



纳米光子学及器件

Nanophotonics and Devices

程 成 程潇羽 著



科学出版社

纳米光子学及器件

程 成 程潇羽 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

纳米光子学是研究纳米尺度光与物质相互作用的一门科学和技术,是近年来发展迅速的一个前沿领域。本书介绍了纳米光子学领域的概貌和纳米晶体量子点光纤型器件等方面的应用;简述了量子点的基本概念和纳米光子学的基础理论,讨论了量子点的能级结构;介绍了量子点的制备和表征、量子点光谱、量子点的热稳定性和光纤中的光传输;阐述了近年来在量子点光纤、量子点光纤放大器和量子点光纤激光器方面的研究工作;简单介绍了近年来极为热门的量子点太阳能电池,包括 PIN 结构、量子点敏化太阳能电池、多激子效应等。

本书可供纳米光子学及其器件领域的科技工作者阅读,也可供光学、光学工程、纳米材料、通信和电子等方向的研究生阅读或作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

纳米光子学及器件/程成,程潇羽著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-037275-8

I. ①纳… II. ①程…②程… III. ①纳米材料-光子②纳米材料-电子器件 IV. ①TB383②O572.31③TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 070452 号

责任编辑:余 丁 王晓丽 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 4 月第一次印刷 印张:22

字数:425 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

纳米的概念年代久远,但近二十年才引起了人们的极大兴趣和关注。作为一门发展迅速的新兴学科,纳米科技涉及物理学、化学、材料、电子、光学、计算机、生物与医药、航空和航天等许多领域,受到了世界各国政府、科技界和产业界的高度重视。纳米科技的成果,大大丰富了人类对物质运动规律的认识,并对科技、经济和社会的发展产生了重大的影响。

在纳米科技中,纳米物理学和纳米化学是理论基础,纳米材料、纳米电子学、纳米生物及医药是纳米技术中几个最重要的分支,它们相互渗透,相互支撑,充分体现了学科交叉的特点。纳米光子学是纳米电子学的重要组成部分。在纳米光子学中,来自尺寸效应的量子约束使得纳米粒子(量子点)产生了一系列的独特的光学现象。例如,原来不发光或发弱光的块体材料变为发光或发强光,原来的连续光谱变为分立、带隙移动展宽和吸收光谱蓝移等。研究这些光学现象,并由此构成新型的纳米光电子器件,就成了十分吸引人的课题。

该书的作者在我回国内担任“千人计划”学者之前,曾到我在美国的实验室研究访问了一段时间。也正是在此期间,作者开始涉猎纳米领域。借助于对光放大器及激光器件的熟悉,随着对量子点光学特性的深入了解,作者在将半导体量子点作为光增益介质方面做了许多有益的尝试,其中许多工作是首次提出或首次被详细研究,部分成果已经收入在该书中。

作为纳米光子学及器件方面的专著,虽然该书有一些不足,但出版该书的意义依然十分明显。一是国内目前该方面的专著非常少,二是该书的特色鲜明、前导性强、参考价值较高。在全书的组成构架上,理论体系较为完整,实验内容丰富,技术路线独特,参考文献较为丰富。无论是对于纳米科技专业工作者,还是对于初涉者,该书都不失为一本较好的参考书。我在此给予大力推荐。



2012年6月26日

南京大学

前 言

纳米科学和技术是一门跨世纪的科学和技术,是内容丰富、蓬勃发展、奇妙无比、利弊共存的一门新兴的科学和技术。

当物体的尺度缩小到几个纳米或改变纳米颗粒的大小时,物质的属性(电学、光学、磁学和热学)会发生许多有趣的变化。例如,原来不发光的发光了,弱光变为强光,不透明的变透明了。正是这些奇妙的特性,吸引了全世界的极大关注,从而使纳米科技得到了极大发展。作为全球关注的热点,纳米科技或将延续几十年上百年的,引起 21 世纪的又一次新的技术革命和产业革命,使得今天的奇迹将俯拾皆是,使得今天的憧憬将变为现实。

纳米光子学是纳米科技的一个重要分支,是近年来发展迅速的一个前沿领域。纳米光子学的含义相当宽广,涉及的材料可以是纳米尺度的各种半导体、金属、有机和无机分子;研究的角度侧重于光的粒子性;覆盖的内容可以包括光与物质的纳米尺度的相互作用、辐射的纳米尺度约束、光子的纳米尺度处理和加工等方面。限于篇幅,本书主要涉及第一个方面。首先简述量子点的基本概念和纳米光子学的基础理论,讨论量子点的能级结构。接着介绍量子点的制备和表征、量子点光谱和光纤中的光传输。然后阐述近年来我们在量子点光纤、量子点光纤放大器和量子点光纤激光器方面的工作。最后简单介绍近年来极为热门的量子点太阳能电池。本书没有涉及近场光学、光子晶体、等离子体光子学以及生物纳米光子学等内容,尽管它们同样熠熠生辉,令人神往。

作者在纳米光电子器件领域工作多年,偶有收获,屡有体会。在指导博、硕士研究生过程中,深深感到将研究生从外围引导到核心、迅速掌握开启大门的钥匙并迈入大门的重要性。于是,将近年来的理论和实验工作进行梳理,总结所涉及领域的发展趋势和成果,辅之一些必要的理论准备和基础知识,整理成书。我们期望能借此顺利打开纳米光子学的大门,跨过门槛,漫步其中。同时,期望本书能成为一本比较系统、循序渐进、内容独特、填白补缺的专门性书籍,抛砖引玉,给广大读者提供参考。

向参与本书初稿整理并做了部分实验的研究生赵志远、簿建凤、吴兹起、崔学伟、许周速等表示衷心感谢。近两年中由于专心撰稿而无法陪伴我的妻子张洪英女士而心有歉意。愿将本书奉献给他们以表谢意。

本书的部分研究内容得到了国家自然科学基金(60777023、61274124)的支持，
谨表谢意。

程成

2012年8月10日

杭州朝晖苑

目 录

序

前言

第 1 章 量子点概述	1
1.1 量子阱、量子线和量子点	1
1.2 量子效应	3
1.2.1 量子尺寸效应	3
1.2.2 表面效应	4
1.2.3 宏观量子隧道效应	4
1.2.4 库仑阻塞效应	5
1.3 量子点的类型和结构	5
1.3.1 量子点的类型	5
1.3.2 量子点的结构	8
1.4 量子点的应用和研究	11
1.4.1 量子点光电子器件	11
1.4.2 量子点太阳能电池	13
1.4.3 量子点在生命科学中的应用	15
1.4.4 量子点研究展望	16
参考文献	17
第 2 章 纳米光子学基础	18
2.1 光子和电子	18
2.2 激子	20
2.3 传播和约束	21
2.3.1 自由空间中的传播	21
2.3.2 光子和电子的约束	22
2.4 隧道效应	25
2.5 周期势场下的约束:带隙	27
2.6 协同效应	32
2.6.1 光子和电子的协同效应	32
2.6.2 协同辐射	35
2.6.3 纳米级能量转移	36

2.7 纳米级光学相互作用	37
2.7.1 棱镜全内反射	37
2.7.2 表面等离子体共振	38
2.7.3 波导耦合	40
参考文献	40
第3章 量子点的能级结构	42
3.1 量子电子态	42
3.1.1 势阱中的粒子	42
3.1.2 球对称势阱中的粒子	45
3.1.3 库仑势中的电子	49
3.1.4 周期势中的粒子	51
3.1.5 晶体中的电子	54
3.1.6 准粒子电子、空穴和激子	59
3.2 有效质量近似	63
3.2.1 弱约束情形	64
3.2.2 强约束情形	65
3.2.3 中等约束情形	68
3.3 表面极化效应	70
3.4 紧束缚近似	71
3.5 经验赝势法	72
参考文献	73
第4章 量子点的制备和表征	75
4.1 量子点制备	76
4.1.1 分子束外延生长	76
4.1.2 金属有机化学气相沉积	79
4.1.3 脉冲激光沉积	80
4.1.4 纳米化学法	81
4.1.5 高温熔融法	85
4.2 实验室量子点光纤制备	86
4.2.1 光纤本底材料的选择	86
4.2.2 量子点胶体的制备	87
4.2.3 空芯光纤灌装方法探索	87
4.2.4 量子点玻璃光纤(空气包层)的制备	90
4.3 量子点的表征	94
4.3.1 X射线	94

4.3.2 电子显微镜	96
4.3.3 扫描探针显微镜	98
4.3.4 激光粒度仪	99
4.3.5 吸收—发射光谱	100
4.4 熔融法制备 PbSe 量子点玻璃	101
4.4.1 实验制备	102
4.4.2 结果与分析	102
4.4.3 结论	108
4.5 CdSe/PMMA 量子点光纤材料的制备	109
4.5.1 概述	109
4.5.2 制备	110
4.5.3 结果与分析	111
4.5.4 结论	115
4.6 本体聚合法制备 PbSe/PMMA 量子点光纤材料	115
4.6.1 概述	115
4.6.2 制备	116
4.6.3 结果与分析	117
4.6.4 结论	122
4.7 脉冲激光沉积法制备锗纳米薄膜	123
4.7.1 实验	123
4.7.2 结果与分析	124
4.7.3 结论	131
4.8 基于 SiO ₂ 光纤的单分散 CdS 量子点的制备	132
4.8.1 制备	132
4.8.2 结果与分析	134
4.8.3 结论	136
参考文献	136
第 5 章 量子点光谱	139
5.1 量子点的发光	139
5.1.1 发光模式	139
5.1.2 俄歇复合	140
5.1.3 量子点光谱的频移	140
5.2 跃迁谱线线形	142
5.2.1 均匀展宽	142
5.2.2 非均匀展宽	144

5.2.3 综合展宽	146
5.3 量子点的吸收、辐射和散射特性	147
5.3.1 吸收	147
5.3.2 辐射	149
5.3.3 散射	150
5.4 跃迁截面	152
5.4.1 截面的概念	152
5.4.2 爱因斯坦系数和 Ladenburg-Fuchtbauer 关系	154
5.4.3 辐射截面的 Mc Cumber 理论	156
5.4.4 截面的确定	159
5.4.5 能级寿命	166
5.5 量子点掺杂对本底折射率的影响	168
5.5.1 本底溶剂的折射率	169
5.5.2 量子点胶体的折射率	169
5.5.3 量子点对本底折射率的影响	170
5.6 PbSe、PbS 和 CdSe、CdS 量子点的比较	170
参考文献	171
第 6 章 量子点的热稳定性	172
6.1 表面能	172
6.2 纳米粒子的热学性质	173
6.2.1 纳米粒子的热导	173
6.2.2 纳米粒子的熔融	176
6.3 CdSe/ZnS 量子点的热稳定性研究	177
6.3.1 实验和结果	178
6.3.2 实验和理论的比较与讨论	180
6.3.3 小结	183
参考文献	184
第 7 章 光纤中的光传输	185
7.1 均匀介质中的光传输	185
7.2 三能级系统	187
7.2.1 三能级模型	187
7.2.2 三能级速率方程	187
7.2.3 小信号增益	190
7.2.4 增益饱和	192
7.2.5 最佳光纤长度	193

7.3 重叠因子	194
7.4 二能级模型	197
7.4.1 二能级近似	197
7.4.2 二能级速率方程	198
7.5 放大的自发辐射	199
7.5.1 噪声功率和噪声带宽	200
7.5.2 噪声系数	201
7.5.3 噪声功率方程	202
7.6 二能级系统的解析法	203
7.7 包含放大自发辐射的建模	205
7.7.1 速率方程	205
7.7.2 平均反转和均匀展宽	207
7.7.3 非均匀展宽情形	207
7.8 径向效应	209
7.8.1 速率方程	209
7.8.2 径向分布函数	210
7.8.3 计算实例	211
参考文献	214
第8章 量子点光纤和光纤放大器	216
8.1 低浓度掺杂 CdSe/ZnS 量子点光纤的传光特性	217
8.1.1 概述	217
8.1.2 实验制备和测量	218
8.1.3 荧光发射峰值波长和峰值强度随掺杂光纤长度的变化	220
8.1.4 荧光发射峰值波长和峰值强度随掺杂浓度的变化	223
8.1.5 结论	224
8.2 较高掺杂浓度 CdSe/ZnS 量子点光纤的传光特性	225
8.2.1 概述	225
8.2.2 实验	225
8.2.3 不同掺杂浓度下的 PL 光谱	226
8.2.4 PL 峰值强度增益与掺杂光纤长度的关系	227
8.2.5 PL 峰值强度增益与掺杂浓度的关系	229
8.2.6 PL 光谱中的其他谱峰及红移现象	230
8.2.7 结论	232
8.3 UV 胶纤芯本底的 CdSe/ZnS 量子点光纤的传光特性	232
8.3.1 实验	232

8.3.2	UV 胶中的 CdSe/ZnS 量子点的吸收谱和发射谱	233
8.3.3	掺杂光纤对泵浦光的吸收	234
8.3.4	PL 峰值强度与掺杂光纤长度和浓度关系	235
8.3.5	PL 峰值波长与掺杂光纤浓度和长度关系	237
8.3.6	结论	238
8.4	量子点光纤荧光光谱的红移	239
8.4.1	纤芯基底为甲苯时的 PL 峰值波长的红移	239
8.4.2	不同纤芯本底的 PL 峰值波长的红移	240
8.4.3	结论	243
8.5	单掺杂 PbSe 量子点光纤放大器	243
8.5.1	基本工作原理	243
8.5.2	速率方程	245
8.5.3	结果和讨论	248
8.5.4	结论和展望	251
8.6	多粒度掺杂 PbSe 量子点光纤放大器	251
8.6.1	引言	251
8.6.2	能级和叠加谱	252
8.6.3	结果和讨论	254
8.6.4	结论	257
8.7	理想的量子点光纤放大器	257
8.8	结语	260
	参考文献	262
第 9 章	量子点光纤激光器	265
9.1	概述	265
9.2	几个关键问题	267
9.2.1	量子点种类的选择	267
9.2.2	量子点的光学增益和受激辐射阈值	268
9.2.3	泵浦光激励阈值	269
9.2.4	光纤增益和损耗	269
9.2.5	激射的稳定性	270
9.2.6	谐振腔	270
9.3	CdSe/ZnS 量子点非饱和单模光纤激光的数值建模	272
9.3.1	原理和模型	272
9.3.2	数值计算及结果	276
9.3.3	结论	282

9.4 基于钠铝硼硅酸盐玻璃的 PbSe 量子点红外单模光纤激光	282
9.4.1 PbSe 量子点的吸收谱和辐射谱	282
9.4.2 散射截面和吸收截面	284
9.4.3 PbSe 量子点光纤激光器参量的确定	287
9.4.4 结论	290
9.5 PbSe 量子点光纤激光器的实验实现	291
9.5.1 激光器的构成	291
9.5.2 实验过程	292
9.5.3 实验结果与分析	293
9.5.4 结论	300
9.6 结语与展望	300
参考文献	302
第 10 章 量子点太阳能电池简介	304
10.1 太阳能电池的基本工作原理	305
10.2 PIN 结构的量子点太阳能电池	308
10.2.1 基本结构	308
10.2.2 硅基串联电池	311
10.3 量子点敏化太阳能电池	312
10.3.1 类型和比较	312
10.3.2 结构和组成	312
10.3.3 工作原理	315
10.3.4 现状和发展	317
10.4 量子点多激子产生效应	317
10.4.1 光子的吸收和产生过程	318
10.4.2 PbSe、PbS 和 PbTe 量子点中的 MEG	319
10.4.3 CdSe、Si 量子点中的 MEG	321
10.4.4 MEG 效应提高光伏效率	322
10.4.5 设计 MEG 量子点	324
10.5 量子点太阳能电池的几个关键问题	326
10.6 展望	329
参考文献	329
附录 本书主要物理量符号对照表	332
希腊字母符号	336

第 1 章 量子点概述

纳米科学和技术是 21 世纪的科学技术。当前,各种各样纳米结构的研究和应用已经成为科学和技术发展的热点,纳米领域正在经历着一个极为迅速的发展时期。一方面,电子集成目前已达到纳米级的加工水平,由于受到电子衍射极限等因素的制约,电子集成似乎无法进一步扩展。另一方面,由于半导体量子点具有类似于原子、分子的独特性质,使得人们可以通过控制量子点粒径的大小,获得不同波长的光子的吸收和发射,从而为光子集成开辟了极为广阔的应用前景。近年来,量子点在生物荧光标识、太阳能电池、LED、激光器、光纤放大器等方面都有很多的研究和应用。

纳米结构一般指的是至少在一个维度上的尺寸为 $1\sim 100\text{nm}$,这种结构可包括半导体量子阱、量子圈、量子线、量子点以及碳纳米管等。由于纳米结构种类繁多,性质各异,要想在一本书中囊括所有的纳米结构是不现实的。本书主要讨论纳米晶体量子点(nanocrystal quantum dots)及其光学性质,并且主要是指通过化学纳米法制备的纳米晶体量子点。在以下各章中,在不引起概念模糊和不特别提及的前提下,所指的纳米结构均指纳米晶体量子点。对于纳米管、量子阱和量子线等纳米材料及其光学性质,读者可参考其他书籍。

本章是本书的一个引述,通过引述向读者介绍关于纳米材料(量子点)的概貌。主要内容包括量子阱、量子线和量子点的基本概念;量子效应,包括量子尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应、库仑阻塞效应;量子点的类型和结构;量子点的应用和研究发展等。

1.1 量子阱、量子线和量子点

半导体中,电子和空穴都可以用波的概念描述,对应的波称为电子和空穴的德布罗意(de Broglie)波,波长分别用 λ_e 和 λ_h 表示。德布罗意波是描述粒子性质的一个重要参量。

对于三维体材料,电子和空穴在三个维度上都不受限制,电子的德布罗意波波长远小于材料的尺寸,因此,体材料中的电子能态为连续分布。当体材料在某一维上的尺寸受到限制,或者该维的尺度小到与电子和空穴的德布罗意波波长相当时,三维退化为二维,称为量子阱。如果二维尺寸进一步被限制成一维,则称为量子线。如果维度继续减少,成为零维或准零维,电子和空穴的运动在三个方向上都受

到限制,那么就称为量子点(quantum dot, QD)。

大量的实验观测证明:量子点光谱具有分立的特性,并且吸收峰相对于发射峰有蓝移。量子点的分立光谱的特性,本质上来自于介质中的电子的波粒二象性。电子的德布罗意波特性取决于其费米(Fermi)波长 $\lambda_F = 2\pi/k_F$ 。对于二维情形,费米波矢 $k_F = \sqrt{2\pi n_s}$ (n_s 是电子面密度)。对于一般的体材料,其尺寸远大于电子德布罗意波长,电子能级或者能态密度是连续的,因此没有量子约束效应。如果将某一维度的尺度缩小到一个电子德布罗意波长,即为量子阱,此时电子只能在另外两个维度所构成的二维空间中运动,电子的能态密度成为量子化的“阶梯”形。如果进一步将两个维度减小到一个维度,则电子只能在一维方向上运动,电子的能态密度被进一步量子化,成为尖顶“脉冲”形,即为量子线。当第三个维度的尺寸也缩小到一个电子波长以下时,电子只能在“零维”方向上运动,成了“准零维”的量子点,电子的能态密度成为分立状(图 1.1.1)。在相干波长与激子玻尔(Bohr)半径可比较的强限制区域,会形成激子并有激子吸收带。随着粒径的减小,激子带的吸收增强,激子的低能量向高能方向移动,即吸收带产生了蓝移。

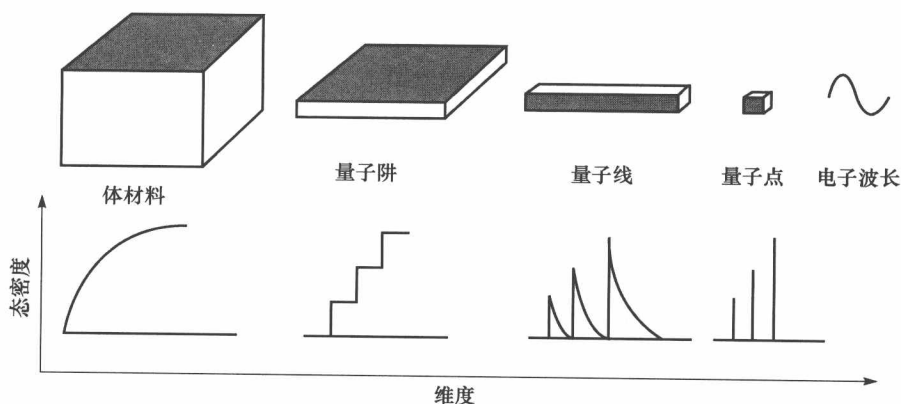


图 1.1.1 各个维度的电子能态密度

当 $d=1,2,3$, 态密度为 $\rho(E) \propto E^{\frac{d}{2}-1}$ 。对于一个准零维系统, 电子能态密度可用 δ 函数表示

在纳米结构中, 低浓度的准粒子可以认为是类似于三维晶体的理想气体。电子和空穴的能态密度的一般形式为

$$\rho(E) \propto E^{\frac{d}{2}-1} \quad (d = 1, 2, 3) \quad (1.1.1)$$

式中, d 是维数; E 为能量, 电子的能量从导带底部标定, 空穴的能量从价带的顶部标定。在三维系统中, $\rho(E)$ 是能量的平方根的函数。当 $d=2$ 和 $d=1$ 时, 由于量子限制效应, 出现许多离散的子带, 每一个子带都满足式(1.1.1)。例如, 一个二维结构量子阱, 其量子化能量为

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_{e,h} L^2} n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.1.2)$$

式中, L 为沿约束方向的大小; 色散关系表示为

$$E(k) = E_n + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m_{e,h}} \quad (1.1.3)$$

在 x, y 方向上的运动不受限制, 而沿着约束方向 z 轴的运动受到限制。当 $d=0$ 时, 则为零维结构, 即准粒子的量子点。

一般所指的半导体量子点的大小为 $1 \sim 10 \text{ nm}$, 但实际上并没有一个十分明确的尺寸标识范围, 它的尺寸由材料中的电子费米波长决定。一般电子费米波长在半导体内比在金属内长得多, 如在半导体材料砷化镓 (GaAs) 中, 其费米波长约为 40 nm , 在铝金属中却只有 0.36 nm 。

量子点通常均匀分散于光学透明材料中, 如在玻璃和聚合物薄膜中; 也有分散在有机溶剂中, 如分散在甲苯、正己烷中。一个量子点可以包含几百到数万个原子, 量子点内部有超晶格结构。量子点的外形大多呈球形, 也有的呈棒状、四面体、六面柱体、盘形等形状的量子点, 具体形状与量子点的合成过程及其化学成分有关。

量子点作为一种准零维多原子系统, 又称为“人造原子”。由于量子点中的电子和空穴在三个维度上都被约束, 引起了一系列特殊的量子效应, 如能级离散化、表面效应、量子尺寸效应(约束效应)、宏观量子隧道效应、量子干涉效应、库仑阻塞效应、光学吸收峰的蓝移、光学非线性增强的量子效应等, 派生出与宏观和微观体系很不相同的低维物理特性, 展现出许多奇特的物理化学性质, 其电学性能和光学性能也因此发生显著变化。

量子点的材料种类繁多, 同时量子点的尺寸也可以通过制备过程控制, 这为量子点的广泛应用提供了极大的空间。从 20 世纪 80 年代到现在, 人们发现了不同量子点的很多物理现象, 如光谱分立、奇异的载流子动力学性质等, 吸引了越来越多的关注, 使得量子点在生命科学、医药、非线性光学、磁介质、单电子器件、存储器以及各种光电器件等方面开辟了极为广阔的应用前景。

需要指出, 由量子点的纳米尺寸而导致的奇特的物理性质, 至今仍无法很好地解释。可用来完整描述量子点能级结构和性质的普适理论仍然不够完善, 实验制备以及应用研究也有相当大的待开拓空间。

1.2 量子效应

1.2.1 量子尺寸效应

量子尺寸效应又指由量子尺寸引起的量子约束效应。当量子点的尺寸小到可

与电子的德布罗意波长、相干波长及激子玻尔半径相比时,电子受限在纳米空间,电子输运受到限制,电子平均自由程很短,电子的局限性和相干性增强,极易形成激子,产生激子吸收带。随着粒径的进一步减小,激子带的吸收系数增加,出现激子强吸收。由于量子约束效应,激子的最低能量向高能方向移动(蓝移),其光谱是由带间跃迁的一系列线谱组成的。由于载流子运动受到小空间的限制,费米能级^①附近的电子能级由准连续变为分立,即能量发生量子化。量子尺寸效应导致其吸收谱从连续分布,变为具有峰值结构的离散谱带。相邻电子能级间距和粒子直径之间的关系,可表示为^[1]

$$\delta = \frac{4}{3} \frac{E_F}{N} \quad (1.2.1)$$

式中, N 为一个粒子中的导带电子数; E_F 为费米能级能量。

对于块体材料,能级间距为零。对于量子点,它含有限数量的原子, N 值较小,因此, δ 值不为零,即有一定的能级间距。当量子点的能级间距大于热能、磁能、光子能量时,量子尺寸效应就会比较明显,从而使得量子点的磁、光、声、热、电以及超导电性与宏观块体材料的特性有显著的区别,如量子点的磁化率、比热容、介电常数和光谱线的位移都会发生变化。

1.2.2 表面效应

量子点的表面效应是指由于量子点的粒径很小,大部分原子位于量子点的表面,其比表面积随量子点粒径的减小而增大。由于比表面积很大,使得表面原子配位不足,不饱和键和悬键增多,从而使得这些表面原子具有很高的活性,很容易与其他原子发生反应。表面原子的活性会引起表面电子自旋和电子能谱的变化,产生陷阱电子和空穴,从而使量子点的荧光发射发生变化。

由表面效应导致的最直观现象,就是随着纳米微粒尺寸的减小,其熔点逐渐降低。与此同时,纳米粒子的表面张力也随粒径的减小而增大,这会引发引起纳米粒子表面层晶格的畸变,晶格常数变小,从而发生显著的晶格收缩效应。

1.2.3 宏观量子隧道效应

宏观量子隧道效应是指电子从一个量子阱穿越势垒进入另一个量子阱。在纳米空间,电子的平均自由程与约束空间尺度相当,载流子运输过程的波动性增强,量子隧道效应就出现了。量子隧道效应使得电子可以穿过纳米势垒而形成费米电

^① 费米能:在金属或费米子系统中,在热力学零度时,电子按泡利不相容原理,从低能级到高能级逐个填充系统的各个能级,电子能够填充到的最高能级就是费米能级 E_F 。当温度 $T > 0$ 时,电子可以激发到比热力学零度时 E_F 能级更高的能级上去,这时,占据费米能级的概率是 $1/2$ 。在半导体物理和电子学领域中,费米能是电子或空穴的化学势。