

非对称 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 双量子阱的 光学特性和光学非线性*

陈辰嘉 王学忠 高 蔚 黄德平 米立志

(北京大学物理系, 北京, 100871)

摘要: 报道用光调制反射谱和光致发光方法对非对称的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 耦合双量子阱研究的实验结果. 在 300 K 和 77 K 下测量了光调制反射谱, 对实验结果的线形拟合确认了在双量子阱中分别对应于能级 11H、11L、13H、22H 等的跃迁, 并与理论计算结果作了比较. 以氩离子激光器 488 nm 激发测量了双量子阱中基态 ($n=1$) 荧光峰强度随激发光密度的变化, 研究了其非线性效应. 用 632.8 nm 激光在弱激发下测量了 3.8~300 K 范围内相应荧光峰随温度的变化, 对实验结果作了分析讨论.

关键词: 双量子阱, 光调制反射, 光致发光, 光学非线性.

引言

双量子阱 (DQW) 由于有限势垒分割单量子阱结构而显示出许多引人注意的性质, 其中主要是由于电子和空穴能隧穿通过势垒而得到速度很高的电光开关效应, 了解隧穿机构和隧穿速率也是当前基础研究中很引人注目的课题^[1], 关于光学非线性效应的报道亦受到重视^[2].

光调制反射的非破坏接触方法已被证明是研究多量子阱结构中大量量子态的很有效的技术^[3], 然而对双量子阱结构量子态的光调制反射谱测量的报道却很少. 即使在室温下, 由在临界点附近产生的微商谱特性也能观测到很锐的微分反射谱 $\Delta R/R$.

本文着重报道用光调制反射谱和光致发光方法, 在 4~300 K 范围内对非对称耦合双量子阱 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 光学特性和光学非线性效应的实验研究结果.

本文 1992 年 10 月 19 日收到, 修改稿 1993 年 1 月 12 日收到.

* 国家自然科学基金资助课题.

1 实验

实验用 GaAs/Al_xGa_{1-x}As DQW 样品是在 GaAs(001) 衬底上用 MBE 方法生长的, 典型样品双阱宽分别为 6.5 和 10 nm, 双阱间垒宽为 4 nm, 双阱两侧势垒为 51 nm, $x = 0.3$, 在半绝缘衬底上生长厚度 $\sim 0.95 \mu\text{m}$ GaAs 缓冲层. 光调制反射 (PR) 实验中以 150 W 卤钨灯为光源, 用 HRD-1 双光栅单色仪作探测光束, 探测光束会聚在杜瓦瓶内样品上. 斩波器调制约 1 mW He-Ne 632.8 nm 激光光束 (频率 $\sim 150 \text{ Hz}$) 作为泵浦光源, 通过探测器的直流部分 $I_0(\lambda)R(\lambda)$ 和交流部分 $I_0\Delta R$ 分别由 7151 多用电位计和锁相放大器给出, 其中 $R(\lambda)$ 为样品直流反射率, $I_0(\lambda)$ 为光强, ΔR 为反射率变化. 最后由计算机和记录仪给出 $\Delta R(\lambda)/R(\lambda)$, 实验装置参见图 1.

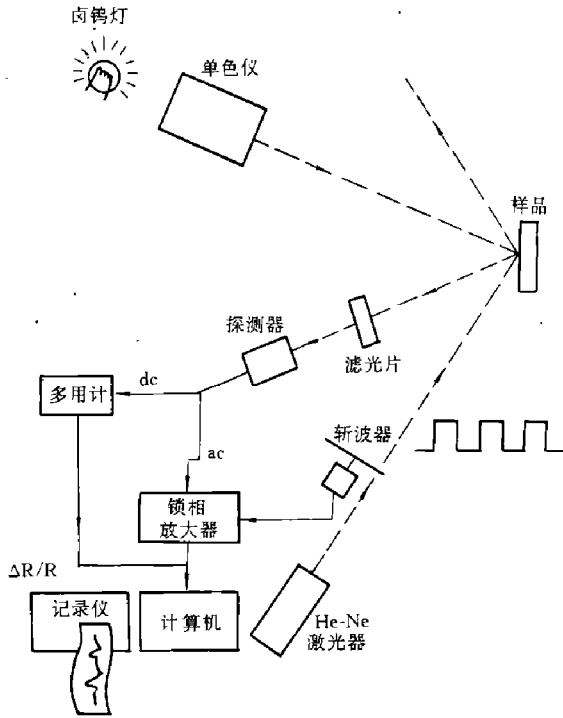


图 1 光调制反射实验装置框图
Fig. 1 Schematic representation of a photoreflectance experimental arrangement

用氩离子激光器 ($\lambda = 488 \text{ nm}$) 为强激发光源, 在 $T = 4 \text{ K}$ 下将样品浸于液氮中, 在光激发功率密度为 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ W/mm}^2$ 范围内观测光致发光 (PL) 谱强度的光学非线性效应. 以 He-Ne 激光器 632.8 nm ($\sim 0.1 \text{ mW}$) 弱激发研究阱中 PL 谱随温度的变化规律. 样品安装在连续液氮流的低温杜瓦瓶内以避免激光照射引起升温.

2 结果和讨论

2.1 光调制反射谱

典型的 PR 谱如图 2 和 3, 分别为双量子阱样品在 300 K 和 77 K 下的实验结果. 图中圆点为实验的测量值, 实线是线形函数理论的最小二乘法拟合值. 通常反射的改变由下式给出 [4]:

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

式中 p 是拟合特征谱的数目, C_j , θ_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). 我们对 GaAs 衬底和缓冲层采用三阶微商函数形式的线形 ($m = 2.5$, 三维临界点) 拟合, 对 77 K 时阱

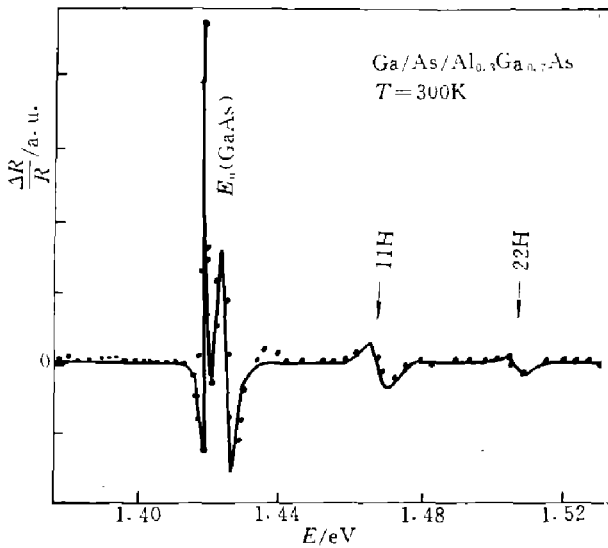


图 2 耦合双量子阱 300K 下的 PR 谱
Fig. 2 Photoreflectance spectra of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As coupled double-quantum wells at 300K

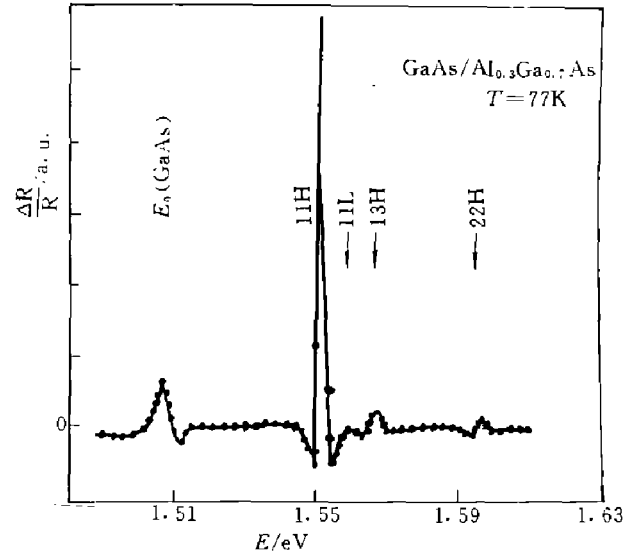


图 3 耦合双量子阱 77K 下的 PR 谱
Fig. 3 Photoreflectance spectra of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As coupled double-quantum wells at 77K

结构采用一阶微商函数形式的线形 ($m=2$, 激子) 拟合, 在 300K 室温下阱结构采用三阶微商函数形式的线形 ($m=3$, 二维临界点) 拟合. E_0 对应衬底 (GaAs) 能隙和 GaAs 缓冲层. 在 E_0 以上能量的锐结构如图 2 和 3 中箭头所示, 分别表征为 11H、11L、13H、22H, 代表双量子阱中不同子能级间的跃迁. 其中图 2 的 11H 和 22H 分别对应于阱中第一导带态到第一重空穴态 (H) 和第二导带态到第二重空穴态 (H) 的跃迁. 在 77K 下除了 11H 和 22H 跃迁外, 还能观测到 11L 和 13H 跃迁, 分别对应于阱中第一导带态到第一轻空穴态 (L) 及第一导带态到第三重空穴态 (H) 的跃迁 (参见图 3).

由于双量子阱间垒宽不大, 阱间相互作用不可忽略, 存在着弱耦合, 子带极小值的能量与不耦合的单量子阱仅存在一些差异. 弱耦合的非对称双量子阱 $n=1$ 的能级 E_{e1} 和 E_{hh1} (E_{e1} 和 E_{hh1} 分别表示双量子阱中电子和重空穴的基态能量) 近似等于宽单量子阱中 $n=1$ 的能级, 而双量子阱中 $n=2$ 的能级 E_{e2} 和 E_{hh2} (E_{e2} 和 E_{hh2} 分别表示双量子阱中电子和重空穴的第一激发态能量) 则近似等于窄单量子阱中 $n=1$ 的能级. 由于双阱间的弱耦合, 阱间的包络函数也存在相应程度的耦合. 例如: $n=1$ 的电子和重空穴包络函数主要部分局域在宽阱内, 同时也有相当一部分振幅在窄阱内; 同理, $n=2$ 的电子和重空穴包络函数主要局域在窄阱内, 同时在宽阱内也有确定的振幅. 由于电子的有效质量较重空穴的有效质量小, 电子包络函数与近邻阱的耦合较重空穴包络函数的耦合更强.

由于阱间的耦合作用, 使非对称双量子阱系统对光激发的响应与单量子阱系统有明显的差别. 这是由于耦合作用使窄阱中光激发电子和空穴具有两种可能的复合通道: 一是与单量子阱一样通过发射能量 ΔE_2 ($\Delta E_2 = E_{e2} - E_{hh2}$) 的光子而直接复合; 二是隧道穿透进入宽阱, 通过带内弛豫损失能量, 然后发射更低能量为 ΔE_1 ($\Delta E_1 = E_{e1} - E_{hh1}$) 的光子而复合. 这两个复合通道的竞争对双量子阱系统的设计参数非常敏感, 当从窄阱到宽阱

的纯隧穿率大于单量子阱本征复合率时, 在能量 ΔE_1 处的光致发光峰强度将比 ΔE_2 处的峰强度大很多, 本文的双量子阱系统即属于这种情况.

对阱间耦合双量子阱结构, 将用包络函数理论计算的结果^[5]与实验值进行了比较, 理论与实验符合得很好, 结果见表 1.

表 1 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 耦合双量子阱不同特征能量在 300 K 和 77 K 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 300 K and 77 K of the energies of the various features of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As coupled double quantum wells and the energies relative to the lowest-lying transition 11H

特征谱	实验				理论			
	T=300 K		T=77 K		T=300 K		T=77 K	
	E	E-E _{11H} (meV)	E	E-E _{11H} (meV)	E	E-E _{11H} (meV)	E	E-E _{11H} (meV)
11H	1468	0	1551	0	1466	0	1551	0
11L			1560	9			1560	9
13H			1567	16			1567	16
22H	1507	39	1594	43	1505	39	1591	40

2.2 光致发光谱

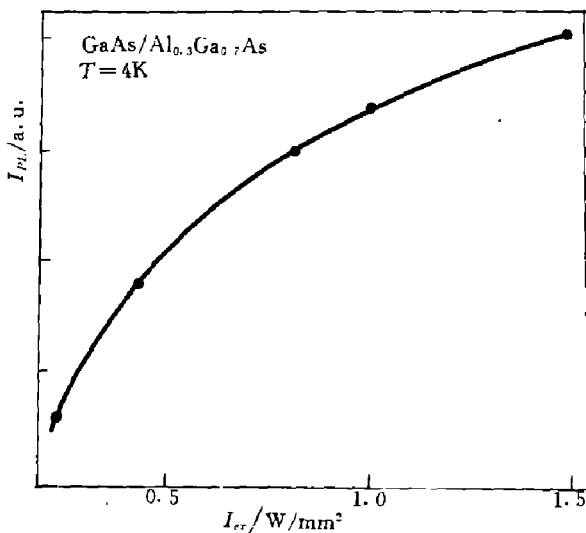


图 4 $T=4\text{K}$ 时非对称耦合双量子阱对应 11H 的 PL 谱峰值强度与激发光功率密度的关系
Fig. 4 Photoluminescence peak intensities vs. laser intensity measured at 4 K in asymmetric GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As double quantum wells related 11H transition

图 4 给出 $T=4\text{K}$ 下双量子阱中 11H 对应的 PL 谱峰值强度随激发光功率密度的变化. 在强光激发范围内, 随着激光功率密度的增加, PL 谱峰值出现非线性饱和现象.

在 $T=3.8\sim 300\text{K}$ 范围内用 He-Ne 632.8 nm ($\sim 0.1\text{mW}$) 激光测量了光致发光谱, 图 5 给出弱激光下双量子阱中 PL 谱强度随几个典型温度的变化关系. 随着温度的升高, 在 11H 的高能端出现的肩峰对应于 11L 跃迁 (见图 5 中 $T=76\text{K}$). 图中同时还给出与 GaAs 衬底和缓冲层有关的 E_{01} 、 E_{02} 峰强度与温度的关系. 图 6 给出 PL 谱峰值强度与 T^{-1} 的变化关系. 从图中可以看到阱中 11H 和 E_{01} 随温度的变化规律基本类同 (见图中实线), E_{01} 是 GaAs 衬底对应的能隙, 而 E_{02} 随温度变化规律与前者十分不同, 较前者随温度变化更为急剧 (见图中虚线), 是否与缓冲层 GaAs 的激子跃迁有关, 尚有待进一步研究确定.

实验研究结果表明光调制反射技术是研究双量子阱量子态结构的有效工具.

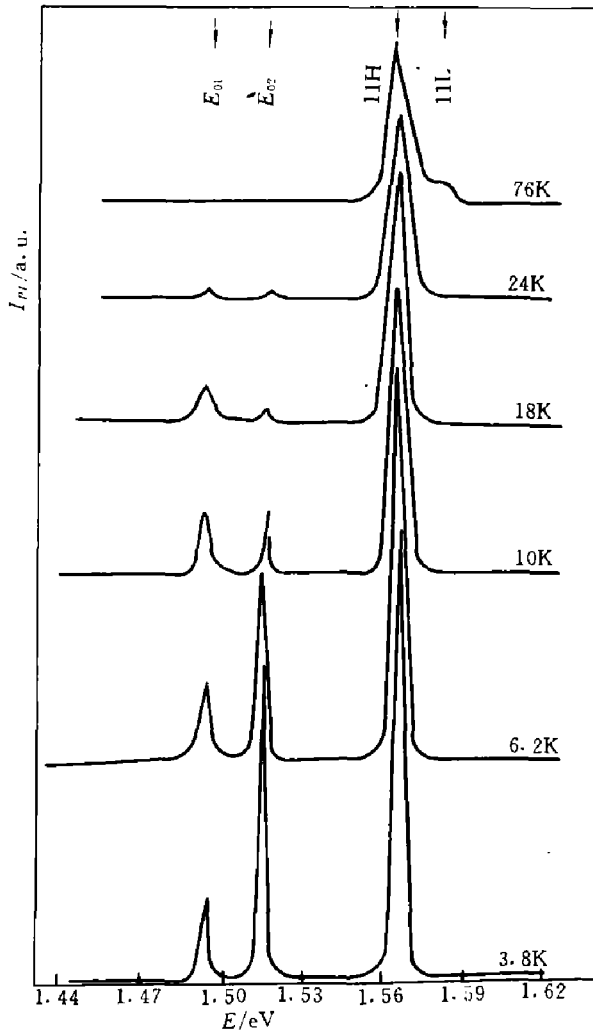


图 5 不同典型温度下 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 双量子阱中 11H 等跃迁的 PL 谱强度变化
Fig. 5 PL intensities of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As in double-quantum wells related 11H transition measured at various temperatures

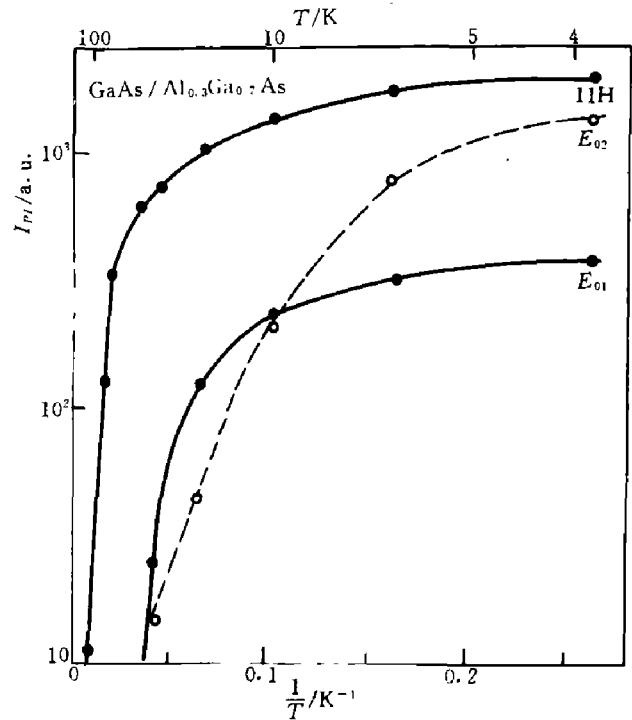


图 6 双量子阱中 11H、E₀₁ (衬底 GaAs) 和 E₀₂ (与 GaAs 衬底或缓冲层有关) 的 PL 峰值强度与 T^{-1} 的关系曲线
Fig. 6 PL peak intensities of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As in double-quantum wells related to 11H transition and E₀₁ (GaAs), E₀₂ (GaAs) as a function of T^{-1}

参考文献

- 1 Nelson D F, Miller R C, Kleinman D A et al. *Phys. Rev.*, 1986,**B34**:8671
- 2 Leopold D J, Leopold M M. *Phys. Rev.*, 1990,**B42**:11147
- 3 Glembocki O J, Shanabrook B V, Bottka N et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1985,**46**:970
- 4 Shanabrook B V, Glembocki O J, Beard W T. *Phys. Rev.*, 1987,**B35**:2540
- 5 Bastard G, Brum J A. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986,**QE22**:1625

PHOTOREFLECTANCE AND PHOTOLUMINESCENCE
CHARACTERIZATION OF GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As
ASYMMETRIC DOUBLE QUANTUM WELLS AND
OPTICAL NONLINEAR EFFECT*

CHEN CHENJIA, WANG XUEZHONG, GAO WEI, HUANG DEPIN, MI LIZHI

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

Abstract: The study of the experimental results in asymmetric GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As double quantum wells (DQW) structure by using photoreflectance (PR) and photoluminescence (PL) techniques is presented. PR spectra were given at 300 K and 77 K, respectively. With a least square fit of a line-shape function, the transition above $E_0(\text{GaAs})$ can clearly be identified as confined 11H, 11L, 13H and 22H in the DQW. The comparison of the experimental intersubband energies with an envelope-function calculation was obtained. An argon-ion laser operating at 488 nm was used for a photoexciting source and the PL peak intensities related to 11H transition measured at 4 K were obtained and the nonlinear optical effect was discussed. PL peak intensities as a function of temperature for 11H transition, E_{01} and E_{02} were measured by using a 632.8 nm laser of low excited intensity and the results were analyzed.

Key words: double quantum wells, photoreflectance, photoluminescence, optical nonlinear effect.

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