

低维半导体物理

Low Dimensional Semiconductor Physics

彭英才 赵新为 傅广生 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

低维半导体物理

彭英才 赵新为 傅广生 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

低维半导体物理 / 彭英才, 赵新为, 傅广生编著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-118-07494-9

I. ①低... II. ①彭... ②赵... ③傅... III. ①半导体
物理 IV. ①047

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 103691 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 9 $\frac{1}{2}$ 字数 258 千字

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序

彭英才教授邀请我为他们的著作《低维半导体物理》作序,为了说明这本书的意义,我想讨论两个关系:

1. 半导体物理和半导体材料、器件的关系。20世纪40年代半导体晶体管的发明,使得世界从工业化社会进入了信息化社会,经济、社会生活发生了根本的变化。半导体器件无处不在,与此同时,大规模集成电路和新的半导体材料、器件仍在飞速地发展,在信息领域,特别是当前在能源和环境领域将会发挥越来越大的作用。这些成就都是在20世纪量子力学和固体电子论研究的基础上获得的。人们为了发展生产力,往往把注意力集中在研究半导体材料和器件上,而忽视了对半导体物理基础的研究。中国科学院半导体所在20世纪80年代,在黄昆先生的领导下,自主开发了分子束外延技术,并开展了相应的超晶格物理的研究,促进了半导体所在量子阱激光器方面的研究,在当时取得了达到国际先进水平的成果,推动了我国光纤通信技术的发展。现在,我国各大研究所和著名大学中从事半导体研究或与半导体有关研究的人员已经很多,每年培养的大学生、研究生也不少。但是,我觉得他们的半导体物理基础还不够,往往只是在某些方面具有一定的专长和技能。这种情况如果长期发展下去,不仅影响到他们本人的发展,也将影响到我国整个半导体事业的发展。这本《低维半导体物理》是一本半导体物理的基础著作,主要介绍低维半导体结构,包括:超晶格、量子

线、量子点、二维电子气等的电子结构、输运性质、光学性质和自旋磁学性质等,为所有从事半导体研究的研究人员和教师提供了一个比较系统和完整的基础。

2. 半导体低维结构与纳米研究的关系。过去 10 年来,我们国家对纳米研究高度重视,已经投入了大量研究经费,并已列入了国家中长期科技发展规划中的四大基础研究项目之一。纳米研究包括许多方面,如材料制备、表征、各种性质的研究以及应用。半导体低维结构只是其中的一个方面,它主要研究低维结构的电子态、输运性质、光学性质和自旋磁学性质等,具有重要的应用前景。举一个例子:2010 年,美国哈佛大学的著名纳米科学家 Charles Lieber(查尔斯·利伯),在《科学》杂志上报道了一种新的病毒级探针。该探针为纳米场效应晶体管,它可以探测人体细胞内的生命活动,却不破坏细胞膜。由半导体低维结构组成的电子电路可能是下一代、摩尔定律以后集成电路的组成单元,目前的主要问题是,如何从工艺上解决集成化的问题。半导体低维结构,如单光子发射器将是量子通信的关键光源;单电子晶体管和单电子存储器将大大降低集成电路的功耗,使得超大型计算机的功能进一步提高;量子比特有可能通过半导体量子点实现,从而实现真正的量子计算;硅基量子点发光有可能实现在硅片上的光电集成和光传输;量子点、量子线、光子晶体与光学的结合产生了一门新的分支学科——介观光学,或等离子体光学。此外,半导体量子线、量子点的太阳能电池预期将有更高的转换效率、更低的制作成本,在能源和环境领域将有重要的应用前景。

本书的作者河北大学电子信息工程学院彭英才教授、傅广生教授和日本东京理科大学物理系赵新为教授在科研和

教学的基础上,经过多年的努力,反复修改,终于完成了这本著作。他们的科研工作也做得很好,在高效率 Si 基量子点激光器和量子点激子太阳能电池方面都做过高水平的工作。这也证明了上面所说的道理,只有基础扎实了,研究才有正确的方向,才能做出高质量的研究工作。反过来,只有做了真正的研究工作,才能抓住要害,写出自己在研究工作中的体会,给读者以真正的帮助。否则为写书而写书,只能做资料的收集员,东拼西凑不得要领。

最后,希望本书的出版能为立志从事半导体事业的大学生、研究生和研究人员提供有益的、系统的有关半导体低维结构的知识,对他们今后的研究和教学工作有所帮助。

夏建白

2010. 12. 20

前 言

1970年,著名物理学家、诺贝尔物理学奖(1973年)获得者江崎及其合作者朱兆祥首次提出了半导体超晶格的概念,由此揭开了低维半导体研究的序幕。可以说,20世纪80年代是半导体超晶格与量子阱研究与发展的黄金时期。在此期间,各种超晶格与量子阱材料不断涌现,许多新的物理效应不断被揭示,各类超晶格与量子阱器件相继问世,这是由能带工程实现的低维半导体研究出现的第一个高潮;90年代伊始,发光多孔Si的出现和纳米科学技术的兴起,使得量子点与纳米晶粒等纳米结构材料及其物理性质的研究又引起了人们的浓厚兴趣,因此低维半导体的研究又呈现出了第二个高潮;进入21世纪以来,随着纳米材料与技术研究的不断深入和量子点自组织生长工艺的日趋成熟,各种纳米量子器件和纳米光电子器件的研究又成为人们所关注的焦点,低维半导体器件的制作和应用展示出广阔的发展前景,这是低维半导体研究出现的第三个高潮。

所谓低维半导体,是指材料体系至少在一个维度上对其中的载流子输运和跃迁等物理行为具有量子限制作用的半导体结构,这是它们区别于体材料的一个最显著标志。像超晶格与量子阱、量子线、量子点与纳米晶粒分别对载流子具有一维、二维和三维量子限制作用,因而是一类典型的低维半导体材料与结构。与传统的体材料相比,低维半导体具有许多新颖的物理性质,蕴藏着丰富的物理内涵。低维半导体物理的任务,就是深入研究这些物理性质并深刻揭示这些物理内涵。其重要性主要体现在以下三个方面:一是它可以丰富、充实和完

善现代凝聚态物理的研究内容；二是基于这些物理性质和效应，可以设计与制作面向 21 世纪的各类高性能纳米器件；三是可以使人们在纳米尺度上，甚至在分子与原子级水平上构建更新的材料与结构，因此具有重大而深远的意义。

迄今，人们已对低维半导体材料的制作方法、结构表征、物理性质及器件应用进行了富有成效的研究。然而，目前国内外尚未出版比较系统和完善地介绍与论述低维半导体物理的专著或教材。为了弥补这一不足，以促进我国低维半导体物理的研究与发展，我们在长期从事科研和研究生教学的实践中，逐渐积累了大量相关专业知识，并几易其稿编写成了此书。

本书的内容安排如下：第一章概述了低维半导体物理的发展历程、研究内容和发展趋势；作为半导体物理基础，第二章简要介绍了晶态半导体中的电子状态、载流子输运性质、光吸收与光发射特性等；低维半导体所呈现的许多新颖的物理性质，皆起因于它们各自特有的能带结构，因此第三章主要介绍了异质结和超晶格等不同低维结构所具有的能带特性；第四章以电子能量分布和有效状态密度为主线，分别讨论了调制掺杂异质结、超晶格与量子阱、量子线和量子点中的电子状态及激子状态；二维电子气在调制掺杂异质结构的平行输运中起着十分重要的作用，因此第五章在简要介绍了二维电子气的形成之后，重点讨论了在电场和磁场作用下二维电子气的输运过程，同时对发生在低温和强磁场下的量子化霍尔效应与物理起因进行了比较详细的分析与讨论；任何异质结构都不能回避垂直于异质结界面的电子隧穿输运问题，所以第六章讨论了单势垒隧穿、双势垒共振隧穿和多势垒顺序共振隧穿等；第七章分析与讨论了量子线与量子点这类介观体系中的输运现象，如量子线的电导呈量子化现象和量子点的库仑阻塞与单电子隧穿等；第八章则介绍了半导体量子阱的光学性质，如二维激

子特性、量子限制斯塔克效应及发光特性等；第九章以量子点为主，主要讨论了纳米半导体材料与结构的光学性质，如零维激子特性、量子尺寸效应、量子点的发光特性及 Si 基纳米结构的发光特性等；第十章侧重讨论了低维磁性半导体的一些物理性质，如近藤效应、磁光效应及自旋输运等。

本书可作为普通高等学校与科研院所相关专业博士研究生和硕士研究生的专业课教材，亦可供普通高等学校相关专业的高年级本科生阅读，还可供从事各类低维半导体材料、物理与器件研究的相关科技工作者参考阅读。

由于作者水平有限，书中不妥之处敬请批评指正。

作 者

目 录

第一章 绪论	1
1.1 半导体超晶格与量子阱的研究发展	1
1.2 半导体量子线与量子点的研究发展	5
参考文献	9
第二章 晶态半导体物理	11
2.1 晶态半导体中的电子状态	11
2.1.1 能带结构	11
2.1.2 电子能量	22
2.1.3 状态密度	24
2.2 晶态半导体中的载流子输运	25
2.2.1 载流子散射机构	25
2.2.2 载流子迁移率	30
2.2.3 载流子隧穿输运	32
2.3 晶态半导体的光吸收	34
2.3.1 本征吸收	34
2.3.2 激子吸收	36
2.3.3 杂质吸收	38
2.4 晶态半导体的光发射	40
2.4.1 半导体中的各种发光过程	40
2.4.2 直接和间接跃迁复合发光	42

2.4.3	激子复合发光	44
2.4.4	激子分子发光	46
2.4.5	施主—受主对发光	47
2.4.6	非辐射复合	49
	参考文献	51
第三章	低维半导体的能带结构	52
3.1	异质结的能带结构	52
3.1.1	异质结的能带特点	53
3.1.2	Ⅲ-V族化合物半导体异质结	54
3.1.3	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 调制掺杂异质结	55
3.1.4	$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结	57
3.1.5	GaN 基异质结	59
3.1.6	其他异质结	60
3.2	超晶格的能带结构	61
3.2.1	Ⅲ-V族超晶格	61
3.2.2	Ⅱ-VI族超晶格	64
3.2.3	Ⅳ-VI族超晶格	64
3.2.4	nipi 掺杂超晶格	66
3.2.5	应变层超晶格	67
3.2.6	无序超晶格	69
3.2.7	有效质量超晶格	70
3.2.8	调制薄膜结构	71
3.3	量子点的能带结构	72
3.3.1	Si 纳米晶粒与 Si 纳米线	73
3.3.2	Ge/Si 量子点异质结	74
3.3.3	InAs/GaAs 量子点	74
3.3.4	CdSe/HgSe/CdSe 量子点	76

参考文献	77
第四章 低维半导体中的电子状态	78
4.1 量子化表面层中的电子状态	78
4.1.1 量子化表面层的形成	79
4.1.2 三角形势阱中的电子能量	80
4.2 量子阱中的电子状态	82
4.2.1 一维无限深势阱	82
4.2.2 一维有限深势阱	83
4.2.3 二维方形势阱	89
4.2.4 状态密度	90
4.2.5 电场中的量子阱	92
4.3 量子线中的电子状态	95
4.3.1 矩形截面量子线	95
4.3.2 圆形截面量子线	96
4.3.3 状态密度	96
4.4 量子点中的电子状态	98
4.4.1 箱形量子点	98
4.4.2 球形量子点	99
4.5 nipi 掺杂超晶格中的电子状态	100
4.6 低维半导体中的激子状态	103
4.6.1 量子阱中的激子	104
4.6.2 量子点中的激子	107
4.6.3 II 型量子点中的激子	109
4.6.4 耦合量子点中的激子	111
参考文献	113
第五章 调制掺杂异质结中的二维电子气输运	114
5.1 电场中的二维电子气输运	114

5.1.1	二维电子气的面密度	115
5.1.2	二维电子气的散射机构	119
5.1.3	二维电子气的迁移率	123
5.1.4	Si 调制掺杂异质结构的输运性质	127
5.2	磁场中的二维电子气	129
5.2.1	磁场中二维电子气的能量本征值	129
5.2.2	二维电子气的朗道能级态密度	130
5.3	整数量子霍尔效应	132
5.3.1	量子霍尔效应的实验观测	132
5.3.2	量子霍尔效应的物理起因	134
5.3.3	不同二维电子气系统的量子霍尔效应	137
5.4	分数量子霍尔效应	142
5.4.1	分数量子霍尔效应的实验发现	142
5.4.2	分数量子霍尔效应的物理内涵	144
	参考文献	146
第六章	半导体超晶格中的电子隧穿输运	148
6.1	电子的隧穿输运理论	148
6.1.1	单势垒的透射概率与隧穿电流	149
6.1.2	双势垒的共振隧穿电流与传递矩阵计算	152
6.1.3	顺序共振隧穿和巴丁传递哈密顿方法	155
6.2	单势垒的隧穿特性	156
6.3	双势垒的共振隧穿特性	158
6.3.1	双势垒共振隧穿的基本原理	158
6.3.2	结构参数对共振隧穿特性的影响	159
6.4	多势垒的顺序共振隧穿特性	161
6.4.1	顺序共振隧穿的基本原理	161
6.4.2	顺序共振隧穿的输运动力学	163

6.5	异质结中热电子的实空间转移	165
6.6	量子级联结构中的隧穿运输	169
6.6.1	量子级联激光器的工作原理	169
6.6.2	量子级联激光器的载流子运输	169
6.6.3	超晶格微带运输的布洛赫增益	171
6.6.4	磁场下的超晶格微带运输	172
	参考文献	174
第七章	低维量子结构中的输运现象	175
7.1	量子细线的电导特性	175
7.1.1	量子细线的一维子能带	176
7.1.2	动量弛豫时间	176
7.1.3	影响量子细线电导特性的一些物理限制	179
7.2	量子细线的电导呈量子化现象	182
7.2.1	一维导体中电子的横向运动	182
7.2.2	点接触的量子化电导	183
7.2.3	与电导量子化相关的一些物理问题	184
7.2.4	AlGaAs/GaAs 量子点的量子化电导	189
7.2.5	量子细线的霍尔电导	191
7.3	零维体系的库仑阻塞现象	192
7.3.1	库仑阻塞的基本原理	192
7.3.2	单电子隧穿振荡现象	194
7.3.3	产生库仑阻塞的基本条件	195
7.3.4	串联双隧道结中的库仑阻塞	197
7.4	双量子点系统中的隧穿现象	199
7.4.1	耦合量子点中的隧穿特性	199
7.4.2	量子点分子的输运特性	201
7.5	平行晶粒之间的量子共振隧穿特性	203

参考文献	205
第八章 半导体量子阱的光学性质	207
8.1 量子阱中的二维激子特性	207
8.1.1 激子束缚能	207
8.1.2 振子强度	209
8.1.3 低温下的二维激子吸收	210
8.1.4 室温下的二维激子吸收	211
8.2 量子限制斯塔克效应	212
8.2.1 量子限制斯塔克效应的理论表述	212
8.2.2 平行量子限制斯塔克效应	215
8.2.3 垂直量子限制斯塔克效应	218
8.2.4 万尼尔—斯塔克效应	220
8.3 量子阱的光学非线性效应	222
8.3.1 二维激子的非线性吸收系数	222
8.3.2 二维激子的光学双稳现象	223
8.3.3 AlAs/GaAs 量子阱的吸收饱和现象	224
8.3.4 产生非线性光学效应的物理机制	225
8.4 量子阱的发光特性	226
8.4.1 量子阱中的带间光学跃迁	226
8.4.2 几种典型量子阱的发光特性	227
8.4.3 异质界面对量子阱发光性质的影响	234
参考文献	237
第九章 纳米半导体的光学性质	238
9.1 零维量子体系中的物理效应	238
9.1.1 量子尺寸效应	239
9.1.2 量子限制斯塔克效应	243

9.1.3	光学非线性效应	246
9.2	量子点的发光特性	248
9.2.1	量子点的发光模型	249
9.2.2	晶粒尺寸分布对发光特性的影响	253
9.2.3	量子点发光谱的多峰结构	254
9.2.4	发光峰的斯托克斯位移	258
9.3	Si 基纳米结构的发光特性	260
9.3.1	Si 基纳米薄膜的发光模型	261
9.3.2	掺 Er 的 Si 基纳米薄膜的发光特性	264
	参考文献	269
第十章	低维半导体的磁学性质	271
10.1	低维磁性半导体结构	271
10.1.1	低维稀磁半导体结构	271
10.1.2	低维铁磁半导体结构	274
10.2	量子点中的近藤效应	277
10.2.1	近藤效应的物理描述	278
10.2.2	量子点的近藤效应	279
10.2.3	自旋磁阻现象	281
10.3	低维半导体结构的磁光效应	282
10.3.1	光学跃迁的选择定则	282
10.3.2	量子阱中二维电子体系的磁光效应	284
10.3.3	量子点中的磁光效应	288
10.4	低维半导体结构中的自旋输运	290
10.4.1	二维电子气的自旋输运	291
10.4.2	量子点的自旋输运	294
	参考文献	296

第一章 绪 论

低维半导体物理是晶态半导体物理研究与发展的深入和拓展,是当代凝聚态物理学中的一个重要组成部分,主要研究半导体异质结、超晶格、量子阱、量子线、量子点、纳米晶粒以及原子团簇等低维材料与结构的能带特性、电子状态、电场下的载流子输运、磁场下的量子输运及其光照下的载流子跃迁光吸收与光发射等物理性质。如果从 20 世纪 70 年代初半导体超晶格的研究算起,低维半导体物理的发展整整走过了 40 年的光辉历程。若以每 10 年为一个周期,可以说 20 世纪 70 年代是低维半导体物理的萌芽期,80 年代为发展期,90 年代为成熟期,21 世纪的前 10 年为深化期。下面,不妨简单回顾一下它的发展历程。

1.1 半导体超晶格与量子阱的研究发展

1947 年晶体管的发明,开辟了半导体科学技术发展的新纪元。20 世纪 50 年代,晶态半导体材料、物理、工艺与器件的研究全面展开,并取得了丰硕成果。60 年代中期,无线通信技术和计算机技术开始获得迅速发展,它要求电子器件的性能必须大幅度提高。但由于 Si 单晶与 GaAs 化合物单晶等传统材料受其自身固有物理性质的限制,器件特性难以从根本上得到改善。其中的主要原因是载流子在电场作用下的输运过程中不可避免地要经受各种散射,这就使其难以摆脱低迁移率的困境,从而使通信传输速率和计算机整机运算速度受到极大限制。因此,半导体材料的发展受到了极大挑战,它迫使材料物理学家开始寻觅新的有效途径,以制备出性能更加优异的新型半导体材料。

早在 1957 年,著名物理学家、诺贝尔物理学奖(1973 年)获得者江