

GaAs/AlGaAs 多量子阱材料差分反射光谱*

代作晓 陆书龙 赵明山 李国华

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 介绍了一种新型的空间调制光谱技术—差分反射(DR)光谱技术。利用振动光束差分反射测试系统, 获得了 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的 DR 谱, 初步分析了 DR 信号的产生机制。通过与材料的 PR 谱及反射光谱的一阶微商谱比较分析, 论证了 DR 光谱技术用于多量子阱量子化跃迁观测的理论可行性, 并从实验角度证明了 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的 DR 谱具有反射率谱对能量的一阶微商线型特征。

关键词: 多量子阱; GaAs/AlGaAs; 差分反射光谱

PACC: 7855; 7865

中图分类号: O484.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)11-1099-04

Differential Reflectance Spectroscopy of GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Wells*

DAI Zuo-xiao, LU Shu-long, ZHAO Ming-shan and LI Guo-hua

(Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Received 8 November 1999, revised manuscript received 17 March 2000

Abstract: An improved spatial modulation technique called Differential Reflectance (DR) spectroscopy has been described. The DR spectra of GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As multiple quantum wells (MQWs) samples were measured experimentally. The reflectance and photoreflectance spectra of these samples were also obtained. Good correspondence between DR, PR spectra and the calculated results shows that like PR, DR technique can be used as an effective tool of the study and characterization of semiconductor quantum wells. Besides, it's proved experimentally that the DR spectra of MQWs have a first-order derivative line shape of reflectance to the photon energy.

Key words: multiple quantum wells; GaAs/AlGaAs; differential spectroscopy reflectance

* 山东省自然科学基金资助, 项目号 Y98G05101 [Project Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province Under Grant No. Y98G05101].

代作晓 男, 1970 年出生, 硕士, 从事光谱测试及光谱学分析工作

陆书龙 男, 1975 年出生, 硕士研究生, 从事半导体材料调制光谱研究

1999-11-08 收到, 2000-03-17 定稿

PACC: 7855; 7865

Article ID: 0253-4177(2000)11-1099-04

1 引言

差分反射(DR)光谱技术是一种空间调制技术,它利用材料表面存在的空间非均匀性获得差分反射光谱信号,已经广泛用于半导体材料性质研究^[1-3].由于材料的差分反射光谱信号随着材料表面非均匀性的加剧而增大,使得该技术特别适于研究半导体材料的损伤分布.同时,该技术的非接触测量方式、高灵敏度及宽光谱测量范围等优点,使其成为研究半导体量子阱的有效工具.人们已经利用该技术获得了不同温度条件下的半导体多量子阱材料的DR光谱,并初步分析了DR技术研究半导体量子阱材料的有效性.但是,由于DR信号通常是由样品的几种不同的非均匀性共同贡献的,因此DR谱线型比较复杂,一时难以建立合适的数学模型,这就使得许多情况下利用DR谱确定各个参数变得十分困难.本文通过材料的DR谱、PR谱及反射光谱的一阶微商谱之间的比较分析,进一步论证了DR技术研究半导体量子阱的理论可行性,并从实验角度证实了多量子阱材料的DR谱线型具有反射率对能量的一阶微商特征.该工作对于建立有效的DR谱数学模型,进而进行DR谱的定量分析有积极的借鉴意义.

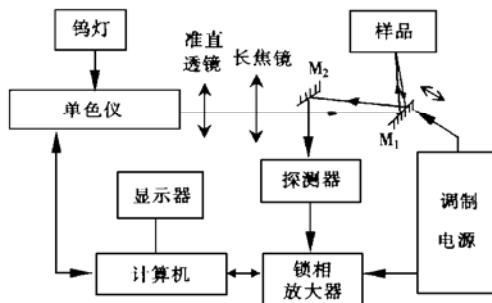


图1 差分反射光谱测量装置图

FIG. 1 Diagram of DR Experimental Setup

光灯发出的白光经单色仪分光、透镜准直入射至长焦透镜,再经振镜M₁反射会聚在样品表面.调节样品角度,使样品反射光稍微偏离入射光束方向(偏角<5°),再次入射振镜M₁,经M₂反射后由Si光电探测器收集.振镜M₁由与之相连的扬声器带动沿镜面法线方向振动,使探测光斑交替入射样品两相邻位置.从探测器输出的电流信号包括两部分:一是对应于样品平均反射率R的直流成份,二是对应于样品两点反射率差分变化ΔR的交流成份.DR信号,即样品某一区域反射率的归一化差分变化ΔR/R,由标准锁相技术检测,并将结果送入计算机处理.实验中单色仪的扫描控制及锁相放大器参数设定、数据采集均可通过计算机编程来实现.

本实验所用的样品为中国科学院半导体研究所生长的具有四个不同阱宽的GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As多量子阱材料,阱宽分别为1、2.5和10nm,垒宽约10—15nm,缓冲层厚度>0.5μm.实验中探测光斑大小约0.2mm×2mm,两光斑分开距离约为0.2mm,光斑振动频率为78Hz.室温条件下测得的DR谱如图2(a)所示.由图中结果可看出,DR谱具有非常丰富的光谱峰结构.其中,1.425eV处的光谱结构对应于缓冲层GaAs的E₀跃迁,其它高能区的光谱结构与量子阱的各量子化能级间跃迁相关.作为比较,我们还测量了同一样品的光调制反射光谱(PR谱),如图2(b)所示.图中结果显示,DR和PR谱有着很好的对应关系,DR谱在低能区具有更强的光谱结构和更好的信噪比,理论和实验已经证明^[4,5],量子阱材料的PR谱的产生机理是光激发电场引起的量子阱带和激子的Stark效应.PR谱线型具有介电函数对能量的一阶微商特征,光谱结构对应于量子阱的量子化能级间跃迁.因此,上述DR和PR谱的一致性表明DR谱结构也反映了样品的量子化能级间的跃迁,与文献[6]的结论一致.

2 实验装置及实验结果

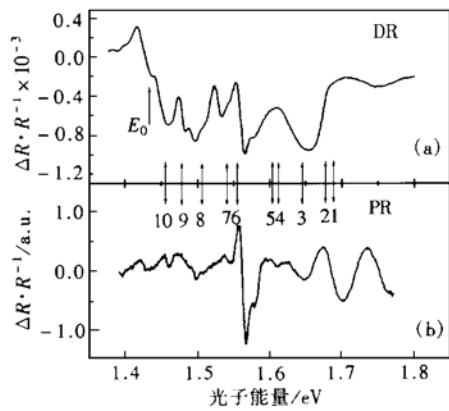
DR谱是基于测量样品两相邻位置(或两块样品间)反射率归一化差分变化($\Delta R/R$)随入射光子能量变化关系而得到的一种调制光谱.DR信号的产生依赖于样品的空间非均匀性.差分反射光谱的测量装置如图1所示.

光灯发出的白光经单色仪分光、透镜准直入射至长焦透镜,再经振镜M₁反射会聚在样品表面.调节样品角度,使样品反射光稍微偏离入射光束方向(偏角<5°),再次入射振镜M₁,经M₂反射后由Si光电探测器收集.振镜M₁由与之相连的扬声器带动沿镜面法线方向振动,使探测光斑交替入射样品两相邻位置.从探测器输出的电流信号包括两部分:一是对应于样品平均反射率R的直流成份,二是对应于样品两点反射率差分变化ΔR的交流成份.DR信号,即样品某一区域反射率的归一化差分变化ΔR/R,由标准锁相技术检测,并将结果送入计算机处理.实验中单色仪的扫描控制及锁相放大器参数设定、数据采集均可通过计算机编程来实现.

本实验所用的样品为中国科学院半导体研究所生长的具有四个不同阱宽的GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As多量子阱材料,阱宽分别为1、2.5和10nm,垒宽约10—15nm,缓冲层厚度>0.5μm.实验中探测光斑大小约0.2mm×2mm,两光斑分开距离约为0.2mm,光斑振动频率为78Hz.室温条件下测得的DR谱如图2(a)所示.由图中结果可看出,DR谱具有非常丰富的光谱峰结构.其中,1.425eV处的光谱结构对应于缓冲层GaAs的E₀跃迁,其它高能区的光谱结构与量子阱的各量子化能级间跃迁相关.作为比较,我们还测量了同一样品的光调制反射光谱(PR谱),如图2(b)所示.图中结果显示,DR和PR谱有着很好的对应关系,DR谱在低能区具有更强的光谱结构和更好的信噪比,理论和实验已经证明^[4,5],量子阱材料的PR谱的产生机理是光激发电场引起的量子阱带和激子的Stark效应.PR谱线型具有介电函数对能量的一阶微商特征,光谱结构对应于量子阱的量子化能级间跃迁.因此,上述DR和PR谱的一致性表明DR谱结构也反映了样品的量子化能级间的跃迁,与文献[6]的结论一致.

采用 Kronig-Penny 模型, 我们粗略计算了量子阱导带和价带子能级位置, 进而给出各允许的量子化能级间的跃迁能量。计算采用的相关参数分别为: $\Delta E_c = 202\text{meV}$, $\Delta E_v = 109\text{meV}$, 垒宽为 10nm , GaAs 能隙 $E_0 = 1.425\text{eV}$, 阵中载流子有效质量分别为: 电子 $M_e = 0.067m_0$, 重空穴 $M_{hh} = 0.620m_0$, 轻空穴 $M_{lh} = 0.087m_0$, 阵中载流子有效质量分别为: 电子 $M_e = 0.088m_0$, 重空穴 $M_{hh} = 0.655m_0$, 轻空穴 $M_{lh} = 0.103m_0$ 。理论计算结果见表 1, 其中 $\text{HH}_n/C_m(\text{LH}_n/C_m)$ 表示从价带重空穴(HH)或轻空穴(LH)子能级到导带子能级的跃迁。各跃迁所在的能量位置在图 2 中以箭头形式指示, 序号 1—10 所对应的量子化跃迁分别为:

1. $\text{LH}_1/C_1(w_1)$,
2. $\text{HH}_1/C_1(w_1)$,
3. $\text{LH}_1/C_1(w_2)$,
4. $\text{LH}_2/C_2(w_4)$,
5. $\text{HH}_1/C_1(w_2)$,
6. $\text{HH}_2/C_2(w_4)$,
7. $\text{LH}_1/C_1(w_3)$,
8. $\text{HH}_1/C_1(w_3)$,
9. $\text{LH}_1/C_1(w_4)$,
10. $\text{HH}_1/C_1(w_4)$.

图 2 GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 多量子阱材料

的 DR 谱和 PR 谱

FIG. 2 DR and PR Spectra of
GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As MQWs表 1 GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 多量子阱材料允许的量子化跃迁Table 1 Allowed Quantized Transitions of GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As MQWs

跃迁标号	跃迁能量/eV			
	w ₁ (1nm)	w ₂ (2nm)	w ₃ (5nm)	w ₄ (10nm)
HH ₁ /C ₁	1.677	1.611	1.508	1.458
LH ₁ /C ₁	1.696	1.647	1.540	1.474
HH ₂ /C ₂				1.556
LH ₂ /C ₂				1.617

3 分析与讨论

原则上利用 DR 谱可以获得有关材料量子化能级间跃迁等信息, 但是, 由于多量子阱材料 DR 信号产生原因的多样性, 导致了 DR 光谱线型的复杂性, 对于 DR 谱的合理解释需要同时考虑样品的电子态性质或多层介质性质等多种因素。人们对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的反射光谱研究表明^[7], 该类材料的反射光谱线型受到样品前表面反射波与量子阱多层界面间干涉效应的强烈影响, 随着量子阱材料前势垒层厚度的变化, 反射线型呈现类散射和类吸收等不同线型, 这种影响反射线型的干涉效应也必然反映在差分反射光谱中, 在 DR 光谱中通常表现为与激子跃迁相联系的 DR 信号叠加在一个大的振荡背景上且多量子阱的振荡背景尤为明显, 我们在对多种多量子阱材料差分反射谱的研究中都证实了这一点。

多量子阱材料 DR 谱的复杂线型增加了 DR 光谱精确分析的困难, 然而, 通过反射微商光谱与 DR 光谱的比较研究, 可以了解 DR 谱主要光谱结构的线型特征, 从而有助于分析 DR 光谱的调制机制。在一个空气与半导体多层结构(N 层)构成的多层膜体系中, 对于任何一种调制光谱技术, 材料介电函数的调制与反射率 R 的归一化调制的关系可由下式给出:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_{L=1}^N [\alpha^{(L)} \Delta \epsilon_e^{(L)} + \beta^{(L)} \Delta \epsilon_h^{(L)}]$$

其中 $\alpha^{(L)}$ 、 $\beta^{(L)}$ 为广义 Seraphin 系数, $\alpha^{(L)} = \frac{1}{R} \times \frac{\partial R}{\partial \Delta \epsilon_i^{(L)}}$, $\beta^{(L)} = \frac{1}{R} \times \frac{\partial R}{\partial \Delta \epsilon_e^{(L)}}$; $\epsilon^{(L)}$ 为第 L 层介电函数, 且 $\epsilon^{(L)} = \epsilon_i^{(L)} + j \epsilon_e^{(L)}$; $\Delta \epsilon^{(L)} = \Delta \epsilon_i^{(L)} + j \Delta \epsilon_e^{(L)}$ 为调制引起的该层介电函数的变化量。对不同的调制方式, $\Delta \epsilon_i^{(L)}$ 及 $\Delta \epsilon_e^{(L)}$ 有所不同, 但是 $\alpha^{(L)}$ 、 $\beta^{(L)}$ 却与所采用的调制技术无关, 只反映材料本身的性质。因此, 通过同一样品不同方式调制光谱的比较, 可以帮助我们确定各种光谱的调制机制。

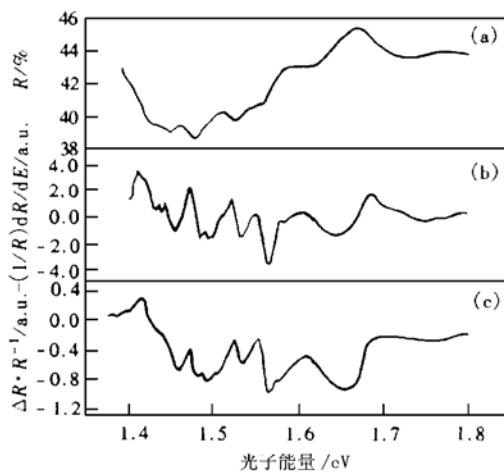


图 3 GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 多量子阱材料
的反射光谱(a), 一阶微商光谱(b)和 DR 谱(c)

FIG. 3 Reflective Spectrum (a), First-Order Derivative Spectrum (b) and DR Spectrum (c) for
GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As MQWs
迁能位置呈现锐利的光谱峰结构。

4 结论

我们利用差分反射技术, 获得了具有丰富信息的 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的 DR 谱, 通过与 PR 谱的比较说明 DR 谱中众多的光谱结构对应于量子化能级间的跃迁。通过 DR 谱与反射微商光谱的比对分析, 从实验上证明了 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料 DR 谱具有一阶微商线型特征。对于多量子阱 DR 谱的精确分析, 依赖于弄清材料 DR 信号产生的各种机制, 这一工作有待于深入研究。

参 考 文 献

- [1] M. Gal and C. Shwe, Appl. Phys. Lett., 1990, **56**: 545.
- [2] C. Shwe and M. Gal, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**: 1910.
- [3] P. Kraisingdecha and M. Gal, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 1355.
- [4] R. Enderlein, Desheng Jiang and Yinsheng Tang, Phys. State Solidus, 1988, **B145**: 167.
- [5] R. Enderlein, Desheng Jiang and Yinsheng Tang, Solid State Commun., 1987, **63**: 793
- [6] J. Bellotti, G. Campagnoli et al., J. Appl. Phys., 1996, **79**: 3205.
- [7] Pedro Castrillo, Gaspar Armelles, Ana Ruiz and Rernando Briones, Jpn. J. Appl. Phys., 1991, **30**: 1241.

为此, 我们在日本岛津产 UV-3101PC 型分光光度计上测得了 GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As 多量子阱的相对反射光谱, 如图 3(a)表示, 并计算了反射光谱的对数一阶微商光谱($-\frac{1}{R} \times \frac{dR}{dE}$), 并且和材料的 DR 谱相比较, 结果分别如图 3(b)、(c)所示。反射光谱的对数一阶微商光谱相当于波长调制谱, 此时 $\Delta \epsilon^{(L)}$ 为 $\epsilon^{(L)}$ 对能量的一阶微商。通过多量子阱材料 DR 谱(图 3(c))与反射对数一阶微商光谱(图 3(b))比较可看出, 两曲线中主要光谱结构特征一致, 从而可以证明 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料 DR 谱主要光谱结构具有介电函数对能量一阶微商线型。

GaAs/AlGaAs 多量子阱材料 DR 信号的产生是由于材料本身固有的空间非均匀性, 如层厚变化、组份涨落等, 而 DR 曲线中锐利的光谱峰结构, 主要源于量子阱阱宽 L_w 、合金组份 x 的空间非均匀性^[6], 二者的空间非均匀性引起激子能量的变化, 导致了材料介电函数的空间差异, 在量子化跃