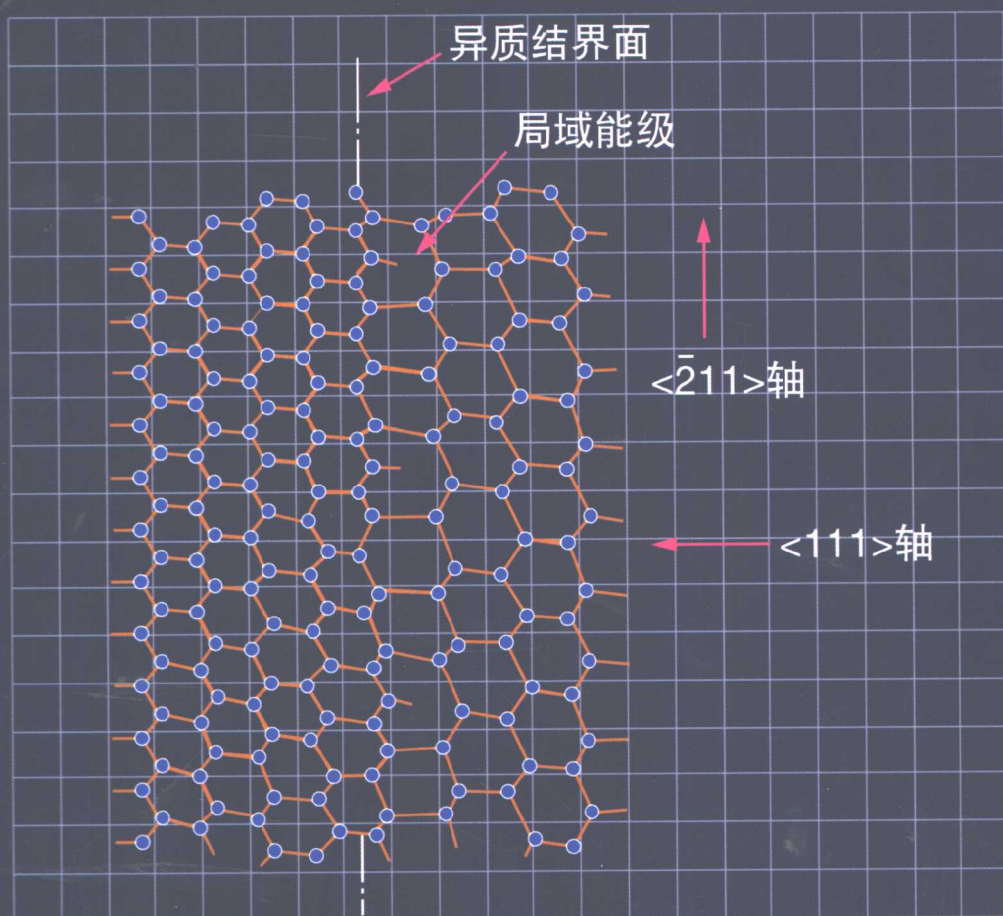


OHM 大学理工系列

半导体器件

〔日〕滨川圭弘 编著



科学出版社

OHM社

图字:01-2002-0304 号

Original Japanese edition

Shinsedai Kougaku Series; Handoutai Device Kougaku

Edited by Yoshihiro Hamakawa

Copyright © 2000 by Yoshihiro Hamakawa

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**新世代工学シリーズ
半導体デバイス工学**

濱川圭弘 オーム社 2001

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件/(日)濱川圭弘编著;彭 军译. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-010104-9

I. 半… II. ① 濱… ② 彭… III. 半导体器件-教材 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008229 号

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2002 年 3 月第一次印刷 印张: 8 3/4

印数: 1—5 000

字数: 128 000

定 价: 17.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着重为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪大学名誉教授

副主编

西川祐一 大阪工业大学校长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广濑全孝	广岛大学教授	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	大阪大学教授
池田克夫	京都大学教授	滨川圭弘	立命馆大学教授 大阪大学名誉教授

前言

在信息化社会飞速发展的时代里,我们在忙碌中度过一日又一日。特别是在近几年,信息技术(IT)已经成为充溢于社会上各种活动中的关键词。由于报纸、杂志等各种媒体的宣传,不仅使一般的社会人,甚至在中、小学生中也涌起了 IT 化浪潮。互联网打开了知识之窗,成为进入 21 世纪新的信息化社会的象征。利用 e-mail 在瞬间完成了商务联络或亲友之间的寒暄问候;利用互联网,足不出户,就能够对旅行中列车或飞机的时刻表和目的地的地图,甚至于购物商店、旅馆了如指掌。通过 IT 技术的利用,使社会活动能够更有活力、更有效率。那么支撑 IT 技术进步的驱动力是什么呢?那就是人们经常说的,不断追求发展以“更低的能耗”、“更快的速度”处理“更多的信息”为目标的新技术。本书中所介绍的“电子器件的发展进步”的历程就充分体现了这一点。

IT 的原动力是半导体技术。本书所涉及到的内容是 IT 的基本技术。特别是最近 10 年,半导体集成电路技术已成为 IT 技术革命的中心,在这个领域中,从担负兆位次信息处理的 LSI 到处理千兆位的 VLSI,进而迈向 ULSI。近来,SoC(system on chip)超小型大规模计算机系统的单片化技术又成为研究开发的新热点。

进入 21 世纪,IT 领域无疑将会有更加迅速的发展。在这种形势下,希望担负着发展 21 世纪最尖端技术重任的年轻一代认真学习本书所介绍的内容。希望各位都能成为 21 世纪文明的开拓者。

本书各章的执笔者都是电气电子领域的材料物理专家和电子电路系统专家。本书如能够像“OHM 大学理工系列”的初衷那样受到读者青睐,我们将感到不胜荣幸。

滨川圭弘

目 录

第 1 章 半导体器件的发展	1
1.1 电子器件发展历程中的“潮流与波浪”	1
1.2 从体单晶时代向多层化薄膜器件时代的 发展	3
练习题	6
第 2 章 半导体的电学性质	7
2.1 半导体的导电率	7
2.2 晶体中电子的有效质量	10
2.3 电子状态密度	13
2.4 载流子密度与温度及禁带宽度的依赖关系	18
2.4.1 载流子密度与温度的关系	18
2.4.2 载流子密度随禁带宽度的变化	19
2.4.3 载流子密度与费米能级位置的 关系	19
练习题	20
第 3 章 半导体界面的电子现象	21
3.1 半导体的清洁表面与实际表面及其电子 状态	21
3.2 pn 结	24
3.3 异质结	26
3.4 金属-半导体界面	31
3.5 半导体-电介质界面	36
3.6 晶粒间界	40
练习题	42

第 4 章 各种半导体二极管	43
4.1 pn 结二极管	43
4.1.1 pn 结二极管的直流电流-电压特性	44
4.1.2 pn 结二极管的交流特性	48
4.1.3 pn 结二极管的直流电压-电容特性	49
4.1.4 电压-电流特性理论的修正	51
4.2 肖特基二极管的直流电流-电压特性	55
4.3 异质结二极管	57
4.4 江崎二极管与反向二极管的直流电流-电压特性	60
4.4.1 电子穿过薄势垒的几率	60
4.4.2 简并半导体 pn 结的电压-电流特性	61
4.4.3 反向二极管的直流电流-电压特性	63
练习题	64
第 5 章 双极型功能器件	65
5.1 晶体管的作用	65
5.1.1 双极晶体管的结构	65
5.1.2 接地电路与电流的流动	66
5.1.3 输入-输出特性	69
5.2 双极晶体管的工作原理	71
5.2.1 晶体管的放大功能	71
5.2.2 晶体管内部的电流输运机理	72
5.3 晶体管的性能参数(α_0^* , β_0 , γ_0 , f_a)	76
5.3.1 发射极注入效率 γ_0	76
5.3.2 基区输运效率 β_0	76
5.3.3 收集效率 α_0^*	77
5.3.4 高频特性	77
5.4 漂移晶体管	79
5.4.1 载流子扩散的渡越时间	79
5.4.2 漂移晶体管的结构和原理	80
5.5 晶闸管与 SCR, GTO	81
5.5.1 晶闸管的结构与工作原理	81

5.5.2	SCR(silicon controlled rectifier)	83
5.5.3	GTO(gate turn off)	86
	练习题	87
第 6 章	MOS 型控制器件	89
6.1	场效应晶体管的工作原理	89
6.1.1	场效应晶体管的分类与结构	89
6.1.2	MOS 器件的结构	90
6.2	MOS 晶体管的电流-电压特性	92
6.2.1	直流输出特性	94
6.2.2	小信号交流特性	95
6.3	MOS 晶体管的种类与结构	97
6.4	MOS 存储器	99
6.4.1	MOS 存储器的分类	99
6.4.2	DRAM 与 SRAM	99
6.5	CCD 与 BBD 及其电荷转移功能	101
6.5.1	CCD	101
6.5.2	CCD 的原理	102
6.5.3	CCD 的用途	103
	练习题	104
第 7 章	异质结器件	105
7.1	GaAs 系异质结器件的重要性	105
7.1.1	GaAs 系异质结器件是重要的发展趋势	105
7.1.2	GaAs 的特征与物理基础	106
7.2	异质结与二维电子气物理	106
7.2.1	载流子关闭引起的二维效应	106
7.2.2	能带结构	108
7.3	HEMT 的工作原理和电学特性	109
7.3.1	HEMT 的基本结构与高电子迁移率特性	109
7.3.2	HEMT 的工作原理	112
7.3.3	电学特性	114
7.4	微波 HEMT	116

7.4.1 低噪声 HEMT	116
7.4.2 高输出 HEMT	119
7.5 超高速数字 HEMT	120
7.5.1 基本电路形式和开关特性	120
7.5.2 计数器与可控制性	121
练习题	124
练习题简答	125
参考文献	129

第 1 章

半导体器件的发展

被誉为 20 世纪最重要发明之一的晶体管的出现,使得电子器件中真空管几乎全被半导体器件所替代,并形成固体电子工程这一重要领域。环顾我们的社会生活,从茶余饭后的“电视 VTR”,到办公室的“OA 设备”、生产车间的“CVD 或工业机器人”,以及计算机信息处理系统,电子技术已经成为现代文明社会中不可或缺的工具。的确,如果没有晶体管,电子技术也就不可能有今天的巨大进步,开发宇宙也只能是天方夜谭。看到这些,我们深切地感受到晶体管的诞生对现代文明所做出的伟大贡献。

本章,首先回顾电子器件从电子管到晶体管的发展历史,分析电子器件迅速发展的原因,探讨潜在的趋势,展望今后的发展。

1.1 电子器件发展历程中的“潮流与波浪”

科学技术的发展过程有“潮流”与“波浪”。当初,发明真空管的时候,首先发现克鲁克斯管中电子以束状射向阳极的现象。当理论上和实验上确认这种电子束能够被电场或磁场有效的控制(电子束的偏转),并围绕电子束这一概念,建立起相应的理论,“热电子发射”、“汞扩散泵以及油扩散泵高真空技术”的实现,推进了真空技术的进步,才可能有发明真空三极管等技术的创新。

晶体管的诞生也是如此,首先经历了半导体材料的高纯制备技术与单晶生长技术的开发阶段,然后应用这些技术制造出锗单晶,并且在锗单晶上用被称为猫须(cat whisker)的探针实现了“注入空穴”,终于发现了晶体管的功能。在实现了对半导体电子和空穴密度有效控制的价电子控制技术后,制作可设计半导体材料“synthetic material”的条件成熟了。这样,从最初的可靠性及功能还远不如电子管的晶体管发展到今天已经迅速崛起成长为强大的

半导体产业,也是经历了一个发展过程的。就是说,每当掀起一个“创新波浪”时,基本的科学见解是开端,随着围绕它所需的周边技术的发展与成熟,多元的“技术潮流”的交叉发展,并且巧妙地应用于所开发的技术领域,才能最终形成巨大的浪潮。

在电子技术发展的历史上,能够与晶体管相媲美的功能器件无疑是前面所说的 1906 年发明的真空三极管。当时是在基于真空二极管的工作基础上,增加了放大、振荡等功能,使得被动电路能够主动的工作,将应用范围一举扩大到当时的无线通信的发射领域。但是,作为电子技术,电子电路的各种功能被广泛地应用是在进入 20 世纪 30 年代后出现无线电广播,并且接收用四极、五极管成为一般大众化的商品之后开始的。

图 1.1 是以功能器件为中心的电子技术进步与变迁示意图。表示电子设备中所使用器件数目随着年代的推移而增长的情况,它反映出电子技术的发展历程。可以看出,电子设备的信息处理能力随着时间的推移逐步变为大容量化、复杂化,为此所必须的器件数目呈指数关系增长。当然,这种发展是受信息处理的经济原

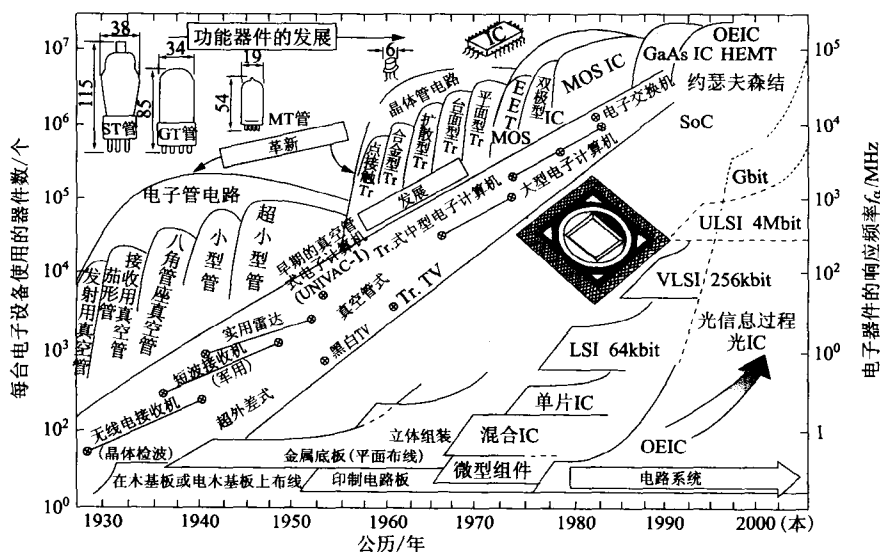


图 1.1 电子器件的进步(从真空管到晶体管,从集成电路到光集成电路的进步)总是以“更低的能耗”、“更快的速度”处理“更多的信息”这样的信息处理经济化的大原则为驱动力发展起来的。最终目标是光信息处理。

则支配的。就是说,在追求信息处理高速化的同时,必须考虑完成一种功能所必要的电源“节能化”、“小型化”问题。

同时,技术的发展要与制造工程以及维持生产设备的合理化相联系,要进行产品的“标准化”。以接收管为例,它的结构形式最初是“ST管(茄形管)”,后来发展为“GT管(八角管座真空管)”,进而向“MT(小型)管”以及“SMT(超小型)管”演变。

晶体管诞生以来的固体电子工程时代继承了以信息处理经济化为基本原则的技术开发潮流,就是说要满足以“更低的能耗”、“更快的速度”处理“更多信息”的技术要求。晶体管由最初的合金型晶体管→扩散型→离子注入型→外延型,然后是平面型晶体管,不断地演变。

另一方面,在图的右下方画出了由微功能模块向 IC 及电路系统一体化、集成化发展的新的潮流。由混合 IC→单片式 IC→LSI→VLSI 的进展,最近,已实现了把整个电路系统制作在一个小片上的 SoC。

1.2 从体单晶时代向多层化薄膜器件时代的发展

“硅单晶”是构筑起电子技术新时代基础的现代新材料的代表。面向 21 世纪,将会出现什么样的“技术创新”?或者说,按照前述的逻辑推论,根据近 10 年间技术发展的潮流,以及从科学技术发展中得到的新启示,不断向可设计材料(synthetic material)发展的新材料是什么?

首先,由于最近材料精制技术与超高真空技术的进步,不仅无机材料,甚至有机金属都可以得到超高纯度的原材料,它们满足了 ALE(原子层外延)、MBE(分子束外延)以及等离子 CVD、MOCVD、光 CVD、ECRCVD 等新的薄膜制备技术的需要。处于这种技术新趋势中的薄膜材料,无疑不仅有 Si 等元素半导体和以 GaAs 为代表的化合物半导体,以及能有效进行价电子控制的四配位系非晶态半导体,还有非晶态金属形状记忆合金等多种多样的新合金膜、透光性强电介膜,被称为“新型陶瓷”的多种材料都相继实现了大面积薄膜化、多层薄膜化。

特别是在结晶材料获得重要发展的启示下,非晶态物质和新

型陶瓷材料的强度也得到提高。复杂的外延(epitaxial)生长技术不再那么神秘,众多的异质材料衬底上都可以容易地生长出大面积的均匀薄膜材料,并且易于加工,适于批量生产。我们注意到,这些材料中不仅包括半导体,还涉及从金属、电介质材料到PVDF(聚偏二氟乙烯)那样的聚合物等范围很宽的多种材料。就是说,“从体单晶时代向多层化薄膜器件时代发展”是21世纪支配电子技术的材料技术的“新潮流”。

这10年中,由于材料科学的进步,相继开发出大量小型、轻量、可靠性高的器件。在这些器件的开发过程中,在金属、半导体、介质材料等材料制备技术取得巨大进步的同时,器件制造工艺技术也得到迅速发展。在图1.2中,表示以这两者为支柱的半导体器件的发展过程,新器件就诞生在图中两种波纹线的交结点。以图中半导体材料的技术革新为例,硅和锗等单晶半导体的制备技术由于切克劳斯基(CZ)结晶和悬浮区熔(FZ)结晶技术的发展使得能够制备超高纯度、大尺寸的单晶体,所以最初的晶体管诞生了。

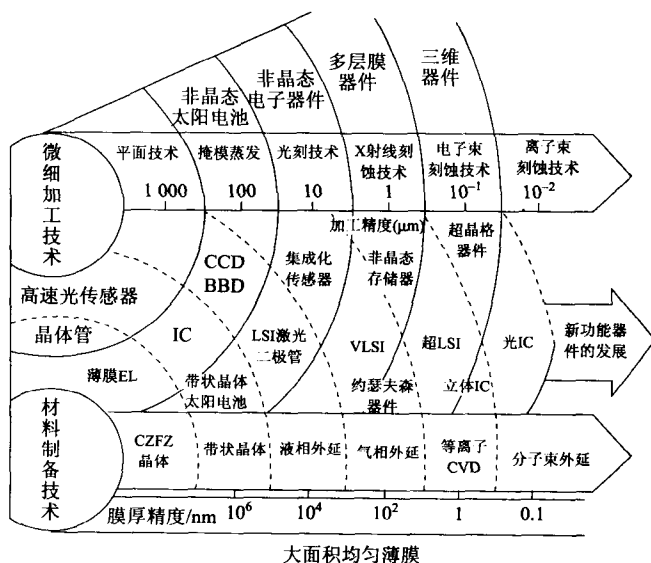


图 1.2 由于微细加工技术与材料技术的进步诞生新的功能器件

电子设备中使用部件数目的增加,对于电路系统的组装形式也带来重大变革。例如,初期的电路基板是用木质或电木等绝缘

物组装的,改为金属底板后,有利于各电路的接地和电磁屏蔽,并且使得整个电路能够“小型化”。在此基础上,电子电路的组装也正在改变为立体集成式的电路集装架方式。如图所示,由“印制电路板”向“微型组件”发展,这种电路系统小型化的思想,成为现代集成电路发展的基础。

回顾 20 世纪 50 年代到 60 年代多路电话交换装置的变迁过程,可以看到,在由电子管向微型组件化的晶体管电路推进的 10 年间,设备的容(体)积减小为最初的 570 分之一,重量减轻为 400 分之一,工作消耗的电力降低到 1000 分之一。高速运行与降低电力消耗的技术潮流促进了器件微细加工精度的提高,并导致 IC (集成电路)的诞生。同时围绕着微细加工水平的提高,在材料制备技术方面,已由仅仅追求高纯度的体单晶发生了演变,即带状单晶→外延薄膜→等离子 CVD 非晶态薄膜等,就是说形成了从体单晶向多层化薄膜单晶发展的新技术潮流。这种由体单晶向薄膜以及它的多层化发展的潮流,不仅对半导体,同样波及金属和介质材料。表 1.1 列举出这样的技术发展潮流。

表 1.1 半导体器件的技术走向
——从体单晶时代到多层薄膜器件时代——

	实用化需要	薄膜化技术
金 属 ↓ 半 导 体 ↓ 绝 缘 体	金属薄板成型 (微屏等)	电成型
	金属涂膜 (车,家具等)	等离子 CVD, 电离镀膜
	非晶磁性膜 (激光唱片等)	溅射, 反应溅射, EB 蒸发
	单晶薄膜 (电子器件, 传感器)	外延, MBGE, CVD, 光 CVD, ECRCVD
	非晶半导体膜 (太阳能电池, TET 等)	MBGF+等离子 CVD+光 CVD 等离子 CVD, 光 CVD, ECRCVD
	(3 维 IC, 发光器件) (CCD, BBD, J. J. 器件)	
	介质材料的薄膜化 (智能化传感器, EL, 光 IC, IROPFET 等)	等离子 CVD(Si_3N_4 , SiO_2) 光 CVD, ECRCVD

从晶体管到 VLSI(very large scale integrated circuit), 微细加工技术的进步是微电子取得巨大进步的半导体技术中极为重要的潮流之一。从光刻到 X 射线刻蚀, 从电子束到离子束刻蚀, 进而到

基于 SR 光的 LIGA(lithographic galvanofforming and abforming)技术的垂直加工,我们看到线条更加微细,电子器件向表面化、多层化发展的惊人变化。

促使这种技术开发潮流的驱动力,是以“低少的能耗”、“更快的速度”处理“更多的信息”的需求,也就是“信息处理经济”的大原则在起作用。高度集成化,从简单平房式 IC 向高层建筑式 IC(集成电路的三维化)演变是人们长期以来执着的追求,今日的多层薄膜化技术的飞速发展使我们感受到这一梦想正在实现。

练习题

1. 从电子管到晶体管、IC,回顾支撑电子技术进步的功能器件的发展历程,试分析技术发展的驱动力究竟是什么?从这种发展历程,试回答支撑未来发展的新功能器件是什么?

第 2 章

半导体的电学性质

固体按照导电性能可以分为三类:良导体、半导体及绝缘体。半导体这一名词最早出现于 19 世纪,那时,人们把既不是金属那样的良导体,又不像玻璃或云母之类绝缘体的物质一概称为半导体。实际上这是一个模糊的定义。事实上,现在成为电子技术的重要材料的超高纯度的锗和硅单晶出现之前,代表性的半导体材料是硒薄膜和氧化亚铜,它们经常会出现同样条件下得到的产品的导电率会有数量级差别的现象,甚至连它的电学性质都难以正确地把握。

进入 20 世纪 40 年代,用区熔法和切克劳斯基法人工制造出高纯度的锗和硅单晶,随后,通过对这种单晶掺入极微量的杂质,得到了可控导电类型和导电率的半导体材料,实现了所谓的“价电子控制技术”,从而使半导体成为可以用于制造器件的可设计材料(synthetic material)。从 20 世纪初开始不断发展和完善起来的量子力学理论是固体电子论的基础,事实证明固体电子论很好地解释了半导体电学性质的理论问题,并成为一個崭新的领域——“固体电子学”的基础,进而,发展为“微电子学”,成为近代文明社会不可或缺的科学技术领域。

本章,首先简要介绍建立在量子力学基础上的固体物理学基本理论,然后学习“半导体器件工程”的基本知识和器件设计、制造技术,以及新器件研究、开发所必须的基础知识。

2.1 半导体的导电率

在半导体两端加一电压 V ,并形成均匀电场 E 的情况下,半导体的导电率 σ 由欧姆定律定义为

$$J = \sigma E \quad (2.1)$$

式中, J 为流过半导体的电流密度。半导体中的电流输运者(载流

子)有电子和空穴,载流子密度分别为 n 和 p ,在沿着电极方向的电场 E_x 作用下,流过半导体的电流为电子电流与空穴电流之和:

$$J = J_n + J_p = e p \langle v_{dp} \rangle - e n \langle v_{dn} \rangle \quad (2.2)$$

式中, $-e$ 是电子电荷, v_{dp} 和 v_{dn} 是空穴和电子的漂移速度。

为简单起见,我们在讨论电子的运动时,认为当外加电场为零时,电子的速度分布为各向同性的, $\langle v_{dn} \rangle = 0$; 在外加电场作用下,由于库仑力 $-eE_x$ 的作用,电子在 x 方向上获得的加速度为 $-eE_x/m$, 电子一方面作布朗运动,一方面在电场的反方向上以平均速度 $\langle v_d \rangle$ 运动。称这种运动速度为漂移速度(drift velocity)。

外加电场 E_x 时,电子受力 $-eE_x$ 而运动,假设与声子和杂质碰撞时的平均碰撞时间为 τ_n , 那么,单位时间内平均动量的变化为 $\langle p_{xn} \rangle / \tau_n$ 。因此,按照牛顿定律,动量随时间净的变化量等于在电场力 $-eE_x$ 作用下增加的部分与因碰撞而损失的部分之差。

$$\frac{d\langle p_{xn} \rangle}{dt} = -eE_x - \frac{\langle p_{xn} \rangle}{\tau_n} \quad (2.3)$$

在稳定状态下, $d\langle p_{xn} \rangle / dt = 0$, $\langle p_{xn} \rangle = m_n \langle v_{dn} \rangle$, 所以由式(2.2)得到

$$\langle v_{dn} \rangle = -\frac{e\tau_n}{m_n} E_x = -\mu_n E_x \quad (2.4)$$

如前所述, $\langle v_{dn} \rangle$ 是漂移速度,它对电场之比例系数的绝对值

$$\mu_n = \frac{e\tau_n}{m_n} \quad (2.5)$$

是表征电子运动速度的常数,称为迁移率(mobility)。因此,电流密度 J_n 可以表示为

$$J_n = n(-e)\langle v_d \rangle = \frac{ne^2\tau_n}{m_n} E_x \quad (2.6)$$

类似地,可以得到空穴电流表达式,结果,式(2.2)可以写为

$$J = J_n + J_p = eE(n\mu_n + p\mu_p) \quad (2.7)$$

$$\text{式中, } \mu_n = \frac{e\tau_n}{m_n}, \mu_p = \frac{e\tau_p}{m_p} \quad (2.8)$$

这样,可以把宏观的欧姆定律明确地表示为由荷电粒子电子与空穴的流动构成电流的关系式。

晶体中电子与空穴一边作热运动(类似于布朗运动),一边在电场 E_x 作用下加速,受到偏离晶格振动和晶体周期势场的作用,也就是受到晶格缺陷和杂质散射作用的同时输运电荷。但是,各种散射是相互独立的现象,假设各种散射机构的平均碰撞时间分

别为 τ_L 、 τ_I 和 τ_D ，那么，单位时间内总的碰撞概率 $1/\tau$ 为各种散射机构碰撞概率之和：

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_L} + \frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_D} \quad (2.9)$$

对于代表性的半导体材料， τ_L 、 τ_I 、 τ_D 的值可以通过精确测定各种材料的迁移率与温度的依赖关系，并根据它的理论模型，得到数值化的数据。由这种结果发现，声学波声子散射的平均碰撞时间与绝对温度 $T^{-3/2}$ 成比例，其迁移率 μ_L 也与 $T^{-3/2}$ 成比例。

另一方面，半导体中带正电荷的电离施主和带负电的电离受主也会以库仑电场作用对荷电载流子散射，这种现象与 α 射线的卢瑟福散射类似，同样地可以用经典方法处理，结果表明， τ_I 正比于 $T^{3/2}$ ， μ_I 也与 $T^{3/2}$ 成比例，温度越高，迁移率越大。此外，位错散射 τ_D 也与 T 成比例。因此，在一定温度下，测定的载流子迁移率 μ_n 或 μ_p ，是取决于各种散射机构作用的迁移率的并联效果，即

$$\mu^{-1} = \mu_L^{-1} + \mu_I^{-1} + \mu_D^{-1} \quad (2.10)$$

实际上 μ 的值取决于三种散射机构作用下最小的迁移率值。

n 型锗双晶晶界面处产生的 p 型电导率与温度有关系，图 2.1

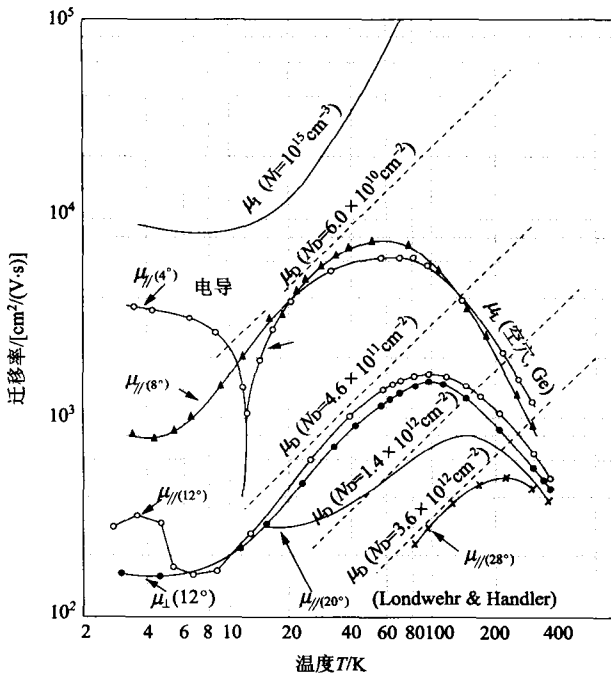


图 2.1 从锗双晶晶界面电导率求得的迁移率 μ 及其与散射机构的关系 ($\mu_{//}$ 和 $\mu_{\perp}$ 都是位错散射迁移率 μ_D ， N_D 是位错密度，(4°) 或 (8°) 表示错角)