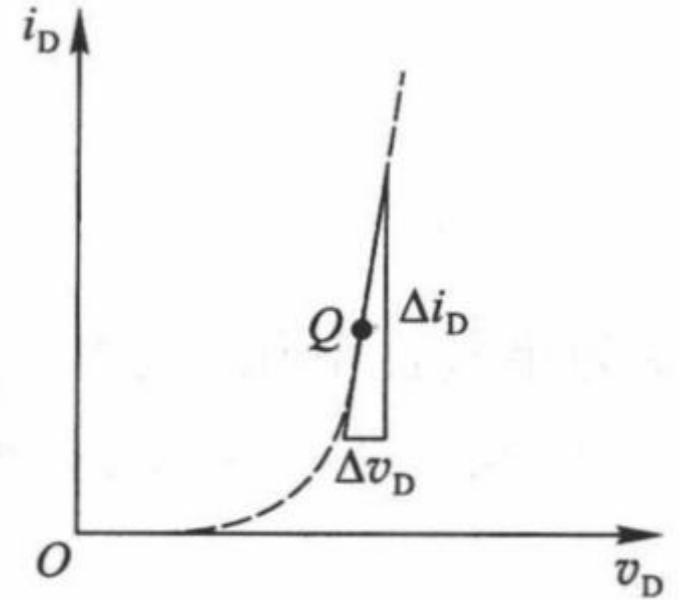
# 解答

- (2) 输入电压为幅值等于6V的正弦电压，所以(1)中所  
得的结果可以用来绘制输出电压的波形。



# 小信号模型

- 如果二极管在它的V-I特性的某一小范围内工作，如在静态工作点Q(即V-I特性上的一个点， $v_D=V_D$ ， $i_D=I_D$ )附近工作，则  
 可把V-I特性看成一条直线，其斜率的倒数就是所要求的小信号模型的微变电阻  
 $r_d$ 。



(b)

$$\begin{aligned}
 r_d &= \Delta v_D / \Delta i_D = 1 / g_d \\
 g_d &= \frac{di_D}{dv_D} = \frac{d}{dv_D} [I_S (e^{v_D/V_T} - 1)] \\
 &= \frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \approx \frac{i_D}{V_T} = \frac{I_D}{V_T}
 \end{aligned}$$





# 模型分析法应用举例

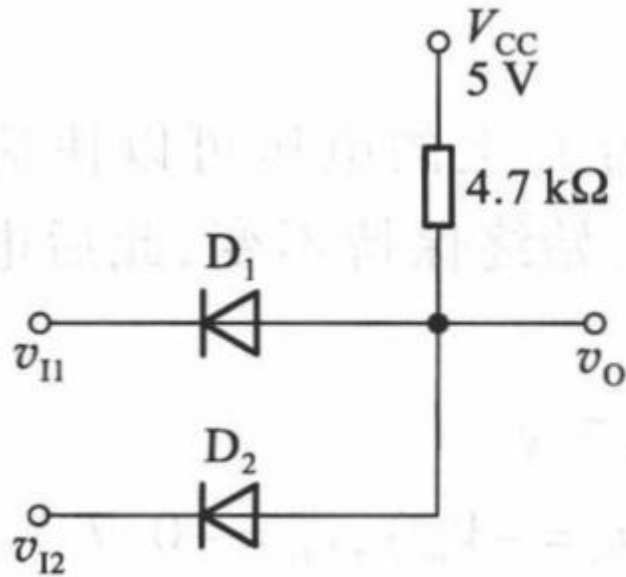
- 整流电路
- 静态工作情况分析
- 限幅与钳位电路
- 开关电路
- 小信号工作情况分析
- 低电压稳压电路

# 开关电路

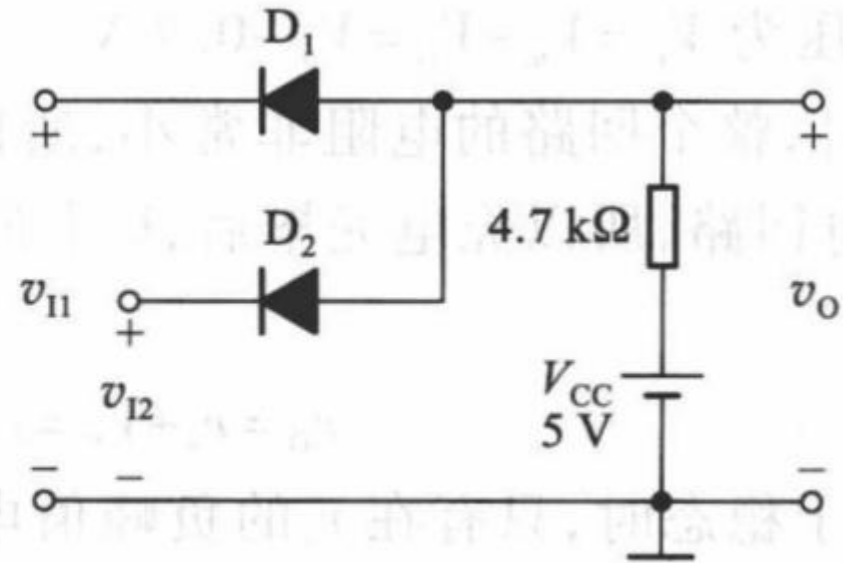
- 在开关电路中，利用二极管的单向导电性可以接通或断开电路，在数字电路中得到广泛的应用。
- 在分析这种电路时，应当掌握一条基本原则，即判断电路中的二极管处于导通状态还是截止状态，可以先将二极管断开，然后观察(或计算)阳、阴两极间是正向电压还是反向电压、若是前者则二极管导通，否则二极管截止。

# 例3.4.6

- 二极管开关电路如图。当  $v_{I1}$  和  $v_{I2}$  为 0V 或 5V 时，求  $v_{I1}$  和  $v_{I2}$  的值不同组合情况下，输出电压  $v_o$  的值。设二极管是理想的。



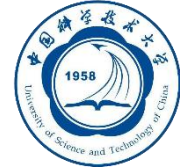
(a)



(b)



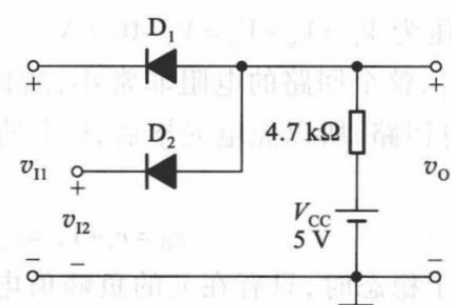
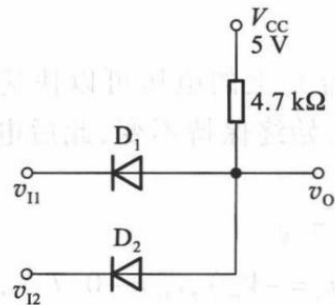
# 解答



• 解:

• (1) 当  $v_{i1}=0$  V、 $v_{i2}=5$ V 时， $D_1$  为正向偏置， $v_o=0$ V， $D_2$  的阴极为 5V，阳极为 0V，处于反向偏置，故  $D_2$  截止。

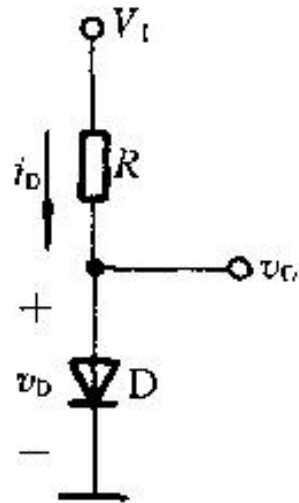
• (2) 依此类推。将  $v_{i1}$  和  $v_{i2}$  的其余三种组合及输出电压列于表中。



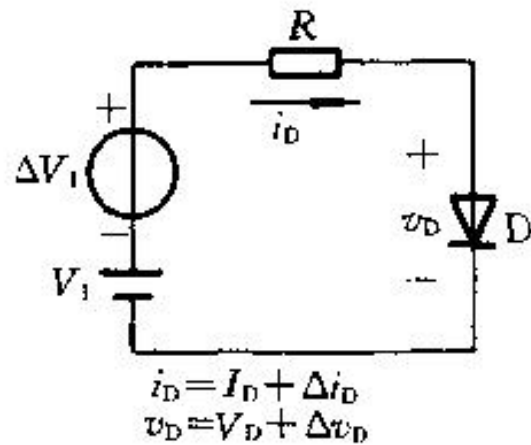
$v_{i1}/V$	$v_{i2}/V$	二极管工作状态		$v_o/V$
		$D_1$	$D_2$	
0	0	导通	导通	0
0	5	导通	截止	0
5	0	截止	导通	0
5	5	截止	截止	5

# 低电压稳压电路

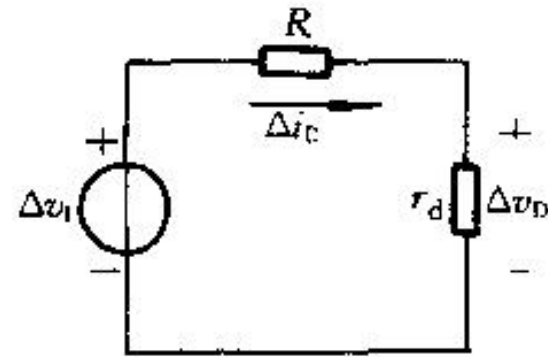
- 稳压电源是电子电路中常见的组成部分。利用二极管的**正向压降**特性，可以得到一种稳压性能较好的低电压的稳压电路。另参见齐纳二极管，反偏使用。



(a)



(b)



(c)



## 例3.4.8

- 在低电压稳压电路中，直流电源电压 $v_I$ 的正常值为10V， $R=10k\Omega$ ，若 $v_I$ 变化 $\pm 1V$ 时，问相应的硅二极管电压(输出电压)的变动如何。

解：(1)当 $v_I=10V$ 时，利用二极管恒压降模型有

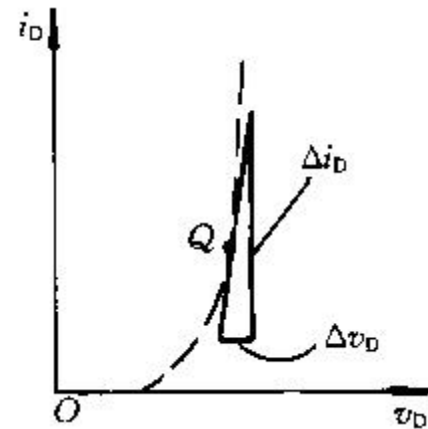
$$v_D \approx 0.7V$$

由此可得二极管 $Q$ 点上的电流为：

$$I_D = \frac{10V - 0.7V}{10k\Omega} = 0.93mA$$

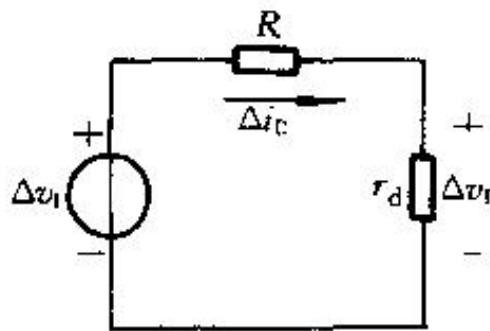
(2)在此 $Q$ 点上，计算二极管的微变电阻内为

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26mV}{0.93mA} \approx 28\Omega$$



# 解答

- (3) 当  $v_i$  有  $\pm 1V$  的波动, 它可视为一峰-峰值为  $2V$  的交流信号, 该信号作用于由  $R$  和  $r_d$  组成的分压器上。显然, 相应的二极管的信号电压, 可按分压比来计算, 即



$$\begin{aligned} v_d &= 2V \times \frac{r_D}{R + r_D} \\ &= 2V \times \frac{28}{10 \times 10^3 + 28} = 5.58mV \end{aligned}$$



## § 3-5 特殊二极管

- 除普通二极管外，还有若干种特殊二极管，如齐纳二极管、变容二极管、光电二极管、发光二极管和激光二极管等



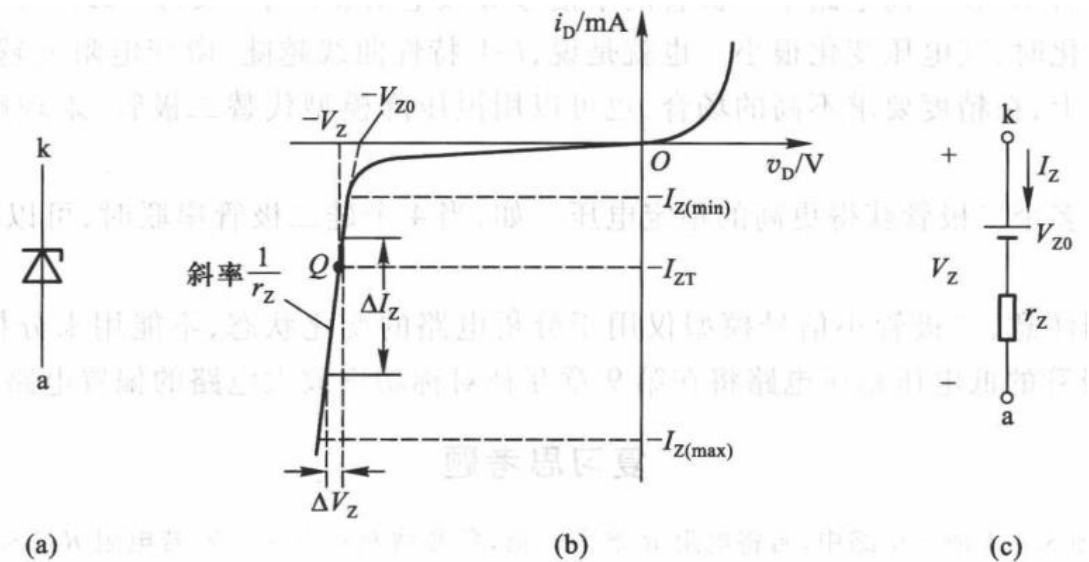
# 齐纳二极管



- 齐纳二极管又称**稳压管**，是一种用特殊工艺制：型硅半导体二极管。
- 管子的杂质浓度比较大，空间电荷区内的电荷密度大，区域很窄，容易形成强电场。当反向电压加到某一定值时，反向电流急增，产生反向击穿。

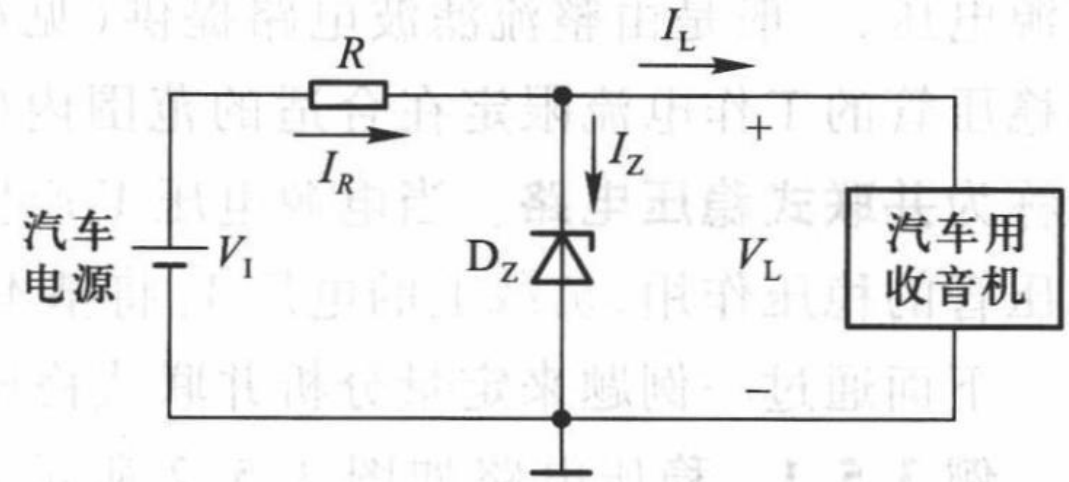
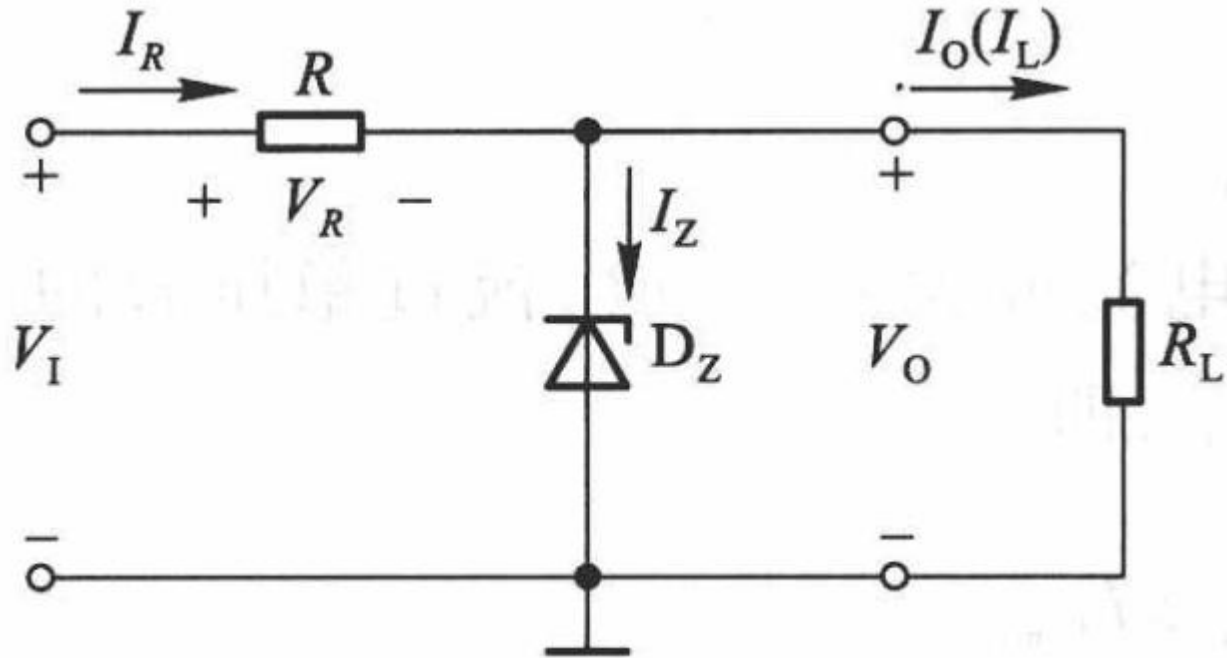
❖  $V_Z$ 表示反向击穿电压，即稳压管的稳定电压。电流增量 $\Delta I_Z$ 很大，只引起很小的电压变化 $\Delta V_Z$ 。曲线愈陡，动态电阻愈小，稳压管的稳压性能愈好。

$$r_z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$$



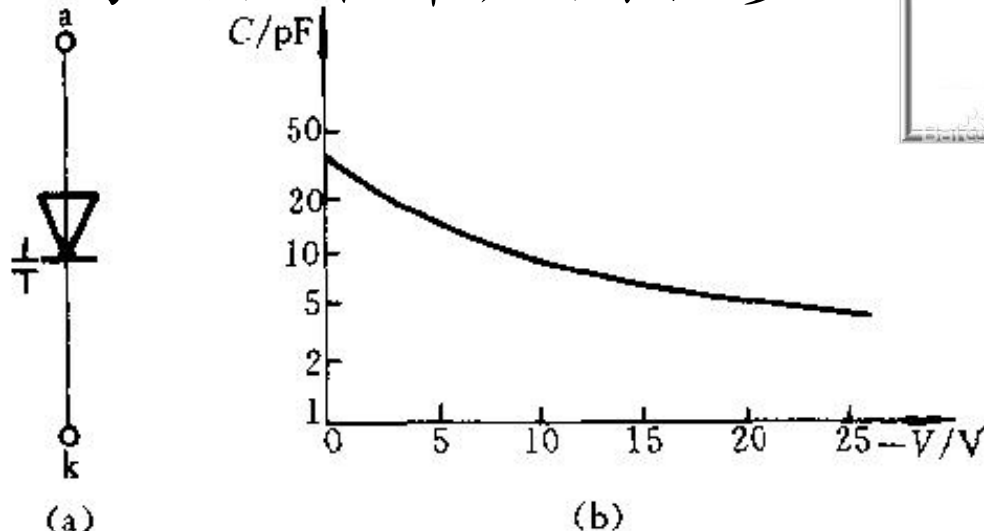
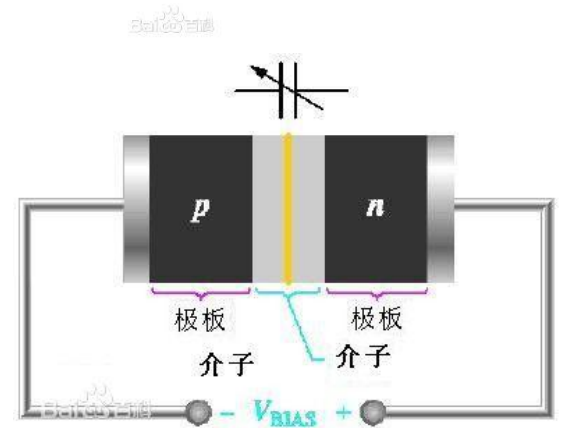
# 并联式稳压电路

- 稳压电路之所以能够稳定输出电压，在于当电流 $I_Z$ 有较大幅度的变化 $\Delta I_Z$ 时，电压的变化 $\Delta V_Z$ 却很小。
- 当 $V_I$ 或 $R_L$ 变化时，电路能自动地调整 $I_Z$ 的大小，以改变 $R$ 上的压降 $I_{RR}$ ，达到维持输出电压 $V_O$  ( $V_Z$ ) 基本恒定的目的。



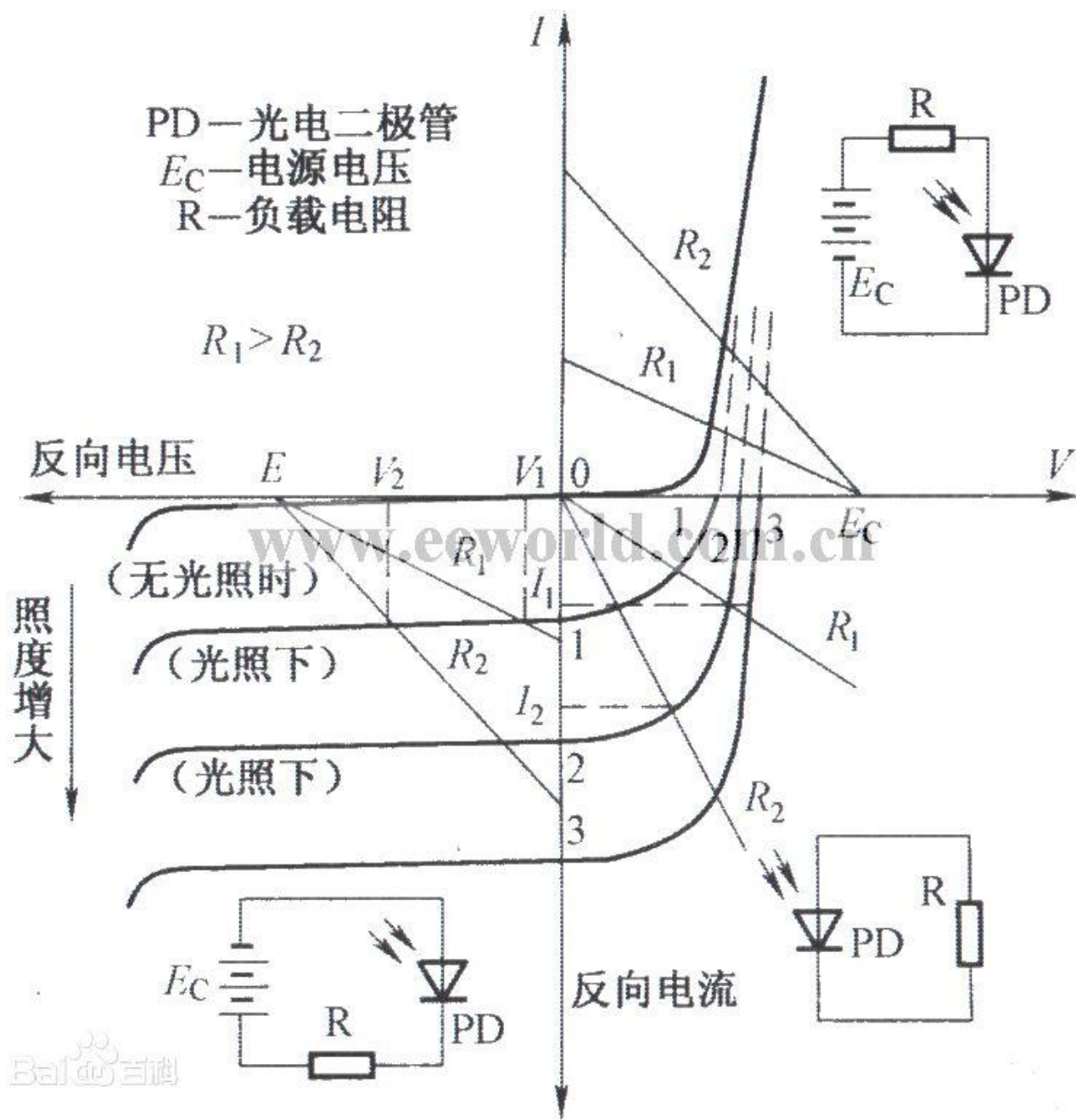
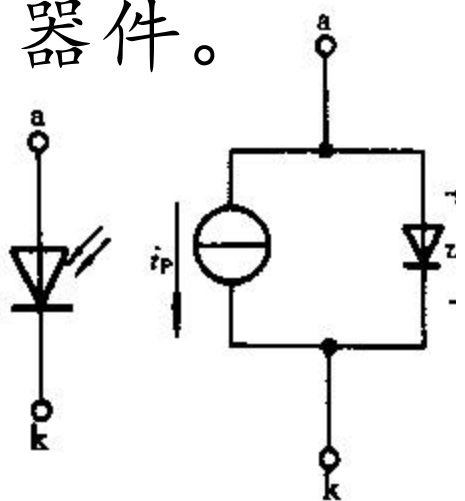
# 变容二极管

- 二极管结电容的大小除了与本身结构和工艺有关外，还与外加电压有关。结电容随反向电压的增加而减小，这种效应显著的二极管称为变容二极管。
- 不同型号的管子，其电容最大值可能是5-300PF。最大电容与最小电容之比约为5:1。变容二极管在高频技术中应用较多。



# 光电二极管

- 光电二极管的结构与PN结类似，在管壳上的一个玻璃窗
- 器件的PN结在反向偏置电压的增加而上升。反向型值为 $0.1\mu\text{A}/\text{lx}$ 数量级
- 光电二极管可用来作为信号的常用器件。





# 发光二极管 LED

- 发光二极管通常用元素周期表中III、V族元素的化合物，如砷化镓、磷化镓等所制成。
- 当通以电流时将发出光来，这是由于电子与空穴直接复合而放出能量的结果。光谱范围是比较窄的，其波长由所使用的基本材料而定。

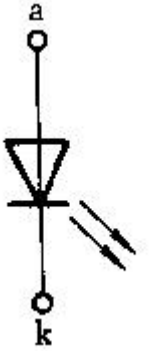


表 3.5.2 发光二极管的主要特性

颜色	波长/ nm	基本材料	正向电压 (10 mA 时)/V	光强(10 mA 时,张角±45°)/ mcd*	光功率/μW
红外	900	砷化镓	1.3 ~ 1.5		100 ~ 500
红	655	磷砷化镓	1.6 ~ 1.8	0.4 ~ 1	1 ~ 2
鲜红	635	磷砷化镓	2.0 ~ 2.2	2 ~ 4	5 ~ 10
黄	583	磷砷化镓	2.0 ~ 2.2	1 ~ 3	3 ~ 8
绿	565	磷化镓	2.2 ~ 2.4	0.5 ~ 3	1.5 ~ 8

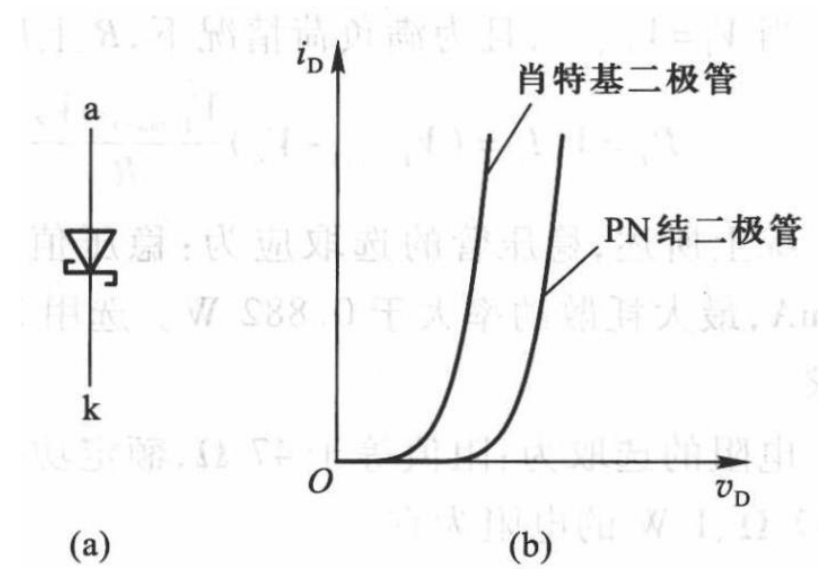
\* cd(坎德拉)为发光强度的单位。





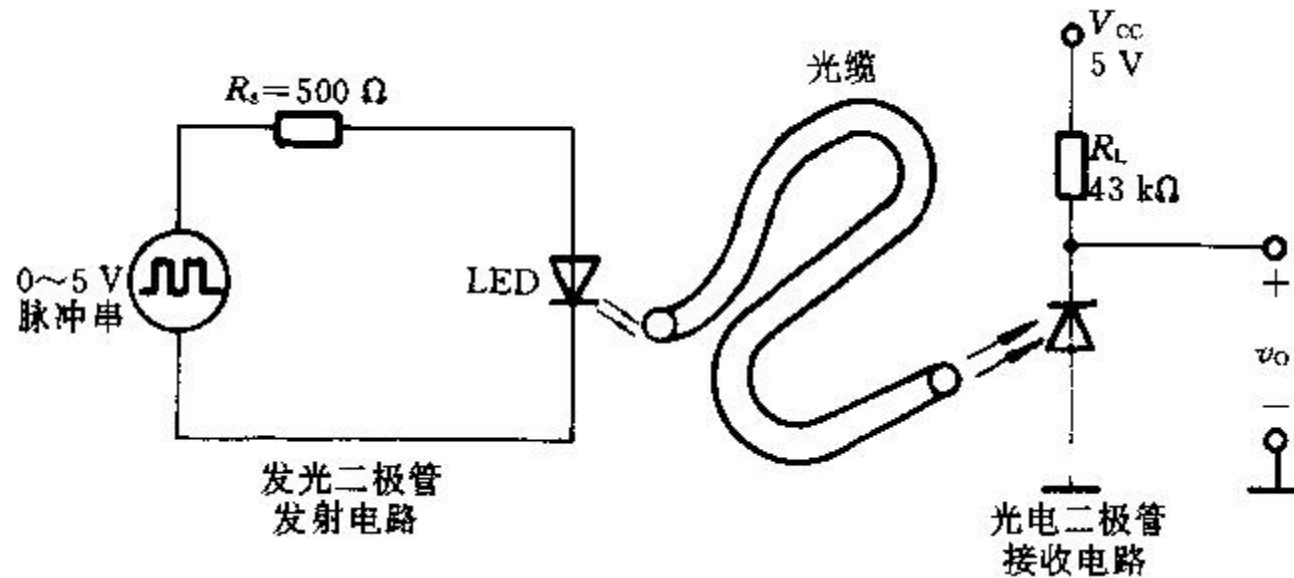
# 肖特基二极管 Schottky Barrier Diode

- 利用金属（铝、金、钼、镍、钛等）与N型半导体在交界面形成势垒的二极管。
- 与普通二极管的差别
  - 是多数载流子器件，结电容小，工作速度快
  - 耗尽区薄，正向导通压降小
  - 反向击穿电压低（几十V），反向漏电流比较大



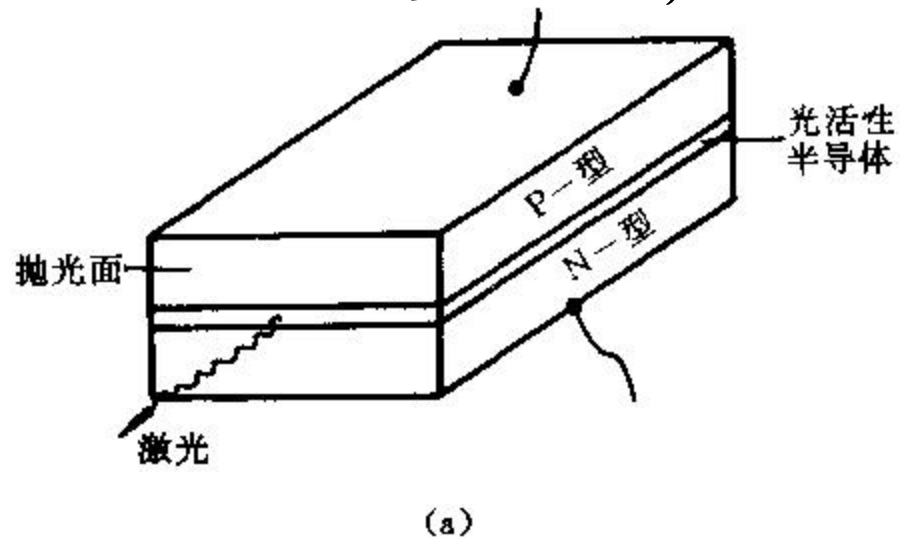
# 光电器件应用

- 发光二极管的一种重要用途是将电信号变为光信号，通过光缆传输，然后再用光电二极管接收，再现电信号。



# 激光二极管

- 激光二极管的物理结构是在发光二极管的结间安置一层具有光活性的半导体，其端面经过抛光后具有部分反射功能，因而形成一光谐振腔。
- 在正向偏置的情况下，LED结发射出光，并与光谐振腔相互作用，从而进一步激励，从结上发射出单波长的光。







# 作业

- 第七版 习题三
- 3.2.1、3.4.3、3.4.8(1)、3.5.1、3.5.3
  
- 预习第五章