

大功率可控硅元件

原理与设计

北京市技术交流站可控硅元件短训班



人民教育出版社

大功率可控硅元件

原理与设计

清华大学工业自动化系 北京变压器厂
北京整流器厂 北京椿树整流器厂
首都钢铁公司总计控室 北京冶金仪表厂
冶金部建筑研究院半导体室等编写。

人民邮电出版社

1975年·北京

内 容 简 介

本书内容着重总结文化大革命以来北京市有关生产单位制造大功率可控硅元件的经验；针对生产中所提出的如何提高元件的电压水平、改进控制极特性、增大电流容量及承受电流过载能力和改善动态特性等问题进行了元件结构参数的讨论；并综合考虑了大功率可控硅元件的设计和某些工艺问题。为了便于工人阅读，结合各章补充了一些有关半导体的基本知识。书中还介绍了元件的一些特性参数和中间物理参数的测试技术、列出了必要的计算举例、数据和图表，以供实际工作参考。

本书适用于具有初中文化程度的从事可控硅元件制造的工人阅读，也可供大专院校有关专业的工农兵学员和工厂技术人员参考。

大功率可控硅元件

原理与设计

北京市技术交流站
大功率可控硅元件短训班

*

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民教育出版社印刷厂印装

*

1975年8月第1版 1976年3月第1次印刷

书号 13012·014 定价 1.30 元

前 言

毛主席亲自发动和领导的无产阶级文化大革命和批林批孔运动，深刻地批判了刘少奇、林彪的修正主义路线，推动了我国科学技术的蓬勃发展。广大工农兵群众和科技人员正沿着毛主席指引的方向，以阶级斗争为纲，积极开展科学研究和技术革新，使我国科学技术不断迈向新的水平，各项先进技术被广泛应用，可控硅技术就是其中之一。可控硅元件是自动化中不可少的一种基础元件，它具有体积小，重量轻，效率高，寿命长，容易维修等优点，现在已在我国广泛制造和使用。随着自动化程度的不断提高，对可控硅元件也不断提出增大功率的要求，有关工厂对大功率可控硅元件的技术人员需要也日益增多和日益迫切。

为了适应有关工厂生产大功率可控硅元件的需要，北京市技术交流站组织清华大学工业自动化系、北京变压器厂、北京整流器厂、北京椿树整流器厂、首都钢铁公司总计控室、北京朝阳可控硅元件厂、北京东城可控硅元件厂、北京重型电机厂、冶金部建筑研究院半导体室、铁道科学研究院半导体室等单位一起成立了“三结合”的教学组，举办了“大功率可控硅元件短训班”，编写了本教材。本书就是在短训班教材的基础上几经修改而成。在修改过程中，为了满足广大读者需要，结合原教材各章内容补充了一些有关半导体的基本知识，并把教材中的基本内容和较深的参考内容分别用大小字排印，以便各类学校使用和广大工人自学。

本书着重总结了无产阶级文化大革命以来，北京地区有关工厂制造大功率可控硅元件的实践经验，介绍了有关的基本理论，并针对当前生产中所提出的关于如何提高元件的电压水平、改进控制极特性、增大电流容量、加强承受过载能力和改善动态特

性等问题进行了元件参数的讨论，还综合考虑了大功率可控硅元件的设计和某些工艺问题。

我们希望这本书的出版，有助于普通高等学校和厂办七·二一大学有关专业或短训班的学员参考，有利于广大工人掌握科学技术知识，以促进劳动人民知识化和加强工人阶级在科技领域中的领导作用，并有利于开展工业学大庆、农业学大寨的群众运动，为实现四届人大提出来的社会主义建设的宏伟目标、巩固无产阶级专政，作出贡献。

由于我们马列主义、毛泽东思想水平不高，实践经验有限，加上时间比较急促，书中难免有粗糙和错误之处，希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 可控硅元件的电压	1
1-1 半导体的导电机构和 PN 结的形成.....	2
1-2 PN 结的反向电压和硅单晶材料的关系.....	25
1-3 电流放大系数和可控硅元件的电压.....	52
1-4 可控硅元件长、短基区的设计估算.....	80
1-5 可控硅元件的高温特性.....	105
1-6 磨角与保护.....	115
第二章 可控硅元件的控制极参数	126
2-1 可控硅元件控制极触发导通的原理.....	126
2-2 控制极电压和电流的估算.....	130
第三章 可控硅元件的通态特性	144
3-1 硅整流元件的正向工作情况.....	144
3-2 可控硅元件的导通状态.....	155
3-3 通态压降的计算及其讨论.....	165
3-4 可控硅元件的电流容量和电流过载能力.....	186
第四章 可控硅元件的动态特性	201
4-1 可控硅元件的开通过程.....	202
4-2 阳极-阴极间加有迅速上升的正向电压 引起可控硅元件的导通.....	216
4-3 可控硅元件承受电流上升率的能力.....	227
4-4 可控硅元件的关断过程.....	236
第五章 可控硅元件诸参数与特性的相互关系及综合考虑	245
5-1 参数与特性的相互关系.....	246
5-2 大功率可控硅元件主要参数的设计考虑.....	253

5-3	大功率可控硅元件最大转换功率的设计考虑	264
第六章	关于可控硅元件制造工艺的一些问题	277
6-1	元件制造工艺	277
6-2	制造可控硅元件的挖槽工艺	322
6-3	硅单晶的不均匀性对元件性能的影响	326
6-4	工艺检测方法	330
第七章	关于可控硅元件参数测试中的几个问题	350
7-1	静态参数的测量	350
7-2	动态参数的测量	360
7-3	可控硅元件一些物理参数的测量	367
附表 1	自然对数表	386
附表 2	误差函数表	389
附表 3	硅的物理特性	392
附表 4	常用物理常数表	392
附表 5	常用单位换算表	392
附表 6	本书采用的物理量和参数符号表	393
附 图	最佳长基区参数组合	
(a)	$\tau_p = 4\mu s$ $L_p = 70.5\mu$	
(b)	$\tau_p = 6\mu s$ $L_p = 86.4\mu$	
(c)	$\tau_p = 8\mu s$ $L_p = 99.7\mu$	
(d)	$\tau_p = 10\mu s$ $L_p = 112\mu$	
(e)	$\tau_p = 12\mu s$ $L_p = 122\mu$	
(f)	$\tau_p = 14\mu s$ $L_p = 132\mu$	
(g)	$\tau_p = 16\mu s$ $L_p = 141\mu$	

第一章 可控硅元件的电压

可控硅元件是一种大功率的 PNP 四层三端半导体器件, 它已经成为国民经济各部门所必不可少的一种自动化基础元件。在我国, 可控硅的制造和应用正在得到迅速的发展, 为了实现第四届全国人民代表大会提出的要在本世纪内把我国建设成为社会主义的现代化强国的宏伟目标, 为了向社会主义建设提供更多高质量的可控硅元件, 我们要以阶级斗争为纲, 认真地总结可控硅的生产经验, “将丰富的感觉材料加以去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的改造制作工夫, 造成概念和理论的系统”, 以促进可控硅元件生产水平的进一步提高, 更好地为我国农业、工业、国防和科学技术的现代化服务。

可控硅有两种稳定的工作状态——阻断状态(简称断态)和导通状态(简称通态), 正是因为在一一定的条件下, 可控硅能够从一种稳态转变为另一种稳态, 才使它在轧机、电力机车、电解、各种逆变装置以及高压直流输电等方面得到广泛的应用。毛主席教导我们: “外因是变化的条件, 内因是变化的根据, 外因通过内因而起作用。”为了分析可控元件内部矛盾的特点和在外界条件作用下产生的变化规律, 我们先分别地研究可控硅处于各种稳态的运转情况, 以及它们的相互转化, 再对之进行综合考虑。为了加深理解这些规律, 我们引用了 500 安 1500 伏元件作为典型的设计方案进行讨论。对于其他电压、电流等级的元件设计, 可参考这个具体设计方案进行。

可控硅所以能承受一定的电压, 这是由它的内部独特的规律

所决定的。为此,在这一章里,我们首先学习半导体材料的导电机构和PN结形成的基本原理,在这个基础上我们深入分析可控硅承受正反向阻断电压能力和结构参数的关系,以及影响电压水平的各种因素和解决的方法。

1-1 半导体的导电机构和PN结的形成

一、导体、半导体和绝缘体

导体、半导体和绝缘体的区别,可以用材料的电阻率来衡量,电阻率越小,说明它的导电能力越强。一般金属导体的电阻率在 10^{-4} 欧姆-厘米以下,绝缘体的电阻率在 10^9 欧姆-厘米以上,而半导体的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9$ 欧姆-厘米之间。

金属导体中的电流是由导体内自由电子的运动形成的,导体的电阻率低,导电能力强,说明导体内有大量的自由电子存在。我们用铝来说明这一问题。

铝的原子结构如图 1-1 所示。在它的核外有 13 个带负电荷的电子绕核运转,第一层 2 个,第二层 8 个,第三层 3 个。电子带负电荷,原子核带有与核外 13 个电子等量但符号相反的正电荷,原子核吸引电子,使它不能离开原子

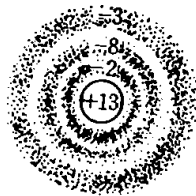


图 1-1 铝的原子结构图

核而自由运动,只能在核附近绕核旋转。原子核对最内层的电子引力最大,对最外层引力较小。原子最外层满 8 个电子时就成为稳定结构,任何原子都有失去和得到一些电子使最外层成为稳定结构的特点。因此当铝的原子相互作用形成晶格结构时,它的最外层电子很容易脱离原来的原子,而在晶格中间自由运动,即形成所谓“自由电子”,因而导电性能良好(见图 1-2)。对绝缘体和纯净半

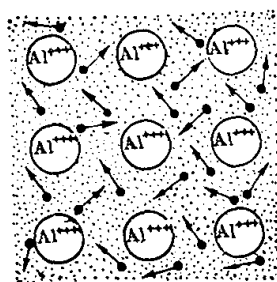
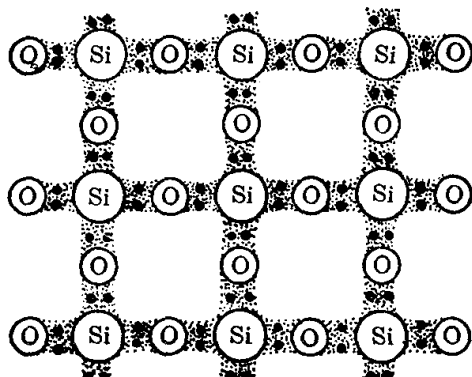
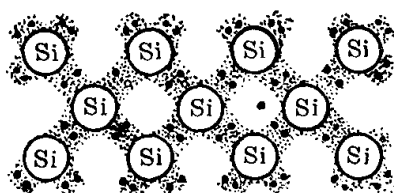


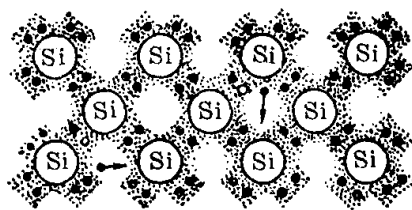
图 1-2 铝的导电性



(a) 绝缘体



(b) 半导体



(c) 半导体中电子的激发

图 1-3 绝缘体纯净半导体晶格结构示意图

导体来说外层电子不易脱离原来的原子,当组成晶格结构时,它的最外层电子好象“胶”一样用来把各个原子“粘”在一起(这种作用在化学中叫做“键合”),因而就没有什么多余电子参与导电过程了,所以呈现出很大的电阻率[见图 1-3(a)(b)]。

绝缘体和纯净半导体的最外层电子虽然都被“胶粘”住了,但是它们的牢固程度是不一样的,对于绝缘体例如二氧化硅,其最外层电子被“胶粘”得很牢固,用一般光或热的激发办法都不足以使最外层电子获得足够的能量离开键合位置而自由运动,见图 1-3(a)。相对来说半导体最外层电子“胶粘”的牢固程度就差多了,在室温的条件下,最外层电子中的一部分就由于热运动而具有足够的能量,离开键合位置而成为“自由电子”[见图 1-3(c)]。这种“自由电子”在电场作用下作定向运动形成电子电流。与此同时,

原有的键合位置由于少了一个电子而形成了空位。这个空位的存在又会使附近处于键合位置中的电子被拉到这个键合位置中来,使附近的键合位置少了一个电子,而形成了一个空位,也叫做空穴。在电场作用下,这种空位的转移也能形成电流,我们称之为空穴电流。形象地说,我们可以认为有电子和空穴两种载流子参与半导体的导电机构。它和金属的导电有着根本的区别。在室温条件下,对于纯净硅材料而言,由于热运动产生的自由电子和空穴数毕竟不多,它的电阻率是 2.3×10^5 欧姆-厘米。但当温度高达 120°C 时,原来处于键合位置中的电子热运动的能量就很大,因此有数量更多的电子离开了原有的键合位置而形成能够在晶格中自由运动的电子和空穴。这时测得的电阻率约为 600 欧姆-厘米。随着温度的升高,半导体的导电性能越来越好。它和金属正好相反,后者,温度越高,电阻率越大。可见半导体在导电机构方面和金属相比有着显著不同的特点。

二、本征硅、N型硅和P型硅

从以上讨论中可见,对纯净半导体来说,由于热运动形成一个自由电子,就必然伴随产生一个空穴,自由电子和空穴总是成对产生的。一般用每立方厘米中电子或空穴的数目(即载流子浓度)来表征它的多少。例如在温度 27°C (绝对温度 300K)下:

$$n_i = p_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

n_i 、 p_i 分别是本征硅的自由电子和空穴浓度。

n_i (或 p_i) 和温度的关系如图 1-4 所示。

半导体不仅在导电能力的数量上与导体和绝缘体不同,而更重要的是它在导电机理上与导体、绝缘体有本质的区别。很重要的一方面就是对掺杂的反应。例如对本征硅掺入某些特定杂质时,其导电性能会大大改变。

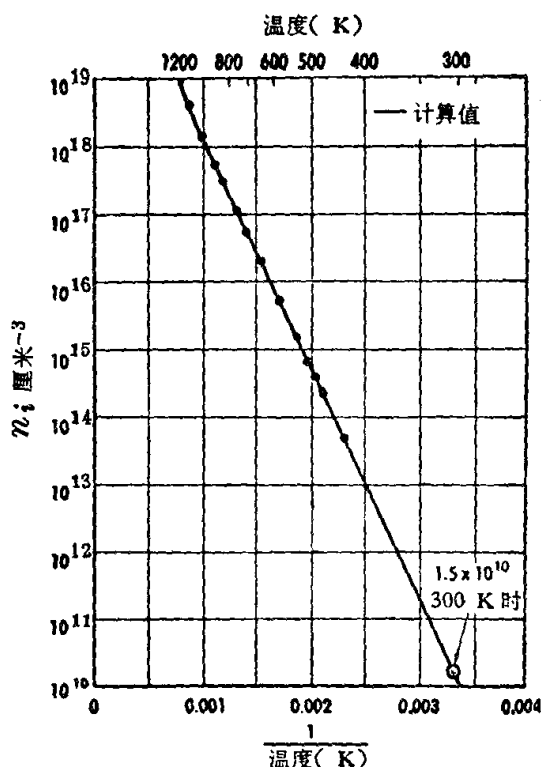


图 1-4 n_i 和温度的关系

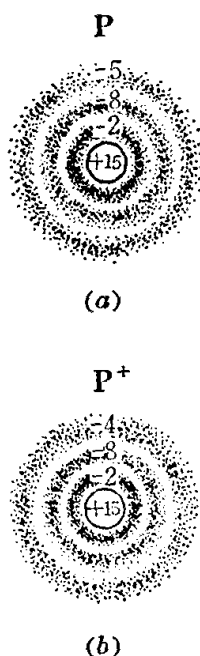


图 1-5(a) 磷原子结构简图
(b) 磷离子结构简图

我们先看掺入五价元素磷时的情况。

磷原子的核外有 15 个带负电的电子绕核运转, 原子核带有与核外 15 个电子等量但符号相反的正电荷, 整个原子呈电中性状态, 磷原子的最外层有 5 个电子[图 1-5(a)]。当磷原子失去外层一个电子后就形成磷离子, 它带一个单位正电荷。磷离子通常用符号 P^+ 表示[参看图 1-5(b)]。磷原子的最外层电子中的 4 个用来和硅原子“胶粘”在一起形成稳定的晶格结构, 而剩下的一个电子只要得到极小的能量就能脱离原子的作用而成为自由的电子, 这个自由电子可以参与导电(见图 1-6)。掺磷越多, 晶体中能够自由运动的电子也越多, 导电性能就越好。例如: 本征硅掺入了 10^{16} 原子/厘米³ 的磷以后, 电阻率就从 2.3×10^5 欧姆-厘米降低到 0.6 欧姆-厘米(参见表 1-1)。值得注意的是, 这时由于热运动, 硅原子

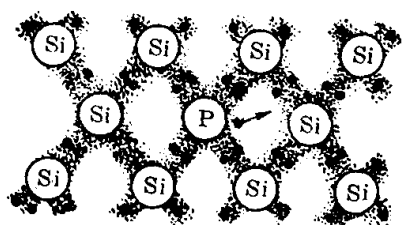


图 1-6 N 型硅晶体结构示意图

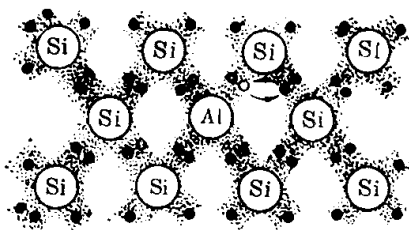


图 1-7 P 型硅晶体结构示意图

中仍然有部分电子脱离键合位置, 它们连同伴随而生的空穴都参与导电, 但由于磷原子提供了多余的自由电子(它不提供空穴), 所以参与导电的自由电子数量比空穴大得多, 这种情况下的半导体我们称之为电子型半导体或N型半导体。在N型半导体中, 电子是多数载流子(简称多子), 空穴是少数载流子(简称少子)。一般情况下掺入的磷原子数比室温条件下本征硅的激发电子空穴对(1.5×10^{10} 厘米 $^{-3}$)大得多, 所以可以认为掺磷硅中电子的浓度近似等于掺入的磷原子的浓度, 即

$$n_n = N_D$$

其中: n_n 为电子浓度, N_D 为磷原子浓度。

除了磷以外, 最外层电子数为五价的砷、锑等元素掺入硅以后, 也可以起到同样的作用, 它们都能形成N型半导体。这类杂质也叫做施主杂质, 即能提供自由电子的杂质。 N_D 为施主杂质浓度。

我们再来讨论一下硼掺入硅中的情况。硼的最外层电子是3个, 因此当硼和硅一起形成晶格结构时, 它只能有3个电子和硅键合在一起(如图 1-7 所示)。和图 1-3(b) 的纯净硅单晶结构比较, 这种键合状态缺少一个电子, 即形成一个空穴。因而附近处于键合状态中的电子就很容易跑到这个位置上而形成了空穴的运动。一般情况下掺硼的原子数有多少, 产生的空穴数就有多少。我们把这种半导体叫作空穴型半导体或P型半导体。其中空穴是多子,

电子是少数。不难看出凡最外层有 3 个电子的元素都可以掺入硅中形成 P 型半导体, 如铝、镓、铟等。这种类型的杂质叫受主杂质, 即能提供空穴的杂质。 N_A 为受主杂质浓度。同样可以认为在室温下掺硼硅中空穴的浓度近似等于掺入的硼原子的浓度即

$$p_p = N_A$$

p_p 为空穴浓度。

在讨论本征硅的导电机构时, 我们指出, 由于热运动激发产生了电子空穴对。电子和空穴也会复合而消失, 放出相应的能量, 这种能量被周围的电子所吸收, 脱离原来的键合位置, 而成了新的电子空穴对。因此在室温下电子空穴对平均总保持在 1.5×10^{10} 厘米⁻³ 的数量。由于复合而消失的自由电子数或空穴数, 必然和自由电子数和空穴数的乘积成正比, 因为随着自由电子数和空穴数的增加, 复合的几率也增加了。因此掺磷以后, 由于自由电子数增加很多, 所以空穴数反倒比同样温度下本征硅的空穴数减少了。经过实践和理论分析表明, 无论是 N 型半导体还是 P 型半导体, 多子浓度和少子浓度之间有以下关系:

$$n_n p_n = n_i p_i = n_i^2 \quad (1-1)$$

或 $p_p n_p = n_i^2$

式中 n_n —— N 型半导体中的电子浓度

p_n —— N 型半导体中的空穴浓度

p_p —— P 型半导体中的空穴浓度

n_p —— P 型半导体中的电子浓度

例: 如已知掺入硅中铝原子的浓度是 10^{16} 厘米⁻³, 求室温下的电子浓度?

解: 铝原子掺入硅中形成 10^{16} 厘米⁻³ 的空穴浓度。室温下本征硅电子浓度为 1.5×10^{10} 厘米⁻³。

所以电子浓度为

$$n_p = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2.25 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$$

可见电子浓度比空穴浓度小得多。

表 1-1 300K 时硅单晶材料掺有不同浓度杂质时的电阻率

电 阻 率 掺杂浓度	类 型 N 型	P 型
本 征 硅	$2.3 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$	$2.3 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$
$10^{10} [\text{cm}^{-3}]$	50	180
10^{15}	4.5	12
10^{16}	0.6	1.8
10^{17}	0.1	0.3
10^{18}	2.5×10^{-2}	6.2×10^{-2}
10^{19}	6×10^{-3}	1.2×10^{-2}

三、杂质浓度和电阻率的关系

在实际生产中，经常遇到已知半导体的杂质浓度 N 求电阻率 ρ ，或已知电阻率求杂质浓度的问题，因此二者的互换关系是很重要的。可以用下列公式进行计算

$$\rho_n = \frac{1}{n_n \mu_n q} \tag{1-2}$$

$$\rho_p = \frac{1}{n_p \mu_p q} \tag{1-3}$$

其中， ρ_n, ρ_p : N型或 P 型硅电阻率

n_n, n_p : 电子或空穴浓度

μ_n, μ_p : 电子或空穴迁移率

q : 电子或空穴电量

在实际生产中，用公式计算不仅很烦琐而且 μ_n, μ_p 的数值还

和杂质浓度有关。人们通过大量的实验把浓度和电阻率的关系总结成图表。所以一般应用时直接查表就行了。

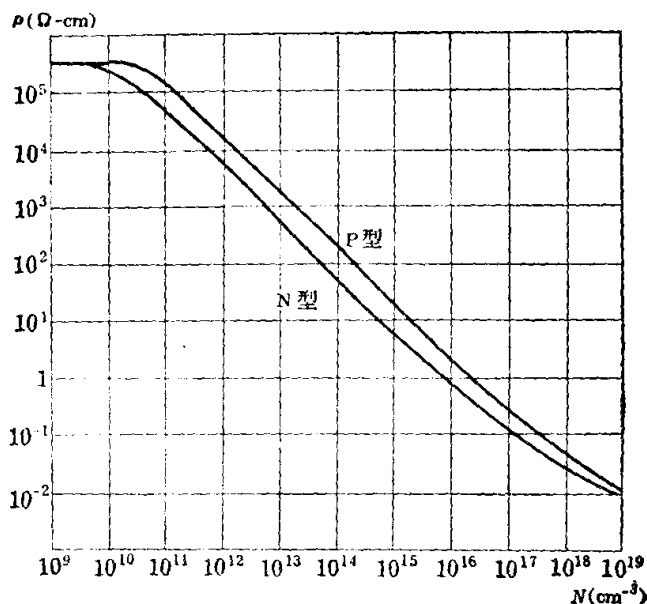


图 1-8 电阻率和杂质浓度的关系

由于电阻率是指截面积为 1 平方厘米长度为 1 厘米的单晶所具有的电阻的数值。所以其单位为

$$\frac{\text{欧姆} \cdot \text{厘米}^2}{\text{厘米}} = \text{欧姆} \cdot \text{厘米} (\Omega \cdot \text{cm})$$

如前所述, 半导体电阻率的大小, 决定于单晶中所能提供的载流子数, 在单晶中掺有一种元素时, 例如磷或铝, 载流子的数量和掺杂量是相同的。图 1-8 上横轴 N (厘米⁻³) 所示的杂质浓度, 可理解为掺杂的浓度。然而, 实际的硅单晶中往往既含有 N 型杂质, 又含有 P 型杂质, 例如 N 型的单晶原材料, 经常含有硼元素, 这时单晶电阻率既不是由其中的 N 型杂质的掺杂量所决定, 也不是由 P 型杂质的掺杂量所决定, 而是由这两种杂质互相补偿后还能提供多少载流子来决定。载流子的种类决定单晶的类型, 补偿后空穴多的是 P 型单晶, 如果电子多, 则是 N 型的。此时, 图 1-8 横轴 N 所

表示的杂质浓度是单晶中N型和P型杂质补偿后的载流子浓度,即N型和P型掺杂浓度之差,也叫作净杂质浓度,补偿度高的单晶影响器件的质量。

四、PN 结的形成(无外加电压下的 PN 结)

前面讲的都是单一类型的半导体特性,但在实际应用中都是利用不同类型半导体的结合所带来的特点。例如在整流二极管中利用了一层P型半导体和一层N型半导体的结合(即一个PN结),晶体三极管中有两个PN结,而可控硅元件则有三个PN结。因此在分析可控硅元件之前,我们必须搞清楚它的基本组成单元——PN结的性质。

1. 电场

在研究分析半导体器件时,将时常用到电场的概念。

我们知道电荷间有同性相斥,异性相吸的性质。当一个带正电荷的金属球附近有带负电荷的自由电子存在时,电子一定会向金属球运动。这就是说电子受到了金属球的吸引力,电荷在带电物体附近之所以受到力的作用,是因为在带电物体周围空间存在一种特殊形式的物质叫做电场。电场对其他物体电荷的作用力称为电场力。图 1-9 中自由电子受到带正电的金属球的吸引力正是由于电场的作用。

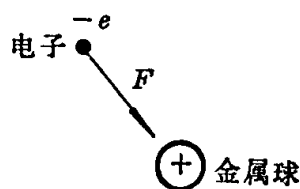


图 1-9 静电场中电子受力的情况

电场的分布随着带电物体的形状、空间的介质以及电荷量而变化。例如,常见的两块平行的金属板(图 1-10),一块带正电荷,另一块带同等数量的负电荷。如果两板中间有自由电子存在,根据同性相斥、异性相吸原理,带负电的电子就必然被带负电荷的板所推斥,被带正电荷的板所吸引,而自左向右运动。电子受到了由