

59-2383

無線電知識叢書

半導體管知識

(譯文集)

科學技術出版社

無線電知識叢書

半導體管知識

科學技術出版社

內 容 提 要

本書是从苏联無線电杂志(РАДИО) 1954~1956 年各期所載有关半导体管著作中选出的一部分, 虽非有系統的完整著作, 但关于半导体管基本知識的各方面差不多都包括了一些。从这本小册子里大体上已可得到关于半导体管的基本原理与应用的基础概念

書中先介绍半导体的工作原理基础, 以后各篇文章中分別介绍各种半导体管, 并討論这些半导体管在各种电路中的应用方法, 最后还介绍一种簡單的試驗仪器, 可用以測定半导体管的特性, 書末并介绍几种苏联半导体管的特性

本書可供广大业余無線电爱好者閱讀。

半 导 体 管 知 識

(譯 文 集)

集 体 翻 譯

*

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海建国西路336弄1号)

上海市書刊出版業營業許可証出 079 号

上海新華印刷厂印刷 新華書店上海發行所总經售

*

統一書号: 15119·462

开本787×1092 1/32·印張 2 7/16·字數 52,000

1957 年 2 月第 1 版

1957 年 2 月第 1 次印刷 印數 1—21,000

定价:(10) 0.33 元

目 录

一	二极和三极半导体管工作的物理基础(罗宗續譯).....	1
二	結合型鍺二极管(叶濤基譯).....	16
三	ДГ-II 型鍺二极管的应用(何成志譯).....	20
四	三极半导体管的应用(何成志譯).....	30
五	新型三极半导体管(叶濤基譯).....	41
六	三极半导体管低頻放大器(錢永順譯).....	47
七	半导体管振盪器(馮正礼譯).....	55
八	三极半导体管試驗器(駱洪釗譯).....	66
九	几种苏联半导体管的特性(駱洪釗譯).....	70

一 二极和三极半导体管 工作的物理基础*

本文里我們扼要講述二极半导体管和三极半导体管工作的物理基础。这里不以点接触型作为主要討論对象，而注重在具有比較大的接触面的电子空穴結的二极管和三极管方面。

二极半导体管和三极半导体管的作用机构，是与电流通过半导体內时所产生过程密切相关的。

半导体是固体中最常見的一类，它們的电阻率介于金属的电阻率与絕緣体的电阻率之間。半导体的最显著特征是它們的电阻率跟温度极有关系，当温度升高时，电阻率就减小。存在自然界中的半导体种类极多，但到现在为止，其中仅有少数几种已經有实际用途。

在無線电技术发展的初期，在矿石檢波器里就是应用半导体晶体如方鉛矿、紅鋅矿、碳化矽、黄鉄矿以及其他各种元素的化合物。除此之外，我們知道还有一类所謂原子半导体，这是具有半导体性質的元素：硒、矽、鍺等。鍺不仅可用以制成整流器或檢波器，而且还可制成半导体放大管——三极管。

鍺是典型的元素半导体，用它作例子很便于研究在半导体內电流通过的机构，以及整流性能与放大性能的产生，所以

* Физические основы действия кристаллических диодов и триодов, Н. Пенн, РАДИО, 1954, 8-9.

在此处我們將只研究鎘的性質。

鎘的晶体点陣的結構

在鎘的晶体里面原子是靠一种力而彼此連結着，这种力的发生可用氫分子的形成作为例子來說明。

我們知道，在普通情况之下，氫气的粒子不是單独的原子，而是由两个氫原子組成的分子。氫原子是由一个帶正电荷的原子核——質子和一个按自己的軌道繞核运行的电子（質子大約比电子重 2,000 倍）組成。假設两个氫原子彼此相距比較远，那么实际上它們之間彼此沒有影响。但是当它們相距很近时，两原子的电荷間的相互作用就相当强烈，因而电子繞核运行的狀況就会大大地改变，而两个原子結合成一个整体。

两个結合一起的原子的核与电子的一种可能排列形式如图 1-1。这样排列的、两个帶正电的原子核的相互排斥力恰与沿着公共軌道繞行的两个电子所施的吸引力相平衡。这种状态是稳定的，也就是若要把一个氫分子再分成两个單独的原子，必須花費一定的能量。

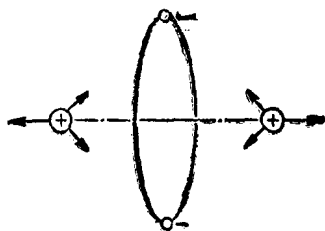


图 1-1 氫分子的構造

由此可見，在氫分子里两个原子是靠了它們本身的电子而結合在一起的。这种同类原子之間的联系，叫做电子鍵或共价鍵。

由两个电子構成的鍵是最穩固的。就理論來說，取去一个电子就会减少結合的力量，而多加进电子实际上却不能加强結合的力量。

形成鍺晶体的原子之間也有这种結合力。鍺是元素周期表里第四族的元素，所以有 4 个价电子。这元素的原子的电子壳中共有 32 个电子，但参加化学作用或导电过程的只有 4 个电子。其余的电子紧密地与原子核联系着，構成具有剩余电荷为 +4 的稳固的原子核。每个鍺原子都力求与其他四个原子構成四个双电子键——共价键。

图 1-2 表示鍺的晶体点陣的構造。在这样的晶体点陣里面每个原子周圍有四个等距离的最鄰近原子。每两个相鄰原子的最小距离是 2.41×10^{-8} 厘米。

晶体点陣中通常被原子所占据的地方叫做結点。若是所有原子都处在結点，既沒有空着的結点，也沒有多余的原子。这样的晶体叫做理想晶体。

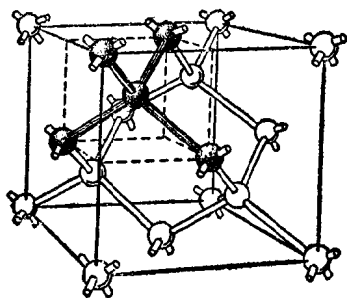


图 1-2 鍺晶体点陣的構造

理想半导体的导电性

图 1-3 表示鍺晶体点陣內共鍵結構的平面示意图。連結的力用双綫表示，这两根綫相当两个电子。每个原子周圍有四个相鄰原子，它同它們的連結是靠八个电子：它自己的四个和每个鄰居的一个。

在完全正常的或者理想的晶体里面，当溫度极低（接近 -273°C ）时，每个电子都坚固地連結着，所以它們不可能参加导电过程，也就是說理想的晶体是絕緣体。若要使晶体导电，須把某些鍵的电子拉出。

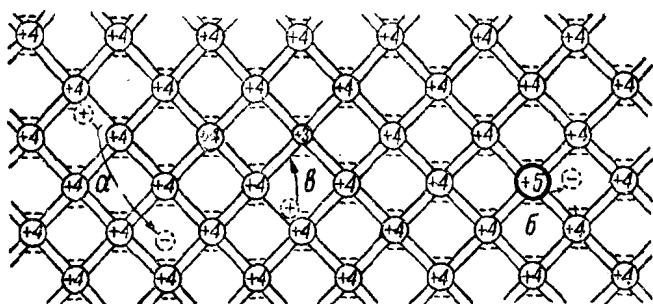


图 1-3 鍺晶体点阵中共价键的结构：a—由于价键断裂而产生空穴和电子；b—点阵中的施主原子（第五个电子常易脱落）；c—点阵中的受主原子（第四个电子常是从邻近的键中取来）。

使键断裂是可能的，譬如，由于温度的影响，当晶体加热时，原子产生振动，而当达到足够高的温度时，就会有某一个电子可能得到为克服原子的束缚力所必需的能量，这样就释放出一个电子，因而形成一个空位，这个空位可以再被电子占据（图 1-3a），这种电子的空位，一般就叫做空穴。

脱下的电子带负电荷，而形成的空穴是正的，由于负电荷脱离中性的原子，因而出现正电荷。

脱落的电子不能进入晶体的任何一个满键中，于是在热运动的影响下，它们将和气体里面的分子一样作不规则的运动。倘在晶体上加上一个电场，这些自由电子将沿作用力的方向运动而产生电流。因自由电子而出现的导电，一般叫做电子导电。

晶体中另外一种可能的电荷移动是因价键断裂形成空穴而产生的。满键中的电子（邻近有不饱和的键时）在热振动的作用下能够跳进不饱和的键，也就是占据空穴，结果就有一个空穴被填满而在另一处出现一个新的空穴，空穴从一个原子迁到另一个原子而在晶体内流动。在外加电场的作用下，空穴依照与电子

运动方向相反的方向移动(图 1-4)。这种导电通常叫做空穴导电, 这样的电流就相应地叫做空穴电流。空穴移动的方向相当于正电荷的移动方向, 因此空穴电流可以想象是正电荷的运动结果。

当理想晶体中的共价键断裂时, 同时产生相等数目的自由电子和空穴, 所以, 导电同时由两种符号的电荷来实现。这种导电通常叫做本征导电。在任何温度时, 空穴和电子总是有一定的平衡密度, 这种密度随温度的上升而增高。同时由于热运动的结果, 空穴和电子将不断地产生和消灭(复合), 而且在单位时间内, 产生的成对偶电荷的数目等于被电子占据而消灭的空穴数目。

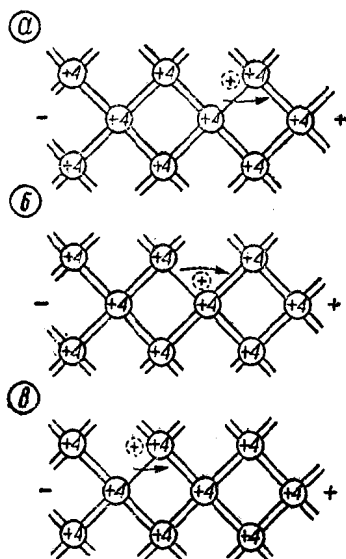


图 1-4 在电场的作用下空穴从一个原子移到另一原子的图示:
a、b、v——电子迁移的逐个阶段。为简化起见, 图中未画出负电荷。箭头指示电子移动方向。

杂质半导体的导电性

可以创造出一些条件, 使晶体中自由电子的数目与空穴的数目不相等, 也就是使其中的电流主要是由一种符号的电荷运动而产生。使某一种导电比另一种导电占优势, 已经有办法达到, 譬如在锗里面加入另外的原子, 也就是加入杂质, 就可达到这目的。

在鍺里面引起电子数目比空穴数目占优势的杂质，也就是造成基本上是电子导电的杂质，叫做施主。鍺中所加典型的施主杂质有砷、锑等等。造成空穴导电的杂质叫做受主。鍺中所加的这类杂质有镉、镓等等。

我們現在来看一看，鍺中加入杂质原子后怎样形成电子导电或空穴导电。假设鍺晶体点陣里面有某一个鍺原子被一个砷原子所代替（图 1-3 6）。砷有五个价电子，砷原子的四个价电子同四个相邻的鍺原子形成共价键，而第五个电子则是“剩余的”，不在完整結構內的。由于鍺有大的介电常数，这个电子将仍很松地連在砷原子上但很容易脱离砷原子，譬如，由于热运动（甚至在室温时）就会脱离。脱离的电子能参加导电过程，而砷的正离子则停留不动。

这样，把施主杂质加入晶体里面，就可使晶体里面的电子数目多于空穴数目，也就是基本上是电子导电。在这种情况下，电子是主要的载流子，而空穴则不是主要的。

晶体內加入的杂质原子越多，超过空穴数的电子数目也越多。而且，由于电子与空穴复合的次数增多，所以自由电子的浓度增加还会使空穴的浓度有一些减低。当平衡时，主要载流子的浓度与非主要载流子的浓度之間有如下的关系：

$$np = n_i^2,$$

即空穴浓度 p 与电子浓度 n 的乘积是一个仅与温度有关的常数。对于室温，

$$n_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ 1/厘米}^3.$$

在理想晶体中，如前面已经指出的，空穴浓度与电子浓度相等。在电子导电的鍺晶体中，电子的浓度比空穴的浓度大。譬如，倘电子的浓度是每立方厘米为 10^{16} ，则空穴浓度将等于

$6 \cdot 10^{26} \div 10^{16} = 6 \cdot 10^{10}$, 就是大約只有电子濃度的十万分之一。

在鍺晶体中加入受主的雜質, 譬如銦, 就发生空穴导电。銦原子只有三个价电子, 所以在鍺的点陣中以一个銦原子代替一个鍺原子时, 就只和三个相鄰的原子有滿鍵的联系。四个鄰近的鍺原子中有一个鍵是不滿的, 就是說有一个空穴。这个空穴很易被鄰近的鍵上脫下来的电子所占据(图 1-3 B), 也就是在鄰近的原子中又形成空穴。这时銦原子是帶負电荷的。

这样, 加入受主雜質就会使晶体中空穴的数目超过自由电子的数目, 而主要的載流子是空穴, 电子則不是主要的。所以基本的导电是空穴导电。同时, 也和电子导电的情况一样, 空穴濃度与电子濃度之間也有同样的关系。

主要是电子导电的鍺晶体叫做 n 型晶体, 而主要是空穴导电的晶体叫做 p 型晶体。

每一二极半导体管都有一个半导体的晶体和两个金属电极。依据整流触点*構造的不同, 二极管分成点接触型和結合型(图 1-5)。

在点接触型二极管內, 整流作用是发生在半导体 1 同电极——金属尖端 2 的接触点附近。另外一个电极 3 的接触面积比第一个大得多, 它仅仅作为二极管同外部电路的电的連結之用。这个电极与晶体

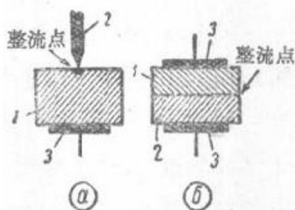


图 1-5 a—点接触型二极半导体管的構造簡图: 1—半导体晶体; 2—第一电极(金属尖端); 3—第二电极。
b—結合型二极半导体管的構造簡图: 1—晶体的电子导电区域; 2—晶体的空穴导电区; 3—电极。

* 两物体的毗連地方叫做触点。触点有能整流的和不能整流的, 不能整流的触点叫做綫性触点。

相接触处的电阻很小,而且沒有整流作用。

結合型二极管的整流作用是在两个半导体晶体 1 与 2 之間的界面处进行,这两个半导体晶体中的导电性質不同。这里的金属电极 3 仅仅作为引导电流到两个晶体部分之用,在它們的接触处沒有整流作用。

电子空穴結的形成

决定二极半导体管(或称晶体檢波器)的性質的主要元件,是金属与半导体之間或两个导电性質不同的半导体之間的**整流触点**。在两个导电性質不同的半导体之間的触点通常叫做**电子空穴結 ($p-n$ 結)**。

半导体管中整流时的物理过程,用电子空穴結为例来研究最为方便。在金属同半导体接触处的整流作用實質上是相同的。

鍺晶体中的电子空穴結可以用人工方法产生,例如,在一块薄的鍺平板的两面加上不同的杂质(施主和受主)而使杂质扩散(图1-6)。

往往也采用單面施加杂质法,使晶体的导电性質改变。制造鍺二极管和三极管时产生电子空穴結的簡便方法之一,是把一小块錮同具有电子导电的鍺晶体熔合起来,在相当高的溫度(500

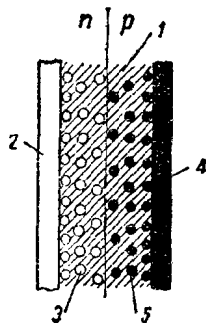


图 1—6 用两面扩散施主(左)及受主(右)方法形成电子空穴結:
1—鍺; 2—施主(例如鋨);
3—鋨原子; 4—受主(例如錮); 5—錮原子。

~550°C) 时錮便熔化而侵染在鍺的表面上,并扩散到鍺晶体中

的一定深处*。

这时,一部分的锗也熔解在熔融的铟点里面。冷却以后,在铟与晶体层之间就形成具有高度空穴导电性的薄层。同时铟还担任外电路与空穴导电层的电接触作用。

图 1-7 表示用熔合铟与锗的方法形成电子空穴结的各个阶段。接到锗平板的另一个电极与晶体接触的地方须没有整流作用。为了这个目的须采用锡或铅,这些金属同锗平板的下表面熔合后,就与锗有可靠的电接触。

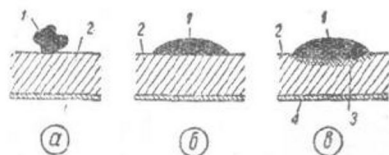


图 1-7 用合金法制成电子空穴结的各个阶段: a—熔合前; b—铟熔布在锗表面后的熔合初期; B—在 500~550°C 左右的温度保持若干时间后。1—铟; 2—*n* 型锗; 3—*p* 层。

电子空穴结中位垒的产生

每个整流触点的整流性能是由于接界处附近有内部电场存在而来,就是由于有接触电位差存在的原故。

我们以接界上电导性质突然改变的电子空穴结为例,来研究接触电场产生的原因(图 1-8a)。图 1-8b 和 B 表示晶体中杂质浓度的分布。左边部分含施主杂质,右边部分则含受主杂质,就是说左边部分具有电子导电,而右边是空穴导电。为了简便起见,假定两部分的杂质都均匀分布。

图 1-8r 和 π 表示在热平衡时,也就是在沒有外电压存在时,整个晶体中空穴与电子的浓度分配图。

* 铟的熔点是 156°C, 锗的熔点是 958°C。

我們来研究一下成立平衡状态的过程。由于电子导电区内的电子浓度比空穴导电区内来得大，所以电子力求轉移(扩散)到空穴区去。这种轉移同时也是电荷的轉移，因此空穴区就充有負电，而电子区則帶正电。这样就产生一个电场，这电场的方向，正好阻碍电子的轉移，也就是它在电子区内的电位比空穴区内的为正。电子扩散的结果，在接界处的电场便相当增高，以致最后从电子区注入空穴区的电子流便等于零。电子区同空穴区之間达成的电位差叫做**接触电位差**。

这种现象和电子管的自由栅极上或二极管的屏极上出現負电荷的情形相似。我們知道，即使在二极管的屏极与阴极之間沒有外加电压，电子还是能够从灼热的阴极飞出，飞出的电子到达屏极，結果屏极就帶負电而阴极帶正电。于是在阴极与屏极之間就产生一个电场，这电场阻碍电子从阴极飞向屏极，最后电场將增到相当高，因而全部电子都被阻滯下来，于

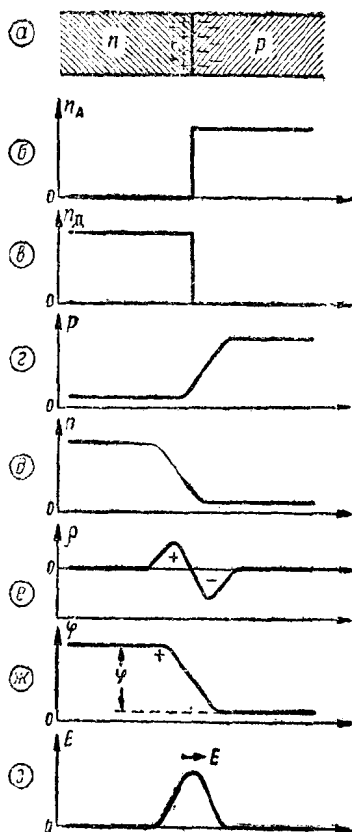


图 1-8 受主 n_A 、施主 n_D 、空穴 p 和电子 n 的浓度分布、体电荷密度 ρ 、电位 φ 和电场强度 E 的分布。

是电子从阴极到屏极的自发转移便停止。

但是，在电子空穴结中达到平衡时并不表示没有电子的运动。由于热运动的结果，将有等量的电子通过境界面而向两方面移动。同时，能从电子区注入空穴区的，将只是那些具有能够克服反向电场的能量的电子，或者换一种说法，能够克服位垒的电子。

位垒的高度决定于两个区域之间接触电位差的大小。存在空穴区中的少量自由电子，能够向相反的方向移动，因此，在平衡状态中，扩散电流正好被在接触电场作用下发生的传导电流抵销。

处在平衡状态的电子空穴结有些象大气层。在平衡情况下，没有空气的垂直运动（垂直风），这是由于向上扩散的气流与在地球引力场中向下沉降的气流互相抵销的结果*。

但空气的密度随高度的增加而减小，即随空气粒子的位能的增高而减小。相似地半导体里面电子的密度也随电子位能的增加而减小。

图 1-9 表示在平衡状态中空穴区内同电子区内电子云的示意图。在没有外加电压时（图 1-96），能量超过位垒高度的电子的密度在两个区域内是相等的。

以上关于在平衡状态时电子的动态的种种解释，对于空穴的动态也是适用的。在空穴区内空穴的密度比电子区来得大，所以，在趋向平衡的过程中空穴力求流进电子区。因为空穴的电荷是正确的，所以由于空穴的扩散而产生的电场方向也和由于

* 假如重力不存在，地球上的大气层将散失，但假如没有热运动，也就没有扩散现象，则空气分子将全部下沉到地球的表面上。

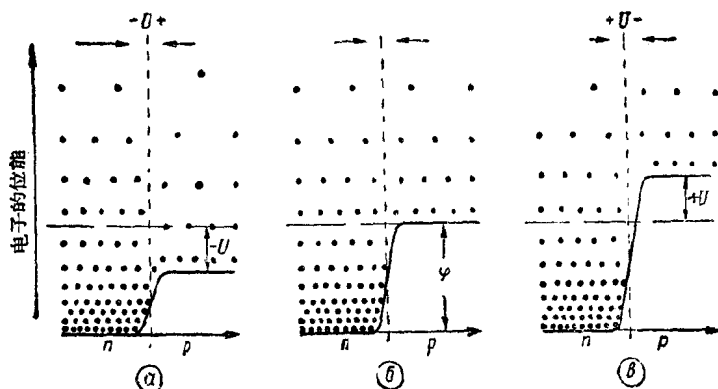


图 1—9 位壘和电子空穴結中的电子云：a—在正向电压时(n 区接負， p 区接正)；b—無电压时；c—在反向电压时。黑点及其分布情况表示电子的密度；箭头及其长度表示越过界面的电子流的方向和密度； φ —位壘的高度。

电子从电子区注入空穴区而产生的电场方向相同。在达到平衡时，向一个方向的空穴扩散电流，适与另一方向的空穴导电电流相抵銷。

由于平衡的结果而形成的电荷，分布在电子空穴結的界面附近，在电子区是未被抵銷的施主正电荷，而在空穴区则是未被抵銷的受主負电荷。

相当于上述情形的体电荷密度分布状况和电场强度的分布状况如图 1-8e 和 3 所示。

这样一来，在界面附近的电子区内缺乏电子，而在空穴区内則相应地缺乏空穴。所以在载流子密度很低的接界点便有很高的电阻。这个高电阻区域通常叫做**阻挡层**。

电子空穴結的整流作用机構

现在我们来研究，在加上外部电位差时，通过电子空穴結的

电流的性质问题。

上面已经讲过，在没有加上外电压时从电子区注入空穴区的电子流正好被反向的电子流抵销。同样地，空穴电流也两相对销。

假定在电子空穴结上加上某一个电位差，并且以空穴区接电源的负端而以电子区接正端。于是阻挡层内的电场便增强，因而两区域内电子的位能差也增大，也就是位垒增高。此时在电子区内更加缺乏电子，而在空穴区内则更加缺乏空穴。这样就使体电荷增加而阻挡层扩大，因而阻挡层的电阻增大。

随着位垒的增高，在电子区内具有足够克服位垒的能量的电子就减少，也就是减少了注入空穴区去的电子流（图 1-9 B）。实际上只要有十分之几伏的阻流电压加上时，从电子区进入空穴区去的电子流就停止了。另一方面，从空穴区注入电子区去的电子流实际上仍和以前一样。事实上，在边界层内的电场还能加速所有从空穴区注入电子区的电子，所以这个电流只取决于空穴区内电子的密度和产生电子的速度以及复合速度，而与外加电压的关系实际上很小。

对于越过位垒的空穴电流来说，情况也相似。按照上述的极性接上外电位差时，对于在空穴区内的空穴的位垒也增高。结果从空穴区注入电子区的空穴电流也减小；但从电子区注入空穴区的空穴电流实际上却没有变动。所以当外加电压增高时，结果的空穴电流也同电子流一样趋于饱和。

所以，饱和的总电流将从空穴区注入电子区的电子电流和从电子区注入空穴区的空穴电流组成，也就是说，将取决于两个区域内的非主要载流子的浓度。

若以极性与上述相反的电位差加到电子空穴结上，那末位