

半 导 体 器 件

[美]Heathkit 公司 著

马明刚 贺又增 王松皋 编译

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书根据美国 Heathkit 公司出版的同名教材《Semiconductor Devices》编译而成。全书共分 10 章,分别讲述了半导体二极管、齐纳二极管、晶体三极管、场效应管、闸流晶体管、集成电路、光电器件等各种半导体器件的基本结构、原理、特性、基本应用、简易测试和有关实验等内容。

本书的特点是避免了高深复杂的数学推导,而着重于物理概念的讲解,内容通俗易懂,全面系统,理论联系实际。每章均有提要、小结、自学习题、测验题及答案。本书是一本很实用的自学入门读物,适于电子爱好者自学,也可供有关电子技术培训班作为教材使用。

半导体器件

BANDAOTI QIJIAN

[美]Heathkit 公司 著

马明刚 贺又增 王松皋 编译

责任编辑: 沈成衡 张瑞喜

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北京顺义振华胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本:787×1092 1/16 1990 年 3 月 第 一 版

印张:13 12/16 页数:110 1990 年 3 月北京第 1 次印刷

字数:336 千字 印数:1—5 000 册

ISBN7-115-04143-1/TN·329

定价: 5.75 元

目 录

第一单元 半导体基础

一、引言	1
二、本单元任务	1
三、本单元学习指导	1
四、半导体的重要性	2
1、优点	2
2、缺点	2
五、半导体材料	3
六、锗原子、硅原子和晶体	4
1、半导体原子	4
2、半导体晶体	5
七、本征半导体的导电性	6
1、低温特性	6
2、高温特性	6
3、空穴	6
4、电流	7
八、掺杂半导体的导电性	8
1、N型半导体	8
2、P型半导体	9
九、本单元考查题	10
十、考查题答案	11

第二单元 半导体二极管

一、引言	13
二、本单元任务	13
三、本单元学习指导	13
四、PN 结	14
1、离子	14
2、结型二极管	14
(1)耗尽区	15
(2)势垒电压	15
五、二极管偏置	16
1、正向偏置	16
2、反向偏置	17
六、二极管特性	19
1、锗二极管	19
(1)正向特性	19
(2)反向特性	20

2、硅二极管	20
(1)正向特性	20
(2)反向特性	20
3、温度特性	20
4、二极管符号	22
七、实验 1 半导体二极管特性	23
八、二极管结构	25
1、生长结	26
2、合金结	26
3、扩散结	26
4、二极管的封装	26
九、实验 2 半导体二极管的测试	28
十、二极管的应用	30
1、整流	30
2、二极管的其他应用	31
十一、本单元考查题	31
十二、考查题答案	33
第三单元 齐纳二极管	
一、引言	34
二、本单元任务	34
三、本单元学习指导	34
四、齐纳二极管特性	34
1、电压—电流特性曲线	35
2、齐纳电压	35
五、齐纳二极管的功耗	36
1、功率—温度曲线	36
2、递减系数	36
六、齐纳二极管的电流极限值	37
七、温度对齐纳电压的影响	38
八、温度补偿型齐纳二极管	38
九、齐纳二极管的阻抗	39
十、齐纳二极管的封装	39
十一、齐纳二极管的稳压作用	39
1、基本的齐纳二极管稳压器	40
2、齐纳二极管稳压电路的设计	41
十二、实验 3 齐纳二极管	42
十三、本单元小结	46
十四、本单元考查题	47
十五、考查题答案	49
第四单元 几种特殊的半导体二极管	
一、引言	50
二、本单元任务	50

三、本单元学习指导	50
四、隧道二极管	51
1、电压—电流特性	51
2、结构	52
3、用途	53
五、变容二极管	54
1、电特性	54
2、工作效率	55
3、结构	56
4、用途	57
六、高频二极管	58
1、PIN 型(正—本—负)二极管	58
2、雪崩二极管	59
3、热载流子二极管	59
4、耿氏(效应)二极管	60
七、本单元小结	61
八、本单元考查题	62
九、考查题答案	63
第五单元 双极型晶体管	
一、引言	65
二、本单元任务	65
三、本单元学习指导	65
四、PNP 和 NPN 的构造	66
五、晶体管的构成	67
1、制作工艺	67
2、封装	68
六、晶体管的基本工作原理	69
1、NPN 晶体管的偏置	70
2、PNP 晶体管的偏置	71
七、晶体管的放大作用	72
八、晶体管电路	74
1、共基极电路	74
2、共发射极电路	75
3、共集电极电路	76
九、双极型晶体管的测试	77
1、测试步骤	77
2、NPN 晶体管的测试	78
3、PNP 晶体管的测试	78
4、晶体三极管的识别	79
十、实验 4 双极型晶体管的测试	80
十一、本单元小结	83
十二、本单元考查题	85

十三、考查题答案	86
第六单元 双极型晶体管特性	
一、引言	88
二、本单元任务	88
三、本单元学习指导	88
四、共基极电路的特性	88
1、集电极特性曲线	89
2、电流增益	90
3、 α 截止频率	91
4、集电结反向饱和电流	91
五、共发射极电路的特性	92
1、集电极特性曲线	93
2、电流增益	94
3、 β 截止频率	95
4、晶体管穿透电流	95
六、实验 5 共发射极晶体管特性	96
七、共集电极电路的特性	99
1、输入阻抗	100
2、输出阻抗	101
八、晶体管的极限参数	101
1、集电极击穿电压	101
2、发射极击穿电压	102
3、最大集电极和发射极电流	102
4、最大集电极耗散功率	102
5、温度特性	102
6、电流增益—带宽乘积	102
九、本单元小结	103
十、本单元考查题	104
十一、考查题答案	105
第七单元 场效应晶体管	
一、引言	107
二、本单元任务	107
三、本单元学习指导	107
四、结型场效应晶体管	108
1、结型场效应管的结构	108
2、结型场效应管工作机理	108
3、栅—源截止电压	109
4、夹断电压	109
5、漏极特性曲线	110
(1) 跨导	110
(2) 图形符号	111
五、实验 6 结型 FET 的特性	112

六、绝缘栅场效应晶体管	116
1、耗尽型 IGFET	116
2、增强型 IGFET	118
3、安全措施	120
七、实验 7 绝缘栅 FET 的特性	122
八、场效应管电路	125
1、共源极电路	125
2、共栅极电路	126
3、共漏极电路	127
九、本单元小结	127
十、本单元考查题	128
十一、考查题答案	130
第八单元 闸流晶体管	
一、引言	131
二、本单元任务	131
三、本单元学习指导	132
四、可控硅整流器	132
1、基本结构和工作原理	132
2、伏—安特性曲线	134
3、实际应用	135
五、实验 8 可控硅整流器	138
六、三端双向可控硅开关元件 (Triac)	142
1、基本结构和工作原理	143
2、电压—电流特性	143
3、实际应用	144
七、双向触发二极管	146
1、基本结构和工作原理	146
2、电压—电流特性	147
3、应用	147
八、单结晶体管	148
1、基本结构	149
2、工作原理	149
3、电压—电流特性	151
4、单结晶体管的应用	151
5、程控单结晶体管	152
九、实验 9 单结晶体管的特性	154
十、本单元小结	157
十一、本单元考查题	158
十二、考查题答案	159
第九单元 集成电路	
一、引言	160
二、本单元任务	160

三、本单元学习指导	160
四、集成电路的重要性	161
1. 优点	161
2. 缺点	162
五、集成电路的基本结构	163
1. 单片集成电路	163
(1) 双极型集成电路	164
(2) MOS 集成电路	166
2. 薄膜集成电路	168
3. 厚膜集成电路	169
4. 混合型集成电路	170
5. 集成电路的封装	171
六、集成电路的应用	174
1. 数字集成电路	175
2. 模拟集成电路	177
七、本单元小结	179
八、本单元考查题	179
九、考查题答案	181
第十单元 光电器件	
一、引言	182
二、本单元任务	182
三、本单元学习指导	182
四、光的基本原理	183
1. 特性	183
2. 光的测量单位	184
(1) 辐射测量系统	184
(2) 光测量系统	185
五、光敏器件	187
1. 光敏电阻	187
2. 光电池	188
3. 光敏二极管	190
4. 光敏三极管	193
六、实验 10 光敏三极管特性	196
七、发光器件(LED)	199
1. LED 的工作原理	199
2. LED 的结构	200
3. LED 的特性	202
4. LED 的应用	203
八、实验 11 发光二极管(LED)的特性	206
九、本单元小结	208
十、本单元考查题	209
十一、考查题答案	210

第一单元 半导体基础

一、引言

本单元介绍各种类型的半导体材料以及它们的电气特性。这是十分重要的一个单元,因为你的半导体器件知识将建立在这一单元的基础之上。在学习过程中应按照本单元学习指导中规定的步骤逐项完成。

二、本单元任务

学完本单元之后,你将能够:

1. 知道三种常用的半导体器件的名称。
2. 大体了解电子设备中半导体器件的基本功能。
3. 了解半导体材料的电特性。
4. 知道两种最常用的半导体材料。
5. 解释本征半导体与掺杂半导体的差别。
6. 定义半导体中应用到的空穴概念。
7. 解释电流如何流过本征半导体和掺杂半导体。
8. 了解半导体器件与同类功能器件相比的五大优点。

三、本单元学习指导

1. 阅读半导体的重要性一节
2. 解答复习题(1)~(9)
3. 阅读半导体材料一节
4. 解答复习题(10)~(12)
5. 阅读锗原子、硅原子和晶体一节
6. 解答复习题(13)~(24)
7. 阅读本征半导体的导电性一节
8. 解答复习题(25)~(34)
9. 阅读掺杂半导体的导电性一节
10. 解答复习题(35)~(42)
11. 完成单元考查题
12. 核对考查题答案

四、半导体的重要性

半导体是构成电子元器件的重要材料。最常用的3种电子器件是二极管、晶体管和集成电路,当然还有其他特殊用途的电子器件。电子设备中半导体器件的基本功能是控制电流或电压以达到所需求的效果。例如,二极管可以作为整流器使交流变成脉动直流;晶体管可以作为变阻器,用来改变电路中的电流;一块集成电路可以用来放大和解调无线电信号等等。

半导体器件体积小,重量轻,消耗的功率小,效率高而且可靠。电子管曾经被广泛地应用在电子设备中,而现在几乎全部被半导体器件所代替。下面我们将具体讨论半导体器件的优缺点。

1. 优点

半导体器件与电子管相比,它不但有体积小、重量轻的优点,而且易于批量生产,价格也要便宜得多。

由半导体材料做成的器件通常叫作固体器件或固态器件,因为半导体材料是一种固体材料。由于具有固态的实芯结构,这些器件比用玻璃、金属和陶瓷材料做成的真空管要坚固得多,能够在十分恶劣的条件下工作。

固态结构省去了真空管中的灯丝与加热器,节约了加热灯丝所需的能源消耗,使固体器件工作温度较低且效率高。另外,它们不需要预热时间,一通电马上就能工作。由于没有灯丝的寿命限制,其使用寿命比真空管长得多。固体器件的电源电压很低(1V至25V),而真空管的电源电压一般需要100V或者100V以上。这意味着固体器件比真空管消耗的功率要低得多,所以更适合于用干电池供电的便携式设备。器件在低电压下工作也更加安全。袖珍式收音机、计算器和干电池供电的微型电视接收机等都是应用固体器件的典型产品。

最复杂的半导体器件要算是集成电路。集成电路的每一个元件都是由半导体材料制成,整个电路封装在一个微小的管壳中。这种器件不仅可代替单个电子电路,而且还还可代替整个设备或系统。例如可以把整个计算机或者无线电接收机做成一块集成电路,它并不比典型的晶体管大多少。集成电路的发展使我们在利用半导体材料改进电子设备方面跨出了一大步。

2. 缺点

固体器件比起真空管来有很多优点,但它也有一些固有的弱点。首先,它对温度的变化特别敏感,如果在很高温下工作就会损坏。通常,为了使固体电路稳定地工作在一个比较宽的温度范围内,需要增设附加的元件。另外当超过功耗极限或者正常的工作电压被接反时,固体器件也很容易损坏。对比起来真空管器件对于温度和工作电压就没有这么敏感。

另外,半导体器件在大功率和超高频情况下的应用还受到限制,不能完全取代电子管。

尽管固体器件有上述缺点,它仍然是迄今为止最有效、最可靠的电子器件,在国民经济的各个领域得到广泛的应用。

复习题

- (1)由半导体材料制作成的器件叫作_____器件。
- (2)半导体器件不需要预热时间。

- (a)对,(b)错。
- (3)晶体管比真空管更可靠而且寿命更长。
- (a)对,(b)错。
- (4)半导体器件要求高的工作电压。
- (a)对,(b)错。
- (5)半导体器件对温度变化特别敏感。
- (a)对,(b)错。
- (6)请列出半导体器件同真空管相比的四大优点:
- (a)_____,(b)_____,(c)_____,(d)_____。
- (7)3种最常用的半导体器件是____、____和_____。
- (8)半导体器件的基本功能是在电路中起_____作用。
- (9)最先进、最复杂、最高级的固体器件是_____。

答案

- | | |
|-----------|-------------------------------|
| (1) 固体。 | (6) (a)寿命长,(b)功耗小,(c)体积小,重量轻, |
| (2) (a)对。 | (d)坚固可靠。 |
| (3) (a)对。 | (7) 二极管、晶体管和集成电路。 |
| (4) (b)错。 | (8) 控制电流(或电压)。 |
| (5) (a)对。 | (9) 集成电路。 |

五、半导体材料

电导率介于导体和绝缘体之间的材料叫做半导体。它既不像导体那样电流能在其中通行无阻,也不像绝缘体阻挡电流在其中流动。有些半导体材料是纯净的元素,它们可以在元素周期表中找到,例如碳、锗、硅。而另外有些半导体是化合物。

在电子器件中应用得最多的是锗和硅。锗是一种脆性的灰白色物质,发现于1886年。它可以从一种煤的灰烬中得到。这种灰烬是锗的氧化物粉末,可以还原成固态锗。

硅是一种非金属元素,发现于1823年。这种材料可以在地球外壳中大量找到。氧化硅是一种白色或无色的硅化合物,它以沙子、石英、玛瑙和电石的形式广泛地存在于自然界中。从硅化合物中用化学方法可提炼得到纯净的固态硅。一旦得到了纯净的半导体材料以后,适量地加以掺杂就可以得到具有特殊电特性的半导体材料,用来制成半导体器件。

复习题

- (10)最常用的制造电子器件的两种半导体材料是____和_____。
- (11)半导体材料的电阻与良导体相比,
- (a)较高,(b)较低,(c)几乎相等。
- (12)半导体器件是直接由不掺杂的纯净半导体材料制成的。
- (a)对,(b)错。

答案

- (10)硅和锗。

(11) (a)较高____半导体的电阻比导体高,比绝缘体低。

(12) (b)错。

六、锗原子、硅原子和晶体

1. 半导体原子

在研究锗和硅的原子结构之前,我们首先复习一下一般的原子结构模型。原子中包括质子、中子和电子。质子和中子位于原子核内,电子在围绕原子核的轨道上旋转。每一种元素的原子,在它的原子核内有一定数目的质子,在原子轨道上有相等数目的对应的电子。围绕原子核的电子的分布状态对于元素电特性起很重要的作用。一般说来,每个电子有它自己的轨道,若干轨道组合在一起构成原子壳层。就目前已经发现的元素来说,原子壳层数最多为7层。离原子核最近的壳层只有2个电子,第2壳层可以容纳8个电子,第3壳层可容纳18个电子,第4壳层可容纳32个电子等等。原子的最外层叫做价壳层,在价壳层轨道上运行的电子叫做价电子。

图1-1示出了3种不同原子的质子和电子的分布情况。氢原子只有1个壳层,碳原子有2个壳层,铜原子有4个壳层。应该注意到有些壳层包含的电子数目比容许的最多电子数少。

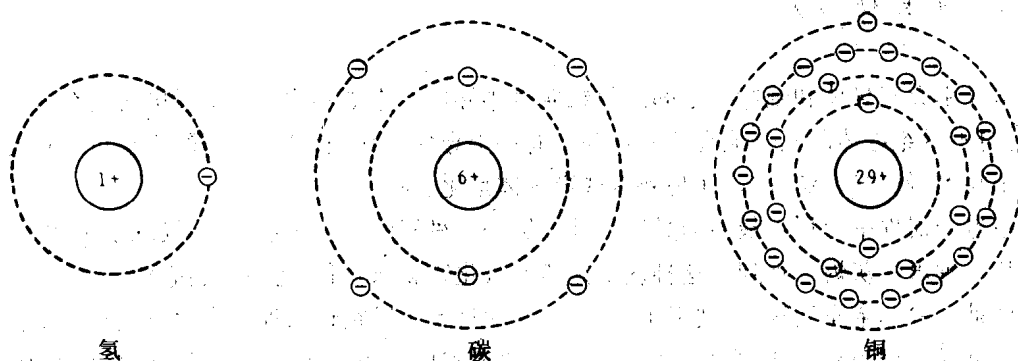


图1-1 典型原子的结构图

在任何特定的原子中,最外壳层的电子数不能多于8个。当外层电子正好等于8个电子时,原子处于完全的稳定状态,它决不轻易地释放和接收电子,具有这种构造类型的原子有氦和氩等。这些元素叫做惰性元素,他们几乎不作任何类型的电气和化学反应。

当一个原子在外壳层具有5个或更多个电子时,它就力图填满壳层以达到稳态。这种类型的元素绝缘性很好,因为各个原子都企图捕获电子而不是释放电子,电子很难自由地从一个原子移动到另一原子。当一个原子在外壳层的电子数目少于4个时,它就比较容易释放这些电子。具有这种类型原子的元素导电性能好。因为他们包含大量自由电子,这些自由电子能够随机地从一个原子向另一原子漂移。

当原子的外壳层正好具有4个电子时,它既不准准备释放也不准备吸收电子。具有这种原子结构的元素既不是良导体也不是绝缘体,人们叫它为半导体。碳元素是半导体材料的一个典

型例子。如图 1-1 中所示,碳原子的最外壳层中正好有 4 个电子。

制造晶体管等器件最常用的两种半导体材料是锗和硅。这两种材料的原子外壳层都具有 4 个价电子。单个锗原子的结构图如图 1-2 所示。锗原子有 4 个壳层,从第一层到最外层的电子分布分别是 2、8、18 和 4 个。因此,总共有 32 个电子围绕着原子核旋转,原子核中总共有 32 个质子。单个硅原子的结构图如图 1-3 所示,

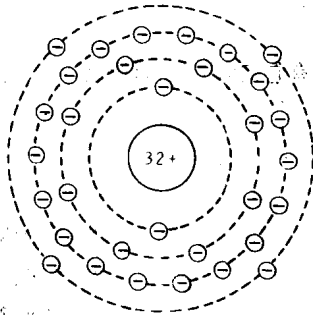


图 1-2 锗原子

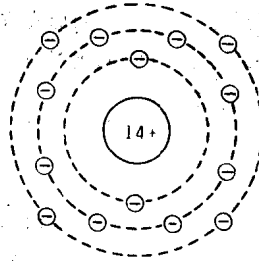
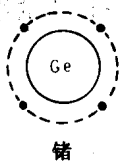
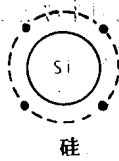


图 1-3 硅原子

它只有 3 个壳层,从第一层到最外层的电子分布分别是 2、8 和 4 个。因此总共有 14 个电子围绕着原子核旋转,原子核中总共有 14 个质子。由于在锗和硅材料中决定电流流动的主要是最外层的价电子,所以可以用锗和硅原子的简化结构图来说明问题。这种简化结构图只画出 4 个价电子围绕着中心核旋转,中心核包括原子核和内壳层。简化结构图如图 1-4 所示。



锗



硅

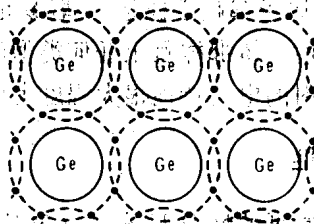


图 1-4 简化的锗和硅原子结构图

图 1-5 锗晶体结构简图

2. 半导体晶体

半导体材料锗的原子排列如图 1-5 所示。每个原子的 4 个价电子与它相邻的 4 个原子共用。这种“共用”构成了所谓的共价键。这些共价键把各个原子联结在一起。由于每个原子都力图吸收电子来填满壳层,结果形成了一种点阵式的结构。这种结构通常叫作晶阵。

硅原子联结成的晶体结构图和锗原子的一样,硅原子之间的共价键也和锗原子的一样。

上述锗和硅的晶阵是不掺杂质的,这种纯晶体通常叫作本征半导体,它是制造晶体管等固体器件的基本材料。

复习题

(13) 中性原子具有相等数目的 ____ 和 ____。

- (14)原子中围绕原子核旋转的电子分别在各种不同的____中运转。
- (15)任何原子的壳层数目不能多于____。
- (16)原子中离原子核最近的壳层中的电子数不能多于____。
- (17)最外壳层叫作____。
- (18)最外壳层中的电子数不能多于____。
- (19)惰性原子最稳定,因为在它的最外层有____电子。
- (20)元素的电气特性决定于原子中____的电子数。
- (21)原子的最外层为4个电子的元素叫____。
- (22)半导体中的原子以____的形式排列。
- (23)半导体中的每个原子和它们相邻的4个原子共同占有它们的电子,以构成____。
- (24)本征半导体不含有____。

答案

- | | | |
|------------|----------|----------|
| (13)质子和电子。 | (17)价壳层。 | (21)半导体。 |
| (14)壳层。 | (18)8个。 | (22)晶阵。 |
| (15)7个。 | (19)8个。 | (23)共价键。 |
| (16)2个。 | (20)最外层。 | (24)杂质。 |

七、本征半导体的导电性

从图1-5可知,纯净的半导体材料(本征半导体),例如锗和硅,由于它们的晶体结构,尽管每个原子只有4个价电子,而在半导体材料内部,它们的每个原子核看起来对应应有8个价电子。因此,每个原子都趋于稳定,不轻易地释放和接收电子。然而,这并不意味着本征半导体像前边所讲的惰性气体那样阻止任何类型的电子运动,因为它还受其它因素的影响,如温度的影响。半导体材料的电气特性很大程度上同温度有关。

1. 低温特性

在温度非常低的情况下,价电子和它的母体原子紧密地结合在一起形成共价键。不论哪一种半导体的价电子都不能在晶体结构中从一个原子向另一个原子漂移,所以材料中没有电流流动。在极低温条件下,纯净的锗和硅晶体在功能上和绝缘体一样。

2. 高温特性

当锗或者硅晶体的温度升高时,材料中的价电子被激活,有些价电子会挣脱共价键,少量电子会随机地从一个原子向另一原子漂移。如果在半导体材料上加一个电压,自由移动的电子(自由电子)就能够形成一个小电流。换句话说,半导体材料的温度升高时,材料就开始具有导体的特性。

3. 空穴

要正确了解半导体材料中电流如何流动,我们必须仔细观察材料的内部结构。当一个电子从共价键中逸出后,在共价键中相应留下一个空位置。这个空位置叫做空穴。由于电子带

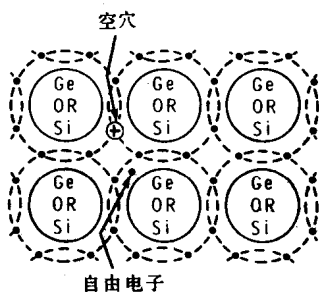


图 1-6 半导体材料中的电子空穴对

有负电荷，所以空穴表示缺少一个负电荷，也即空穴具有正电荷粒子的特性。从共价键中每逸出一个电子，就产生一个空穴。每一对对应的电子和空穴叫作一个电子空穴对。典型的电子空穴对如图 1-6 所示。空穴用一个“+”号表示，说明它带正电荷；电子带负电荷，用“-”表示。图中的半导体材料可以是锗也可以是硅。

电子空穴对的数目随着温度上升而增加。即使在室温下，仍然有少量的电子空穴对存在。有些自由电子会随机地产生漂移，而空穴则力图吸收电子。这就是说，有些电子从一个壳层跳到另一壳层就留下一个空穴，如果有另外一个电子去填充这个空穴，就会在此电子离开的那个壳层上又留下一个空穴。结果就好像是空穴向电子运动相反的方向流动。

4. 电流

如图 1-7 所示，在本征半导体锗或硅上加一电压，带负电荷的自由电子被吸引到电源

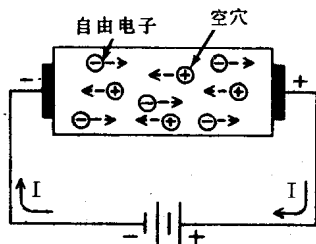


图 1-7 半导体材料中的电流

的正极，自由电子漂移造成的空穴则向电源的负极流去。自由电子流入电压源的正极，就有相等数量的电子离开电压源的负极。这些电子注入半导体材料的左端（见图 1-7），大部分被空穴捕获，电子和空穴重新结合。此时空穴就不存在了。所以空穴总是流向材料的左端然后消失；电子则流向材料的右端，然后流出材料，流进电源的正极。

半导体材料中的电流包括电子流和空穴流，这一点很重要。空穴的功能像带正电荷的粒子（实际上并不存在），而电子才是实实在在的带负电荷的粒子。空穴流和电子流方向相反。当材料的温度增加，材料内部电子空穴对的数目也随之

增多。因为半导体中的电流是由电子空穴对的数目决定的，所以半导体材料中流过的电流也随着该材料温度的增加而增大。另外半导体中的电流需同时考虑空穴和电子的流动，这一点同导体中的电流不同。对于导体，只要考虑其中自由电子的数目就可以了。

复习题

- (25) 在很低的温度下，半导体基本上成为_____。
 - (26) 在很高的温度下，半导体就变成_____。
 - (27) 从共价键中挣脱出来在半导体中漂移的电子叫_____。
 - (28) 从共价键中挣脱出来一个电子，对应就产生一个空穴。
- (a) 对, (b) 错。

- (29) 电子带有__电荷。
 (30) 空穴等效带有__电荷。
 (31) 本征半导体上加一电压, 自由电子就流向__极。
 (32) 空穴的流动方向与电子的相同。
 (a) 对, (b) 错。
 (33) 半导体中电子空穴对的数目随温度的__而增加。
 (34) 半导体中的电阻随温度降低而__。

答案

- | | | |
|-------------|---------|-------------|
| (25) 绝缘体。 | (29) 负。 | (32) (b) 错。 |
| (26) 导体。 | (30) 正。 | (33) 增高。 |
| (27) 自由电子。 | (31) 正。 | (34) 增大。 |
| (28) (a) 对。 | | |

八、掺杂半导体的导电性

本征半导体在室温下只具有少量的电子和空穴, 所以只能传导很小的电流。然而这些材料可以通过掺杂处理使导电性能大大地提高。在锗和硅等本征半导体中加入少量其他元素(这些元素叫作杂质)的技术叫作掺杂。加到锗和硅晶体中去的杂质基本上有两种, 一种杂质为 5 价材料, 因为它由带 5 个价电子的原子所组成; 另一种为 3 价材料, 因为这种材料的原子带有 3 个价电子。

1. N 型半导体

锗和硅等本征半导体中掺以 5 价材料如元素砷(As)后, 原晶体中的有些原子就被砷原子取代。此时材料的晶体结构如图 1-8 所示。砷原子取代了锗或硅原子后, 它的 5 个价电子中的 4 个与相邻的 4 个锗或硅原子的价电子组成共价键, 而其第 5 个价电子未形成共价键, 它受到砷原子核的束缚力很弱, 容易挣脱束缚成为自由电子。这样, 1 个砷原子给半导体晶体带来了一个附加电子, 所以把这种砷原子叫作施主原子。在半导体材料中有很多施主原子, 故而也就有很多自由电子。这种掺杂的锗或硅晶体具有带负电荷的附加电子, 所以通常把这种材料叫作 N 型(N 是英文“负”字的第一个字母)半导体。

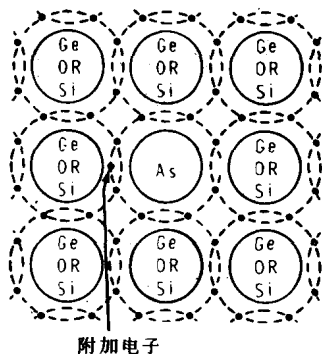


图 1-8 掺以杂质砷的半导体材料

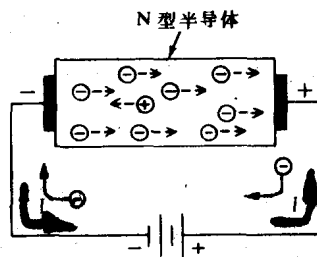


图 1-9 N 型半导体的导电性

图 1-9,若在 N 型半导体两端加上电压,施主原子提供的自由电子就会流向电源的正极。同时也有少数从共价键中挣脱出来的附加自由电子也流向电源正极。这些附加的自由电子是由于共价键破裂而形成的,它们和在纯净半导体中一样,也要形成电子空穴对,对应的空穴流向电源的正极。在正常室温下,由施主原子所提供的自由电子的数目比共价键破裂所形成的电子空穴对的数目多得多。这就是说,N 型半导体中电子的数目大大地超过空穴的数目。电子是多数,叫作多数载流子;空穴是少数,叫作少数载流子。

2. P 型半导体

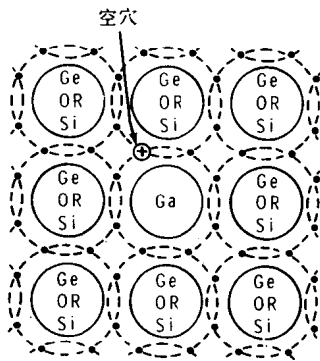


图 1-10 掺以杂质镓的半导体材料

由于空穴极易接受电子,故提供空穴的杂质原子通常叫作受主原子。受主原子在晶体中固定不动,而空穴可以自由移动。

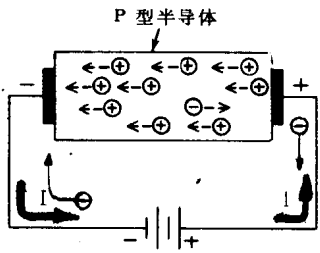


图 1-11 P 型半导体的导电性

在本征半导体中掺以 3 价材料如镓(Ga), 半导体晶体中的有些原子将被镓原子所取代。晶体结构如图 1-10 所示。镓原子和其相邻的 3 个锗原子共同占有它的三个价电子,构成共价键。因为它只有 3 个价电子,所以,就在与第 4 个相邻原子的共价键中留下一个空穴(图 1-10 中用“ $\oplus$ ”号表示)。由于在半导体材料中加了许多镓原子,所以其中就有大量空穴存在,这些空穴就像容易漂移的带正电荷的粒子。这种类型的掺杂半导体叫作 P 型(P 字为英文“正”的第一个字母)半导体。附加的空穴使得电子在运动时就有更多与空穴结合的机会,因此这些空穴实际上是从一个壳层漂移到次一壳层。由于空穴极易接受电子,故提供空穴的杂质原子通常叫作受主原子。受主原子在晶体中固定不动,而空穴可以自由移动。

图 1-11 所示,在 P 型半导体加上电压,受主原子提供的空穴从正极向负极流动。它们的流动方式如前所述的一样,实质上也是电子的流动。例如当某一个电子流入其附近的空穴,就在这电子原来的地方留下一个空穴,等效于空穴移向电子的反方向。由于电子是流向正极的,空穴就流向负极。

除了受主原子产生的空穴之外,P 型半导体中还存在少数由于共价键破裂所形成的空穴。

这些空穴与纯净半导体中产生的电子空穴对的机理一样;这些空穴流向负极,而相应的电子被正极所吸引。

正常条件下,由受主原子所提供的空穴数目比由于共价键破裂所造成的空穴和电子的数目多得多,所以 P 型半导体中空穴的数目大大超过自由电子的数目。空穴占大多数,叫作多数载流子;电子占少数,叫作少数载流子。

应该着重指出的是把上述半导体材料叫作 N 型或者 P 型半导体是因为它们的多数载流子是电子或者空穴,他们分别带有负电荷和正电荷,而 N 型或者 P 型半导体本身并不带电荷,这两种材料都是中性的。这是因为材料中的每一个原子都有相等数目的电子和质子,电子和空