

半导体科学与技术丛书

# 低维量子器件物理

彭英才 赵新为 傅广生 编著



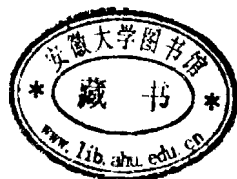
科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

半导体科学与技术丛书

# 低维量子器件物理

彭英才 赵新为 傅广生 编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

低维量子器件是微纳电子技术研究的核心,低维量子器件物理是现代半导体器件物理的一个重要组成部分.它的主要研究对象是低维量子器件的设计制作、器件性能与载流子输运动力学等内容.本书主要以异质结双极晶体管、高电子迁移率晶体管、共振隧穿电子器件、单电子输运器件、量子结构激光器、量子结构红外探测器和量子结构太阳能电池为主,比较系统地分析与讨论了它们的工作原理与器件特性,并对自旋电子器件、单分子器件和量子计算机等内容进行了简单介绍.

本书可作为高等院校相关专业研究生的专业课教学用书,也可供高年级本科生和相关领域的科技工作者阅读和参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

低维量子器件物理/彭英才,赵新为,傅广生编著.一北京:科学出版社,2012

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-033849-5

I. ①低… II. ①彭… ②赵… ③傅… III. ①半导体器件-半导体物理  
IV. ①TN303 ②O47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 043793 号

责任编辑:刘凤娟 尹彦芳/责任校对:张小霞

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年4月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年4月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:234 000

定价:49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《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  
郑有焯

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

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 21 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作出自己的贡献。

《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

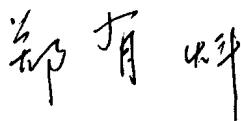
2005 年 3 月 16 日

## 序

1969年江崎(L. Esaki)和朱兆祥(R. Tsu)提出超晶格概念,1972年张立纲(L. Chang)和江崎等用MBE制备出GaAs/GaAlAs超晶格材料,1974年张立纲、江崎和朱兆祥观察到双势垒量子阱电子共振隧道效应,1978年丁格尔(R. Dingle)和斯托默(H. L. Stormer)等实现了超晶格的调制掺杂和调制掺杂异质结构,开创了人工调制低维半导体量子结构的新领域.低维半导体量子结构不仅具有极其丰富的物理内涵,而且具有重大的技术应用价值.从20世纪80年代开始,低维量子结构已经成为半导体器件发展的新方向,也是新一代高性能半导体微电子器件和光电子器件的核心基础.90年代随着纳米科学技术的兴起,低维量子结构器件又获得了新发展,从二维结构拓宽到一维和零维结构,并不断涌现出各种新型半导体器件.低维量子结构器件已经并且将继续推动当代半导体技术的高速发展.

彭英才、赵新为和傅广生三位教授编著的《低维量子器件物理》是对他们长期从事的科研工作和研究生教学实践工作的总结.该书内容丰富,覆盖了当前半导体微电子与光电子领域的主要低维量子结构器件,书中阐述了低维半导体的能带结构、电子状态、输运性质和光学性质等低维量子器件物理基础,对异质结双极晶体管、高电子迁移率晶体管、共振隧穿电子器件、单电子输运器件、量子结构激光器、量子结构红外探测器和量子结构太阳电池等低维量子器件的工作原理与器件特性作了比较系统的讨论与分析,书中还对发展中的自旋电子器件、单分子器件和量子计算机作了简单介绍.

该书的出版必将对我国低维半导体量子器件的教学与科研起到推动作用.



2011年10月20日

# 前 言

1969年半导体超晶格概念的提出,揭开了低维半导体材料制备与物理性质研究的序幕.基于能带工程设计,人们制备了各类低维材料与结构,从而为设计和制作各种新型半导体器件开辟了广阔的发展前景.基于量子力学原理,人们揭示了各类低维材料所呈现的许多新颖物理性质,从而大大丰富了凝聚态物理的研究内容,进一步深化了现代半导体物理的研究内涵.1980年高电子迁移率晶体管的诞生,又开辟了低维量子器件研究的新领域.其后,各类低维电子输运器件和光电子器件应运而生.其中,异质结双极晶体管、共振隧穿电子器件、量子阱激光器与量子阱红外探测器就是其中的几个典型范例.1990年纳米科学技术的兴起,使以量子点为主的纳米半导体材料与物理的研究,成为继半导体超晶格之后又一个新的热点课题,尤其是量子点自组织化生长技术的日渐成熟,为各类量子点单电子器件和量子点激光器的研制奠定了重要物质基础.进入21世纪以来,自旋电子器件、单分子器件、单光子器件和光子晶体器件的研究,又把低维量子器件的发展继续推向深入.

毫无疑问,各类低维量子器件及其集成电路将会在21世纪的光通信技术、计算机技术、新能源技术和电子对抗技术中具有十分重要的潜在应用.迄今,人们在深入研究低维半导体物理的同时,已设计和制作了各类低维量子器件,并取得了丰硕成果.但是,目前国内外尚未出版体系比较完善和内容比较系统的有关介绍与论述低维量子器件物理的专著或教材.为了弥补这一不足,以促进我国低维量子器件的研究与发展,我们在长期从事科研和研究生教学的实践中,逐渐积累了这方面的大量相关专业知识和数易其稿编写了本书.

本书内容大体分为两大类:第一类为低维电子输运器件;第二类为低维光电子器件.其具体内容安排如下:第1章简要回顾低维量子器件的发展历史,作为低维量子器件的物理基础,第2章简要介绍低维量子结构的能带特征、电子状态、输运性质和光学性质;第3~6章主要介绍四种电子输运器件的工作原理与器件特性,其中包括异质结双极晶体管、高电子迁移率晶体管、共振隧穿电子器件和单电子输运器件;而第7~9章则主要讨论三种光电子器件的工作原理与器件性质,其中包括量子结构激光器、量子结构红外探测器和量子结构太阳电池;最后,第10章扼要介绍其他几种低维量子效应器件,如自旋电子器件、单分子器件以及量子计算机等.

本书可作为高等学校与科研院所相关学科专业研究生的专业课教材,也可供

高等学校相关专业的高年级本科生阅读, 同时也可供从事各类低维半导体材料与物理, 尤其是从事器件物理研究的相关科技工作者参考阅读.

由于作者水平有限, 书中不妥之处恳请批评指正.

编著者

2011 年 8 月



# 目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 低维量子器件的发展历史	1
1.1.1 低维电子运输器件	1
1.1.2 低维光电子器件	3
1.2 低维量子器件的未来预测	5
1.2.1 纳米光子器件	5
1.2.2 磁性纳米器件	5
1.2.3 有机纳米器件	6
1.2.4 量子信息处理器件	6
参考文献	8
第 2 章 低维量子结构的物理性质	9
2.1 低维量子结构的能带特征	9
2.1.1 异质结的能带特点	9
2.1.2 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 调制掺杂异质结	10
2.1.3 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结	11
2.1.4 超晶格的能带结构	12
2.2 低维量子结构中的电子状态	13
2.2.1 调制掺杂异质结三角形势阱中的电子状态	14
2.2.2 二维量子阱中的电子状态	15
2.2.3 一维量子线中的电子状态	17
2.2.4 零维量子点中的电子状态	19
2.3 低维量子结构中的激子状态	20
2.3.1 量子阱中的激子	21
2.3.2 量子点中的激子	22
2.4 低维量子结构中的载流子运输	23
2.4.1 二维电子气的散射机构	23
2.4.2 双势垒结构的共振隧穿运输	26
2.4.3 异质结中热电子的实空间转移	28

2.4.4	零维体系的库仑阻塞现象	30
2.5	低维量子体系的光学性质	32
2.5.1	量子阱中的二维激子特性	32
2.5.2	量子阱的发光特性	36
2.5.3	零维体系的量子尺寸效应	37
	参考文献	40
<b>第 3 章</b>	<b>异质结双极晶体管</b>	<b>42</b>
3.1	HBT 的器件结构	42
3.1.1	AlGaAs/GaAs HBT	42
3.1.2	InGaP/GaAs HBT	43
3.1.3	InGaAs/InP HBT	44
3.1.4	SiGe/Si HBT	44
3.2	不同能带形式的 HBT	45
3.2.1	宽带隙发射区 HBT	45
3.2.2	缓变基区 HBT	46
3.2.3	宽带隙集电区 HBT	47
3.3	HBT 中的载流子输运过程	47
3.3.1	宽带隙发射区 HBT 中的载流子输运	48
3.3.2	缓变基区 HBT 中的载流子输运	48
3.3.3	HBT 发射区-基区空间电荷区中的载流子复合	49
3.3.4	宽带隙集电区 HBT 中的载流子输运	51
3.4	HBT 的器件特性	52
3.4.1	电流增益	52
3.4.2	电流-电压特性	54
3.4.3	频率特性	56
3.4.4	温度特性	58
3.5	SiGe/Si HBT 的器件性能	59
	参考文献	61
<b>第 4 章</b>	<b>高电子迁移率晶体管</b>	<b>63</b>
4.1	调制掺杂异质结中的二维电子气	63
4.1.1	2DEG 的面密度	63
4.1.2	2DEG 的迁移率	65
4.2	HEMT 的工作特性	66
4.2.1	阈值电压	66
4.2.2	跨导	68

4.2.3	电流-电压特性	68
4.2.4	电容-电压特性	71
4.3	高频逻辑 HEMT	72
4.3.1	低噪声 HEMT	72
4.3.2	大功率 HEMT	73
4.4	GaN 基 HEMT	74
4.4.1	GaN 基异质结中的 2DEG	74
4.4.2	GaN 基 HEMT 的工作特性	75
4.5	$\delta$ 掺杂场效应晶体管	76
	参考文献	77
<b>第 5 章</b>	<b>共振隧穿电子器件</b>	<b>79</b>
5.1	不同势垒结构的隧穿特性	79
5.1.1	单势垒结构的隧穿	79
5.1.2	双势垒结构的共振隧穿	80
5.1.3	多势垒结构的顺序共振隧穿	81
5.2	共振隧穿二极管	82
5.2.1	RTD 的共振隧穿电流密度	82
5.2.2	RTD 的响应速度	84
5.2.3	结构参数对 RTD 输运特性的影响	85
5.3	共振隧穿晶体管	86
5.3.1	对称双势垒结构 RTT	87
5.3.2	量子阱与超晶格基区 RTT	88
5.3.3	共振隧穿热电子晶体管	89
5.4	负阻场效应晶体管	89
5.5	转移电子器件	91
	参考文献	93
<b>第 6 章</b>	<b>单电子输运器件</b>	<b>95</b>
6.1	单电子箱	95
6.2	单电子和单光子旋转门器件	96
6.2.1	单电子旋转门器件	96
6.2.2	单光子旋转门器件	97
6.3	单电子泵	98
6.4	单电子存储器	99
6.4.1	单电子存储器的工作原理	99
6.4.2	浮栅量子点单电子存储器	101

6.5	单电子晶体管	103
6.5.1	SET 的工作原理	103
6.5.2	SET 的噪声特性	104
6.5.3	SET 的灵敏度	104
6.5.4	电容型 SET	105
6.5.5	电阻型 SET	106
6.5.6	射频 SET	109
6.5.7	单电子 CCD	110
6.6	库仑阻塞测温计	111
	参考文献	111
<b>第 7 章</b>	<b>量子结构激光器</b>	<b>113</b>
7.1	量子阱激光器	113
7.1.1	量子阱激光器的性能特点	113
7.1.2	量子阱激光器的结构类型	113
7.1.3	量子阱激光器的工作原理	115
7.1.4	量子阱激光器的性能参数	116
7.1.5	垂直腔面发射量子阱激光器	122
7.2	量子点激光器	123
7.2.1	量子点激光器的物理性能	123
7.2.2	量子点激光器对材料性质的要求	126
7.2.3	几种典型的量子点激光器	127
7.2.4	量子点光放大器	129
7.3	量子级联激光器	130
7.3.1	QC 激光器的物理特性	130
7.3.2	QC 激光器的工作原理	131
7.3.3	QC 激光器的性能参数	133
7.3.4	几种典型的 QC 激光器	133
	参考文献	135
<b>第 8 章</b>	<b>量子结构红外探测器</b>	<b>136</b>
8.1	光探测器的性能参数	136
8.2	pin 型光探测器	137
8.2.1	基本工作原理	137
8.2.2	光产生电流分析	138
8.3	雪崩光电探测器	140
8.3.1	APD 的工作原理	140

8.3.2 各种改进型的 APD	142
8.4 量子阱红外探测器	144
8.4.1 QWIP 的结构类型	144
8.4.2 QWIP 的光谱响应率	145
8.4.3 QWIP 的探测率	145
8.5 量子点红外探测器	146
8.5.1 量子点红外探测器的性能	146
8.5.2 不同类型的量子点红外探测器	146
8.6 太赫兹单光子探测器	149
8.6.1 双量子点单光子探测器	149
8.6.2 单量子点单光子探测器	150
8.6.3 双量子阱单光子探测器	151
8.7 量子限制斯塔克效应器件	152
参考文献	153
<b>第 9 章 量子结构太阳电池</b>	<b>154</b>
9.1 太阳电池的光伏参数	154
9.1.1 短路电流密度	154
9.1.2 开路电压	155
9.1.3 填充因子	156
9.1.4 功率转换效率	157
9.1.5 Shockley-Queisser 极限效率	158
9.2 量子阱太阳电池	159
9.2.1 量子阱结构中的光吸收	159
9.2.2 量子阱太阳电池的结构组态与光电流密度	160
9.3 量子点太阳电池	162
9.3.1 pin 结构量子点太阳电池	162
9.3.2 量子点激子太阳电池	165
9.3.3 量子点中间带太阳电池	169
参考文献	172
<b>第 10 章 其他低维量子器件简介</b>	<b>174</b>
10.1 自旋电子器件	174
10.1.1 自旋场效应晶体管	174
10.1.2 弹道自旋晶体管	175
10.1.3 自旋发光器件	176
10.2 单分子器件	177

---

10.2.1 单电子隧穿型单分子晶体管 .....	177
10.2.2 内部机械运动型单分子晶体管 .....	178
10.2.3 分子存储器 .....	180
10.3 量子点网络自动机 .....	180
10.4 超导量子器件 .....	182
10.5 Si 基自旋量子计算机 .....	183
参考文献 .....	184

# 第 1 章 绪 论

半导体科学技术发展的宗旨就是利用不同半导体材料所具有的物理性质,设计和制作各种固态电子器件与集成电路.这些器件与电路是组成通信系统、计算机系统和各种电子装置的“心脏”.性能优异的半导体器件的实现,有赖于高质量半导体材料的制备、合理器件结构的设计和优化工艺条件的选取.按照材料结构的不同,半导体器件可分为晶态半导体器件、非晶态半导体器件、超晶格与量子阱器件、量子线与量子点器件、宽带隙半导体器件以及有机半导体器件等;按功能特性的不同,半导体器件又可分为电子输运器件和光电子器件等;而按照物理效应的不同,半导体器件又可分为经典体效应器件和纳米量子效应器件等.正是这些性能优异的各类固态电子器件及其集成电路,在通信技术、计算机技术和电子线路技术中发挥着巨大作用,从而极大地促进了整个信息科学技术的迅速发展.

纳米量子器件一般是指采用半导体异质结、超晶格、量子阱、量子线和量子点等低维结构,设计制作的具有某些量子效应的电子器件,也可称为低维量子器件.如上所述,这种器件又大体可分为电子输运器件和光电子器件两大类.所谓电子输运器件是指在外电场作用下,其工作特性由载流子的输运行为支配的电子器件.例如,异质结双极晶体管(HBT)、高电子迁移率晶体管(HEMT)、共振隧穿晶体管(RTT)和单电子晶体管(SET)均属于这类器件;而光电子器件是指在光照和电场作用下,工作特性基于载流子的光吸收跃迁或发射而实现的电子器件.例如,量子阱和量子点激光器、量子阱和量子点光探测器、量子阱和量子点太阳能电池以及单光子器件都属于这一类.

在正式分析与讨论各种低维量子器件之前,不妨简单回顾一下上述各种低维量子器件的发展历程,这对我们深入理解其工作原理与器件特性将会大有裨益.

## 1.1 低维量子器件的发展历史

### 1.1.1 低维电子输运器件

HEMT可以说是最早研制成功的低维电子输运器件,它是利用调制掺杂异质结构中二维电子气所具有的高电子迁移率制作的超高速逻辑器件.20世纪70年代初,分子束外延(MBE)技术的研发成功,开辟了利用能带工程剪裁材料能带结构的新时代.此后不久,人们便利用MBE工艺生长出了高质量的AlGaAs/GaAs异

质结和超晶格. 尤其是 1978 年, 美国贝尔实验室的 Dingle 等<sup>[1]</sup> 首次观测到了调制掺杂 n-AlGaAs/GaAs 异质结中电子迁移率增强的现象, 即刻引起了人们的广泛关注. 1980 年, 日本富士通公司的 Mimura 等<sup>[2]</sup> 率先采用这种结构成功研制了第一只 HEMT. 其后的几年间, 世界各国科学家又进行了一系列的理论与实验研究, 其主要思路是如何通过优化 n-AlGaAs 层的掺杂浓度和本征 AlGaAs 隔离层厚度, 以获得最高的电子迁移率. 换句话说, 就是如何最佳化 AlGaAs/GaAs 异质结界面的二维电子气面密度, 以在低温乃至室温下得到预期的高迁移率值. 经过人们的尝试与探索, 在短短的几年内便使 HEMT 的低温电子迁移率提高到了  $\sim 10^6 \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . 与此同时, HEMT 环型振荡器、HEMT 分频器、大功率 HEMT、低噪声 HEMT 及其集成电路也相继问世.

与 HEMT 相比, HBT 的发展经历了一个暗淡时期. 早在 1951 年, Shockley 就提出了采用异质结制作双极型晶体管的概念. 但是, 由于当时受材料制备和器件制作工艺技术的限制, 这种器件问世的构想未能如愿以偿. 1983 年, Kroemer<sup>[3]</sup> 首先从理论上分析了 HBT 的电流增益特性, 从此揭开了 HBT 研究的序幕. 然而, 真正给 HBT 的研究发展带来活力的应归功于具有原子级平滑程度, 且组分和厚度能够精确控制的 MBE 等超薄层外延生长技术. 采用这些方法能够独立地控制材料的禁带宽度和掺杂浓度, 它既能使 HBT 基区获得高掺杂浓度, 又可以使基区获得  $0.1\mu\text{m}$  左右薄的厚度, 甚至还可以通过进一步优化基区能带形式, 实现载流子的弹道输运或隧穿输运, 从而使它成为继 HEMT 之后的另一种高速逻辑器件. 目前, 这类器件也已在振荡器、分频器、移位寄存器、门阵列、大功率器件及其集成电路中获得成功应用<sup>[4]</sup>.

共振隧穿电子器件是对半导体超晶格施加一垂直电场时, 电子横穿势垒结构的电子输运器件. 早在 1969 年, 江崎和朱兆祥在提出半导体超晶格概念的同时, 就曾预测到了在这种多层超薄异质结构中能够产生共振隧穿现象. 1974 年, 张立纲等<sup>[5]</sup> 首次利用 MBE 技术制作成功了 AlGaAs/GaAs 双势垒结构, 并实验观测到了这种结构中的共振隧穿现象, 从而开辟了超晶格垂直电子输运研究的新局面. 1983 年, 首例采用 MBE 工艺制备的共振隧穿二极管 (RTD), 在太赫兹频率下观测到了负微分电阻 (NDR) 现象<sup>[6]</sup>. 这一研究结果大大鼓舞了人们的信心, 其后又提出了研制共振隧穿晶体管的设想, 以期利用共振隧穿具有大电流峰-谷比的 NDR 特性, 制作多稳态器件, 并使之用于多值逻辑存储电路系统. 迄今, 对共振隧穿电子器件的研究相当广泛, 已开发成功的器件主要有振荡器、逻辑门、频率倍增器以及存储器等<sup>[7]</sup>.

单电子器件的研究发端于纳米半导体结构中的库仑阻塞现象. 1989 年 Scott-Thomas 等<sup>[8]</sup> 发现, 对于由 Si 表面反型层构成的窄一维沟道结构, 在电导随栅偏压的变化曲线上呈现出了周期性振荡行为. 接着, 他们又在倒置的 AlGaAs/GaAs



异质结制成的一维量子线电导的测量中,重复了上述结果.此后不久,Kouwenhoven 等<sup>[9]</sup>采用分离栅技术,利用半导体异质结试制成功了能控制单个电子进出的新器件,并称此为量子点旋转门(QDTS)器件.纳米结构或量子点中的这种库仑阻塞效应不仅是一种十分有趣的物理现象,而且蕴含着潜在的应用前景.在纳米技术的推动下,一门以单电子物理学为基础的纳米电子技术应运而生.迄今,人们已采用各种材料体系和结构制备了量子点、纳米晶粒、纳米线阵列等零维隧穿异质结构,在低温和室温条件下均观测到了明显的库仑阻塞和单电子隧穿振荡现象,并试制成功了单电子晶体管.尽管目前尚无实用化的单电子器件问世,但是随着纳米电子学研究的不断创新与突破,能够真正造福于人类的单电子器件以及集成电路,将会为信息科学技术的发展带来一场新的革命.

### 1.1.2 低维光电子器件

低维光电子器件主要是指具有优异光发射特性的量子结构激光器和具有良好光吸收特性的量子结构红外光探测器和量子结构太阳能电池等.量子阱激光器是最早被研制成功的低维光电子器件,世界上首例量子阱激光器是1975年由美国贝尔实验的Van der Ziel等试制成功的<sup>[10]</sup>.1981年,该实验室的Tsang<sup>[11]</sup>又研制成功了阈值电流密度低至 $0.25\text{kA}/\text{cm}^2$ 的量子阱激光器.其后,随着光通信向长距离和大容量方向发展,需要高性能的半导体激光器光源.1992年,美国加利福尼亚理工大学的科学家采用短谐振腔和激光端面的高反射率设计方案,获得了阈值电流低至 $0.25\text{mA}$ 的量子阱激光器.同年,日本的NEC公司采用面发光型结构,又使量子阱激光器的阈值电流降低到了 $0.19\text{mA}$ .其后,随着MBE技术的日臻完善和器件结构设计的进一步优化,各种材料体系和异质结构类型的量子阱激光器不断涌现,而且激射性能大大提高<sup>[12]</sup>.

量子线与量子点激光器的概念,最早是1982年由日本东京大学的Arakawa等提出的<sup>[13]</sup>.他们预言,由于量子线和量子点比量子阱具有更强的量子限制效应,因此由它们制作的激光器会具有更低的阈值电流密度,而且同温度的依赖关系也会进一步减弱.但是,由于量子线和量子点在制备工艺上所存在的困难,人们一直没有能够真正制作出这类低维结构激光器.直到20世纪90年代初期,才陆续有一些关于这方面的报道<sup>[14,15]</sup>.但是,早期的量子线和量子点激光器,都是采用对量子阱结构进行再蚀刻方法制作的.这种工艺有一个致命弱点,就是在蚀刻过程中会在量子线或量子点表面产生许多缺陷与损伤,同时衬底表面的空间利用率也比较低,这对产生光激射是非常不利的.后来,人们开始探索量子点的自组织生长技术,即利用生长材料与衬底间具有一定晶格失配度的特点,采用MBE方法并基于S-K模式成功生长出了具有一定密度分布和尺寸趋于均匀的量子点及其阵列.1994年,第一只InAs/GaAs量子点激光器研制成功,从而大大激发了人们研制量子点激光器的