

低维半导体物理和超快光谱技术研究 参考必备手册

低维半导体

复合结构的光学性质

金 华◎著

吉林大学出版社

低维半导体复合结构的光学性质

金 华 著

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

低维半导体复合结构的光学性质 / 金华 著. — 长春: 吉林大学出版社, 2009.5

ISBN 978-7-5601-4463-4

I. 低… II. 金… III. 半导体器件—结构—光学性质
IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 079123 号

低维半导体复合结构的光学性质

金华 著

责任编辑、责任校对: 许海生

吉林大学出版社出版、发行

开本: 880 × 1230 毫米 1/32

总印张: 4 总字数: 150 千字

ISBN 978-7-5601-4463-4

封面设计: 出书网 | 丁岩

北京奥隆印刷厂 印刷

2009 年 6 月第 1 版

2009 年 6 月第 1 次印刷

定价: 20.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 421 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-88499826

网址: <http://www.jlu.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

内 容 简 介

本书介绍了 II ~ VI 族低维半导体复合结构中的载流子动力学过程及其光学性质,并对 II ~ VI 族低维量子体系中材料的表征、稳态和瞬态光谱测量技术、物理特性和应用方面进行较为系统地介绍。主要内容包括低维半导体的基本性质,低维结构中的光学测量方法,ZnTe 基复合量子阱中的载流子行为和 ZnSe 基量子阱/量子点复合结构中的激子行为。

本书可供从事低维半导体物理和超快光谱技术研究的科技人员和相关领域的师生参考。

序

II - VI族半导体具有大的禁带宽度,较大的激子束缚能和强的室温激子效应,一向被认为是制备室温激子非线性器件和短波长发光器件的重要候选材料之一。利用激子隧穿效应制备出各种低维复合结构并对激子隧穿和辐射复合过程进行研究,这无论是对基础理论研究还是对器件实际应用方面都具有重要意义。

本书介绍了II - VI族低维半导体复合结构中的载流子动力学过程及其光学性质,并对II - VI族低维量子体系中材料的物理特性和表征方法、稳态光谱测量技术、超快光谱技术等进行较为系统地介绍。结合大量的实验数据说明了ZnTe基复合量子阱中的激子动力学过程和ZnSe基量子阱/量子点复合结构中的激子行为,证实了复合结构可以提高载流子的隧穿时间以及量子点的发光效率,为新型超快隧穿器件和高效发光器件的研制提供了新思路。

本书作者从事II - VI族低维量子体系特性的研究,有着第一手的资料和亲身的心得体会。根据当前国际上的研究热点和发展趋势,结合自己实验室的研究成果,比较系统完整地撰写了本书的内容,使它既能反映这一研究领域的概况,又具有自己的特色。希望本书的出版,能为从事低维半导体物理和超快光谱技术的科研

人员提供参考,使对这一领域感兴趣的读者有所裨益。本书的出版受到“十一·五”国家科技支撑计划(2006BAK07B04)和公安部应用创新计划(2007YYCXGADX101)的资助。

张立功

2009年5月11日

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	5
第二章 低维半导体的基本性质及发展概况	7
2.1 低维半导体的概况	7
2.2 低维半导体的电子态	9
2.2.1 量子阱的电子态	10
2.2.2 量子线和量子点的电子态	12
2.3 低维半导体材料的制备和表征	14
2.3.1 低维半导体材料的制备	15
2.3.2 半导体低维材料的表征方法	17
2.4 II-VI 族低维半导体材料的应用及研究进展	18
2.4.1 蓝绿色发光器件及激光器	18
2.4.2 激子隧穿器件	21
2.4.3 非线性光学双稳器件	25
参考文献	26

第三章 低维结构中的光学测量方法 33

3.1 稳态光谱测量方法	33
3.1.1 吸收光谱和激发光谱	33
3.1.2 发射光谱	34
3.1.3 喇曼散射谱	35
3.2 超快光谱技术	36
3.2.1 超短脉冲激光技术	36
3.2.2 白光超短脉冲产生	39
3.2.3 超快光谱测量技术	41
3.2.4 超快光谱在低维半导体材料中的应用	48
参考文献	51

第四章 ZnTe 基和 ZnSe 基低维复合结构 中的载流子动力学过程 55

4.1 激子隧穿的基本性质	55
4.1.1 非对称量子阱的电子和空穴隧穿	56
4.1.2 非对称量子阱的激子隧穿	59
4.2 CdZnTe/ZnTe/ZnSeTe 复合量子阱的载流子行为	60
4.2.1 ZnSeTe/ZnTe 多量子阱的能级结构和激子动力学过程	61
4.2.2 CdZnTe/ZnTe/SeZnTe 复合量子阱的载流子行为	69
4.3 CdZnSe/ZnSe/CdSe 量子阱/量子点复合结构的激子隧穿	73
小结	79
参考文献	80

第五章 ZnCdSe/ZnSe/CdSe 量子阱/ 量子点复合结构中的激子复合	83
5.1 激子复合的基本性质	84
5.1.1 激子复合发光峰能量、线宽和激子热离化与温度的关系	84
5.1.2 激子隧穿在激子复合过程中的作用	87
5.2 量子阱/量子点复合结构中量子点的发光特性	90
5.3 垒层厚度对阱/点复合结构中的量子点发光特性的影响 ...	98
小结	106
参考文献	106

第一章 绪论

I would like to describe a field...in which an enormous amount can be done in principle. This field...might tell us much of great interest about the strange phenomena that occur in complex situations. ... what I want to talk about is the problem of manipulating and controlling things on a small scale.

—Richard Feynman

at the 1959 Annual Meeting of the American Physical Society

1959年 Richard Feynman 就预言了纳米科学技术的发展前景并鼓舞科学家们通过不懈的努力将纳米器件带入现实。从那时起,半导体微电子学进入了前所未有的蓬勃发展时期,并对信息和计算技术产生深远影响。微结构的迅速发展使晶体管的小型化遵守摩尔法则,现在已经可做到原子尺寸的微型器件,这已经达到了器件的物理极限。也就是说,微观技术已进入纳米技术的领域,正如 Feynman 所预言的那样:器件已经进入微纳尺度。

在这样的低维体系中,载流子在一定方向上的运动受到限制,失去该方向上的自由度。载流子的行为表现出显著的量子力学特性。电子的局域性和相干性增强,宏观固体的准连续能带消失,出现分立的能带或能级,材料中各种元激发的布居改变,这使得低维体系的光、热、电、磁等物理性质与体材料不同。许多新奇的物理性质在这些体系中被不断的揭示出来,因此近年来低维体系的研究越来越受到重视。

半导体光电子学、光通信和信息技术的发展要求不断提高信息处理的速度。但通信波特率受到光电子器件响应时间的限制,成为高速光通信发展的瓶颈。目前,光开关器件开启速度可以达到很快($\sim$ 几十飞秒),但关闭速度由于受材料中载流子复合寿命的限制难以提高。在低维结构中,载流子不能再被认为是半经典粒子,而必须考虑其波动性。当两个相邻势阱存在匹配的能级,而且载流子波函数的延展范围有一定的交叠,则隧穿将成为粒子传输的主要方式。载流子和激子的隧穿不仅改变载流子在半导体材料中的分布,而且决定着这些粒子的寿命。因此,利用低维复合结构中的量子隧穿效应,将载流子(或激子)转移到所关心的系统之外,可以大幅度降低系统内载流子寿命,从而可以有效的提高光开关器件的工作速率,为高速光电响应提供了基础。

目前有关量子隧穿的研究多集中在非对称双量子阱结构上。这些研究结果表明:粒子隧穿得以发生必须满足一定的条件,如耦合的阱之间必需有匹配的子能级^[1,2];耦合阱间的隔离势垒层的厚度是决定隧穿的重要参量^[3];纵光学声子在粒子隧穿中起辅助作用^[4,5]。一般认为,当耦合阱中的子能级的能量差接近势垒层的光学声子能量时,可以在光学声子的辅助下实现粒子的隧穿过程。在 III ~ V 族半导体材料中,载流子在耦合结构间的传输是以电子和空穴独立隧穿的形式完成的^[6,7,8]。由于空穴隧穿一般不能通过发射 LO 声子来辅助实现,是一个慢过程,导致隧穿过程效率降低。而在宽带 II — VI 族半导体材料中,激子一般具有较大的束缚能(20 ~ 30 meV),当制备成量子阱结构时,在量子限域效应作用下,激子束缚能进一步增加^[9],激子特性可一直延续到室温。电子 - 空穴作为激子在光学声子的辅助下实现快速的整体隧穿。在 ZnSe 基的非对称 ZnCdSe 量子阱^[10]和 ZnTe 基的复合量子阱^[11]中,激子隧穿时间达到皮秒量级,这一特性为研制快速光开关提供了基础。

为了进一步提高隧穿效率,人们在非对称双量子阱结构的基础上探索制备新的复合结构。考虑到在非对称双量子阱中激发窄阱时,宽阱中不可避免的共振吸收现象会抑制激子隧穿过程,人们将目光投向量子点,用量子点代替双量子阱中的宽阱。这种结构与非对称双量子阱中的宽阱相比具有明显的优势。一方面,量子点的吸收截面很小,会大大降低共振吸收,从而在加快量子阱中激子衰减的同时不会影响量子阱的非线性大小。另一方面,理论上量子点在其相应能级处的态密度趋于无穷大,对电子、空穴及激子的接受能力不受限制,不易发生隧穿饱和现象。因此采用量子阱/量子点复合结构在实现半导体光开关特性方面有很好的前景。此外,在量子阱/量子点复合结构中,激子快速、高效的隧穿会在量子点中形成高密度的激子积累,这也为设计新型的光电器件提供了一种新思路,量子点激光器就是一个典型的例子。

由于半导体量子点具有分立的能级结构和类原子的态密度,量子点激光器具有比量子阱激光器、量子线激光器更加优异的性质,如超低阈值电流密度、极高的阈值电流稳定性、微分增益和调制带宽、极高的温度稳定性以及在直流电流调制下无啁啾工作等。量子点激光器已显示出从大功率、光计算到光纤数字传输用高速光源以及红外探测器等方面的极重要的应用前景。但是,一般来说,量子点激光器还无法取代量子阱激光器。这是由于在生长中量子点尺寸、形状和密度的随机分布以及量子点之间的分离所导致在载流子收集和电荷再分布上受到限制,致使增益受限。而在量子阱/量子点复合结构中,附加的量子阱通过隧穿注入会给量子点发光带来很多好处:收集并再注入从量子点中热离化的载流子,有助于量子点间横向载流子传输及电荷平衡,对复合发光的量子点进行尺寸选择并减少腔内模式,调节激光波长。2001年, G. Walter 等人采用 InGaP 阱 - InAlGaP 垒 - InP 点结构,通过量子

阱向量子点进行有效的载流子注入,获得了室温连续工作的光泵受激发射^[12,13]。S. L. Chuang 和 N. Holonyak, Jr 从理论上对量子阱-量子点耦合结构的载流子隧穿进行了研究,发现隧穿速率强烈依赖于阱层和点层能级的共振情况^[14]。可见量子阱/量子点复合结构无论是在快速光电器件、光开关还是在半导体激光器研制方面都具有研究价值和发展前景。因而对半导体低维复合结构中激子动力学过程研究无论对基础理论还是实际应用都有深远的意义。

物质的微观机制决定它的宏观性质,研究物质的微观动力学过程是获得材料微观机制的重要手段。其中超快时间分辨光谱是揭示低维结构中的载流子动力学过程和光学特性的重要手段,特别是时间分辨泵浦-探测差分透射谱(Time-Resolved Differential Transmission Spectra)和时间分辨荧光光谱(Time-Resolved Photoluminescence),利用这些光谱手段可以直接测量处于某一激发态能级的载流子瞬态布居状态。飞秒激光器的出现更是为研究低维结构中各种元激发的超快演化过程提供时间分辨的强大工具,使时间分辨率可以达到几个飞秒,为测量物质中快速的散射过程提供可能。

II-VI族半导体具有大的禁带宽度、较大的激子束缚能和强的室温激子效应,一向被认为是制备室温激子非线性器件和短波长发光器件的重要候选材料之一。利用激子隧穿效应制备出各种低维复合结构,并对激子隧穿和辐射复合过程进行研究,这无论是对基础理论研究还是对器件实际应用方面都具有重要意义。本书对ZnTe基非对称双量子阱和ZnSe基量子点/量子阱复合结构的激子动力学过程和光学性质进行研究,主要内容为:

第二章 介绍II-VI族半导体低维结构的有关知识和研究进展及量子隧穿的基本概念和相关知识。

第三章 介绍超短脉冲激光及超快光谱的基本原理和常用半导体材料表征方法。

第四章 利用泵浦-探测和时间分辨发光光谱研究 CdSeTe/ZnTe/ZnSeTe 非对称双量子阱及 CdSe/ZnSe/ZnCdSe 量子点/量子阱复合结构的载流子动力学过程。表明 ZnSeTe 层对载流子具有很强的限制作用,发现由于在 CdZnTe 量子阱旁加入了 ZnSeTe 量子阱层使得 CdZnTe 中载流子的衰减时间大大缩短,证明在该复合结构中存在着从 CdZnTe 阱向 Zn SeTe阱的高效率激子隧穿,隧穿时间仅为 5.5 ps。并通过对不同垒厚的点/阱复合结构发光特性测量,说明该结构中隧穿现象的存在,最短可达 1.8ps。

第五章 利用变温光谱研究 CdSe/ZnSe/ZnCdSe 量子点/量子阱复合结构中激子热离化和隧穿对量子点发光的影响。根据量子点和量子阱中激子辐射跃迁强度、峰位、线宽随温度的变化关系,说明了激子隧穿对量子点中激子发光的影响,激子复合过程的各种竞争机制的关系。特别是激子隧穿和激子离化在激子复合过程中的作用。通过 CdSe 量子点/CdZnSe 量子阱结构的变温发射谱和激子吸收,以及垒层对激子发光的影响,指出了激子隧穿过程对量子点和量子阱中激子复合的影响,从而进一步认识这种复合结构的发光机理。同时阐述了在不同垒层厚度的样品中激发功率对量子点和量子阱发光的影响。

参考文献

- [1] M. F. Krol, S. Ten, B. P. McGinnis, and etal, Phys. Rev. B 1995, 52, 14344.
- [2] N. Sawaki, R. A. Hopfel, E. Gornik, H. kano, Appl. Phys. Lett, 55, 1996 (1989).
- [3] S. Haacke, N. T. Pelekanos, H. Mariette, A. P. Heberle, W. W. Ruhle, M. Zigone, J. Crystal Growth, 1994, 138, 831.
- [4] D. Y. Oberli, J. Shah, T. C. Damen, etal, Appl. Phys. Lett. 1990, 56, 1239.

低维半导体

复合结构的光学性质

DIWEIBANDAOTI FUHEJIEGOUDEGUANGXUEXINGZHI

- [5] K. Kuroyanagi, N. Sawaki, T. Takatsuka, I. Akasaki, et al, Semicond. Sci. Tech. , 1992, 7, B424.
- [6] A. P. Heberle, W. W. Ruhle, M. G. W. Alexander, K. Kohler Semicond. Sci. Tech. , 1992, 7, B421.
- [7] A. P. Heberle, X. Q. Zhou, A. Tackeuchi, W. W. Ruhle, K. Kohler, Semicond. Sci. Tech. , 1994, 9, 519.
- [8] M. F. Krol, R. P. Leavitt, J. T. Pham, B. P. McGinnis, N. Peyghambarian, Appl. Phys. Lett. , 1995, 66, 3045.
- [9] W. H. Khoch, K. L. Fork, M. C. Downer, D. A. Miller, D. S. Chemla, C. V. Shank, A. C. Gossard, W. Wiegmann, Phys. Rev. Lett. , (1988) 54, 1306.
- [10] S. Ten, F. Henneberger, M. Rabe, N. Peyghambarian, Phys. Rev. B 1996, 53, 12637.
- [11] S. Haccke, N. T. Pelekanos, H. Mariette, M. Zigone, Phys. Rev. B 1993, 47 16643.
- [12] G. Walter et al Appl. Phys. Lett. ,(2001) 79, 1956.
- [13] G. Walter et al Appl. Phys. Lett. ,(2001) 79, 3215.
- [14] S. L. Chuang, N. Holonyak, Jr, Appl. Phys. Lett. ,(2002) 80, 1270.

第二章 低维半导体的基本性质及发展概况

半导体低维材料被誉为构成继晶体管和集成电路之后的第三代半导体器件的重要材料。这种基于量子效应的微结构材料将导致新的电子学革命。人们可以根据需要改变晶格周期势场,调节甚至改变材料的能带结构、态密度分布及材料中的电子的波函数分布,是半导体材料研究领域的一项重大突破。在这种低维结构中,电子、空穴、激子等的行为发生特异变化,产生了很多新的物理现象,如分数量子霍尔效应、二维激子等。这也开辟了新的物理研究领域,对发展高效率、低功耗和超高速的新一代光电子学及非线性光学元器件具有非常重要的意义^[1,2,3]。

2.1 低维半导体的概况

1969年,美国IBM公司的江崎(Esaki)和朱兆祥(Tsu)首先提出了超晶格概念^[4,5]。两种或者两种以上不同组分或者不同导电类型超薄层材料,交替堆叠形成多个周期结构,如果每层的厚度足够薄,以致其厚度小于电子在该材料中的德布罗意波的波长,这种周期变化的超薄多层结构就叫做超晶格。1973年,张立纲等人^[6]实现了这一设想,使用分子束外延技术生长出了第一个人造半导体超晶格。从此低维材料制备技术获得了突破性的进展。

超晶格结构按组分的不同可分为组分超晶格和掺杂超晶格。组分超晶格是指由两种组分不同的材料组成的超晶格,其禁带宽度分别为 E_{g1} 和 E_{g2} ,因而出现带隙不连续性。如果材料相同,但掺杂交替变换,n 型和 p 型交替出现,也能引起能带结构周期的变化。这种采用调制掺杂不同导电型的同质材料构成的超晶格叫做掺杂超晶格。

按照能带偏移的情况,还可分为 I 型、II 型和 III 型超晶格,如图 2.1 所示。在 I 型超晶格中, $E_{g2} > E_{g1}$, $E_{c1} < E_{c2}$, $E_{v1} > E_{v2}$,窄带隙超薄层中,电子和空穴都受到宽带隙层势垒的限制。II 型超晶格对应 $E_{c1} < E_{c2}$ 和 $E_{v1} < E_{v2}$ 的情形,电子和空穴不再同在一个势阱区中受到限制了,空穴被 ΔE_v 限制在宽带隙超薄层一边,在空间上限制发生在不同位置上的超晶格结构中。III 型超晶格是一类有独特能带结构的超晶格材料,它由宽禁带材料和零带隙材料组成,比较典型的是 CdTe/HgTe 超晶格。目前对前两类超晶格研究得较多。

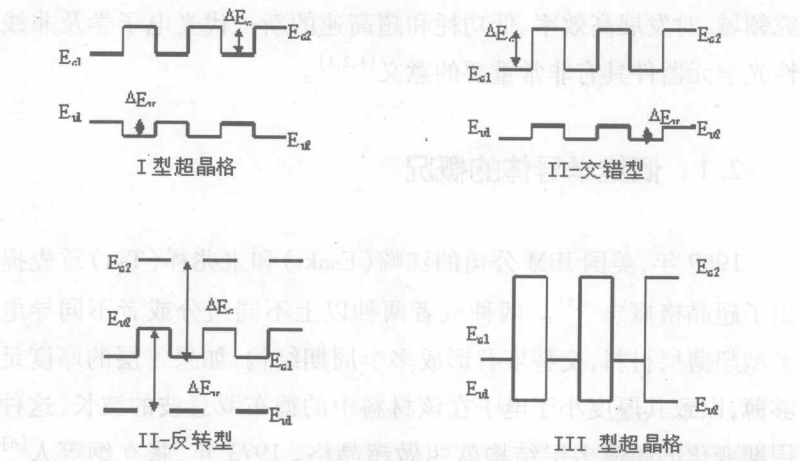


图 2.1 几种超晶格结构示意图

根据组分之间的匹配情况,分为匹配超晶格和应变超晶格。