

新的空间调制光谱技术在半导体超晶格量子阱中的应用*

陈辰嘉 王学忠 孙允希 林春 韩一龙 李海涛 蔡明

(北京大学物理系, 北京, 100871)

0471.4

摘要 报道一种通过转动样品来实现空间调制微分反射(DR)光谱技术, 给出 GaAs/AlGaAs 多量子阱和应变 InGaAs/GaAs 多量子阱在室温下的 DR 谱实验测量结果, 并与光调制反射谱(PR)实验和理论计算结果相比较. 实验证明 DR 谱的信号比 PR 谱更强, 可达 10^{-2} 量级, 两者一致并与理论计算结果符合得很好. DR 谱是研究薄膜和微结构的有效方法.

关键词 微分反射, 光调制反射, 半导体多量子阱.

超晶格

DR光谱

引言

各种光学技术已广泛应用于半导体超晶格量子阱能级结构的研究, 其中电调制反射(ER)技术是常用的方法之一, 它是在作用电场的周期性调制下, 样品材料在光子频率对应子能带结构的临界点处在反射谱上产生锐结构, 具有很高的灵敏度, 其缺点是需要直接在样品上加电场, 制作电极. 另一种非接触无破坏的光调制反射(PR)技术, 是通过光注入载流子调制样品的表面电场, 虽然信号较 ER 谱为弱, 但近十多年来已广泛应用于半导体超晶格量子阱微结构的研究^[1]. M. Gal 和 C. Shwe 等人^[2]在 1990 年提出新的无接触空间反射谱(DR)方法, 等效于无接触的电调制谱技术, 并应用于 InGaAs/GaAs 多量子阱限定子能级的研究, 证明 DR 信号在临界点的幅度较 PR 高很多, 可以与 ER 相比拟. 然而该方法必须改变样品中约一半部分的表面态, 例如用化学或离子束腐蚀、电子束辐射、离子注入等. 随后他们又报道了无需改变样品表面态而由于 InGaAs/GaAs、GaAs/AlGaAs 多量子阱本身存在的不均匀性而观测到的 DR 谱^[3]. DR 谱是将入射光聚在样品上 1mm 直径的点上并在垂直于入射光平面上加 1.5~2mm 的小振动($\sim 58\text{Hz}$)以实现其空间调制. 本文报道的一种新的空间调制技术无需对样品表面进行任何处理的微分反射光调制技术, 该方法通过转动样品实现空间调制, 与查访星等人^[4]提出的方法基本相同.

1 实验

DR 谱实验装置与 PR 谱类似, 以卤钨灯为光源, 经 HRD-1 双光栅单色仪分光后聚于样品上, 经样品反射后, 反射光的直流部分 R 和交流部分 ΔR 分别通过探测器连接的 7151 型多用电位计和锁相放大器给出, 由计算机控制单色仪扫描和采集数据, 给出 $\Delta R/R$ 与波长

* 国家自然科学基金(编号 19874005)资助项目
稿件收到日期 1998-10-20, 修改稿收到日期 1999-01-11

(或光子能量)的关系曲线.空间调制反射谱实验装置框图见图1.

样品($3 \times 3 \text{mm}^2$)必须贴在斩波器转动盘的中心部位,光聚在样品中心约1mm宽的长条上,转动频率为 $0 \sim 50 \text{Hz}$,样品部分见图2.由于斩波器采用两孔式叶片,参考信号经分频器接入锁相放大器(见图1).

$\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 样品(No. 1)是在GaAs(001)衬底上用MBE方法生长的,缓冲层厚度约500nm,阱和垒宽分别为7和10nm的多量子阱,周期为10, $x = 0.36$. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 样品(No. 2)是在GaAs(001)衬底上用MBE技术先生长500nm GaAs缓冲层,阱和垒宽分别为8和15nm的应变多量子阱,周期为15, $x = 0.2$. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 样品(No. 3)是在n-GaAs(Si)上用MOCVD技术生长500nm的缓冲层后,生长阱和垒宽分别为7和40nm的应变多量子阱,周期为4, $x = 0.2$. 顶层为200nm p-GaAs(Zn)覆盖.

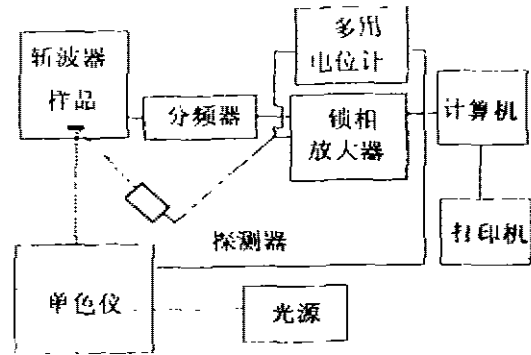


图1 空间调制反射谱实验装置框图
Fig. 1 Block diagram of a differential reflectance experimental arrangement

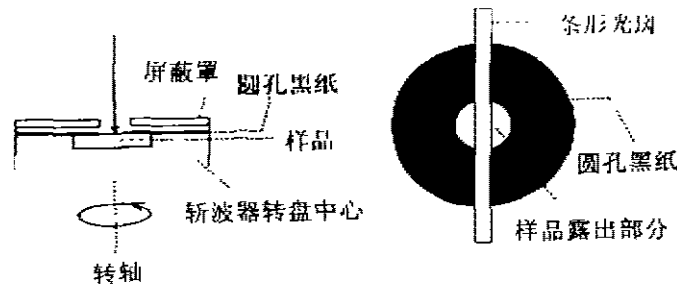


图2 样品部分示意图
Fig. 2 Schematic representation of sample part

2 结果和讨论

2.1 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 多量子阱

图3给出室温下 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ 多量子阱的DR和PR谱.图中圆点为实验值,PR谱中的箭头是阱内子能级结构拟合值11H(1.474eV)、11L(1.501eV).用包络函数模型对不同子能级的理论计算得到的不同能级间跃迁能量为11H(1.485eV)、11L(1.512eV),分别对应第一导带态到第一重、轻空穴的跃迁. DR谱中的箭头是实验数据的极小值,分别指认为是11H(1.485eV)和11L(1.508eV).图3表明室温下与量子阱内子能级相对应的DR谱实验结果与PR谱相一致,并与理论计算结果相符合,DR谱 $\Delta R/R$ 的幅度可达 10^{-2} .在PR谱中低能部分两个峰结构对应于样品衬底和缓冲层GaAs能隙的结构,其强度较阱内子能级结构更强,而在DR谱中对应的区域只有较阱内结构弱得多的信号(如虚箭头所示),这说明GaAs体材料的均匀性,而空间调制微分谱对均匀性体材料是不灵敏的.

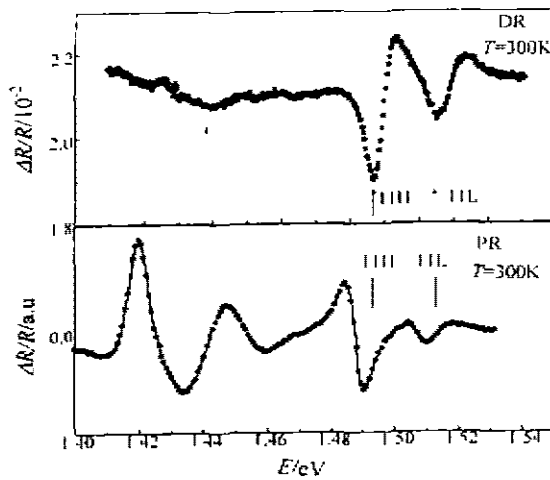


图3 室温下GaAs/Al_{0.36}Ga_{0.64}As多量子阱DR和PR谱

Fig. 3 DR and PR spectra of GaAs/Al_{0.36}Ga_{0.64}As multiple quantum wells at room temperature

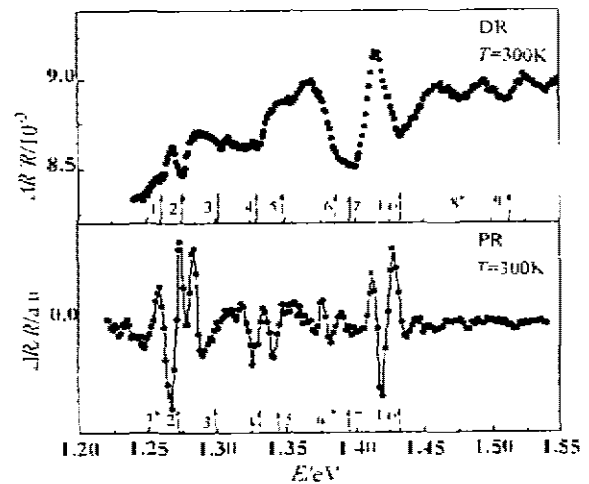


图4 室温下In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs(MBE)应变多量子阱DR和PR谱

Fig. 4 DR and PR spectra of In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs(MBE) strained multiple quantum wells at room temperature

2.2 In_xGa_{1-x}As/GaAs 应变多量子阱

图4给出室温下In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs(样品No. 2)应变多量子阱的DR和PR谱. 图中圆点为实验值, DR谱中箭矢是实验数据极小值, 序号1~9对应阱内子能级结构, E₀为衬底及缓冲层的结构. PR谱中的箭矢是阱内子能级结构拟合值. 用包络函数模型对不同子能级结构的理论计算与实验结果相比较后得到的不同能级跃迁能量结构分别表征为: 11H(Γ)、11H(π)、13H(Γ)、13H(π)、11L(Γ)、22H(π)、E₀(GaAs)、21H(Γ)、23H(Γ)等, 例如11H(Γ)和11H(π)分别对应第一导带态到第一重空穴态在布里渊区Γ点(中心)和π点(边缘)的跃迁. In_xGa_{1-x}As/GaAs应变多量子阱不同特征能量在室温下的实验和理论值详见表1, 其中序号1为对应激子跃迁.

表1 In_xGa_{1-x}As/GaAs(MBE)应变多量子阱不同特征能量在室温下实验和理论值
Table 1 Experimental and theoretical values of the energies of different features of In_xGa_{1-x}As/GaAs(MBE) strained multiple quantum wells at room temperature

序号	特征结构	实验		理论 eV
		DR(eV)	PR(eV)	
1	11H(Γ)	1.261	1.261	
2	11H(Γ)	1.273	1.273	1.275(1)
3	11H(π)	1.300	1.285	1.275(4)
4	13H(Γ)	1.330	1.330	1.332
5	13H(π)	1.345	1.345	1.333
6	11L(Γ)	1.382	1.382	1.349
7	22H(π)	1.392	1.390	1.380
	E ₀ (GaAs)	1.432	1.428	1.424
8	21H(Γ)	1.476		1.460
9	23H(Γ)	1.513		1.515

对应变多量子阱,实验观测到 DR 谱的 $\Delta R/R$ 信号亦较 PR 谱为强,序号 1~7 的子能级相一致,序号 8、9 对应的子能级跃迁 $21H(\Gamma)$ 、 $23H(\Gamma)$ 在 PR 谱中由于信号太弱无法辨认,而 DR 谱能从实验中确认.两者实验结果与理论计算也符合相当好(详见表 1).由于应力效应造成的空间不均匀性与 GaAs/AlGaAs 体系不同,图 4 中与 GaAs 相联系的 E_0 结构振幅在 DR 谱中可与阱内结构强度相比拟.

MOCVD 生长 $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ 样品(No. 3)室温下 DR 和 PR 谱如图 5 所示.圆点为实验值,不同序号箭矢表示阱内子能级结构, E_0 对应 GaAs 衬底能隙,与上述样品的实验结果类似.我们获得 $\Delta R/R$ 振幅高达 10^{-2} 的 DR 谱信号,且两者一致,图中序号 5 结构在 DR 谱没有相对应的极小值,这是转动频率为 20Hz 时测定的,当提高频率(例如调到 45Hz)时,序号 5 结构的极小值重新出现,说明转动频率选取的重要性.

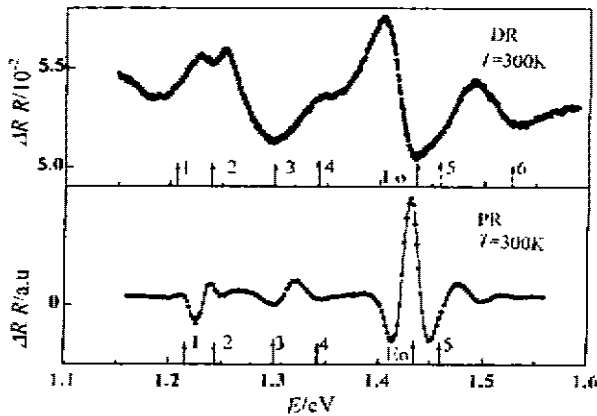


图 5 $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ (MOCVD)应变多量子阱 DR 和 PR 谱

Fig. 5 DR and PR spectra of $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ (MOCVD)strained multiple quantum wells at room temperature

一般认为空间调制反射谱的调制信号来源于两方面:一是样品各处微结构的差异,例如表面状态不同、本身的结构、组分、各层厚度涨落、薄层应变、缺陷在空间分布等的不均匀性可引起反射信号的周期性起伏;另一是转盘与样品在转动过程中并非绝对垂直于转轴而引起的周期性变化.我们设计的转动样品方案使入射光在样品上呈一条长条形,当样品转动一周时保持照在样品上入射光强不变而使最终调制反射光振幅 $\Delta R/R$ 强达 10^{-2} 量级.

DR 谱与 PR 谱相比,对样品同样具有非接触无破坏的优点.PR 谱 $\Delta R/R$ 振幅强度一般在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级,而 DR 谱较前者高 2 个量级以上,且省略了特定的激光器作为调制光源.目前对 III-V 族半导体,PR 谱一般采用 $\lambda=632.8nm$ 的氦氖激光器作为调制光源.而对 III-VI 族半导体,由于能隙较宽,一般必须用 $\lambda=325.0nm$ 且价格较昂贵的氮镉激光器作为调制光源.相比之下 DR 谱测量方法简便,且不受选择激光光源的限制,关于 DR 谱的线形和机制尚有待于进一步研究,可望得到更广泛的应用.

3 结论

用一种新的通过转动样品来实现空间调制的微分反射光谱技术,对 GaAs/AlGaAs 和应变 InGaAs 多量子阱的研究结果证明:DR 谱的信号比 PR 谱更强,可达 10^{-2} 量级,说明 DR 谱是研究半导体薄膜和超晶格量子阱的有效方法.

REFERENCES

- 1 CHEN Chen-Jia, GAO Wei, MI Li-Zhi, *et al.* Photoreflectance Study of GaAs/Al_xGa_{1-x}As Single Quantum Well and Strained In_xGa_{1-x}As/GaAs Superlattice Proc. International School of Physics (Enrico Fermi) Course CXVI, *Semiconductor Superlattices and Interface*, 1993, 333
- 2 Gal M, Shwe C. Novel contactless electroreflectance spectroscopy of semiconductors, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56:545
- 3 Shwe C, Gal M. Differential reflectance spectroscopy of InGaAs/GaAs and AlGaAs/GaAs quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57:1910
- 4 CHA Fang-Xing, HUANG Xing-Liang, SHEN Xue-Chu. A new kind of space-modulated spectroscopy and its application to several kinds of semiconductor material, *Chinese Journal of Semiconductors* (查访星, 黄醒良, 沈学础. 一种新的空间调制光谱技术及其对几种半导体材料的应用, *半导体学报*), 1997, 18:329

A NEW TYPE OF SPACIAL MODULATION SPECTROSCOPY APPLIED IN SEMICONDUCTOR SUPERLATTICES QUANTUM WELLS*

CHEN Chen-Jia WANG Xue-Zhong SUN Yun-Xi LIN Chun
HAN Yi-Long LI Hai-Tao CAI Ming

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract A new type of differential reflectance (DR) spectroscopy technique that relies on the spacial modulation by rotation was reported. The experimental results in GaAs/AlGaAs and strained InGaAs/GaAs multiple quantum wells by using DR technique at room temperature were presented, and compared with the experimental results of photoreflectance (PR) spectra and the theoretical values. It is shown that both spectra of DR and PR are coincident and in good agreement with the theoretically predicted values. The modulation signal of DR spectra ($\Delta R/R$) is about 10^{-2} , which is much higher than that in PR measurements. It is concluded that DR is an effective method at room temperature for the study of films, semiconductor superlattices and quantum wells.

Key words differential reflectance, photoreflectance, semiconductor multiple quantum wells.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1998-10-20, revised 1999-01-11