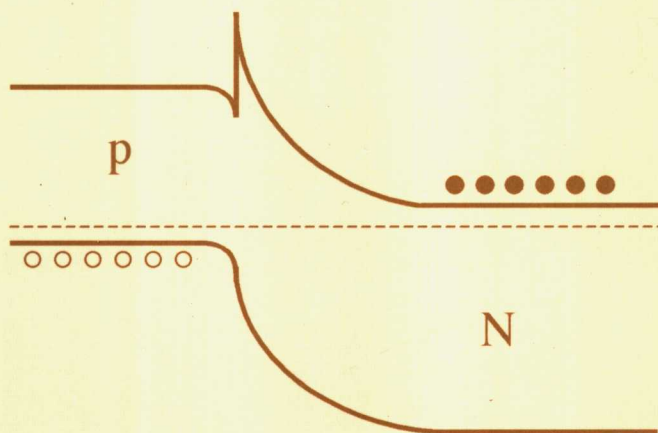


半导体科学与技术丛书

半导体异质结物理

(第二版)

虞丽生 编著



科学出版社
www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

半导体异质结物理

(第二版)

虞丽生 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了国内外半导体异质结方面的研究成果,较系统地介绍了半导体异质结的基本物理原理和特性.本书共分10章,内容有半导体异质结材料特性、能带图、伏安特性、异质结晶体管、二维电子气及调制掺杂器件、异质结中非平衡载流子特性、半导体异质结激光器、半导体异质结的光电特性、氮化镓异质结、超晶格和多量子阱.

本书可供已学过半导体物理的高年级本科生、研究生及相关人员阅读.

图书在版编目(CIP)数据

半导体异质结物理/虞丽生编著. —2版. —北京:科学出版社,2006

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 7-03-016884-4

I. 半… II. 虞… III. 半导体-异质结-物理性质-研究 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 010129 号

责任编辑:田士勇 张 静/责任校对:鲁 素

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1990年5月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年5月第 二 版 印张: 23 3/4

2006年5月第二次印刷 字数: 443 000

印数: 751 3750

定价: 52.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问 王守武 汤定元 王守觉

顾 问 (按姓氏汉语拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾

沈学础 王 圩 王启明 王阳元 王占国

吴德馨 郑厚植 郑有炘

主 编 夏建白

副主编 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林

黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深

刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标

申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光

杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣

张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用,它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新,并在许多技术领域引起了革命性变革和进步,从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后,在国际上对中国禁运封锁的条件下,我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下,自力更生,艰苦奋斗,从无到有,在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果,为我国半导体科学技术事业的发展,为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前,在改革开放的大好形势下,我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统,正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我国国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果,发展我国的半导体事业,使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域,包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作,总结自己的研究经验,吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来,为他们提供一套有用的参考书或教材,使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究,为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展,力求覆盖较广阔的前沿领域,展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题,而不求面面俱到。在写作风格上,希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点,深入浅出,图文并茂,文献丰富,突出物理内容,避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会,将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005年3月16日

第二版前言

半导体异质结就是两种不同的半导体材料结合在一起的结构. 在这种结构中电子的行为, 光和电子的相互作用以及其他一些物理性质与在单一的半导体材料中不同. 半导体异质结广泛地应用在半导体器件的设计和制备中. 早在 20 世纪六七十年代, 人们已经开始研究半导体异质结的物理特性. 1972 年 A. G. Milnes 和 D. L. Feucht 出版了名为《异质结和金属半导体结》(Heterojunction and Metal-Semiconductor Junction)的书, 1974 年 B. L. Sharma 和 R. K. Purohit 出版了《半导体异质结》(Semiconductor Heterojunctions)的书, 系统总结了早期研究成果. 20 世纪 60 年代末, 室温连续的砷化镓/铝镓砷双异质结激光器的成功开创了一个新的时代. 它使光纤通信成为可能, 从而才会有今天遍布全世界的互联网. 砷化镓/铝镓砷双异质结激光器的倡导人 H. Kroemer 和最早研究出砷化镓/铝镓砷双异质结激光器的人之一 Zh. I. Alferov 因此而获得了 2000 年的诺贝尔物理学奖. 由于研究半导体异质结界面上二维电子气的量子霍尔效应获得的成果, K. Von Klitzing 获得了 1985 年的诺贝尔物理学奖. 1987 年, 作者在给北大物理系的研究生讲了几年“半导体异质结物理”课程以后, 深感需要重新写一本系统地论述半导体异质结物理性质的书, 给进入这一领域的初学者作为台阶和入门. 在黄昆先生的鼓励下及夏建白等人的帮助下, 《半导体异质结物理》第一版于 1990 年出版.

15 年过去了, 半导体异质结在半导体器件中的应用又有了很大的增长. 在异质结器件和量子阱超晶格的物理和器件方面又出现了数以万计的文献报道. 还有一些新的半导体异质结材料和器件, 例如氮化镓及以它为基的电子和光电子器件出现. 半导体异质结的物理研究也有不少进展. 这一领域的学生, 研究人员也在大幅度增长. 夏建白院士建议把《半导体异质结物理》一书再版, 并给予极大的鼓励和促进. 作者本人虽觉自身水平有限, 还是决定再版. 本书第一版中介绍的半导体异质结的基本物理原理和特性, 如异质结能带图、伏安特性、异质结界面的二维电子气和非平衡载流子的行为等在再版中保留下来了. 虽然在 15 年后的今天再来看当初的内容和文字, 有许多不满意之处, 但因为是再版, 不是重写, 1~6 章基本未变. 只在每一章的后面加了一些文字, 指出了一些新的参考文献. 半导体激光器是异质结应用很成功的例子, 而在第一版中过于简略. 再版中重新写了第 7 章“半导体异质结激光器及光波导”, 对其作了详细的介绍. 原来的第 7 章“半导体异质结的光电特性”也重新写过, 加了不少新的内容变成了第 8 章. 另外新写了第 9 章“氮化镓材料及其异质结特性”, 这是近十几年来才蓬勃发展起来的领域. 作者本人在这 15 年

里和以前的 20 年中一直在半导体激光器和光波导以及氮化镓材料的电学光学特性等方面做第一线的实验研究工作. 在这些领域有一些切身的体会, 所以才重新改写了 7、8、9 三章. 在第 10 章“半导体超晶格和多量子阱”中保留了原来的量子阱超晶格的基本原理, 另外加了一节“量子阱和超晶格的近期进展”, 简单介绍近期发展起来和应用的几个方面, 方便读者做进一步探讨. 关于 GeSi 异质结的一些基本特性也作为一节加到第 4 章中. 本书仍是以介绍半导体异质结和器件的基本原理为宗旨. 如果要对涉及的某一特定方面做深入探讨, 还须参考相应的专著. 本书可作为从事这方面研究的高年级大学生, 研究生和有关人员入门的参考书. 作者水平有限, 如果能够为初学者提供一些帮助已是幸甚.

2005 年 9 月

第一版前言

A. G. Milnes 和 D. L. Feucht 1972 年编写的《异质结和金属半导体结》和 B. L. Sharma 和 R. K. Purohit 1974 年编写的《半导体异质结》，总结了异质结研究初期的一些成果。近十几年来，对半导体异质结的研究，无论在理论上还是在应用上都取得了很大的进展，二维电子气、调制掺杂、量子阱及超晶格的研究为半导体异质结增添了许多全新的物理内容。异质结晶体管、高电子迁移率器件、异质结激光器和量子阱及超晶格器件在集成电路、集成光学和光纤通信中有着重要的应用前景。半导体异质结是当前迅速发展的重要领域之一。

本书系统地论述了半导体异质结的基本物理性质，较全面地介绍了近十几年来的最新进展，可供高年级本科生、研究生及有关方面的工作人员参考。本书在编写的过程中得到了黄昆教授的关怀，他亲自审阅了第 8 章全部和第 5 章的主要部分，提出了若干重要修改意见，作者在此表示衷心的感谢。夏建白同志花费很多精力对本书进行了全面细致的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见；于淦同志审阅和修改了第 5 章的部分内容。在编写的过程中还和韩汝琦、江丕桓、韩汝珊、陆果、叶良修等同志进行了有益的讨论。作者在此一并表示感谢。

限于作者的水平，本书难免有许多错误和不妥之处，希望专家和读者指正。

1987 年 1 月

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 序言	1
参考文献	3
第 2 章 半导体异质结的组成与生长	4
2.1 材料的一般特性	4
2.1.1 晶格结构	4
2.1.2 能带结构	6
2.1.3 有效质量和等效态密度	14
2.2 异质结界面的晶格失配	18
2.3 异质结的生长	22
2.3.1 液相外延法(LPE)	22
2.3.2 金属有机化学气相沉积法(MOCVD)	25
2.3.3 分子束外延(MBE)	27
思考题	27
参考文献	27
第 3 章 半导体异质结的能带图	29
3.1 理想突变异质结的能带图	30
3.1.1 异型异质结——Anderson 模型	30
3.1.2 同型异质结	34
3.1.3 对 pN 异质结的修正	40
3.2 异质结的能带带阶	42
3.2.1 Anderson 定则及有关争议	42
3.2.2 测量能带带阶的方法	44
3.3 有界面态的突变异质结能带图	52
3.3.1 界面态密度较小	53
3.3.2 界面态密度较大	55
3.3.3 界面态密度很大	55
3.4 渐变异质结的能带图	57
思考题	62

参考文献	63
第4章 半导体异质结的伏安特性和异质结晶体管	65
4.1 异质结的注入比	65
4.2 异质结中的超注入现象	69
4.3 理想突变异质结的伏安特性	71
4.3.1 pN 异质结	71
4.3.2 nN 异质结	76
4.4 有界面态的异质结的伏安特性	78
4.4.1 热电子发射和多阶隧道的并联模型	78
4.4.2 界面能级的电离对伏安特性的影响	80
4.4.3 空间电荷区的复合电流	82
4.4.4 完全经由界面态的复合电流	83
4.4.5 表面复合对伏安特性的影响	87
4.5 伏安特性的微商研究法	88
4.6 异质结双极晶体管	90
4.6.1 理论分析	90
4.6.2 异质结双极晶体管的制备	96
4.7 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结器件	99
4.7.1 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结的基本特性	100
4.7.2 迁移率和输运特性	103
4.7.3 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 双极晶体管和场效应晶体管	106
思考题	108
参考文献	108
第5章 半导体异质结构中的二维电子气及调制掺杂器件	112
5.1 方形势阱中粒子运动的特性	112
5.1.1 一维方形势阱	112
5.1.2 方形沟道势阱中的粒子	115
5.2 异质结量子势阱中的二维电子气	119
5.2.1 方形势阱的简单分析	119
5.2.2 异质结界面的量子阱	121
5.2.3 势阱中的面电子密度	127
5.2.4 界面组分渐变对势阱的影响	132
5.3 二维电子气的输运	137
5.3.1 二维弛豫时间近似	137
5.3.2 二维电子气的散射	141

5.4 调制掺杂结构和场效应晶体管	147
5.5 强磁场中的二维电子气	151
5.5.1 磁量子效应和磁阻振荡	151
5.5.2 二维电子气的朗道能级	153
5.5.3 量子霍尔效应	157
思考题	164
参考文献	164
第6章 半导体异质结中的非平衡载流子	167
6.1 过剩载流子的特性	167
6.1.1 准费米能级	167
6.1.2 过剩载流子的寿命	168
6.1.3 过剩载流子的扩散	169
6.2 异质结中的过剩载流子	169
6.3 异质结中过剩载流子寿命的测量	175
6.3.1 荧光脉冲衰减法	175
6.3.2 反向电压恢复法	177
6.3.3 激光延迟法	179
6.3.4 光电流法	180
6.4 热载流子的一般特性	182
6.4.1 电子温度和分布函数	182
6.4.2 热载流子的漂移和扩散	183
6.4.3 载流子在能谷之间的转移	184
6.5 研究热载流子特性的实验方法	185
6.5.1 迁移率测量	185
6.5.2 光荧光谱测量	185
6.5.3 吸收光谱测量	189
6.5.4 拉曼散射测量	190
6.5.5 隧道效应测量	191
6.5.6 时间分辨光谱的测量	193
6.6 异质结中的热电子行为	194
6.6.1 异质结中热电子的光荧光谱	194
6.6.2 异质结中电子迁移率随电场的变化	195
6.6.3 异质结中热载流子的远红外发射	197
6.6.4 异质结中热载流子的弛豫	197
6.6.5 异质结中热电子的实际空间转移	198

6.7 几种实空间转移器件	202
6.7.1 负阻振荡器	202
6.7.2 负阻场效应晶体管(NERFET)	202
6.7.3 电荷注入晶体管(CHINT)	204
思考题	205
参考文献	205
第7章 半导体异质结激光器及光波导	208
7.1 半导体受激光发射的基本原理	208
7.1.1 半导体中光的吸收、自发辐射和受激辐射	208
7.1.2 半导体中受激光发射的必要条件	211
7.1.3 半导体的吸收谱和增益谱	212
7.1.4 异质结对电流的限制作用	217
7.2 半导体激光器的阈值条件	218
7.2.1 阈值增益	218
7.2.2 半导体激光器的纵模	220
7.3 增益和电流的关系,量子效率和增益因子	222
7.4 半导体异质结激光器的横模	223
7.4.1 半导体异质结光波导效应的理论分析	223
7.4.2 半导体激光器的条形结构	229
7.5 半导体激光器增益谱的测量	233
7.6 半导体异质结光波导	234
7.6.1 脊形光波导	235
7.6.2 组分无序化光波导	235
7.6.3 光弹光波导	236
思考题	241
参考文献	241
第8章 半导体异质结的光电特性	244
8.1 异质结的光伏特性和光电流	244
8.2 键合异质结的光电流	250
8.3 用光电导方法测量 AlGa _N /Ga _N 异质结中 Al 的组分	255
8.4 用光反射测量 AlGa _N 及 AlGa _N /Ga _N 异质结中 Al 的组分	258
8.5 用光电流方法测量金属和 Ga _N 及 AlGa _N /Ga _N 异质结构肖特基 势垒的高度	261
8.6 异质结光电晶体管	263
思考题	269

参考文献	269
第 9 章 氮化镓材料及其异质结特性	271
9.1 氮化镓的基本物理特性	271
9.2 金属和 GaN 及 AlGa _N /GaN 的肖特基接触	278
9.2.1 基本特性	278
9.2.2 金属/GaN 肖特基势垒中电子的输运机制	281
9.2.3 金属和 AlGa _N /GaN 结构的肖特基结	284
9.3 金属在 AlGa _N 上的肖特基结势垒高度和 Al 组分的关系	288
9.4 p 型 GaN 材料的特殊情况	289
9.4.1 空穴浓度	289
9.4.2 金属在 p-GaN 上的肖特基接触	292
9.5 AlGa _N /GaN 和 InGa _N /GaN 的自发极化和压电极化	294
9.5.1 压电效应的由来及其对器件的影响	294
9.5.2 压电效应引起的量子限制斯塔克(QCSE)效应	296
9.6 InGa _N /GaN 量子阱发光管和激光器中发光均匀性和光谱特性	298
9.6.1 InGa _N /GaN 量子阱发光的不均匀性	298
9.6.2 光谱特性	300
9.7 GaN 的电子器件	301
思考题	302
参考文献	302
第 10 章 半导体超晶格和多量子阱	306
10.1 超晶格和多量子阱的一般描述	306
10.2 超晶格的能带	308
10.2.1 GaAs-Al _x Ga _{1-x} As 超晶格	308
10.2.2 InAs-GaSb 超晶格	312
10.2.3 HgTe-CdTe 超晶格	313
10.2.4 应变层超晶格	315
10.2.5 IV-VI 族和 II-V 族超晶格	316
10.2.6 掺杂超晶格	317
10.3 垂直于超晶格方向的电子输运	318
10.4 超晶格的光谱特性	328
10.4.1 吸收光谱实验	328
10.4.2 激子光谱	328
10.4.3 激子的饱和吸收	332
10.4.4 室温荧光特性	333

10.4.5 其他光谱特性	334
10.5 超晶格和量子阱器件	336
10.5.1 量子阱激光器	336
10.5.2 光学双稳态器件	336
10.6 量子阱和超晶格的近期进展	339
10.6.1 量子限制斯塔克效应(QCSE)	339
10.6.2 超晶格子能带的电学研究	341
10.6.3 量子阱超晶格光电接收器	343
10.6.4 Wannier-Stark 效应	343
10.6.5 超晶格红外级联激光器	345
10.6.6 超晶格中的布洛赫振荡	350
思考题	352
参考文献	352
部分参考答案	357
常用物理常数表	362

第 1 章 序 言

计算机和自动化正在愈来愈广泛地进入到人们的生活中. 一个技术革命的新纪元已经开始. 计算机的心脏部分是集成电路, 它使计算机的许多奇妙的功能得以实现. pn 结则是组成集成电路的主要细胞. 20 世纪 50 年代 pn 结晶体管的发明和其后的发展奠定了这一划时代的技术革命的基础.

pn 结是在一块半导体单晶中用掺杂的办法做成两个导电类型不同的部分. 一般 pn 结的两边是用同一种材料做成的(例如锗、硅及砷化镓等), 所以称之为“同质结”. 如果把两种不同的半导体材料做成一块单晶, 就称之为“异质结”. 结两边的导电类型由掺杂来控制. 掺杂类型相同的称为“同型异质结”(nN 或 pP 结)^①. 掺杂类型不同的称为“异型异质结”(nP 或 pN 结).

两种材料禁带宽度的不同以及其他特性的不同使异质结具有一系列同质结所没有的特性, 在器件设计上将得到某些同质结不能实现的功能. 譬如说, 在异质结晶体管中用宽带一侧做发射极会得到很高的注入比, 因而可获得较高的放大倍数. 还有, 如果在异质结中两种材料的过渡是渐变的, 则禁带宽度的渐变就相当于存在着一个等效的电场, 使载流子的渡越时间减小, 器件的响应速度增加. 禁带宽度的渐变也能使作用在电子和空穴上的力方向相反, 因而能分别控制电子和空穴的运动. 另外, 同型异质结是一种多数载流子器件, 速度比少子器件高, 更适合于做成高速开关器件.

正因为有上述这些特点, 早在 20 世纪 60 年代初期, 当 pn 结晶体管刚刚取得巨大成功的时候, 人们就开始了对异质结的研究^[1,2], 对异质结的能带图、载流子在异质结中的输运过程以及异质结的光电特性等提出了各种物理模型并做了理论计算. 同时, 在实验上也生长了一些异质结, 并测量了它们的特性. 其中做得较多的是 Ge-Si, Ge-GaAs 及其他 III-V 族异质结. 但是, 研究工作的结果并不理想; 理论和实验未能做到一致, 实验上也未能做出功能较好的器件. 主要原因之一是实验上很难得到非常理想的异质结. 因为组成异质结的两种材料的晶格常数不同, 当它们长成同一块单晶时, 晶格的周期性在界面上发生畸变, 形成位错和缺陷. 除了这种由材料本身固有性质决定的缺陷以外, 生长工艺上的不完善还会引进更多的附加缺陷. 这些界面上的位错缺陷将成为少数载流子的复合中心. 早期生长的异质结中因为界面

① 为了表达清楚起见, 我们用大写字母 N 或 P 表示异质结中禁带宽度较大的材料的导电类型, 用小写字母 n 或 p 表示禁带宽度较小材料的导电类型.

缺陷太多,无法实现少子注入的功能,因而也不能做成性能较好的异质结器件。

在异质结器件方面,首先在异质结半导体激光器上获得了突破性进展. 异质结的禁带宽度之差造成的势垒对注入载流子的限制作用和异质结的高注入比特性,都有助于粒子数反转的建立. 两种材料折射率的不同提供了做成光波导的可能性,以减少光在谐振腔以外的损失. 因而用异质结做成激光二极管是十分有利的. 1968年美国的贝尔实验室和 RCA 公司以及苏联的约飞研究所都宣布做成了 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结激光器^[3~5]. 他们选择了晶格失配很小的多元合金固溶体做异质结对. GaAs 的晶格常数是 $5.6531\text{\AA}$, AlAs 的晶格常数是 $5.6622\text{\AA}$, 两者之差为 0.16% , 固溶体 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 GaAs 的晶格常数之差还要更小一些. 同时,液相外延工艺的改善使生长的界面具有接近于理想的完整的晶格. 经过十多年的努力,现在不仅 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结激光器,而且长波长的 InP-InGaPAs 激光器均可做到室温连续工作寿命十万小时以上,输出功率达数十毫瓦,模式及其他特性也在不断改进,已可正式使用到激光光纤通信系统中去了。

在 20 世纪 70 年代里,异质结的生长工艺技术取得了十分巨大的进展. 液相外延 (LPE)、气相外延 (VPE)、金属有机化学气相沉积 (MO-CVD) 和分子束外延 (MBE) 等先进的材料生长方法相继出现,因而使异质结的生长日趋完善. 分子束外延不仅能生长出很完整的异质结界面,而且对异质结的组分、掺杂、各层厚度都能原子量级的范围内精确控制。

工艺技术的进步使异质结的研究重新获得了生命力,使其在更新的基础上,在更广阔的领域内蓬勃开展起来了. 近年来,异质结晶体管的早期设想正在逐步实现,据报道,已用 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 InP-InGaAs 做成了双极晶体管^[6,7] (简称 HBT),其截止频率达到 35GHz . 异质结光电晶体管的增益也已做到数千^[8]. 其他异质结的光电接收器件 APD 和 PIN 二极管等也达到了较好的水平. 在用分子束外延生长的调制掺杂异质结结构中可以获得比一般体材料大得多的低温迁移率, 4K 下的电子迁移率可达到 $2 \times 10^6 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[9]. 用这种材料做成的场效应晶体管 (称为高电子迁移率晶体管 HEMT 或调制掺杂场效应晶体管 MODFET) 可以高速工作,响应时间在 77K 下至少可以做到 8.5ps ^[10]. 这个速度已和超导约瑟夫森结相似,但是超导结必须在液氦下工作,而 HEMT 器件则可在 77K 下工作,甚至可以在室温下工作,因而实用价值要大得多. 近几年来对异质结中的热载流子行为也进行了较多的研究. 利用载流子在实际空间转移所产生的负阻现象已经做成了振荡器件^[11]. 在材料方面,除了对 GaAs-AlAs 系统有了广泛和深入的研究之外,对其他 III-V 族材料,如 InP-GaAs , GaSb-InAs 系统也做了很多的研究工作. 对 II-IV 族 II-VI 族异质结和一些磁性半导体异质结,如 HgTe-CdTe , HgMnTe-CdTe , PbTe-PbSnTe , Si-SiGe 等的研究工作,也相继展开^[12].

在这几十年间,工艺的进步也促进了异质结物理研究的深入开展. 对异质结的