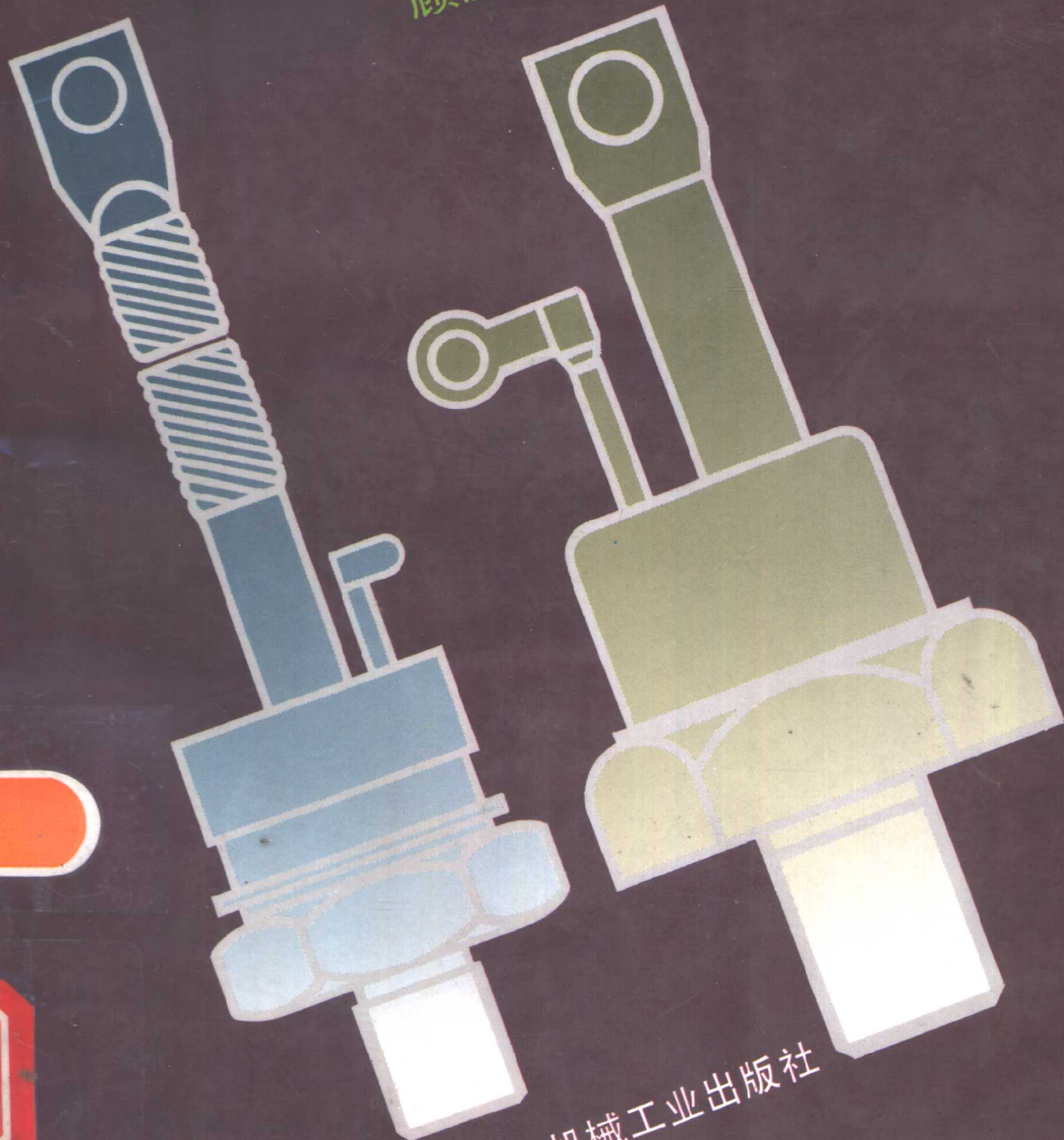


中国电力半导体器件 数据与选用手册

顾廉楚 主编



机械工业出版社

中国电力半导体器件数据与选用手册

顾廉楚 主编



机械工业出版社

本手册系一本中国电力半导体器件的速查手册。书中汇总了当前国内市场可供应的各种整流器、功率晶体管、晶闸管、模块和组件的主要参数和外形尺寸,以及生产厂家等信息;此外还提供器件及其附件(散热器、快速熔断器)的简介和选用方法。它能帮助读者在设计、调试和维护电力电子电路时迅速查到国内能买到的器件及其供应单位。

本书可供电工、电子专业技术人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国电力半导体器件数据与选用手册/顾廉楚主编. —北京:机械工业出版社, 1995

ISBN 7-111-04630-7

I. 中… II. 顾… III. 电力系统-半导体器件-数据-选择-手册 IV. ①TM303-62②TM7-62

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第15932号

出 版 人: 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑: 张沪光 版式设计: 张世琴 责任校对: 贾立萍

封面设计: 姚 毅 责任印制: 卢子祥

北京交通印务实业公司·新华书店北京发行所发行

1995年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm/16·15.75印张·378千字

0 001—2 000册

定价: 24.00元

《中国电力半导体器件数据与选用手册》编委会

主 编 顾廉楚

副 主 编 张志刚 陈守良

编 委 黄跃先 宋鸿国 殷纯华

编写人员 顾廉楚 钟授钊 宋鸿国 刘蜀仁 郭依群 姜爱蓉

前 言

由于科学技术的发展越来越快,特别是在电子技术领域,国际信息机构几乎每年都要为每一类电子器件出版一本数据手册,对于有的器件甚至需要另出补充版。这种信息的迅速传送为科技、贸易等领域提供了极大的方便和活力。但是,国内在这方面至今还是一片空白。即使在过去的十多年中曾花费巨大精力先后完成了国内产品的目录汇编,但这样的出版速度终究不能赶上电子技术飞速发展的形势。为了能及时向广大的电工、电子界读者提供国内电力半导体器件的当前信息,在中国电工技术学会电力电子学会的倡议下,由北京分会成立了《中国电力半导体器件数据与选用手册》编委会,完成了本书的编写工作。

编委会计划在1995年出第一版,以后视国内市场更新情况,每两年左右出一次修订版,以便及时反映电力半导体器件的市场情况。此外,编委会也希望本手册的工作能作为与国际数据手册接轨的第一步。我们相信,国内外电力半导体器件信息的接轨必将对国产器件进入国际市场提供更为有利的条件。

本手册的内容包括两大部分:

第一部分为电力半导体器件的简介及选用。对于它的必要附件散热器和常用的配套保护元件快速熔断器,本手册也编入了它们的选用方法。此外,每一章的参考文献部分都列出了有关的图书资料,以便读者深入研究。

第二部分为电力半导体器件数据表。为了便利读者迅速查找所需器件,本手册在全面介绍器件主要参数的基础上,还提供了产品型号索引表。此外,手册中还编入器件生产厂家名录,以便读者与他们联系。

本书第一部分第1至16章由顾廉楚负责编写;第17章由钟授钊负责编写。其中第14章系根据许文侠、俞苹的著作(见第14章参考文献[2])摘编而成;第15章系根据俞苹的著作(见第15章参考文献[2])摘编而成;第16章系根据胡英伦的著作(见第16章参考文献[21]中第9章)摘编而成。对于这些材料的利用,编委会得到许文侠、俞苹和胡英伦三位原作者的慷慨应允和热情支持,对此,我们致以衷心的感谢。

本书第二部分由宋鸿国、刘蜀仁、郭依群分别建立模块和组件、晶闸管、整流管和晶体管的各种数据库,姜爱蓉完成全部数据到表格的计算机处理。在数据收集过程中,得到电力半导体器件各生产厂家的大力支持,在此,表示衷心的感谢。

本手册是作为中国电工技术学会电力电子学会1994年度活动计划中的一项工作进行。在编写过程中,编委会得到了学会领导和广大会员的热情支持。中国电器工业协会电力电子专业协会提供了宝贵的信息和强有力的支持。在此一并致谢。

本书系参照国外电力半导体器件数据手册并根据国内具体情况编写的。由于系初次进行此项工作,错误与不当之处在所难免。编委会衷心欢迎读者指正和帮助,以使未来的修订版更加完善。

《中国电力半导体器件数据与选用手册》编委会

1994年11月20日

目 录

前 言

第一部分 电力半导体器件简介及选用

第 1 章 半导体物理基本概念	1
1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.2 本征、N 型和 P 型半导体	1
1.3 多数载流子和少数载流子	3
1.4 平衡载流子、非平衡载流子和寿命	4
1.5 半导体中的两种导电机理——漂移与扩散	5
第 2 章 功率二极管	7
2.1 概述	7
2.2 PN 结工作原理	7
2.3 结型功率二极管	11
2.4 功率齐纳二极管	13
2.5 肖特基势垒二极管	14
第 3 章 大功率双极结型晶体管	17
3.1 概述	17
3.2 基本结构及工作原理	17
3.3 饱和态和截止态	19
3.4 开关特性	21
3.5 热特性	22
3.6 极限参数	23
3.7 单块达林顿功率 BJT	24
第 4 章 普通晶闸管	25
4.1 概述	25
4.2 基本结构	25
4.3 基本工作原理	26
4.4 功率损耗	31
4.5 主要参数	33
第 5 章 快速晶闸管和高频晶闸管	35
5.1 概述	35
5.2 参数及其选用	35
5.3 快速、高频晶闸管的应用	37
第 6 章 双向晶闸管	38

6.1 概述	38
6.2 基本结构及工作原理	38
6.3 特性及主要参数	39
第7章 逆导晶闸管	41
7.1 概述	41
7.2 基本结构及电气性能特点	41
7.3 测试及典型应用	42
第8章 可关断晶闸管	44
8.1 概述	44
8.2 基本结构及工作原理	44
8.3 基本参数	46
8.4 应用	47
第9章 非对称晶闸管	48
9.1 概述	48
9.2 基本结构及工作原理	48
第10章 门极辅助关断晶闸管	50
10.1 概述	50
10.2 基本结构及工作原理	50
第11章 功率 MOS 场效应晶体管	52
11.1 基本结构及工作原理	52
11.2 器件基本特性	53
11.3 功率 MOSFET 与功率双极结型 (BJT) 晶体管的比较	54
第12章 绝缘门极晶体管	56
12.1 基本结构及工作原理	56
12.2 特性	57
第13章 结型场效应晶体管	59
13.1 概述	59
13.2 基本结构及工作原理	59
13.3 参数	61
13.4 双极运行	61
13.5 常闭型 JFET	62
第14章 静电感应晶闸管	63
14.1 基本结构及工作原理	63
14.2 特性	64
14.3 常闭型 SITh	66
第15章 MOS 控制晶闸管	67
15.1 概述	67
15.2 基本结构及工作原理	67
15.3 特性	68

15.4 MCT 与其它器件的比较	69
第 16 章 散热器的选配	70
16.1 概述	70
16.2 类型	70
16.3 选配计算	74
第 17 章 快速熔断器选用	84
17.1 概述	84
17.2 基本结构	84
17.3 特性	85
17.4 选用	89

第二部分 电力半导体器件数据表

厂家代码与厂名对照表	99
第 18 章 整流管技术参数	100
18.1 普通整流管	100
18.2 快恢复整流管	124
18.3 旋转整流管	130
18.4 汽车整流管	131
18.5 限压二极管	131
第 19 章 功率晶体管技术参数	132
19.1 功率晶体管	132
19.2 绝缘门极晶体管	133
19.3 静电感应晶体管	133
第 20 章 晶闸管技术参数	134
20.1 普通晶闸管	134
20.2 快速晶闸管	158
20.3 高频晶闸管	168
20.4 双向晶闸管	170
20.5 逆导晶闸管	174
20.6 门极可关断晶闸管	176
20.7 非对称晶闸管	178
20.8 旋转晶闸管	178
20.9 过电压保护用两极晶闸管	178
20.10 光控晶闸管	179
第 21 章 模块技术参数	180
21.1 整流管模块	180
21.2 晶闸管模块	182
21.3 整流管-晶闸管模块	184
21.4 功率晶体管模块	184

第 22 章 组件技术参数	186
22.1 整流管组件	186
22.2 晶闸管组件	190
22.3 整流管-晶闸管组件	192
22.4 组合式整流管	194
22.5 硅整流堆	194
第 23 章 器件外形和电路图	196
23.1 外形图	196
23.2 电路图	232
生产厂家名录	237
产品型号索引	239

第一部分 电力半导体器件简介及选用

第 1 章 半导体物理基本概念

绝大部分电力电子电路都采用电力半导体开关器件。为了简化电路分析，这类器件常被认为是理想开关，即，断开时表现为无穷大电阻，导通时表现为零电阻，并且在两种状态之间的转换过程为瞬时完成。然而对于从事电力电子的工程技术人员而言，必须具备应用这类器件所需的半导体物理知识以便理解实际器件中的物理现象和专业术语。为此，本章将简要地介绍与开关器件有关的物理概念。电力电子装置中应用的开关器件目前绝大多数是以硅单晶材料为基础的。因此本章将主要以硅为例介绍半导体物理概念。如出现其他半导体材料时，将在需要时特别加以说明。

1.1 导体、绝缘体和半导体

固体有着不同的导电性能。根据导电能力的大小，可以把固体划分为三类，即，导体、绝缘体和半导体。在导体（如金属）中，每个原子中的价电子都不受各自原子的束缚而自由游离于原子与原子之间的空间，形成浓厚的电子云；一旦在导体上外加一个电场，这些电子极易在电场作用下流动形成电流。因而成为极好的导电物体。

绝缘体则相反，每个价电子都牢牢地被束缚在各自的原子范围内。在室温下，只有极少的电子能获得能量脱离原子核的束缚变为自由电子。因而在外电场的作用下只有小到可以忽略的电流通过。故称为绝缘体。

然而，半导体不仅在导电能力上有别于导体和绝缘体，它还具有其他一系列特殊的物理性能。这些性能对于演变出适用于各种场合的器件可能是更为重要的。本章以后各节将予以介绍。

1.2 本征、N型和P型半导体

1.2.1 本征（纯）硅单晶

目前主要的半导体材料是共价键晶体。硅、锗等IV族元素半导体就是最典型的共价键晶体。以硅为例，在硅原子中有14个电子围绕原子核运动。每个电子带电荷 $-q$ （负号表示带负电荷， q 为电荷量，测定为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ）。原子核带电 $+14q$ 。整个原子呈电中性，在14个电子中，有四个电子处于最外层（见图1-1）。主要由它们决定硅的物理化学性质，被称为价电子。在硅的晶体中，每个硅原子之间有一对电子，它们与两个相邻的原子核都有吸引作用，称为共价键。正是靠共价键的作用使硅原子紧紧结合在一起，构成了晶体。图1-2是一幅形象地说明硅原子靠共价键结合成晶体的示意图。

这个模型表明纯硅单晶在接近热力学温度（K）=0时的情形。由于不存在自由电子，因

此它是很好的绝缘体。

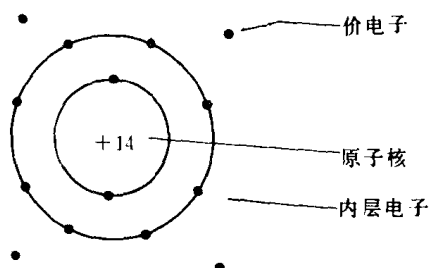


图 1-1 硅原子模型

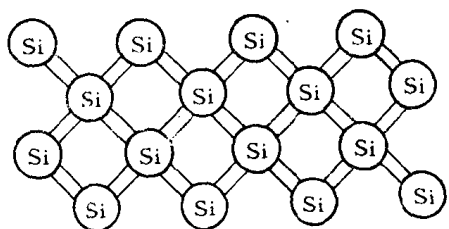


图 1-2 硅单晶的共价键

但是,如果共价键中的电子获得足够的能量,它就可以摆脱共价键的束缚,成为可以自由运动的电子(见图 1-3)。这时在原来的共价键上留下了一个缺位。因为邻键上的电子随时可以跳过来填补这个缺位,从而使缺位转移到邻键上去,所以缺位也是可以移动的。这种可以自由移动的缺位被称为空穴。虽然,缺位的移动本质上仍为带 $-q$ 的电子在价键上进行置换运动,但为了区别自由电子的运动与空穴的运动,通常认为缺位的运动是与置换电子运动方向相反的带 $+q$ 的空穴运动。

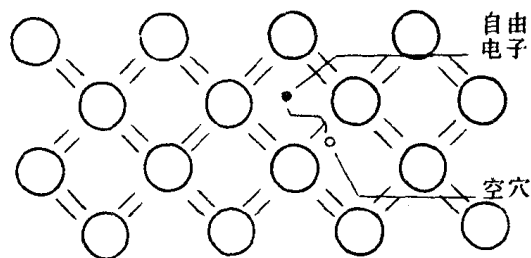


图 1-3 本征硅中的电子与空穴

因此,和金属不同,半导体的导电是靠自由电子和空穴进行的。电子和空穴被统称为载流子,但是电子带 $-q$ 电荷,而空穴带 $+q$ 电荷。

电子摆脱共价键所需的能量可以来自外面光的照射或存在于晶体本身的原子的热运动。在常温下,硅单晶内由于热运动激发价键上电子而产生的电子和空穴不超过 1.5×10^{10} 个/ cm^3 ,其对应的电阻率为 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 量级。因此它对硅的导电性的影响是十分微小的。但随着温度的上升电子空穴对的浓度的增加是很快的。

1.2.2 N 型半导体

当硅中掺有 V 族元素杂质(磷 P, 砷 As, 锑 Sb, 铋 Bi) 时, 这些 V 族杂质替代了一部分硅原子的位置(见图 1-4)。但是,因为它们外层有 5 个价电子,其中 4 个与周围硅原子形成共价键,多余的一个电子极易脱离 V 族元素原子的束缚成为可以导电的自由电子,所以一个 V 族杂质原子可以向半导体硅提供一个自由电子而本身成为带正电的离子。通常把这种杂质称为施主杂质。这种依靠电子导电的半导体叫做 N 型半导体。随着掺杂浓度的变化,掺杂硅单晶的常温电阻率可在 $10^{-5} \sim 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 很宽的范围变化。

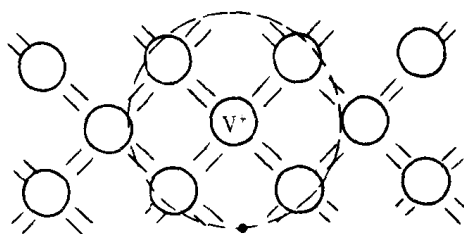


图 1-4 V 族元素的掺杂

1.2.3 P 型半导体

当硅中掺入 III 族元素杂质(硼 B, 铝 Al, 镓 Ga, 铟 In) 时。这些 III 族元素杂质原子在晶体中替代一部分硅原子的位置(见图 1-5)。因为它们的外层有 3 个价电子,在与外围硅原子形成共价键时,产生一个缺位。这个缺位就要接受一个电子而向晶体提供一个空穴。所以一

个Ⅲ族杂质原子可以向半导体硅提供一个空穴,而本身接受了一个电子成为带负电的离子。通常把这种杂质称为受主杂质。这种主要靠空穴导电的半导体称为P型半导体。

事实上,一块半导体常常同时含有施主和受主杂质。当施主数量超过受主时,半导体就是N型的;反之,则是P型的。更具体地讲,假设在N型半导体中单位体积有 N_D 个施主, N_A 个受主,且 $N_A < N_D$ 。这时施主放出的 N_D 个电子首先去填补受主 N_A 造成的缺位,然后余下的 $(N_D - N_A)$ 个电子才成为导电的载流子。这种现象称为杂质的补偿。

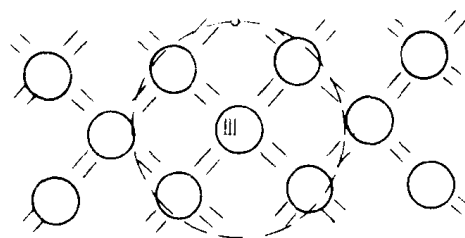


图 1-5 Ⅲ族元素的掺杂

1.3 多数载流子和少数载流子

在N型半导体中虽然主要依靠电子导电,但同时还存在少量空穴。这时,电子称为多数载流子(简称多子),空穴则称为少数载流子(简称少子)。而在P型半导体中,空穴是多子,电子是少子。为什么在半导体中总是同时存在电子和空穴呢?

由前节已知,在本征硅中,晶格的热振动如能给共价键上的电子提供足够的能量使它脱离共价键的束缚,则能产生自由电子并留下缺位—空穴。也即电子浓度 n 和空穴浓度 p 是相等的。电子-空穴对的产生率是束缚能和温度的函数,束缚能越低,温度越高,产生率也越大。对于指定的材料(如硅)束缚能是一定的,则产生率变成温度 T 的函数,用 $G(T)$ 表示。

和自然界许多现象相似,与自由电子-空穴对的出现伴随而生的则是其逆过程-复合。当自由电子和空穴相遇时电子就可以重新由自由状态变为共价键上的电子,同时空穴也随即消失。电子和空穴的浓度越高,复合的机会也越大,即复合率与存在的自由电子浓度 n 和空穴浓度 p 成正比,

$$\text{复合率} = rnp$$

式中 r ——比例常数。

在一块只存在热运动的半导体中,产生过程随着时间的推移将形成越来越多的电子空穴对;而电子空穴浓度的提高又加速了复合过程。最后出现的平衡状态必然相当于

$$\text{复合率} = \text{产生率}$$

对于一定材料,如硅,在一定温度下,产生率 $G(T)$ 为一定,因而

$$G(T) = rnp \quad (1-1)$$

对于本征(纯)硅单晶,

$$n = p = n_i$$

此处设 n_i 为硅的本征载流子浓度。则式(1-1)将变为

$$n_i^2 = G(T)/r \quad (1-2)$$

n_i 与绝对温度 T 的关系见图1-6。

对于掺杂半导体,除了热产生的电子空穴对之外,还有杂质提供的载流子。此时,复合率仍然保持有效。因此,对于N型硅单晶,

$$n \approx N_D$$

利用式(1-1)和(1-2),可得

$$N_D p = n^2 \quad (1-3)$$

故 $p = n^2 / N_D \quad (1-4)$

由于多子浓度 $N_D \gg n$, 所以少子浓度 $p \ll n_i$ 。同理, 对于 P 型硅单晶, 多子浓度 $p \approx N_A$, 故少子浓度 $n = n_i^2 / N_A$ 。由于多子浓度 $N_A \gg n$, 所以少子浓度 $n \ll n_i$ 。

综上所述, 在本征硅单晶中, 电子和空穴浓度是相等的; 在 N 型硅单晶中, 多子电子浓度等于施主浓度而少子空穴的浓度则低于本征浓度 n_i ; 在 P 型硅单晶中多子空穴浓度等于受主浓度, 而少子电子浓度则低于本征浓度 n_i 。

在掺杂浓度 N_D 或 N_A 及温度 T 已知情况下, 由图 1-6 可求得硅的本征载流子浓度 n_i , 然后由式 (1-3) 可求得相应的少子浓度。

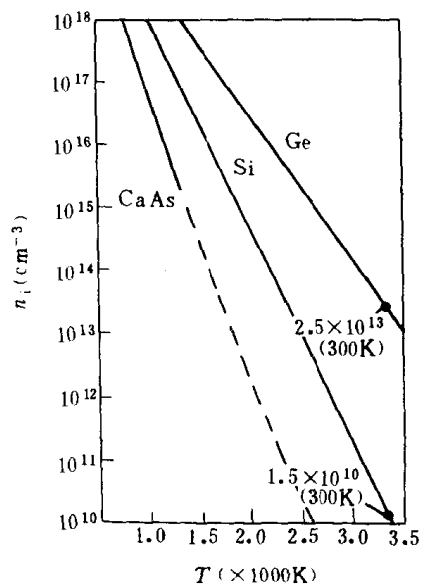


图 1-6 本征载流子浓度与温度的关系

1.4 平衡载流子、非平衡载流子和寿命

上一节已指出: 热平衡并不是一种静止状态。用半导体中的载流子来说, 任何时候电子和空穴总是在不断地产生和复合, 只不过在热平衡状态下, 产生率和复合率相等而已, 从而保持电子和空穴浓度稳定在一定的数值上。这种状态下的载流子称为平衡载流子。

但是, 我们将在以后几章中看到, 在各种结构的半导体器件中, 这种热平衡常常被打破。例如, 当光线照射到半导体上时, 光的能量将在热平衡载流子之外产生更多的载流子; 加正偏压的 PN 结也能向半导体注入超过平衡值的载流子。这种超过热平衡值的载流子称为非平衡载流子, 或称剩余载流子。

在非平衡的情形下, 产生和复合之间的相对平衡被打破了。由于多余的非平衡载流子的存在, 电子和空穴数目比热平衡时多了。它们在热运动中相互遭遇而复合的机会也将按比例地增加。这时复合将要超过产生而造成一定的净复合: 即

$$\text{净复合} = \text{复合} - \text{产生}$$

只要外界因素 (如光) 不断提供非平衡载流子, 半导体中的载流子浓度可稳定地保持在高于平衡载流子浓度的水平。此时每秒钟外界因素提供的载流子量应等于每秒钟净复合掉的载流子量。

但如突然去掉外界因素, 非平衡载流子的来源断绝, 则净合作用将使非平衡载流子逐渐减少以至最后消失。半导体中的载流子浓度重新达到平衡浓度。非平衡载流子消失的速度常用它的寿命值 τ 作为参量来衡量。寿命长的复合得慢, 反之则复合快。一般来说, 非平衡载流子在外界因素突然消失后经过 3 个寿命值 τ 之后可以消失到初始值的 5% 以下。在实际工作中, 可认为只需 3τ 的时间非平衡载流子即已基本复合完。

在半导体器件中, 例如加正向偏压的 PN 结, 空穴由 P 型区扩散进 N 型区而成为非平衡载流子。正是由于空穴的正电荷才把等量的电子 (多子) 吸引过来达到电中性。因此, 非平衡

电子浓度总是与非平衡空穴浓度相等的。并且由于非平衡载流子中少子所处的主导地位，非平衡载流子的寿命常称为少子寿命。

少子寿命除了和电子空穴直接遭遇的机率有关之外，还与半导体中存在的杂质或晶格缺陷的性质及浓度有关。这些杂质或缺陷能首先捕捉到一个电子（或空穴），然后给空穴（或电子）提供复合的机会。某些重金属杂质如金、铂等都可以有效地缩短少子寿命。近年来，采用加速电子、快中子、 γ 射线辐照等工艺也能有效地缩短少子寿命。如需加长半导体中的少子寿命，则可采取吸收工艺把重金属杂质吸出来或采用退火工艺使辐照造成的缺陷还原，从而延长半导体内的少子寿命。寿命控制是半导体器件制造工艺中极为重要的一环。

在半导体器件中，也会出现局部区域，它的载流子浓度低于平衡浓度，例如，后面将要讲到的 PN 结中的空间电荷区。由于在该区中存在极强的电场，所有进入该区的载流子都以极快的速度被打出去，因而区中的载流子浓度几乎接近于 0。在这种场合中，复合过程近于消失，产生过程将起主导作用。此时电子空穴对将以产生率决定的速度产生出来。

1.5 半导体中的两种导电机理——漂移与扩散

与金属材料不同，由于存在两种性质不同的载流子，在半导体中存在两种导电机理——漂移与扩散。

一种机理是漂移。当一块半导体材料的两端加上电压 V 时（见图 1-7），材料中带正电的空穴（用“ $\circ$ ”表示）顺电场方向流动；而带负电的电子（用“ $\cdot$ ”表示）则逆电场方向流动。流动的速度与外加电场 E 成正比。但由于电子与空穴在晶格中运动的方式不同，在同样电场作用下电子的运动速度比空穴快。对于硅单晶材料在室温低浓度下，电子的运动速度约为空穴的 2.6 倍。

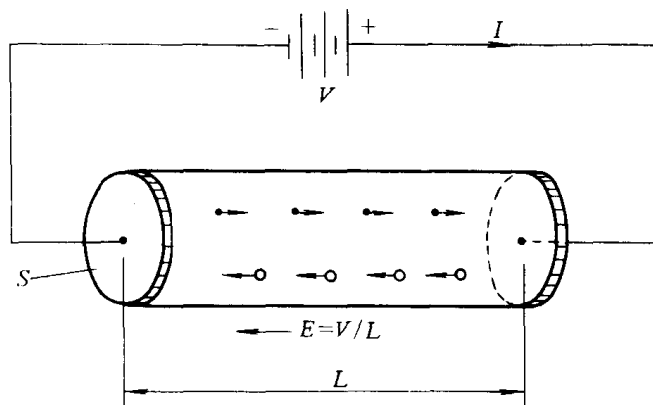


图 1-7 漂移电流

不论本征、N 型还是 P 型半导体，都服从欧姆定律，即

$$V = RI \quad (1-5)$$

$$R = \rho (L/s) \quad (1-6)$$

式中 V —— 半导体样品两端电压 (V)；

I —— 电流 (A)；

R —— 电阻 (Ω)；

ρ —— 电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)；

L —— 样品长度 (cm)；

s —— 样品截面积 (cm^2)。

与金属导体不同之处在于：在半导体中，由电子和空穴两种载流子的漂移运动确定电阻率 ρ 。当然，在以电子导电为主的 N 型半导体中和以空穴导电为主的 P 型半导体中，可以认为多子的漂移运动决定着它的电阻率。

半导体中的第二种导电机理是载流子的扩散运动。就如同一滴墨水被滴进一杯清水时，墨水就会向四周慢慢扩散，直到墨水分子均匀地分布在整個杯中为止。这种扩散运动是分子的热运动造成的。同理，在半导体中，只要在任何时候任何地方存在电子或空穴的浓度差，就会出现电子或空穴的扩散运动。扩散运动形成的电流与该点的浓度梯度（即每单位长度上的浓度差）成正比。但由于电子和空穴在晶体中的运动方式不同，在硅单晶中对于同样的浓度梯度电子的扩散速度约为空穴扩散速度的 2.6 倍。

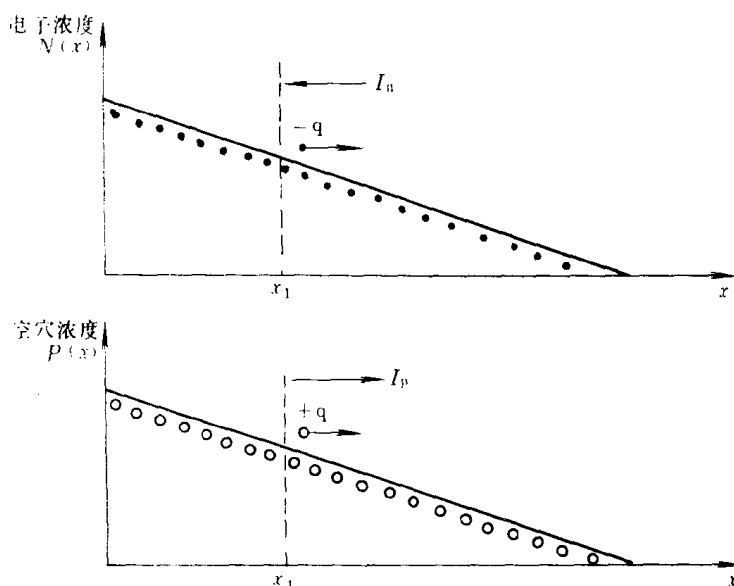


图 1-8 扩散电流

对于同样的浓度分布（见图 1-8），尽管电子和空穴都向低浓度的方向扩散，但由于电荷符号不同，所形成的电流方向恰好相反。例如在 x_1 处，尽管电子与空穴都向右扩散，但电子电流 I_n 向左，而空穴电流 I_p 向右。

参 考 文 献

- 1 黄昆，韩汝琦著，半导体物理基础，北京：科学出版社，1983。
- 2 顾廉楚主编，电力半导体器件原理（电力电子技术丛书），北京：机械工业出版社，1988。

第2章 功率二极管

2.1 概述

二极管是电力半导体器件中最简单的一种器件。它是由一个PN结或一个半导体—金属的结构形成的。在电力电子装置中,功率二极管被广泛应用于整流、吸收及续流等电路中。随着功率二极管应用范围的扩展派生出了许多类型。特别是由于近年来新型电力半导体器件的涌现,对与之配合的功率二极管的要求也在迅速发展。本章扼要而定性地介绍各种类型二极管的工作原理及电气参数等问题。其深度以有助于读者理解及选用器件为准。读者如需进一步了解,可参阅本章后面介绍的参考文献。

2.2 PN结工作原理

PN结是很多半导体器件的核心。掌握PN结的性质是分析这些器件特性的基础。

在一块半导体材料中,如果一部分是N型区,另一部分是P型区,则N型区和P型区的交界面就是PN结。形成PN结的工艺有扩散、合金、外延、离子注入等方法,视器件生产的需要而定。

现在以合金法制成的突变结为例说明PN结的电流-电压关系。突变结的掺杂浓度分布如图2-1所示。N型区均匀地掺有施主杂质,杂质浓度为 N_D 。P型区均匀地掺有受主杂质,杂质浓度为 N_A 。在P型区和N型区的交界面处,杂质分布有一突变。图中 $N_D \gg N_A$ 。在N型区,多子 $n_{n0} = N_D$,少子为 p_{n0} ;在P型区,多子 $p_{p0} = N_A$,少子为 n_{p0} 。图中“ $\oplus$ ”和“ $\ominus$ ”分别表示固定在晶格上的施主和受主离子;“ $\cdot$ ”和“ $\circ$ ”分别代表可自由移动的电子和空穴。

2.2.1 平衡PN结

现在讨论无外加电压时的PN结。此时,半导体材料只受热运动的支配。如果P型半导体和N型半导体为二块分立的材料,则每块中的荷电状态都是中性的,即载流子的电荷与杂质离子的电荷相中和。但如二种不同类型的半导体做在同一个晶格体系上,由于在二者的交界面处存在电子和空穴的浓度梯度,N区中的电子要向P区扩散;P区中的空穴要向N区扩散。结果,使N区剩下带正电的电离施主,形成一个带正电荷的区域;P区剩下带负电的电离受主,形成一个带负电的区域。这样,在交界面的两侧形

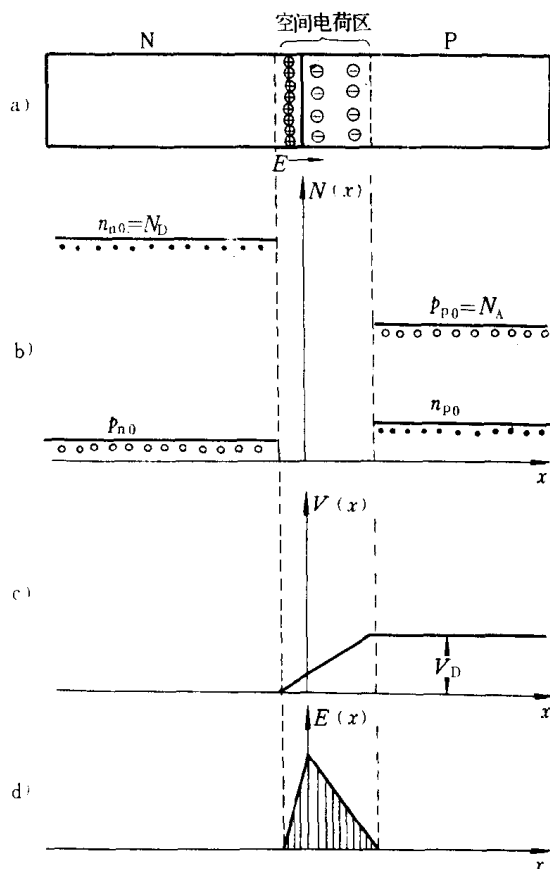


图2-1 零偏PN结

a) 空间电荷区 b) 载流子浓度分布
c) 扩散电位 d) 电场分布

成了带相等正、负电荷的区域，叫做空间电荷区。空间电荷区中的正负电荷间形成的电场称为自建电场。其方向由N区指向P区，大小分布如图2-1所示。自建电场一方面推动带负电的电子逆电场方向做漂移运动，即由P区向N区运动；另一方面又推动带正电的空穴沿电场方向做漂移运动。由此可以看到，自建场引起电子和空穴的漂移运动方向与它们的各自的扩散运动方向正好相反。随着扩散的进行空间电荷数量不断增加，自建电场越来越强，直到载流子的漂移运动和扩散运动相抵消（即大小相等方向相反）才达到动态平衡。此时，N型区的电位比P型区的电位高 V_D （见图2-1）。这个自建场形成的电位差 V_D 保持住了P和N两个中性区载流子的浓度差。这个电位差也称为势垒或扩散电位。

2.2.2 正偏PN结

当PN结如图2-2加有正向偏压（P侧加正极，N侧加负极）时，外加电压的方向与势垒的方向相反，使空间电荷区变窄，电场减弱。这样就打破了扩散运动和漂移运动的相对平衡，使载流子的扩散运动超过漂移运动。在这种情况下，电子将源源不断从N区扩散到P区，成为非平衡载流子（图中超过平衡时少数浓度的部分）。这种现象常称为PN结的正向注入。

由于注入P区的非平衡载流子（电子）大于P区中平衡时的电子（少数）浓度，电子将向前扩散，同时与P区中丰富的空穴（多子）相遇而复合。于是注入电子的浓度将是图2-2中所示的形状。同理，由P区注入N区的空穴也经历同样的过程。如果外加正向电压保持不变，N区和P区中非平衡载流子的浓度将保持一个稳定的分布。

至于电流，我们先从N区注入P区的电子电流（图2-2中 I_N 部分）来说明这个问题。电子从左到右穿过N区时是多子漂移电流；跨过空间电荷区注入P区后就成为非平衡载流子，以扩散形式运动。在扩散过程中，它们将与空穴先后复合，逐渐减少，以至完全消失。但是它们的复合并不意味着电流的中断。相反，与这些电子复合的空穴通过P区多子的漂移运动不断地来自右方。但不论在何处，电流总是同一个数 I_N ，因为只有这样电流才是连续的。

同理，对于从P区注入到N区的空穴电流 I_P （如图2-2所示）可以做完全相似的讨论。总电流 I 即为 I_N 和 I_P 两个分量之和。

一般来说，经过PN结的电子电流 I_N 和空穴电流 I_P 是不相等的。这是因为PN结上所加的正向电压 V_f 越大，势垒 V_D 受到削弱的程度越大。此时图中 x_P 处的电子浓度和 x_N 处的空穴浓度也越高。注入浓度与 V_f 的关系由以下指数规律确定：

$$n_p = n_n e^{-q(V_D - V_f)/KT}$$

式中 n_p —— P区PN结边沿的注入电子浓度；

n_n —— N区PN结边沿的电子浓度，也即 $n_n \approx N_D$ ；

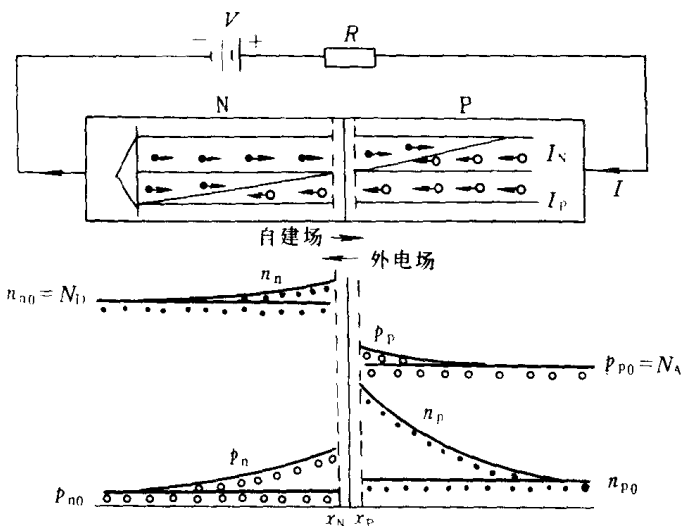


图2-2 正偏PN结的电流