

变容二极管的应用

吴志田 编著

国防工业出版社

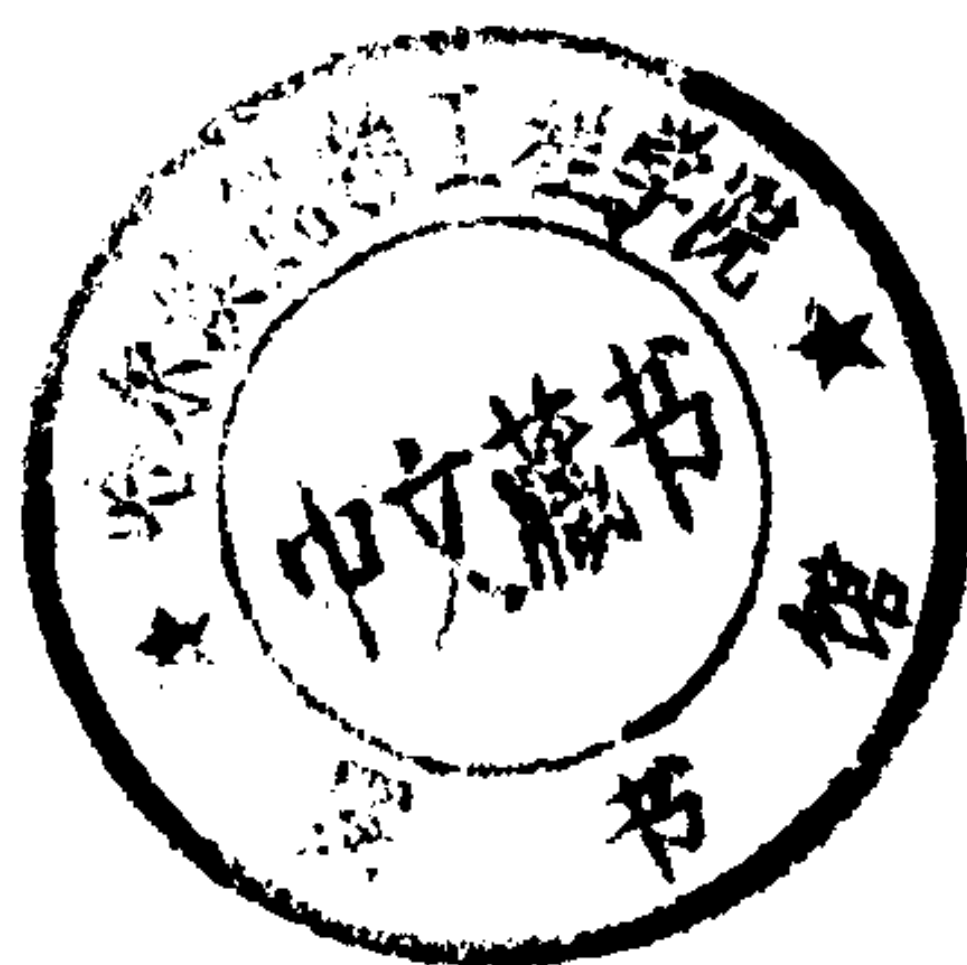
TN 312

W

341864

变容二极管的应用

吴志田 编著



国防工业出版社

DL16/03
内 容 简 介

全书共分十章。第一章介绍变容二极管的工作原理及其特性，第二章至第十章详细地介绍了变容二极管在压控振荡器、参量放大器和参量混频器、参量倍频器、电调谐、变容二极管频率调制器、变容二极管相位调制器、变容二极管温度补偿晶体振荡器、参量调制放大器、参量分频器和限幅器中的应用，对变容二极管在锁相环鉴频器、解码器、自动增益控制、天线电调谐、可变中心频率滤波器、脉冲整形器和发生器中的应用，也作了简要地介绍。

全书叙述力求深入浅出，通俗易懂。

本书可供有关电子技术的工程设计和使用人员，以及设备维修人员阅读，亦可供大专院校有关专业的师生参考。

变容二极管的应用

吴志田 编著

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张10⁵/8 277千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数：0,001—2

ISBN 7-118-00109-0/TN22

定价：6.50元

前 言

自1955年尤里和贝卡诺斯基研制成变容二极管以来，变容二极管有了很大的发展。现在世界上生产近万种变容二极管，它的应用范围不断扩大，非常广泛。民用上用于收音机、电视机、录象机、各种通信机、电子测量和计量仪器，以及各种人造卫星等，军事上用于战略武器、战术武器和各种通信机，以及各种人造卫星等。使用的频率从超低频、中波、短波、超短波发展到微波。制造变容二极管的材料从锗、硅，发展到砷化镓。笔者根据自己多年来对变容二极管的研究成果和学习体会并参考了一些单位和个人科研成果编写了本书，供有关同志参考。

本书力求理论结合实际，在阐明变容二极管的工作原理、各种特性的基础上，给出了若干工程设计公式、数据和曲线，以及实用线路。

该书在编写过程中，得到了张有正教授、姜忠炳和王遵棠高级工程师，以及张申秋、魏俊奇等同志的热情帮助，在此谨向他们致以衷心的感谢！

由于笔者水平所限，书中定有缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章	变容二极管及其主要特性	1
§ 1-1	PN 结	1
§ 1-2	PN 结电容和变容二极管	3
§ 1-3	PN 结的基本制造方法	6
§ 1-4	封装	13
§ 1-5	电容-电压特性	15
§ 1-6	串联等效电阻	23
§ 1-7	优值和动态优值	28
§ 1-8	截止频率和自谐振频率	32
§ 1-9	反向饱和电流	36
§ 1-10	温度特性	39
§ 1-11	噪声特性	43
§ 1-12	大交流电压引起的电容量变化	45
§ 1-13	电荷电压特性曲线簇	47
§ 1-14	反向击穿电压	52
§ 1-15	极限耗散功率	55
§ 1-16	特殊变容二极管	56
§ 1-17	可靠性	61
§ 1-18	主要特性的测量	64
第二章	压控振荡器	86
§ 2-1	开环相位噪声	87
§ 2-2	长期稳定度	9
§ 2-3	压控灵敏度	
§ 2-4	改善频率-电压特性的方法	
§ 2-5	电路选择	
§ 2-6	压控晶体振荡器	
第三章	参量放大器和参量混频器	

§ 3-1	参量放大器的基本工作原理	112
§ 3-2	参量混频器的变频效应	114
§ 3-3	分类和泵激及电路组成要点	119
§ 3-4	微带参量放大器	120
§ 3-5	微带发射参量混频器	125
§ 3-6	下边带向上变频短波参量混频器	128
§ 3-7	上边带向上变频短波参量混频器	163
§ 3-8	低频参量放大器	170
第四章	参量倍频器	171
§ 4-1	理想参量倍频器的效率	171
§ 4-2	串联参量倍频器的效率	173
§ 4-3	并联参量倍频器的效率	180
§ 4-4	改善倍频效率的一些方法	185
§ 4-5	两种参量倍频器电路的比较	187
§ 4-6	变容二极管的选择	189
§ 4-7	电路设计	194
§ 4-8	调试及其稳定性	196
第五章	电调谐	198
§ 5-1	调谐对接收机抗干扰能力的改善	201
§ 5-2	电调谐中的谐振特性	202
§ 5-3	电调谐的非线性失真	207
§ 5-4	电调谐的统一调谐	213
§ 5-5	电调谐的统一调谐误差	220
§ 5-6	电调谐中的变容二极管	221
第六章	变容二极管频率调制器	226
§ 6-1	LC 频率调制器	226
§ 6-2	晶体频率调制器	245
第七章	变容二极管相位调制器	255
§ 7-1	线性相位调制器	255
§ 7-2	180° 和 360° 移相器	259
§ 7-3	双变容二极管移相器	277
第八章	参量调制放大器	278
§ 8-1	参量调制放大器的基本工作原理	278

§ 8-2	变容二极管电桥	280
§ 8-3	自激式参量调制放大器	285
§ 8-4	他激式参量调制放大器	287
§ 8-5	参量调制放大器中的变容二极管	290
§ 8-6	应用举例	291
第九章	温度补偿晶体振荡器	293
§ 9-1	TCXO 的特点及其技术性能	293
§ 9-2	TCXO 的晶体振子	295
§ 9-3	TCXO 中的变容二极管	300
§ 9-4	TCXO 的补偿网络	302
第十章	其他应用	308
§ 10-1	参量分频器	308
§ 10-2	变容二极管限幅器	315
§ 10-3	PLL 鉴频器	318
§ 10-4	解码器	320
§ 10-5	自动增益控制	324
§ 10-6	天线电调谐	324
§ 10-7	可变中心频率滤波器	325
§ 10-8	脉冲整形器和发生器	326

第一章 变容二极管及其主要特性

§ 1-1 PN 结

一个单独的N型或P型半导体，其载流子的分布是均匀的，正负电荷的总和是平衡的，因而呈现电中性。当N型半导体与P型半导体结合起来以后，在接触面附近，由于载流子的不均匀引起扩散，而趋向于平衡。P型半导体的空穴向N型半导体扩散，留下负电荷 q_- ，而N型半导体的电子向P型半导体扩散，留下正电荷 q_+ ，如图 1-1 所示。通常，我们把这种正电荷 q_+ 或负电荷

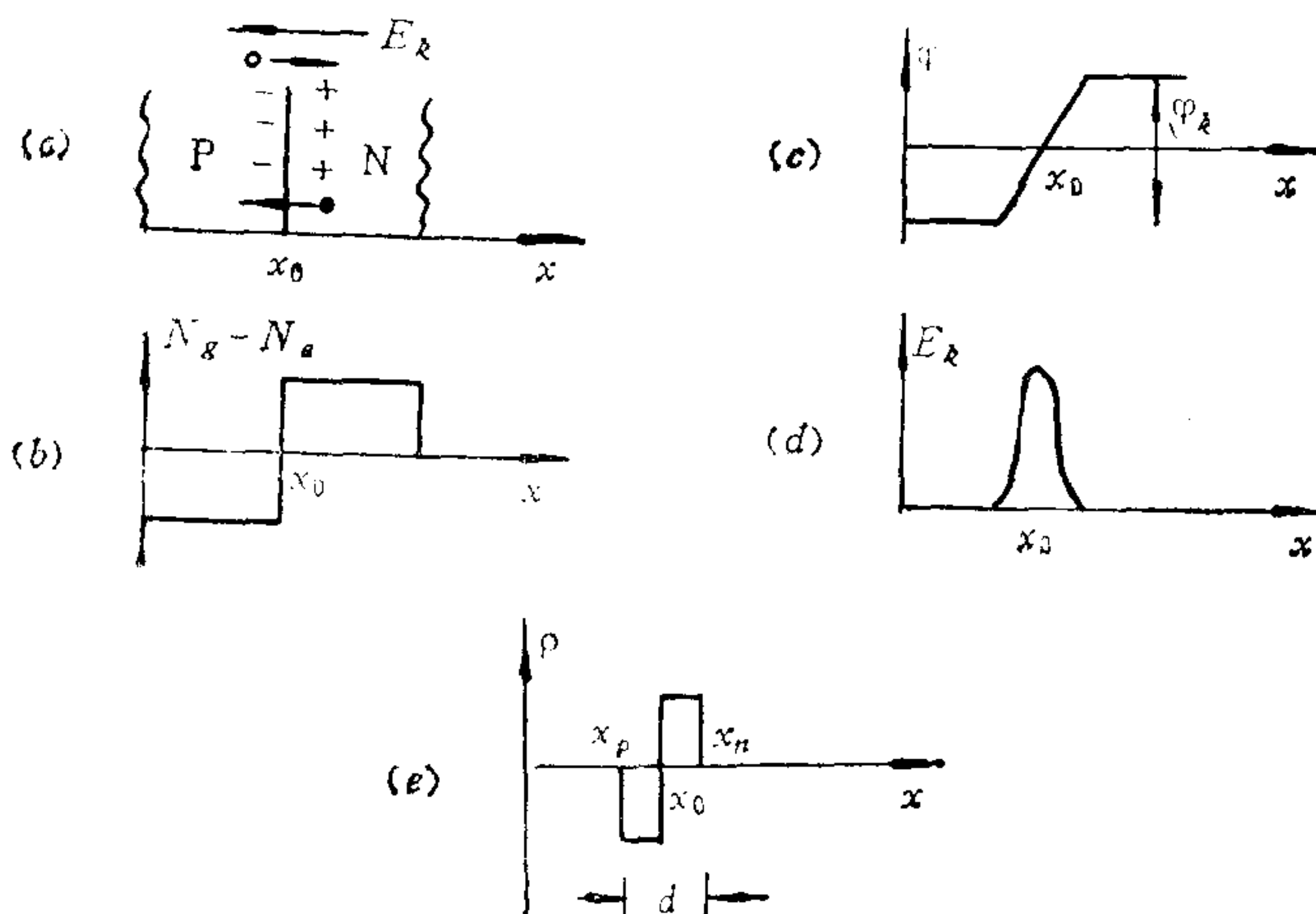


图1-1 无外加偏压时的PN结

(a) P型和N型半导体的分界；(b) P型和N型半导体中的杂质分布；
 (c) 接触电位 φ_k 的分布；(d) 电场强度 E_k 的分布；(e) 体电荷密度 ρ 的分布。

q_- 称为体电荷。因此，在N型和P型半导体的接触面附近产生接触电位 φ_k ，并产生电场 E_k ，电场的方向是把电子推向N型半导体，

把空穴推向 P 型半导体，其作用恰好和扩散相反，因此，在接触面两旁形成一个薄层。当电场作用能够完全抵消扩散作用时，薄层厚度就不再增加。上面所说的薄层称为 PN 结。PN 结的厚度约为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm}$ 。跨越狭窄结的电位梯度可以很高，每厘米通常为几千伏。因为结内的载流子都被电场移走，所以这个结区称为耗尽层。耗尽层是个完全没有载流子的区域，所以是个电阻率很大的高阻区。由于 PN 结能够阻止载流子的扩散作用，所以又叫做阻挡层。由于 PN 结附近有电荷积累，因此 PN 结呈现电容效应，按照电荷积累的方式来区分，PN 结电容效应由两种电容组成，即几何电容和扩散电容。

图 1-1 中：

x_0 ——PN 结的深度；

N_g ——N 型半导体中施主浓度；

N_a ——P 型半导体中受主浓度；

x_p, x_n ——分别表示 PN 结在 P 区和 N 区的边界；

d ——PN 结厚度。

PN 结接触电位 φ_k 的大小，可借助费米能级的概念求得。它由下式决定：

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{P_p N_n}{N_i^2} \quad (1-1)$$

式中 k ——波耳兹曼常数，

$$k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/}^\circ\text{C}$$

T ——绝对温度，K；

e ——单位电子的电荷，

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑 (C)};$$

P_p ——P 型半导体中空穴浓度；

N_n ——N 型半导体中电子浓度；

N_i ——本征半导体中的载流子浓度。

从式 (1-1) 可以看出，PN 结的接触电位 φ_k 决定于两侧 P 型和 N 型半导体中的载流子浓度，浓度 P_p 和 N_n 越高，接触电

位 φ_k 也就越大。

对于不同的材料, 其 PN 结可以根据式 (1-1) 定量计算它的接触电位 φ_k 。例如, 室温下, $kT/e = 0.026 \text{ V}$, 取 $P_p = 5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, $N_n = 6 \times 10^{14}/\text{cm}^3$, 对于锗取 $N_i = 2.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 此时可求得 $\varphi_k \approx 0.4 \text{ V}$ 。在实验室中一般测得 φ_k 的数据是: 对于锗, PN 结一般在 $0.2 \sim 0.4 \text{ V}$ 左右, 对于硅, PN 结一般在 $0.5 \sim 0.75 \text{ V}$ 左右, 对于砷化镓, PN 结一般为 $0.8 \sim 1.2 \text{ V}$ 左右。

§ 1-2 PN 结电容和变容二极管

当 PN 结加上反向直流偏置电压 V_n 时, 如图 1-2 所示, 结中的电场得到增强, PN 结体电荷 q_+ 和 q_- 增多, 由于 PN 结内没有自由电子和空穴, 这些体电荷只能由杂质电荷形成, 因此导致 PN 结的扩张。当 PN 结加上正向直流偏置电压 V_n 时, 由于结中电场减弱, PN 结变窄, 如图 1-3 所示。这样, 加到结上的

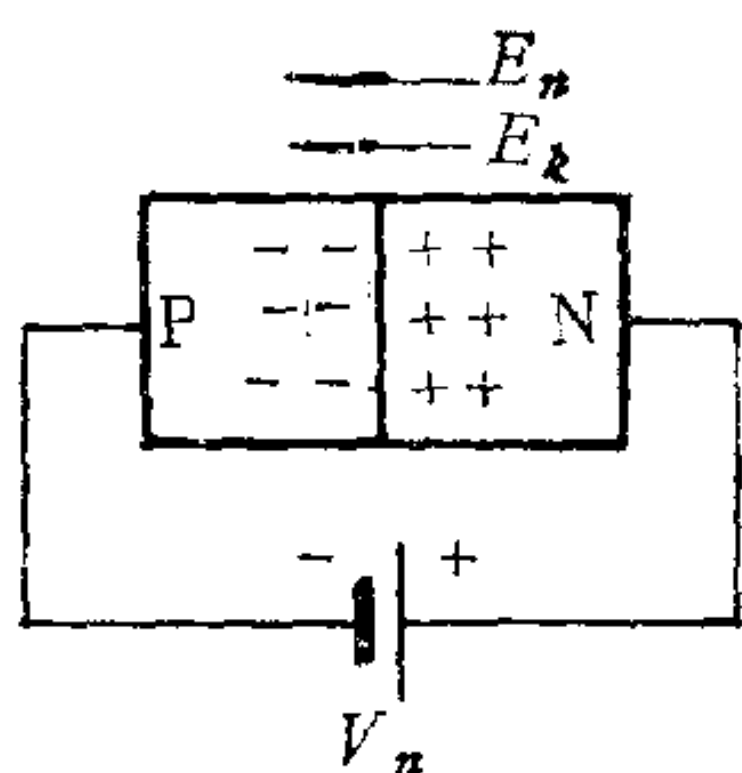


图1-2 加有反向直流偏置电压的PN结

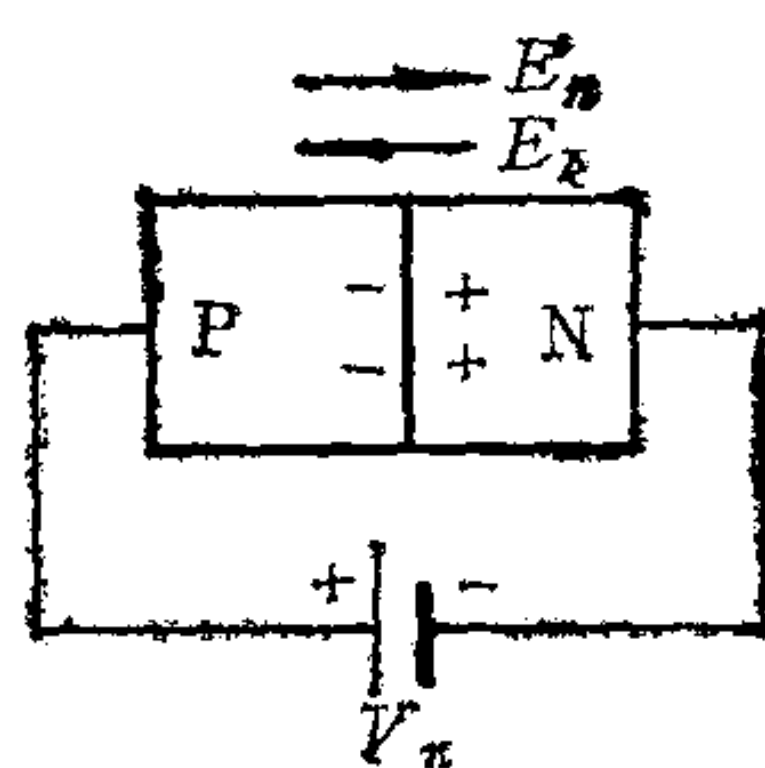


图1-3 加有正向直流偏置电压的PN结

电压变化 dV_n 时, 结内体电荷必然变化 dq , 于是, 产生电容 $C = dq/dV_n$ 。PN 结的这一重要特性被人们利用来制造各种各样的变容二极管, 用不同的反向直流偏置电压获得不同的电容。图 1-4 示出目前流行的几种变容二极管的外貌图形, 其中有些厂家用色点表示负极, 而另一些厂家则用出脚的长短来区分正、负极性。

对于图 1-2 所示 PN 结的电容 C_j 的求解, 可借助泊松方程

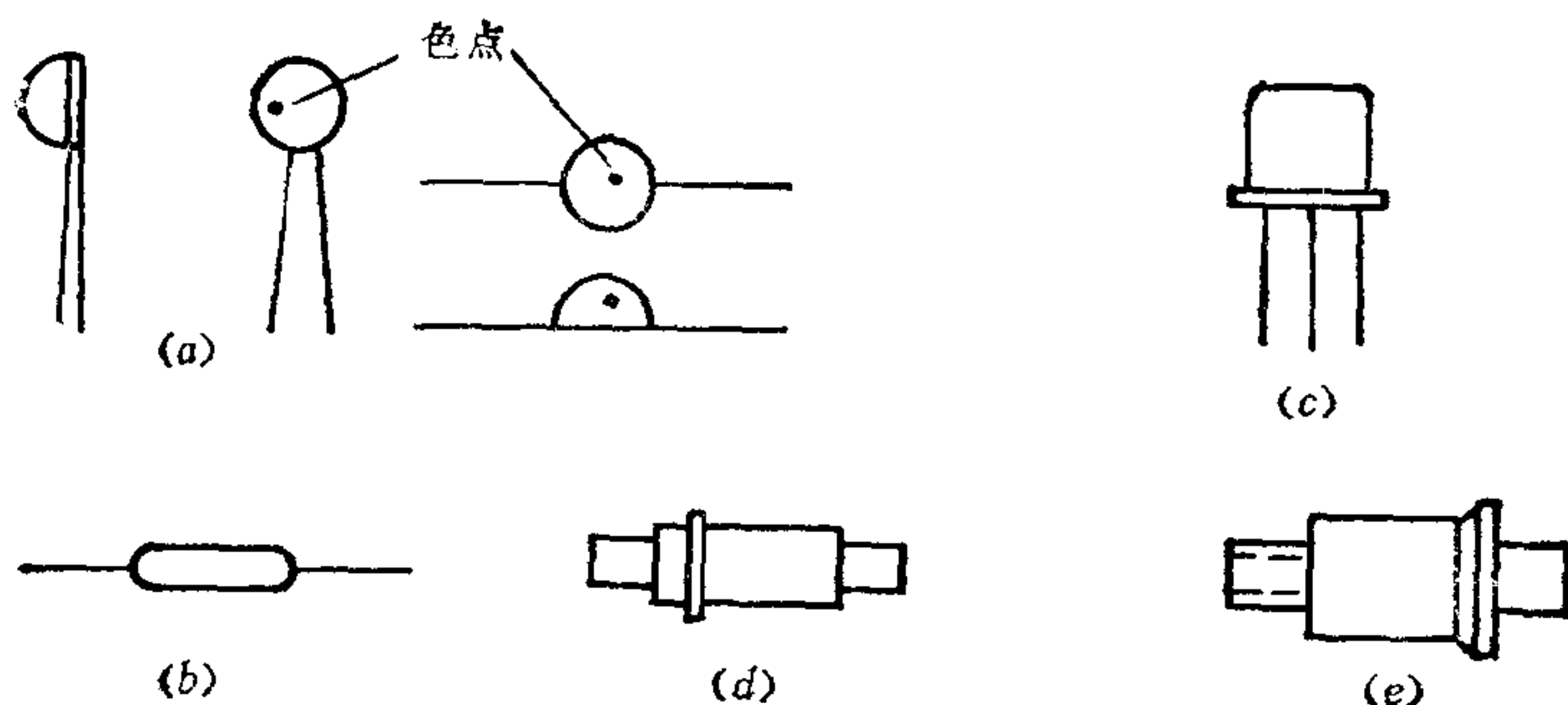


图1-4 几种变容二极管的外貌图形

来进行。对于一个 PN 结来说，一维泊松方程有如下形式：

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{4\pi\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0} \quad (1-2)$$

式中 $\psi(x)$ ——电位；

$\rho(x)$ ——体电荷密度；

ϵ_0 ——自由空间介电常数；

ϵ ——材料的介电常数。

对于非耗尽层 PN 结，其体电荷密度 $\rho(x)$ 依赖于电位，式 (1-2) 的解一般不能用有限形式来表达。为了简化计算，我们考虑 PN 结为耗尽层的情形，此时有

$$\rho(x) = e(N_d - N_a) = eN(x) \quad (1-3)$$

其边界条件为

$$\left. \frac{d\psi(x)}{dx} \right|_{x=x_p} = \left. \frac{d\psi(x)}{dx} \right|_{x=x_n} = 0 \quad (1-4)$$

在 x_p 、 x_n 边界内的电荷 q 绝对值应相等，其符号相反，即

$$q = eS \int_{x_p}^{x_0} |N(x)| dx_p \quad (1-5)$$

或

$$q = eS \int_{x_0}^{x_n} |N(x)| dx_n$$

于是

$$dq = eS|N(x_p)|dx_p \quad (1-6)$$

或

$$dq = eS|N(x_n)|dx_n$$

式中, S 为 PN 结的面积。

对于 PN 结上加有反向直流偏置电压 V_n 的情况, 由式(1-2)可知, PN 结上的总的电位差为

$$\begin{aligned} V_n + \varphi_k &= -\frac{4\pi e}{\epsilon\epsilon_0} \int_{x_p}^{x_n} dx \int_x^{x_p} N(y) dy \\ &= \frac{4\pi e}{\epsilon\epsilon_0} \int_{x_p}^{x_n} xN(x) dx \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} dV_n &= \frac{4\pi e}{\epsilon\epsilon_0} [|N(x_p)|(x_0 - x_p)dx_p + |N(x_n)|(x_n - x_0)dx_n] \\ &= \frac{4\pi e}{\epsilon\epsilon_0} |N(x_p)|(x_n - x_p)dx_p \\ &= \frac{4\pi e}{\epsilon\epsilon_0} |N(x_n)|(x_n - x_p)dx_n \end{aligned}$$

根据电容定义:

$$C_j = \frac{dq}{dV_n} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{4\pi(x_n - x_p)}$$

式中, $(x_n - x_p)$ 为 PN 结厚度。

令

$$d = x_n - x_p$$

则

$$C_j = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{4\pi d} \quad (1-8)$$

由此可见, 图 1-2 所示 PN 结相似于一个平板电容器。由于这一电容完全由 PN 结的几何形状、面积 S 、厚度 d 所决定, 所以人们称之为几何电容。

PN 结除了上述类似于平板电容器的几何电容外, 还存在另一种电容。因为在任何电压下, 在 N 区和 P 区的边界都有一定的电荷积累, 当直流偏置电压改变时, 此电荷数目也跟着改变。当直流偏置电压加到 PN 结上时, 载流子的分布可以近似地认为符合平衡时的麦玻分布。因此, P 区界面上积累的载流子浓度可以写为

$$n_p = n_n^0 e^{-\frac{e(\varphi_k - V_n)}{kT}} \quad (1-9)$$

式中, n_n^0 为平衡情况下, N 区的载流子浓度。

考虑到平衡情况下的麦玻分布, 则

$$n_p^0 = n_n^0 e^{-\frac{e\varphi_k}{kT}} \quad (1-10)$$

式中, n_p^0 为平衡情况下, P 区的少数载流子浓度。从式 (1-10) 求出 n_n^0 后, 代入式 (1-9), 得

$$n_p = n_p^0 e^{\frac{eV_n}{kT}}$$

P 区界面上积累的电荷等于其电荷密度乘面积, 设 PN 结的面积为 S , 则 P 区界面上积累的电荷为

$$q = (en_p) S = eSn_p^0 e^{\frac{eV_n}{kT}}$$

当反向直流偏置电压改变 dV_n 时, 电荷也随之改变 dq , 即

$$dq = eSn_p^0 e^{\frac{eV_n}{kT}} dV_n$$

由此可得

$$C_d = \frac{dq}{dV_n} = eSn_p^0 \cdot \frac{e}{kT} \cdot e^{\frac{eV_n}{kT}} \quad (1-11)$$

由于上式的电容 C_d 的形成与载流子的扩散相联系, 所以人们称之为扩散电容。显然, 该电容和 PN 结扩散电流成正比, 因此正向运用时 C_d 大, 反向运用时 C_d 小。

当反向直流偏置电压取得比较高时, 扩散电容 C_d 很小, 可以忽略不计。这时的 PN 结电容完全由式 (1-8) 所示的几何电容 C_j 所确定。

§ 1-3 PN 结的基本制造方法

图 1-5 示出几种制造 PN 结的重要方法。

图 1-5 (a) 表示用合金法制造的 PN 结。合金法是利用 P 型半导体和 N 型半导体熔合的方法巧妙地在一块完整的 N 型半导

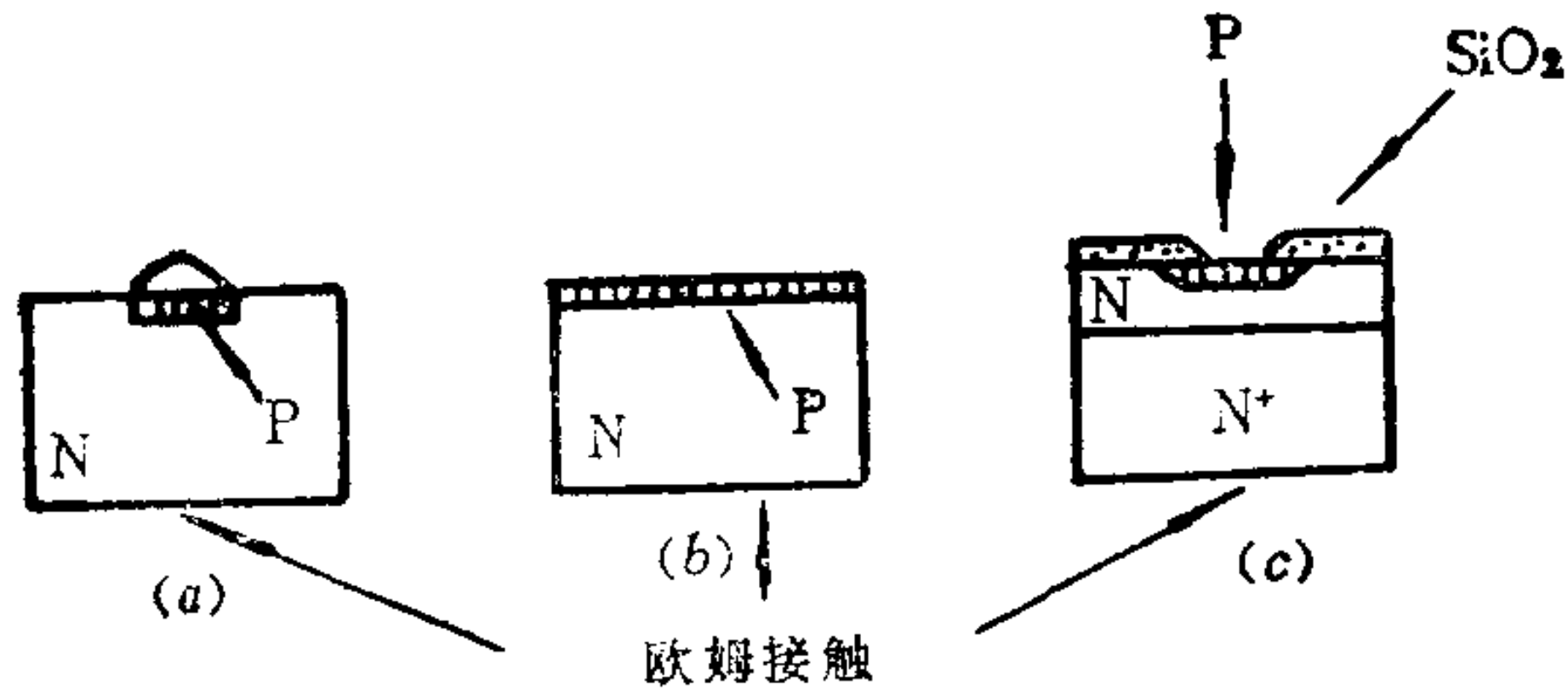


图1-5 制造PN结的几种重要方法

(a) 用合金法制造的PN结；(b) 用扩散法制造的PN结；
(c) 用外延生长法制造的扩散平面结。

体内部实现异型半导体的接触，形成PN结。

下面例举P型镓和N型锗用合金法制造PN结的情况。通常是把镓粒（受主）置于N型的锗片上〔见图1-6（a）〕。放在炉

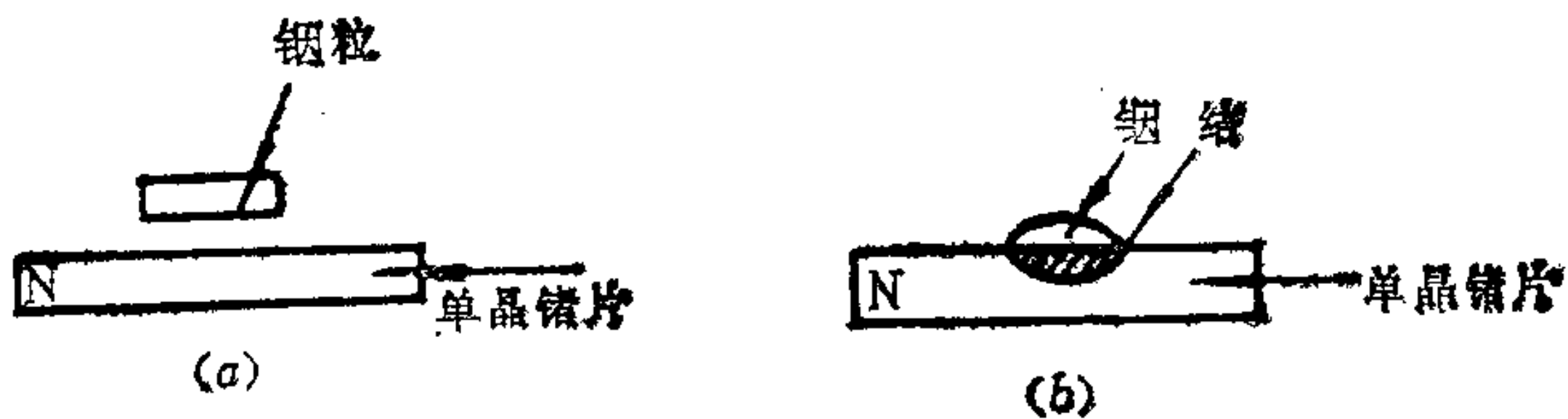


图1-6 合金法熔结过程示意图

中加热，在 156°C 左右镓开始熔化，然后继续加热到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ （锗的熔点 $\approx 936^{\circ}\text{C}$ ）。镓熔化以后锗原子就开始向镓中溶解，在镓界面处的锗浓度宽大，从而引起锗原子向镓内部扩散〔见图1-6（b）〕。锗不断溶解，不断向镓溶液内扩散，直至饱和而达到平衡为止。这时系统的温度称为熔结温度。镓中锗的总量决定于熔结温度和镓粒的大小。在结面积一定时，就可以通过控制熔结温度来控制合金结的深度。最后使温度下降，在锗的表面处就会有新的晶体生长出来。这部分晶体中含有足够量的镓，而形成P型的锗，它与原来的N型锗构成PN结。

用合金法制得的PN结的性能好坏，在很大程度上取决于所选用的合金材料是否适当。所选用的合金材料不仅是所需要的施

主杂质或受主杂质材料，而且应该满足许多附加要求，例如物理性能、机械性能等。由于单一元素很难完全满足上面的要求，因此人们常将两种或两种以上的元素先熔合成合金，再把它和半导体晶片熔成 PN 结。

表 1-1 列出了 N 型和 P 型锗、硅、砷化镓半导体所常用的一些合金材料。表中大多数的合金材料是由两种或两种以上的元素所构成。

表1-1 N型和P型锗、硅、砷化镓半导体常用合金材料

杂质类型 半导体	受主杂质材料 (N型晶片所用合金材料)	施主杂质材料 (P型晶片所用合金材料)
锗	铟 铟镓合金 铟铝合金 铟金镓合金 铟银镓合金	铅锑合金 铅砷合金 金锑合金 金砷合金 锡铅锑合金 锡砷合金
硅	铝 铝镓合金 铝锡合金	金锑合金 金砷合金 银铅砷合金 银铅锑合金
砷化镓	金锌合金 银锌合金 铋镉合金 铝	锡 锡铟合金 锡铝合金 锡金合金 铋锡铂合金

由合金法所形成的 PN 结，在结的附近杂质浓度是突变的〔参见图 1-9 (a)〕，耗尽层中杂质浓度从一个常值变到另一常值。这种 PN 结叫做突变结。

合金法是制造 PN 结的最基本的方法之一。具有工艺简单、操作方便、适合于大规模生产等优点。但是用合金法得到的结的位置、结的深度与合金化过程中的温度、时间有密切的关系，因

而不容易精密控制，影响高频性能。

图 1-5 (b) 表示用扩散法制造的 PN 结。下面举一个例子来说明用扩散法制造 PN 结的基本情况。取一块 P 型锗单晶，表面经过清洁处理之后，把它与少量纯铟一起封入真空的石英管中，如图 1-7 (a) 所示。然后加高温，金属铟开始蒸发，铟的蒸汽包围了锗，并进入锗的表面层，表面层中铟的浓度很高，就引起铟原子向锗晶体内部扩散。经过一定时间后，铟的浓度将会有一定的分布，如图 1-7 (b) 所示。对铟的浓度(施主浓度)大

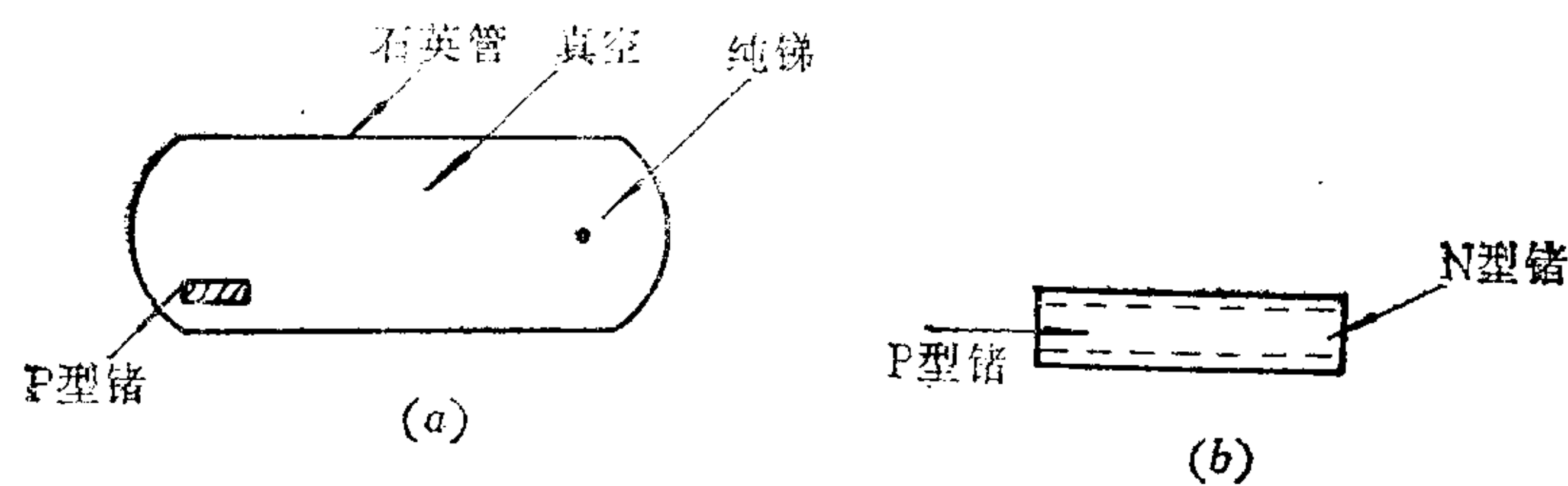


图1-7 扩散法制造PN结

表1-2 锗、硅和砷化镓常用的扩散杂质源

杂质类型 半导体	施主杂质源	受主杂质源
锗	铟 砷	镓 镉
硅	红磷 五氧化二磷 磷钙玻璃 三氯氧磷(液态) 三氯化磷(液态) 三氧化二砷 三氧化二铟	三氧化二硼 硼硅玻璃 氮化硼 硼酸三甲酯 硼酸三丙酯 三溴化硼 三氯化硼 三氧化二镓
砷化镓	锡 硫 碲	锌 二砷化锌 锰

于原来受主浓度的地方，就变成N型，这样就形成了一个PN结。其结的附近杂质浓度是逐渐变化的，是一种线性梯度情况〔参见图 1-9 (b)〕。这种 PN 结叫做缓变结。

不同的半导体材料，扩散用的杂质源也是不同的。有时单一的元素不能满足物理性能、机械性能等许多附加要求，因此将几种元素先熔成化合物或混合物，再作为扩散用杂质源。表 1-2 列出了锗、硅和砷化镓常用的扩散杂质源。

用扩散法形成的缓变结可以有几种不同的杂质分布，这些分布决定于扩散时所用的方法。

在所有的扩散缓变结情形中，交叉点上的杂质分布都可以用一个线性杂质分布来近似。因为在一个扩展层中，杂质密度从表面起迅速下降，并在转变点上接近斜率不很陡但为常数的分布。缓变结的一个基本特点是，在 PN 结交界面有效杂质浓度等于零，在其两侧，有效浓度从零开始增大。

在线性缓变结中，耗尽层均衡地向结的两边伸展。这与突变结形成明显对照，在突变结中，耗尽层在电阻率较大的区中伸入的更深。虽然线性缓变是扩散结梯度的近似，然而在扩散结中测量电容电压变化的结果表明，在低电压下，这种近似是相当良好的，有很好的正确性。如果扩散杂质分布变化很陡，结电压又较大，则扩散缓变结近似为一个突变结。这一点将在 § 1-5 节中进一步说明。

用扩散法制造 PN 结可精确地控制 PN 结的结深和扩散层表面杂质浓度。

图 1-5 (c) 表示用外延生长方法制造的扩散平面结。

外延生长方法是 PN 结制造中最重要的方法之一。

外延生长技术是利用化学反应在晶体的表面上生长一薄层半导体材料的晶体，其晶格结构与原来的晶体相同。这样轻掺杂的高电阻率外延层生长在重掺杂的低电阻率（电阻率在 $0.001\Omega\text{-cm}$ 以下）衬底上并由后者支托。生长在衬底上的外延层，它的导电类型可以和衬底的导电类型相同，也可以不相同。原来 N^+