

In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 应变多量子阱结构的光调制反射和热调制反射谱的研究*

陈辰嘉 高蔚 米立志 黄德平 瞿明

(北京大学物理系,北京,100871)

L. Nosenzo

(Dipartimento di Fisica "A. Volta", Università di Pavia, I-27100 Pavia, Italy)

摘要 对 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 应变多量子阱在 77K 下的光调制反射谱 (PR) 和热调制反射谱 (TR) 进行了实验研究. 对 PR 结果的线形拟合指认了应变多量子阱中子能级的跃迁, 并与理论计算结果作了比较. 实验对比确认 PR 中 11H、13H 等跃迁结构为非耦合态、具有电场调制机构的一阶微商性质. 而 11L、31H、22H 等跃迁结构为阱间耦合态, 对这些隧穿耦合的低场调制产生三阶微商特性.

关键词 应变多量子阱, 光调制反射谱, 热调制反射谱, 耦合态.

引言

近年来, In_xGa_{1-x}As/GaAs 应变多量子阱超晶格结构在基础研究和器件应用方面都引起人们的广泛兴趣^[1]. 光调制反射的非破坏、无接触方法已被证明是研究多量子阱结构中大量子带量子态的有效技术^[2], 在室温下就能在临界点附近产生微商特性并观测到很锐的差分反射谱 $\Delta R/R$. PR 谱的电场调制机构产生一阶或三阶微商线形, 当温度从低温升到室温时, 洛伦兹线型会变为高斯线型, 情况比较复杂, 对其调制机构如线形等的研究仍然是一个重要而未完全解决的课题. H. Shen 等人比较了 300K 下 GaAs/Ga_{0.82}Al_{0.18}As 多量子阱结构的热调制反射谱和光调制反射谱, 给出了非耦合态和耦合态的电场调制机构^[3]. 为了对半导体微结构的电场调制机构的进一步的研究, 本文主要报道我们在 77K 下对 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 多量子阱的 PR 和 TR 谱进行对比实验研究的结果. 因为 TR 是一阶微商调制谱, 且为洛伦兹线型, 而 PR 谱在 77K 下亦为洛伦兹线型, 通过这两者的比较可以从实验上确定 PR 微商谱的特征. 通常情况下, PR 的一阶微商线形对应于束缚态的调制, 例如孤立量子阱激子的情况, 而三阶微商线形则对应于阱间耦合的隧穿非束缚态. 因此, 电场调制谱的微商阶数可作为这些半导体微结构中电子或空穴受电场调制而加速产生隧穿现象的光学探针.

* 国家自然科学基金资助项目

本文 1994 年 10 月 31 日收到, 修改稿 1995 年 4 月 12 日收到

1 实验

实验用 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱样品是在 $\text{GaAs}(001)$ 衬底上用 MBE 方法生长的, 在衬底上生长厚度为 500\AA 的缓冲层, 阱宽和垒宽分别为 80\AA 和 150\AA , $x=0.2$, 共 15 个周期. 光调制反射实验以 150W 卤钨灯为光源, 通过 HRD-1 双光栅单色仪作为探测光束, 会聚在杜瓦瓶内样品上, 斩波器调制(约 1mW) He-Ne 632.8nm 激光光束(频率约 150Hz) 作为泵浦光束, 通过探测器的直流和交流部分分别由 7151 多用电位计和锁相放大器测定 R 和 ΔR , 最后由计算机给出 $\Delta R/R$. 详细实验装置参见文献[4]. 热调制反射实验中 ΔR 的产生则是通过调制温度 $\Delta T=1\text{K}$ 实现的, 通过间接加热电阻为 1Ω 的 Ge 加热器, 电流脉冲频率为 1.5Hz , 由方波功率源提供, 实验装置详见文献[5].

2 结果和讨论

2.1 光调制反射谱

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变多量子阱($x=0.2$)在 77K 的 PR 谱如图 1(a)所示. 图中圆点是实验测量结果, 实线是线形函数理论的最小二乘法拟合结果. 通常反射的改变由下式给出^[6]:

$$\Delta R/R = \sum_{j=1}^p \text{Re}[C_j e^{i\theta_j} (E - E_{g,j} + i\Gamma_j) - m_j],$$

式中 p 是拟合特征谱的数目, $C_j, \theta_j, E_{g,j}$ 和 Γ_j 分别为第 j 个结构的振幅、相位、能量和加宽参数, m_j 表征临界点结构的类型, 取决于微扰类型(微商的阶数). 对 GaAs 衬底和缓冲层区, 我们用三阶微商线形($m=2.5$, 三维临界点结构)拟合; 对量子阱中子能级间跃迁分别用一阶微商线形($m=2$, 激子)和三阶微商线形($m=3$, 三维临界点结构)拟合. 图中箭头是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, 计算中计及阱间的耦合效应. $E_0(\text{GaAs})$ 对应于 GaAs 衬底和缓冲层的直接带隙, 其它结构分别表征为 $11\text{H}_x(\Gamma)$ 、 $11\text{H}(\text{II})$ 、 $11\text{H}(\Gamma)$ 、 $13\text{H}(\Gamma)$ 、 $13\text{H}(\text{II})$ 、 $11\text{L}(\Gamma)$ 、 $31\text{H}(\text{II})$ 、 $22\text{H}(\text{II})$ 、 $23\text{H}(\text{II})$ 、 $33\text{H}(\text{II})$ 、 $21\text{H}(\Gamma)$ 、 $23\text{H}(\Gamma)$ 等, 代表多量子阱中不同子能级间的跃迁. 例如 $11\text{H}(\Gamma)$ 和 $11\text{H}(\text{II})$ 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 II 点(边缘)的跃迁, $11\text{L}(\Gamma)$ 则对应第一导带到第一轻空穴态在 Γ 点跃迁. 多量子阱子带结构的理论和实验能量值如表 1 所示. 表中还列出了对应于最低跃迁 $11\text{H}(\Gamma)$ 的能量.

应变量子阱体系最重要的基本问题之一是关于体系能带偏移分配的性质, 价带和导带能带偏移分别为 Q_v 和 Q_c , $Q_v = \Delta E_v / (\Delta E_v + \Delta E_c)$, $Q_c = 1 - Q_v$, ΔE_v 和 ΔE_c 分别是价带和导带在异质结的不连续, 可由观测谱的能带偏移拟合得到. 由于晶格失配效应引起 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 能隙增加和布里渊区中心价带边分裂, 使重空穴带向上移动而轻空穴带向下移动. 有两种可能的结构: 图 2(a)中电子和重、轻空穴都在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 区域(称为 I 型); 图 2(b)中电子和重空穴在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 区, 而轻空穴被限定在 GaAs 层中(称为 II 型). 我

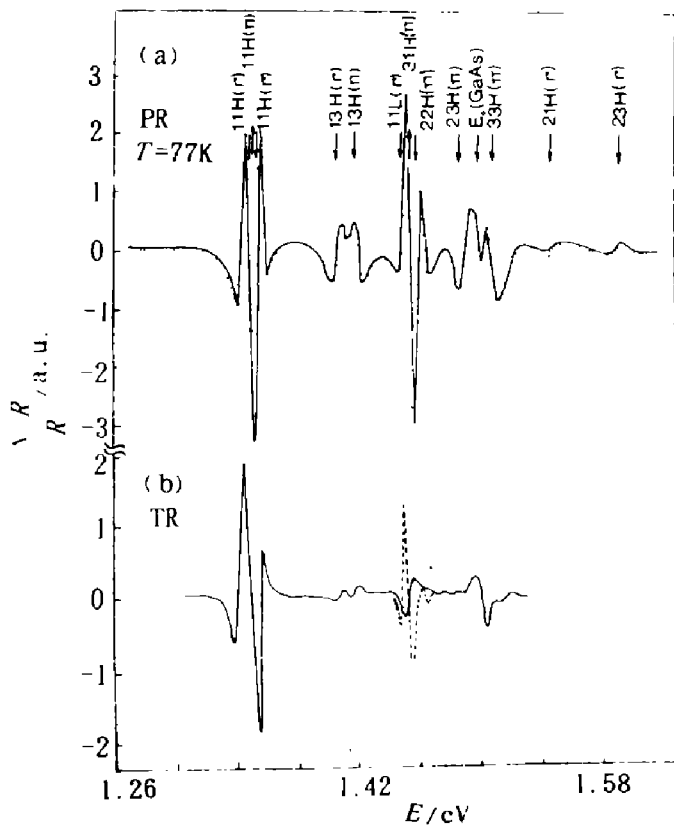


图1 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱 77K 下的 (a)PR 谱和 (b)TR 谱

Fig. 1 (a) Photoreflectance spectra and (b) thermoreflectance spectra of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ multiple quantum wells at 77K

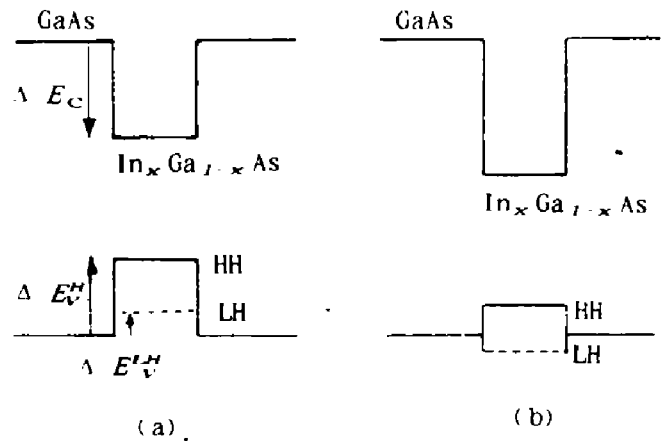


图2 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱可能的能带结构 (a) I 型, (b) II 型

Fig. 2 Possible energy band configurations in strained-layer $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells (a) type-I, (b) type-II

们的结果与最近文献[7]的计算结果一致, $Q_v=0.4$, 轻空穴显示 I 型行为, 即只轻微地局域在 GaAs 层内. 实验中观测到最强的结构对应允许跃迁 11H(Γ)、11H(Π)、22H(Π)、11L(Γ), 同时还观测到激子的锐峰 11H_{ex}(Γ); 观测到较弱结构 13H(Γ)、13H(Π)、31H(Π)、23H(Π) 等对应于禁戒跃迁. 此外, 在能量 $E > E_0(\text{GaAs})$ 处还观测到一些很弱和展宽的跃迁, 如 33H(Π)、21H(Γ)、23H(Γ) 等, 它们对应于非限定态跃迁. 11H(Γ) 的激子结合能由实验确定为 8mV. 实验与理论计算结果比较见表 1, 两者符合得相当好.

2.2 热调制反射谱

样品在 77K 下热调制反射谱结果如图 1(b) 所示, 图中实线是实验测量结果. 比较 PR 和 TR 谱的结果可知, 在 11H 和 13H 跃迁区内, 两者是几乎相同的. 由于 TR 是一阶微商谱, 因而对比实验的结果说明在 77K 下 PR 谱的这些跃迁是一阶线形函数, 计算表明这些跃迁对给定势垒阱间是非耦合的. 然而对 11L、22H 和 31H 跃迁区域内, PR 和 TR 谱有十分明显的差别, PR 谱结构较 TR 谱锐得多, 这是由于 PR 谱对这些跃迁结构不是一阶而是三阶微商线形函数. 图 1(b) 中的虚线是对 TR 谱二次微商的结果, 虚线与图 1(a) 中 PR 谱在该区域内谱线线形特征相一致. 11L、22H 和 31H 跃迁的三阶微商特征可以用 Aspnes 低场电场调制理论来解释^[8]: 三阶微商线形是与调制电场加速电子或空穴相联系. 对 11H 和 13H 跃迁计算表明阱之间不存在耦合, 不存在三阶线形项, 在 77K 下电场主要调制激子参

数而导致产生一阶线形. 而对 11L、31H、22H 等跃迁, 它们的阱之间存在耦合, 耦合会使激子结合能降低, 例如 22H(II) 的结合能只有 $\sim 3\text{meV}$ (见表 1), 调制电场将加速电子的隧穿而产生三阶微商线形. 因而在 PR 谱中对三阶微商线形的观测亦可用以判断多量子阱结构隧穿效应.

表 1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变多量子阱不同特征能量
在 77K 下的实验和理论值(及相对于最低子带跃迁 11H 的能量)
Table 1 Experimental and theoretical values at 77K of the energies of
different features of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ multiple quantum wells

	实 验		理 论	
	E (meV)	$E-E[11H(\Gamma)]$ (meV)	E (meV)	$E-E[11H(\Gamma)]$ (meV)
[11H(Γ)]	1348	0		
	1356	8	1356.1	0
[11H(II)]	1350	2	1356.4	0.3
[13H(Γ)]	1408.8	60.8	1413.6	57.5
[13H(II)]	1409.4	61.4	1414.0	58
[11L(Γ)]	1421	73	1430	75
[31H(II)]	1454	106	1453	97
[22H(II)]	1457	109		
	1460	112	1461	105
[23H(II)]	1488	140	1492	136
[33H(II)]	1510	162	1511	155
[21H(Γ)]	1548	193	1541	185
[23H(Γ)]	1593	245	1596	240

在 $E_c(\text{GaAs})$ 附近区域, PR 谱中有 23H 和 33H 跃迁结构, 而在 TR 谱中, 由于 GaAs 衬底和缓冲层的宽结构与它们叠加在一起而不能分辨, 因而不能简单从 TR 谱二次微商来判断上述两跃迁结构的线形. PR 谱中在 $E_c(\text{GaAs})$ 以上的非限定弱结构跃迁 21H 和 23H, 在 TR 谱中没有观测到.

我们对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱在 77K 下的 PR 和 TR 谱对比研究结果与文献[3]对 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 多量子阱在 300K 下的研究结果一致, 即 PR 谱中一阶微商线形对应于激子等非耦合态跃迁, PR 和 TR 谱线形是相同的, 而 PR 谱中三阶微商线形对应耦合态的低场调制. 这说明电场调制机构是一阶或三阶微商, 可以用来作为调制电场在这些半导体微结构中加速电子或空穴而产生隧穿效应的光学探针. PR 光调制反射谱具有高灵敏、锐结构等优点, 是研究量子阱中量子态的有效工具.

参考文献

- 1 Chen Chenjia, et al. *Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi» Course CXVII Semiconductor Superlattices and Interfaces, Varenna on Lake Como, 25 June-5 July 1991, North-Holland: Italy Physical Society, 1993: 333*
- 2 Glembocki O J, Shanabrook B V, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**: 970
- 3 Shen H, Pan S H, Pollak F H. *Phys. Rev.*, 1988, **B37**: 10919
- 4 陈辰嘉, 王学忠, 等. *红外与毫米波学报*, 1993, **12**: 115

- 5 陈辰嘉. 北京大学学报, 1986, 3:77
- 6 Shanabrook B V, Glembocki O J, Beard W T. *Phys. Rev.*, 1987, **B35**:2540
- 7 Jogai B, Yu P W. *Phys. Rev.*, 1990, **B41**:12650
- 8 Aspnes D E, *Handbook on Semicendctors*, ed. by Moss T S, 1980, **2**:109

PHOTOREFLECTANCE AND THERMOREFLECTANCE STUDIES OF STRAINED-LAYER In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs MULTIPLE QUANTUM WELLS STRUCTURE*

Chen Chenjia Gao Wei Mi Lizhi Hunang Depin Qu Ming

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

L. Nosenzo

(*Dipartimento di Fisica "A. Volta", Universita di Pavia, I-27100 Pavia, Italy*)

Abstract The studies of experimental results in strained In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs multiple quantum wells structure by using photoreflectance (PR) and thermoreflectance (TR) techniques at 77K were presented. With a least square fit of lineshape function, the inter-subband transitions in PR spectra can be clearly identified in the multiple quantum wells and compared with an envelope-function calculation. From a comparison of the PR and TR spectra at 77K of a strained InGaAs/GaAs multiple quantum wells structure, it can be confirmed that the first derivative nature of electric field modulation relates to the uncoupled 11H and 13H transitions, and the low field modulation produces a third-derivative line shape related to the coupled states (the tunneling effect between wells).

Key words strained multiple quantum wells, photoreflectance, thermoreflectance, coupled states.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China