

无线电爱好者讲座

下册

广播出版社

中央电视台电视教育节目用书

中央电视台主办

无线电爱好者讲座

下 册

封承显 陈鹏飞 高志英

广 播 出 版 社

无线电爱好者讲座

下 册

封承显 陈鹏飞 高志英

*

广播出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开 14印张 300(千)字

1983年2月第1版 1983年2月第1次印刷

印数: 1-460,000 册

统一书号: 15236.002

定价: 1.30元

目 录

第一篇 晶体二极管和晶体三极管	(1)
第一讲 半导体.....	(3)
第二讲 PN 结的特性	(12)
第三讲 晶体二极管.....	(25)
第四讲 晶体三极管.....	(33)
第五讲 晶体三极管的特性曲线和主要参数.....	(43)
第二篇 晶体管低频放大器	(63)
第一讲 单管低频放大器的工作原理.....	(64)
第二讲 晶体管放大器的偏置电路.....	(77)
第三讲 放大器的级间耦合.....	(87)
第四讲 放大器中的负反馈.....	(106)
第五讲 单管甲类功率放大器.....	(122)
第六讲 变压器耦合推挽功率放大器.....	(137)
第七讲 变压器耦合推挽放大器的制作.....	(149)
第八讲 OTL 互补对称推挽功率放大器的工作 原理.....	(166)
第九讲 OTL 低频放大器的制作	(174)
第三篇 无线电广播	(191)
第一讲 LC 回路中的电磁振荡	(193)
第二讲 LC 晶体管振荡器	(198)
第三讲 简单信号发生器的制作.....	(206)

第四讲	无线电广播·····	(214)
第五讲	RC 晶体管振荡器 ·····	(230)
第六讲	高频信号发生器的制作·····	(236)
第四篇	超外差式收音机 ·····	(247)
第一讲	超外差式收音机概述·····	(248)
第二讲	调谐输入电路·····	(267)
第三讲	变频器·····	(295)
第四讲	中频放大器·····	(330)
第五讲	检波及自动增益控制电路·····	(359)
第六讲	超外差式收音机的安装·····	(379)
第七讲	超外差式收音机的调试·····	(407)
附录一	晶体管电路图常用符号说明 ·····	(419)
附录二	常用晶体二极管参数 ·····	(422)
附录三	常用晶体三极管参数 ·····	(431)

第一篇

晶体二极管和晶体三极管

晶体二极管和三极管，都是用半导体材料制成的电子器件，目前采用的半导体材料都是晶体，所以称为晶体二极管和晶体三极管，也叫做半导体二极管和半导体三极管。

半导体材料在无线电电子技术中的应用已经有很长的时间了。早在本世纪初，人们实现了远距离无线电通讯后，用天然半导体材料制成的晶体(矿石)检波器就在无线电通讯设备中获得了普遍的应用。但由于当时条件所限，没有形成系统的半导体理论，所以半导体技术发展不快。

后来，由于具有放大作用的电子管以及较完善的电真空理论的出现，人们制成了适应各种需要的电子管。从二十年代到五十年代，在无线电设备中成了电子管的一统天下。电子管被称为无线电设备的核心。

四十年代末期，人们在电子管放大作用的启发下，成功地研制出了具有放大能力的半导体器件——晶体三极管；并出现了较完整的固体物理学、半导体物理学等基础理论。晶体管又以体积小、重量轻、耗电省、寿命长等显著优点引起了人们的重视。三十多年来，半导体技术得到了飞速的发展，并使无线电电子学进入了一个崭新的发展阶段。目前除了在大功率和超高频等方面仍需使用电子管外，在其它方面几乎

都可以用晶体管取代电子管。随着集成电路的出现和发展，电子计算机等复杂的电子设备的应用与普及已成为现实，电子技术的应用已经进入各个领域。目前正向大规模集成电路时代迈进。

我们以前学习制做简单收音机和稳压电源时，已经接触过晶体二极管和晶体三极管，并对晶体管的性能已有一定的了解。但由于晶体管在现代电子设备中占有特殊的重要地位，为了较系统地掌握无线电技术知识，我们必须首先学习晶体管的构造特点、工作原理和它的性能参数，从而为进一步学习晶体管电路打下基础。本篇主要讲述半导体的导电特性及晶体管的工作原理、性能和主要参数及其测量方法。

第一讲 半 导 体

一、什么叫半导体

世界是由物质组成的，按照物质的导电性能，可以把各种单质和化合物分成三大类，即：导体、半导体和绝缘体。那么，怎样判定某种能够导电的物质是导体还是半导体呢？这要从物体的电阻谈起。

我们知道，物体的电阻 R 与它的长度 l 成正比，与它的横截面积 S 成反比，此外还与物质的导电性能有关，用公式表示为

$$R = \rho \frac{l (\text{厘米})}{S (\text{平方厘米})} (\text{欧姆}).$$

式中 ρ 是表示物质导电性质的物理量，叫做电阻率。在一定温度下，长 1 厘米，横截面积为 1 平方厘米的某种物质两相对截面间的电阻值，即为该物质的电阻率，它的单位是欧姆·厘米。

表 1-1 是一些常用材料的电阻率。

银、铜、铝等材料，电阻率很小，善于导电，叫做导体。一般把电阻率 ρ 小于 10^{-3} 欧姆·厘米的物质称为导体。

塑料、陶瓷、橡胶等材料的电阻率很大，难以导电，叫做绝缘体。一般绝缘体的电阻率 ρ 大于 10^9 欧姆·厘米。

锗(Ge)、硅(Si)、硒(Se)、砷化镓(GaAs) 等材料的电阻率介于导体和绝缘体之间，导电性能居中，所以叫做半导

表 1-1

常用的几种材料在 20°C 时的电阻率

材 料			电阻率 [欧姆·厘米]
导 体	纯 金 属	银	1.6×10^{-8}
		铜	1.7×10^{-8}
		铝	2.9×10^{-8}
		钨	5.3×10^{-8}
		铁	1.0×10^{-7}
体	合 金	锰 铜	4.4×10^{-5}
		康 铜	5.0×10^{-5}
		镍 铬 合金	1.0×10^{-4}
		镍 铝 合金	1.4×10^{-4}
半 导 体		锗	$*4.7 \times 10^1$
		硅	$*2.14 \times 10^8$
		砷化镓	$*3.7 \times 10^8$
绝 缘 体		赛璐珞	10^{10}
		电 木	$10^{12} \sim 10^{16}$
		素烧瓷	3×10^{14}
		火 漆	8×10^{15}
		橡 胶	$10^{15} \sim 10^{18}$

* 温度为 26.85 °C 时的电阻率

体。一般把电阻率 ρ 介于 $10^{-3} \sim 10^9$ 欧姆·厘米 之间的物质称为半导体。

在自然界一百零几种元素中，绝大多数属于金属导体，属于绝缘体的有十几种，而半导体只有锗、硅、硒等几种。但是有很多种无机化合物和有机化合物都是半导体。

半导体与导体和绝缘体相比，还有一些特殊的导电性质。

半导体的导电性能随温度的升高而显著增强，随温度的降低而显著减弱，这种特性叫做半导体的热敏性。例如，锗、

硅等半导体材料，每上升 1°C ，电阻率 ρ 下降 $3\sim 6\%$ ；温度上升 100°C ，电阻率 ρ 下降 50 倍，它的温度系数是负的。而银、铜、铝、钨、铁等金属材料，温度上升 1°C ，电阻率 ρ 上升 $0.4\sim 0.5\%$ ，它是正温度系数。利用半导体的热敏特性可以制成自动控制用的热敏元件，如热敏电阻等。

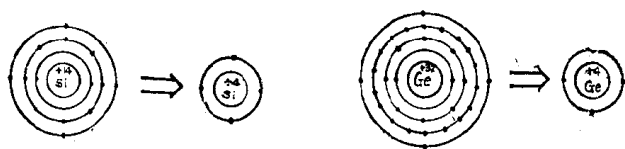
我们知道金属导体受光照射时，电阻率基本不变。而半导体受光照射时，电阻率降低，导电能力大大增强。半导体的这种特性叫做光敏性。利用半导体的这种特性可以制成光电器件，如光电二极管、光电三极管和光敏电阻等。

半导体为什么会具有不同于导体和绝缘体的导电特性呢？其根本原因是由于它内部的特殊结构所决定的。

二、半导体的导电原理

我们知道，电荷的定向移动形成电流。所谓电荷的运动也就是带电（或者说运载电荷的）粒子的运动，例如金属中自由电子的运动，电解液中正、负离子的运动等。我们把运载电荷的粒子叫做载流子。金属导体善于导电是因为它内部存在着大量载流子的缘故；绝缘体难于导电是因为载流子极少的缘故；半导体之所以具有特殊的导电性能，是因为它有特殊导电机构的缘故。

单晶硅和单晶锗是典型的半导体材料。图 1-1 是硅和锗的原子结构示意图。硅的原子序数是 14，它的原子核外有 14 个电子，分布在三层轨道上，由内向外，每层轨道上分别有 2、8、4 个电子。锗的原子序数是 32，它的原子核外有 32 个电子，分布在四层轨道上，由内向外每层轨道上分别有 2、8、18、4 个电子。硅和锗的共同点是最外层都有四个电子。最外层的电子叫做价电子，物质的化学和电学性质就是由价电子决定的。



(甲)

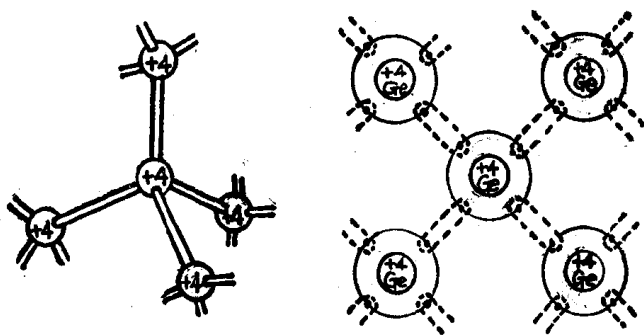
(乙)

图 1-1 (甲) 硅原子结构图及其简化图

(乙) 锗原子结构图及其简化图

硅和锗都是四价的元素，当组成晶体结构时，两个相邻的原子各拿出一个价电子组成共价键结构。组成共价键的电子绕两个原子运动，从而把两个原子联结在一起。每一个原子与相邻的四个原子组成共价键结构，从而达到每个原子外层有八个电子的稳定状态。图 1-2(甲) 是四价元素组成共价键结构的示意图，在硅和锗的单晶半导体中，原子间等距排列，间距约为 2.35×10^{-4} 微米。图 1-2(乙) 是单晶锗结构的平面示意图。

在这样的晶体结构里，当温度为绝对零度时 (-273.15



(甲) 立体示意图

(乙) 平面示意图

图 1-2 四价元素组成共价键结构的示意图

°C)，价电子都被束缚在共价键结构中，因而没有能自由移动的带电粒子，所以它呈现绝缘体的性质。

如果温度升高，价电子的动能就增加，其中一些获得足够能量的价电子，就会克服原子核对它的束缚，成为自由电子。自由电子在电场力的作用下，发生逆电场方向的移动，形成自由电子导电。高能价电子离开共价键的位置后，就在原处留下了一个空位，附近的价电子容易前来填补空位，这样就在另一个共价键上出现新的空位。在电场力的作用下，空位将沿电场方向运动，其效果与带有和电子电量相等的正电荷的粒子运动一样。为了与自由电子导电相区别，我们把价电子电离后留下的空位叫做空穴。空穴在电场力的作用下发生定向移动，叫做空穴导电。空穴导电不同于自由电子导电，其实质是价电子导电。

在纯净的单晶半导体中，自由电子和空穴是成对出现的，我们叫它“电子——空穴对”，如图 1-3 所示。

半导体在外加电压的作用下，电路中所形成的电流是由

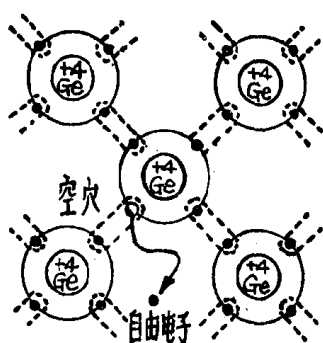


图 1-3 本征激发产生的电子——空穴对

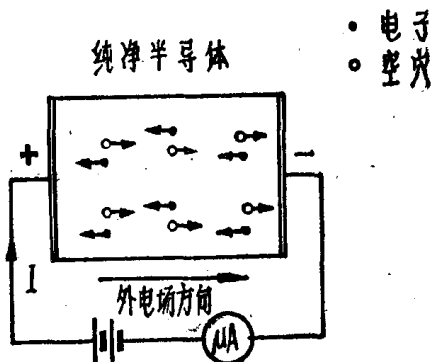


图 1-4 半导体中的电流等于电子流和空穴流之和

“电子流”和“空穴流”两部分组成的，如图 1-4 所示。金属导体是靠电子载流子导电，而半导体是靠电子和空穴两种载流子来导电。这是半导体与金属导体相比在导电机理上的一大差异。在纯净的半导体中，一般自由电子和空穴这两种载流子都很少，所以半导体导电能力很弱。

当外界温度升高或有光线照射到半导体上时，半导体吸收了热能或光能，被束缚着的价电子获得较多的能量，就会有比较多的电子摆脱原子核的束缚，转变为自由电子，与此同时，空穴的数目也就相应增加。随着载流子的数目增加，半导体的导电能力便大为增强。这就是半导体呈现热敏性和光敏性的内在原因。

在导体中，外层电子已全部电离形成了自由电子，加热或光照并不能增加它内部的载流子数目，所以它的导电能力不会增强。另外，当温度上升时，原子的振动加剧，定向移动的自由电子与原子核的碰撞机会将增加，所以电阻率随温度的上升而升高，呈现正温度系数。

在一定的外界条件下，半导体中经常有一些高能价电子电离，产生新的电子——空穴对；同时也有一些自由电子与空穴相遇，复合掉一些电子——空穴对。当电子——空穴对的数目增多时，复合的机会也将增加。在一定条件下，单位时间内产生的电子——空穴对的数目等于复合的数目时，半导体内的电子——空穴对的总数就不再发生变化。这时电子——空穴对不断产生，又不断复合，达到了动态平衡。

以上讨论的是理想的纯净的单晶半导体（又叫本征半导体）的导电原理。实际的半导体，其纯度虽然已达到了 99.999999% 以上，但其内部仍然存在着数目很大的杂质原

子；另外，也不可能是理想的等距结构，因而不可避免地存在着一定的缺陷和位错，所以半导体的实际导电情况要比本征半导体复杂得多。

在纯净的半导体中掺入微量的杂质，就可以剧烈的改变它的导电性能，例如，在单晶硅中掺入百万分之一的硼，电阻率将由 2.14×10^5 欧姆·厘米降到 0.4 欧姆·厘米，即降到原来的五十三万分之一。而在纯净的金属中，即使掺入千分之一的杂质，电阻率的变化也是极微小的，这是半导体最重要的特性。人们根据这一特性，在纯净半导体中掺入不同种类和数量的杂质，制成了不同性质、不同用途的半导体材料。用这些材料，人们又制成了各种晶体二极管、三极管和集成电路等各种半导体器件。

三、N 型半导体和 P 型半导体

掺入纯净半导体中的杂质元素有两类，因而形成两种类型的半导体。一类是掺入少量的五价元素砷(As)、锑(Sb)或磷(P)等，形成 N 型半导体；另一类是掺入少量的三价元素铟(In)、硼(B)或铝(Al)等，形成 P 型半导体。

在纯净的半导体中掺入五价元素，组成共价键结构时(见图 1-5)，多余一个电子，这是由于五价元素有五个价电子。多余的电子受原子核的束缚很弱，在常温下几乎全部电离，因而半导体中自由电子的数目增加很多，这种半导体主要靠自由电子导电，所以也叫做电子导电半导体(或 N 型半导体)。N 是英语 Negative(负)的字头，意思是负电荷载流子导电半导体。在 N 型半导体中，除了存在因掺入五价元素而形成的大量自由电子外，还有本征半导体受激而产生的电子——空穴对，因而，在 N 型半导体中除了有数量很多的自由电子

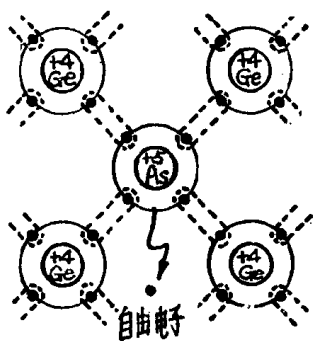


图 1-5 N 型半导体示意图

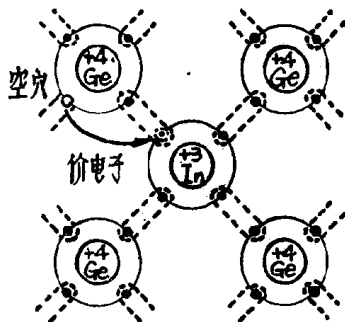


图 1-6 P 型半导体示意图

外，还有少数的空穴。我们把N型半导体中的自由电子叫做多数载流子，把空穴叫做少数载流子。

由于本征半导体材料和待掺入的五价元素都是电中性的，所以掺杂后形成N型半导体晶体仍为电中性的。五价元素多余的价电子电离时除产生一个自由电子外，杂质原子同时形成一个正离子。正离子不能移动，不参与导电。

在纯净的半导体中掺入少量的三价元素，形成共价键结构时(见图 1-6)，由于三价元素外层只有三个电子，在共价键结构中缺少一个价电子，因而出现在一个空位，我们叫它束缚空位。在常温下，相邻的锗(或硅)的价电子会来补缺，从而在锗的共价键结构中出现一个空穴，所以会使其空穴数目增加。在产生空穴的同时，三价杂质原子变成了负离子，这些负离子不能移动，不参与导电。这类半导体主要靠空穴导电，因而叫做空穴导电半导体，或叫P型半导体。P是Positive(正)的字头，表示带正电荷性质的空穴导电半导体。在P型半导体中空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

以上讨论的是理想的本征半导体掺入单一杂质时的情况。实际的半导体不可能那样纯净，杂质也不可能是单一元素，常常是既有P型杂质，又有N型杂质，哪种杂质的浓度大就由那种杂质决定半导体的导电类型，例如，在锗中掺入五价的锑就形成了N型锗，若再掺入三价的镉，当镉的浓度超过锑的浓度时，N型锗就变成了P型锗了。半导体随掺入两种杂质浓度的大小而变换导电类型的性质，为我们制作半导体器件提供了方便条件。

第二讲 PN 结的特性

如果采取某种措施，使一块半导体的一部分形成 P 型半导体，另一部分形成 N 型半导体，那么在 P 型区和 N 型区的交界面处就会形成一个具有特殊导电性能的薄层，如图 1-7 所示，我们把这个薄层叫做 PN 结。

PN 结具有单向导电的特性。晶体二极管就是由一个 PN 结组成的半导体器件。在图 1-8 所示的实验中，当 P 端接电



图 1-7 PN 结

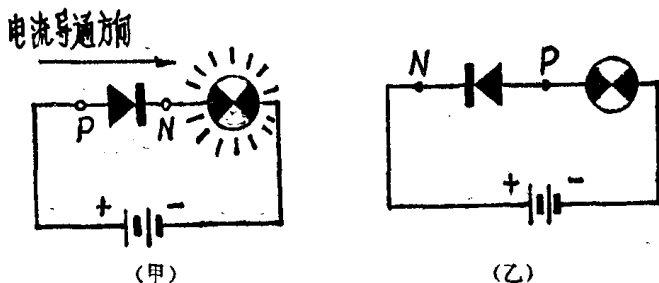


图 1-8 PN 结单向导电实验

源正极，N端接电源负极时(如图 1-8 甲所示)，灯泡就亮，说明 PN 结导通。电流导通方向如图中箭头所示；当 P 端接电源负极，N端接电源正极时(如图 1-8 乙所示)，灯泡不