

半导体物理基础

许 江

一百多年以前,人们就把周围的材料按照导电能力的大小分为导体(金属)、半导体、绝缘体三类。金属的室温电阻率一般在 10^{-4} 到 10^{-6} 欧姆-厘米;绝缘体的电阻率通常大于 10^{10} 欧姆-厘米;而半导体的电阻率则介于金属和绝缘体之间,在 10^{-4} 到 10^{10} 欧姆-厘米的宽广范围之内,并且,其电导率随温度升高能指数式地增大。但是,实际上使半导体成为物质中的一个特殊类别,并在电子技术上得到广泛应用的主要特点是:温度、光照、强电场等多种因素的作用,能大大改变半导体的导电性能,并且用掺入微量杂质的方法,可以显著地改变和控制半导体的电导率和导电类型。

半导体材料的种类很多。元素半导体有锗、硅、灰锡、硒等,它们在元素周期表中的位置如表 1 所示。从表 1 可以看出,它们是位于金属和绝缘体之间的一群元素。在这群半导体元素的左面和下面,是具有良好导电性质的金属,而这些元素的右面和上面,则是在固态状况下为绝缘体的元素。半导体元素在周期表中的这种位置并不是偶然的,下面我们将会看到,固体的电学性质,主要取决于原子的外层电子结构,而元素在周期表中的位置,正好反映了原子核周围电子按壳层模型排列和分布的情况。但必须指出,元素的电学性质不仅由元素在周期表中的位置决定,也跟构成固体时原子之间的化学键特性有关。如白锡具有金属特性,而当温度低于 13°C 时转变成灰锡,就变成了半导体。

表 1 具有半导体性质的元素在周期表中的位置

周 期	II	III	IV	V	VI	VII
II	Be	B	C	N	O	
III		Al	Si	P	S	Cl
IV		Ga	Ge	As	Se	Br
V		In	Sn	Sb	Te	I
VI			Pb	Bi	Po	At

化合物半导体主要是周期表中三族元素和五族元素构成的化合物,简称 III-V 族化合物(如砷化镓、磷化镓、磷化铟等)及 II-VI 族、IV-VI 族化合物等。此外,还有非晶态的玻璃半导体、有机半导体等。当前,在电子技术中应用得最广泛的半导体材料有硅、锗、砷化镓等。

自从本世纪三十年代初有了量子力学的工具以来,人们对固体中电子运动的导电现象进行了深入的研究和分析,建立了固体的能带理论,对金属、半导体、绝缘体的电学和光学行为给予了统一的、定量的解释。而半导体技术的进展,特别是高纯度、高完整性的单晶材料的获得,使固体理论在实验的基础上得到了进一步的发展。

一、固体中能带的形成

在固体晶体中,原子是周期性地、有规则地排列起来的,构成所谓“晶体点阵”。在固体中的电子,其运动的特点与自由电子或孤立原子中的电子有很大的不同。对固体点阵中电子的行为要进行深入的讨论和获得定量的结果,必须使用量子力学中相当复杂的数学工具。单用经典物理的某些直观概念,不可能把物理本质解释清楚。但是,我们如果应用关于原子结构的一般概念,再把量子力学推导出来的某些理论结果结合进去,也可以不太严格,但却正确地了解固体中能带是如何形成的。

对于一个孤立的原子来说,围绕着原子核运转的电子处于一些不连续的“轨道”上,这些轨道又组成了若干电子壳层。所谓“价电子”是处于最外壳层、与原子核结合最弱的电子。量子力学证明,轨道电子的能量只能取不连续的、一定的、所谓“量子化的数值”,因此通常用“能级”这一概念来代表某一轨道上电子能量的大小。这些能级之间被宽阔的禁区所隔开。另外,根据量子力学中的“泡利不相容原理”,在上述每一个能级上最多只能容纳两个自旋相反的电子。原子核周围的电子按照能级的高低,从低到高,逐步占据轨道能级,构成了电子壳层。图 1 是一个自由原子中电子的能级分布图,最外层的价电子一般处于基态的能级上,也可以受激发后处于激发态的能级上。

当大量的原子相互靠拢,并最后周期性地排列成晶体结构时,整个固体可以看成是由无数原子所构成的巨大分子。当原子互相靠拢时,相互作用就开始影响电子的能量状态:原子靠得越近,相互作用就越大。 N 个相同的孤立原子一共有 N 个相同的某一能级;当原子互相靠拢形成固体时,该能级便发生变动,并分裂成一个能量的带。这个能带是由 N 个能量互不相同、而又相距很近

的能级所组成的。由于固体中的能带宽度一般仅仅是几个电子伏,而能带中能级的数目却等于固体中的原子数(如在1厘米³体积的固体中有 10^{22} — 10^{23} 个原子),因此,能带中两个相邻能级的差约为 10^{-22} — 10^{-23} 电子伏,即能带中能级的密度是很大的。根据这个情况,我们可以认为,能带中的能级实际上是连续的。同时,当原子互相靠拢形成固体时,由于相互作用的增强,电子将发生“共有化”,即将可能在整个固体中运动。“共有化”了的电子,将按泡利原理,在能带中根据能量的高低进行重新排列,首先把所有位置较低的能级全部占满。

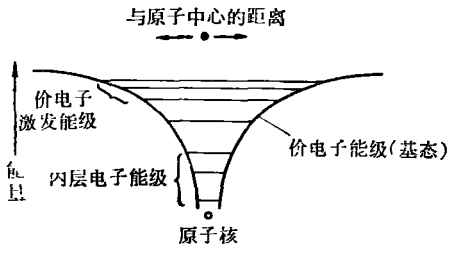


图1 自由原子中电子的能级分布

固体中能带形成的实际情况是比较复杂的,因为当原子靠拢形成晶体时,由于相互作用的影响,能级不

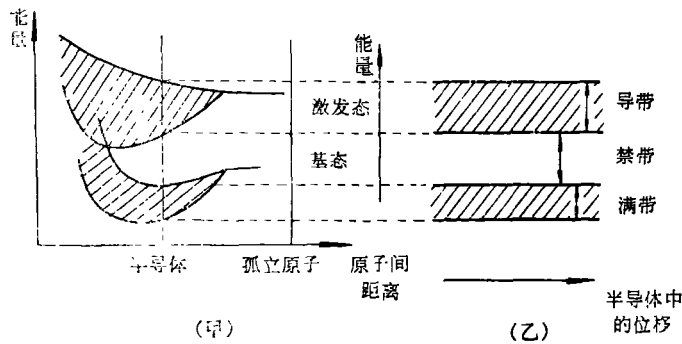


图2 当原子靠拢形成晶体时,能带形成的示意图

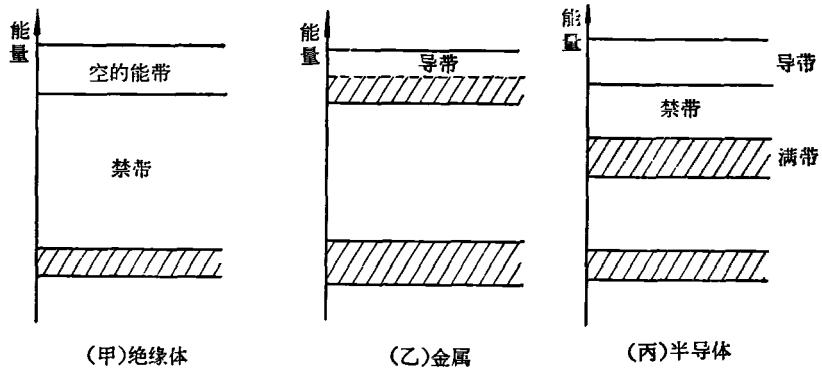


图3 绝缘体、金属、半导体的能带图(阴影线表示充满电子)

但分裂成能带,也要发生移动,并可能彼此交叠和相混。因此能带和自由原子的能级有时并不存在简单的对应关系,能带中是否充满电子,也不完全都可据原来原子各层轨道是否充满电子就能断定。为了说明问题,我们将举图2甲所示的非常简化的模型为例,并重点说明一下与价电子能级所对应的能带的情况,因为这种能带对固体的导电机构起主要作用。

图2中,相应于价电子基态和激发态的能级,在原子逐渐靠拢时发生分裂和移动,阴影线表示分裂后能量所许可采取的数值范围。在图2乙中,画出了相应于价电子的基态和激发态,在原子靠得很拢的时候,分别形成了两个允许带,它们之间的能量禁区被称之为禁带。在上述模型中,相应于原来价电子基态(其中充满电子)的允许能带是填满电子的,被称之为价带或满带,而相应于原来价电子激发态(其中没有电子)的允许带是空的,被称之为导带。这样的模型虽然是简化的,但它的能带结构却代表了实际半导体能带结构的主要特点。绝缘体的能带结构基本上和半导体的能带结构一致,它们的唯一差别仅仅在于禁带宽度大小不同。一般,绝缘体的禁带宽度很大,超过3—4电子伏以上。对于金属来说,其特点为价电子处在未被填满(常常是半满)的能带,这种能带也可称为导带。如金属钠,原来孤立原子的外壳层($3s$ 能级)是半满的;在原子组成晶体时, $3s$ 能级所过渡成的能带也是半满的。此外,如金属镁,由于形成能带时上下能带发生交叠,也造成了不满的能带。绝缘体、金属、半导体的能带图如图3所示。

二、半导体导电机构的特点

建立了能带的概念,我们再回过来看看,怎样用能带结构的差别,来解释金属、半导体、绝缘体导电性能的差别,并用能

带的概念来分析一下半导体导电机构的特点。

首先必须指出,按照能带理论,只有未被电子占满的能带中,电子在外电场作用下才可以产生电流。相反,一个充满了电子的能带,在外电场作用下不可能产生电流。关于这一点,我们可以定性地描述其物理意义:大家知道,当外电场对物体作用时,带电粒子的定向运动就形成了电流。当不存在外加电场时,带电粒子的运动是杂乱无章的,即向各个方向运动的几率是均匀分布的。在外电场作用下,带电粒子就在电场方向进行加速运动(电子带负电荷,运动方向和电场方向相反),并在两次碰撞之间的“自由程”上积累能量。从这个物理图象可以知道,电流的产生是和外电场对电子在自由程上的加速过程相联系的,这个过程反映在能带图上,就是电子沿着能带中相邻能级发生跃迁。按照泡利原理,由于每一个原子能级上最多只能容纳两个电子,所以当电场使电子发生跃迁时,所到达的能级必须是空的,或者是没有完全占满的。对于一个所有状态都被电子占满的能带,即使有外电场,电子也不起导电作用,所以不能在晶体中产生电流。除非由于热激发、光激发等外界的作用,使电子获得能量,从“满带”激发到空的能带——导带中去,在导带中出现电子,才能起导电作用。由于热激发的导带电子数目和温度有指数关系,即

$$n \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

式中 n 是导带中的电子数, E_g 是禁带宽度, k 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度。由于电导率的大小跟这些导带中电子的数目成正比,所以电导率随温度的变化也是指数式的,这正是半导体导电的主要特征。

对于绝缘体来说,其能带结构与半导体是相同的,但由于禁带比较宽,室温下激发到空的能带上去的电子数极少,因此绝缘体在室温下的电导率是很难测量出来的。

对于金属来说,由于导带上半部没有被电子占满,因此在电场作用下,能由于导带电子的运动而形成电流。当然,在热和光激发的作用下,有些电子也可能跃迁到位置更高的能带上去,但是这种受激电子的浓度与导带中价电子的浓度($\sim 10^{23}$ 厘米 $^{-3}$)相比总是很小的,可以忽略不计。这就是为什么金属作为一个良导体,其载流子(能起导电作用的带电粒子)浓度很大,和与温度无关的原因。

下面,我们分析一下半导体导电机构的特点。

在半导体中,不但要考虑带有负电荷的电子导电,还必须引入带有正电荷的“空穴”导电的概念。当半导体中满带电子受到激发,跃迁到导带中去时,不但在导带中产生了导电电子,造成了导电的条件,而且由于使满带中不再全部充满电子,在满带中也造成了导电的条件。这两种情形,虽然总的来说,导电机构都是由于

电子的运动,但是性质却有很大的不同。在前一种情形,导带中的少量电子在电场作用下运动,是负电荷的运动;而在后一种情形,电子差不多充满满带的所有能级,只在满带顶部留下少量的“空的能级”,这种满带中的空能级称之为“空穴”。空穴在空间的分布意味着带负电荷的电子的缺少,因此它相当于带有正电荷,其电荷量跟电子的电荷量相等。在电场作用下,空穴在空间也能发生运动,空穴的运动方向和电子的运动方向正好相反。这两种载流子对电流的贡献是相加的,所产生的总电流是电子电流和空穴电流两部分之和。如果在半导体中,主要依靠热激发的作用使电子从满带跃迁到导带,在这种情形下,所产生的导带电子和满带空穴浓度相等,这种激发叫做本征激发,这种由相等数量的电子和空穴混合导电的机构叫做本征导电。但在某些情况下,电子和空穴的浓度可以相差很多(这种情况,下面还要详细分析)。如果导带电子数目大大超过空穴的数目,导带电子对导电起主要作用,这种导电机构叫做电子型导电(简称 n 型导电)。反之,如果半导体中空穴数目大大超过导带电子的数目,空穴导电为主时,这时就叫做空穴型导电(简称 p 型导电)。在这里值得注意的是,尽管空穴的导电作用归根到底是满带电子运动的结果,但空穴这个概念的引入是量子力学的重要结果之一,它反映了电子在晶体的周期性电场中运动的特殊性。空穴导电和导带电子导电有很大的不同,在半导体中有一些实验现象,只有采用带正电荷的空穴的概念才能解释得通。事实上,人们也正是通过这些实验来鉴别导电机构的类型的。例如,电子和空穴的迁移率(即单位电场强度下电子和空穴所获得的平均速度)是不相等的,一般,电子迁移率大于空穴的迁移率。同时,如有一块半导体样品,仅在电场 E 作用下,其中空穴和电子的运动方向是相反的,它们产生的电流方向相同(以致无法用电流方向来鉴别 n 型导电和 p 型导电),但若同时在与电场垂直的方向加一磁场 H 时,带正电荷的空穴和带负电荷的电子在磁场中受力方向相同,偏转方向相同,并在样品横向分别产生正电荷和负电荷的积累,形成电位差 ΔV (即所谓“霍尔电动势”)(图4)。对 n 型导电和 p 型导电来说,在两者情况下 ΔV 的方向正好相反,因此用“霍尔电

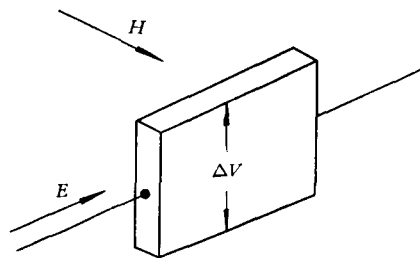


图4 用霍尔电动势 ΔV 的方向鉴别导电类型

动势”的方向可以鉴别 p 型导电还是 n 型导电。此外，在样品局部位置加热，用检查热端与冷端之间电场的方向的方法(即所谓“热探针法”)也可以用来鉴别 p 型导电和 n 型导电。一些半导体的禁带宽度、电子和空穴迁移率如表 2 所示。

表 2 一些半导体的禁带宽度和电子及空穴迁移率的值

半导体	300°K 的禁带宽 (电子伏)	300°K 的迁移率 (厘米 ² /伏·秒)	
		电 子	空 穴
Ge	0.803	3900	1900
Si	1.12	1500	600
GaAs	1.43	8500	400
GaP	2.24	110	75
InSb	0.16	78000	750
InP	1.29	4600	150
CdS	2.42	300	50
ZnS	3.6	165	
PbS	0.41	600	700

上面已经提到,半导体中存在着本征导电、p 型导电、n 型导电三种导电机构。导电机构的改变和控制对半导体的器件应用具有很重要的意义。对于一个完全纯净、完整的半导体晶体来说,其导电类型只能是本征导电(这是理想化的情形)。但是,如果掺入微量的杂质,将使半导体的电阻率产生非常巨大的变化,并且能控制半导体的导电类型,举例来说,纯硅的电阻率约为 214,000 欧姆-厘米;如果掺入百万分之一的硼,硅的电阻率就能减小到 0.4 欧姆-厘米,变化达六个数量级之多。一般来说,对于位于元素周期表中第四族的锗、硅半导体来说,掺入五族元素(磷、砷、锑等)作为杂质时,导电类型变为 n 型;如掺入三族元素(硼、铝、镓、铟等)作为杂质时,导电类型能变为 p 型。由杂质控制导电类型的半导体叫做杂质半导体,其中表现 n 型和 p 型导电的分别叫做 n 型和 p 型半导体。

用能带模型来看掺杂对导电机构发生影响的原因,是由于杂质在半导体的电子能级结构中引入了一些新的、性质不同的能级。这些杂质的能级位于禁带之中。如果掺杂浓度不是太大,分布在半导体中的杂质离子彼此相距很远,则在这种杂质能级上的电子并不是共有化了的,而只在杂质离子的电场范围内运动。这种能级称为“局部能级”。杂质能级的产生可举例用具体的价键模型说明:半导体硅是四价的,硅晶体中每个硅原子用四个价电子与相邻的四个硅原子共用,形成“共价键”。掺入五价的杂质磷时,每个代替硅原子的磷原子能提供一个多余电子,该电子未参加“共价键”,只需要很少能量就能使它脱离束缚,对导电发生贡献。该电子在束缚于磷原子上时,能量状态相当于在禁带中引入了一个杂质能级。当该电子被激发后,

才能在晶体中比较自由地运动,起导电作用,这相当于该电子从杂质能级激发到导带中去,成了导带电子,才能对导电有所贡献(图 5)。能给出对导电有贡献的电子的杂质称为施主;施主提供的杂质能级叫做施主能级。类似地,在硅中掺入三价的硼时,每个代替硅原子位置的硼原子周围就能产生一个局部的空能级,该空能级能接受价带的电子,使价带出现空穴,起导电作用。能接受电子的杂质叫做受主;受主提供的空能级叫做受主能级(图 5)。

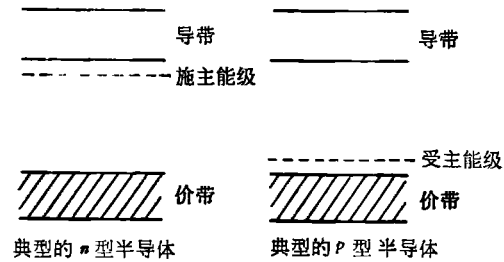


图 5 半导体的杂质能级图
左边是典型的 n 型半导体的能带,
右边是典型的 p 型半导体的能带

我们在这里要注意到,当存在杂质时,杂质电离所产生的载流子(电子或空穴)不是成对的,因此,半导体在掺杂后,导带电子数和满带空穴数就不一定相等了。例如,在 n 型半导体中,导带中电子的浓度一般要比本征激发时的载流子浓度高得多(n 型半导体中的电子叫做“多数载流子”),而空穴的浓度却因增加了空穴与导带电子复合的机会而要减小得远比本征载流子浓度要小。(n 型半导体中的空穴叫做“少数载流子”)。类似地,p 型半导体中的空穴是多数载流子,电子则是少数载流子。可以证明,不管导电类型如何,导带电子浓度 n 和满带空穴浓度 p 的乘积在一定温度下是常数,等于该温度下的本征载流子浓度 n_i 的平方,即 $n \cdot p = n_i^2$ 。同时,在一般情形下,符合实际使用要求的半导体材料中,往往不止存在一种杂质,而是同时存在施主及受主杂质。它们有的是在工艺上故意掺入的杂质,有的是在材料提纯时没有除干净的残留杂质。在这种情形下,由于受主能级比施主能级低,施主能级上的电子很容易首先填充受主能级上的空能级(图 6),而使两种杂质同时电离。这个过程叫做“补偿”。显然,在发

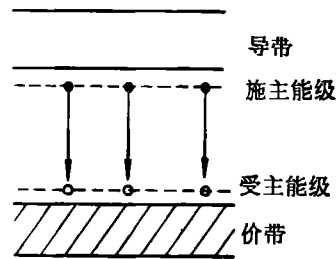


图 6 杂质的补偿作用

生补偿作用时，施主杂质和受主杂质的作用可以互相抵消。此时，半导体的导电类型主要取决于浓度大的那类杂质。一般说来，当存在严重补偿时，由于在半导体中存在较多的电离杂质中心，对载流子的运动能发生碰撞作用，因此载流子的迁移率将要降低。但是，另一方面我们也可以有意识地利用杂质的补偿作用，根据工艺上的需要，向半导体中扩散比原有某类杂质浓度更高的另一类杂质，来改变原有的导电类型。特别是，如果在n型半导体的局部区域中掺入更高浓度的p型杂质，就可以使半导体的局部区域呈p型导电，而未更高掺杂的部分仍呈n型导电。这时，在p型区和n型区交界的地方就能产生半导体器件中应用最为广泛的p-n结。

三、p-n 结

p-n 结的主要特点，是在半导体中发生了p区和n区的直接接触。在n区导带电子浓度很大，满带空穴浓度很小；在p区则满带空穴浓度很大，导带电子浓度很小。所以，在p-n结界面两侧电子和空穴浓度存在着很大的差别，或者说存在着很大的浓度梯度。设想当p区和n区发生接触时，电子和空穴将分别从浓度大处向浓度小的方向扩散，这与气体分子在存在浓度梯度时，由于分子热运动发生扩散而均匀分布的现象是类似的。不过，由于电子和空穴是“带电荷的气体粒子”，因此当空穴从p区扩散到n区（与n区的电子复合）时，将在交界面附近的p区留下带负电荷的受主离子；同样，当电子从n区扩散到p区（与p区的空穴复合）时，将在交界面附近的n区留下带正电荷的施主离子。这些杂质的正、负离子形成了所谓“空间电荷”。这样，在p-n结交界面两侧就如图7（甲）所示构成了空间电荷区。在空间电荷区中存在着从正电荷区指向负电荷区、即从n区指向p区的电场，这种电场将使空间电荷区中的电子和空穴发生运动，其方向与

扩散运动的方向相反。我们把电场对载流子的这种作用叫做漂移作用。举例来说，在空间电荷区中，扩散作用使空穴从p区向n区运动，而漂移作用却使空穴从n区向p区运动，两者的方向正好是相反的。随着扩散过界面的电子和空穴数目的增加，空间电荷区变厚，空间电荷逐渐增多，漂移作用就逐渐增强，最后，漂移作用增强到和扩散作用相抵，p-n结就处于平衡状态，在空间电荷区内建立稳定的“内建电场”。根据电学上的原理，由于空间电荷区存在着电场，因此该区内各点的电势是不相等的，电子在各点的电势能也不相等。内建电场的方向是从n区指向p区，所以n区电势比p区高。对带负电荷的电子来说，其电势能在n区比在p区低（电势能=电子电荷×电势）。因此，当电子从n区向p区移动时，相当于要爬一座电势能的高坡，该高坡就叫做p-n结的“势垒”图7（乙）。因为在空间电荷区存在着势垒，因此这个区域又叫做“势垒区”。

用能带图来分析p-n结的整流作用比较方便。在图5中，我们画出了n型半导体和p型半导体的能带图。当n区和p区直接接触形成p-n结时，如上所述，在势垒区各点的电子电势能存在着差别。能带图上的位置高低本来就反映电子能量的高低，因此当形成势垒时，势垒区的能带将发生如图7（丙）所示的弯曲，其变化与电子的电势能曲线一样（图8）。在这里，我们注意到，由于空穴带正电荷，因此，在同一势垒区，空穴电势能的变化正好与电子相反，反映在能带图上，位置越低的空穴能量越高，因此，如图8所示，当空穴从p区向n区运动时，将受到势垒阻挡。

下面，我们进一步来看一下，具有p-n结的半导体两端加上外加电压时会发生什么情况。首先必须考虑到，p-n结势垒区中，载流子很少，是高阻的区域（又叫“阻挡层”），所以外加电压主要加在p-n结势垒区上。当在p-n结上加上正向电压时，即加上p区为正、n区为负的电压时，外电场的方向与内建电场的方向正好相反，它削弱了势垒区中的电场，使势垒区高度降低，厚度变薄。这时，由于破坏了原有的漂移作用和扩散作用之间的平衡，扩散倾向占优势，n区的电子将向p区方向流动，p区的空穴将向n区方向流动，对正向电流发生贡献。正向电压越大，势垒高度就越低（甚至被拉平），因此正向电流将随电压迅速上升。反过来，当在p-n结上加反向电压时，即加上p区为负、n区为正的电压时，外电场的方向与内建电场的方向一致，这就加强了势垒区内的电场强度、势垒高度增高，势垒区厚度变宽。这时，p区的电子到达p-n结势垒区后就可能被占优势的漂移电场拉到n区中去（或n区的空穴被电场拉向p区），对反向电流发生贡献。由于在这种情况下，对电流的贡献来自浓度很小的少数载流子（p区的电子，n区的空穴），所以反向电流很小。这就是p-n整流作用的基本原理。

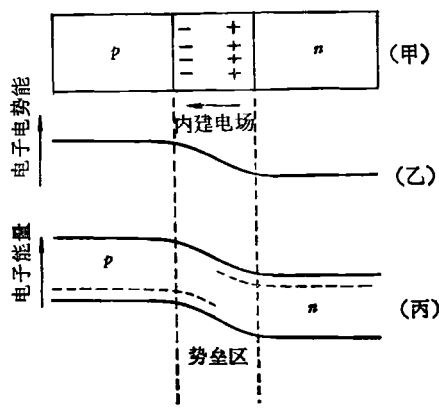


图7 p-n 结

四、半导体器件及应用

人们把金属和绝缘体作为重要的电工材料加以利用,已有很长一段历史了。但半导体在电子技术上的广泛应用和对半导体导电机构的认识,却是最近几十年的事情。半导体硒和氧化亚铜的整流器是在1924年以后才以工业规模进行制造的,方铅矿的无线电检波器虽然使用得比较早,但是使用方法一直处于比较粗糙的状态,对半导体导电机构的深入了解是在1930年量子力学发现以后才开始的。最近30年来,半导体的理论研究和器件应用有了飞速的发展,特别是以p-n结为基础发明的各种二极管、三极管,跟电子管相比,具有体积小、重量轻、省电、寿命长等优点,在电子技术中得到了广泛的应用。六十年代新出现的集成电路,把许多二极管、三极管、电阻、电容做在一片(或几片)晶体或陶瓷基片上,在超小型化及高可靠性方面取得了新的突破,这对电子计算机、空间研究、军事通讯等方面的发展具有非常重大的意义。此外,根据半导体在光照、温度、电磁场及压力等物理因素作用下的电学和光学效应,现在还制造出了许多具有特殊用途的电子元件。下面我们结合半导体中的一些基本现象,举例说明半导体的应用。

1. 利用均匀半导体材料做的器件

热敏电阻: 是利用改变温度能控制半导体电阻率的现象制成的。热敏电阻的阻值随温度升高而减小。电阻随温度变化的灵敏度由激发导电电子和空穴所需的能量——激活能来决定(在本征激发情况,激活能就是半导体的禁带宽度;在杂质激发情况,激活能就是施主能级到导带底或受主能级到价带顶的距离)。热敏电阻可以用来测量温度和控制温度等。

光敏电阻: 是利用光照能改变和控制半导体电

阻率的现象制成的。当光照射在半导体表面上时,如果光子能量($E = \frac{hc}{\lambda}$,其中 h 为普朗克常数, c 为光

速, λ 为光波波长)大于电子或空穴的激活能时,光子就可能被吸收,并把电子(或空穴)激发到导带(或满带)中去,使半导体电导率增大,电阻值减小。光敏电阻所适用的波长范围由激活能的大小决定。因此,对于不同波长的光,半导体必须采用不同的成份(禁带宽度不同)、或掺以不同杂质(杂质能级位置不同),才能设法得到较大的灵敏度。现在,光敏电阻适用的范围可达到波长很大的远红外区。光敏电阻可用来制造红外探测器及用于自动控制等。

霍尔器件: 是利用半导体在电磁场同时作用下产生霍尔电动势的现象制成的。霍尔器件可用来测量电场或磁场强度等。

2. 利用一个或多个p-n结做的器件

二极管: 利用p-n结的整流作用,可做整流管,当外加电压方向相反时,电阻值可相差达数千倍。二极管还有检波、稳压、混频、开关等特殊功能的应用。

三极管放大器: 利用p-n-p或n-p-n结构的三极管,能构成对电压或电流讯号进行放大作用的放大器。

光电池和光电二极管: 当光照在p-n结的势垒区上时,n区的光生空穴就被内建电场扫入p区,p区的光生电子被电场扫入n区,使p-n结产生一正向电压。如果把p-n结与外回路接通,回路中将产生电流。这种器件可用来制造太阳能电池或用于光度测量、自动控制等。

此外,应用半导体与金属(或绝缘体)直接接触的界面效应等原理,已制造出一些很有用的半导体器件。由于种类很多,这里就不作介绍了。

(上接第45页)

件。这样组成的系统,可以不断扩充改进,而不受初始条件的限制。

每个单位从无到有的第一台电子计算机,对于破除迷信、解放思想,对于普及有关知识和培养干部,能起到重要作用。培养干部的一个重要方面,是造就一批通晓物理研究要求的软件设计人员。今后物理工作者的基本训练中应当包括必要的程序设计和与计算机“接口”的知识。然而为了发展物理研究专用的软件系统,例如基本粒子径迹分析或同时控制多台中小型仪器设备的分时操作系统,则必须靠专业软件设计人员与物理工作者结合。在计算机科学这样蓬勃发展的领域中,专业人员训练总是跟不上实际要求的,必然要从

其它领域吸收一些人员,而在实践中学习和创造,就是主要的培养途径。

物理实验室的组织和建设,反映着整个工业的发展水平。一百多年前无产阶级的革命导师马克思就曾经指出:“生产方式的革命,在手工制造业,是以劳动为出发点;在大工业,是以劳动手段为出发点。”¹⁾工业生产和科学研究中大量使用电子计算机的实践,再次证明着马克思的科学论断。在毛主席革命路线指引下的我国物理工作者,将不断提高自己的政治思想和科学技术水平,在科学实验这个伟大革命运动中,为人类作出较大的贡献。

1) 马克思,《资本论》第一卷,人民出版社,(1963),394。