

GaAs/Al_xGa_{1-x}As 表面单量子阱原位光 调制反射光谱研究*

缪中林 陈平平 陆 卫 徐文兰 李志锋 蔡炜颖 史国良 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(1999 年 12 月 5 日收到, 2000 年 9 月 11 日收到修改稿)

用分子束外延(MBE)方法生长了两种典型阱宽(5nm 和 10nm)的表面单量子阱,表面量子阱中的受限态被表面真空势垒和 Al_xGa_{1-x}As 势垒束缚.以原位光调制光谱(PR)作为测量手段,明确观察到表面量子阱中空穴子带到电子子带的光跃迁以及真空势垒对于不同阱宽表面量子阱中的受限电子态的束缚作用,并且看到了 10nm 表面量子阱激发态的跃迁峰.采用有效质量近似理论对实验结果作了较好的解释.

关键词:表面量子阱(SQW),原位光调制反射光谱(PR),分子束外延(MBE)

PACC: 7320, 7360, 7865, 4280

1 引 言

自从江崎等提出半导体超晶格的概念以来,人们对于二维体系如超晶格、量子阱等进行了广泛的研究.随着分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)的技术发展成熟,开辟了一个半导体物理和凝聚态物理的新天地,诞生了一系列人造晶格结构的光电器件.可以说,半导体超晶格的研究是最重要、最富有成就和挑战的前沿领域之一,是半导体能带工程在材料精细加工技术长足进步推动下的深入和发展,并反过来对半导体的科学和技术的进步有极大的影响和推动作用.在过去的二十年中,量子阱结构大多数由半导体材料构成,但是对于受限电子态的一端是半导体,一端是真空势垒的结构研究不多.在这类结构中,真空势垒对于表面量子阱中的受限电子态的影响要比另一端的半导体势垒强得多^[1,2].

在表面量子阱结构中,Cohen 等研究了 InP 表面量子阱在不同激发光强下的光荧光谱,发现了 hh1-e1 和 lh1-e1 的跃迁峰^[2],Moison 等对 GaAs/AlGaAs 近表面量子阱的光荧光谱作了研究,发现随着表面势垒层的减薄,荧光峰发生明显的红移^[3].而 Kreybrodt 的光荧光谱^[4]与 Liu 的光调制光

谱^[5,6]研究发现随着表面势垒层的减薄,光跃迁峰蓝移.

本文采用与 MBE 腔体耦合的原位光调制反射光谱(PR)方法对不同宽度 GaAs/AlGaAs 表面单量子阱中受限电子能态间的光跃迁进行了研究.为了揭示真空势垒对表面量子阱中受限电子态的影响,我们利用原位测量保证排除表面的氧化、吸附等不可控制的因素,并借以研究不同宽度表面单量子阱的光调制反射光谱的特性,了解真空势垒对于表面势阱中受限电子态的影响.在材料生长过程用反射高能电子衍射谱(RHEED)振荡进行了严格的监控,以保证厚度误差不超过一个原子层.在测得的调制光谱中看到了量子阱中的基态跃迁峰以及发现激发态的跃迁峰.

2 实 验

实验样品由 RIBER32P R&D 型 MBE 系统生长.为了减小应变和缺陷,在[100]取向 GaAs 衬底上生长 350nm GaAs 缓冲层,接着外延 30nm 的 Al_xGa_{1-x}As 势垒层,Al 的组分 $x = 0.3$,再分别生长 5nm 和 10nm 的 GaAs 表面单量子阱两种样品.每层生长结束后都中断 10s,使生长面恢复得更平整.外延生长的速率和 Al 的组分由 RHEED 强度振

* 国家自然科学基金(批准号 59676014)资助的课题.

荡来监控,其厚度误差不超过一个原子层.样品结构如图 1(a)所示,图 1(b)给出了相应的导带结构模型.

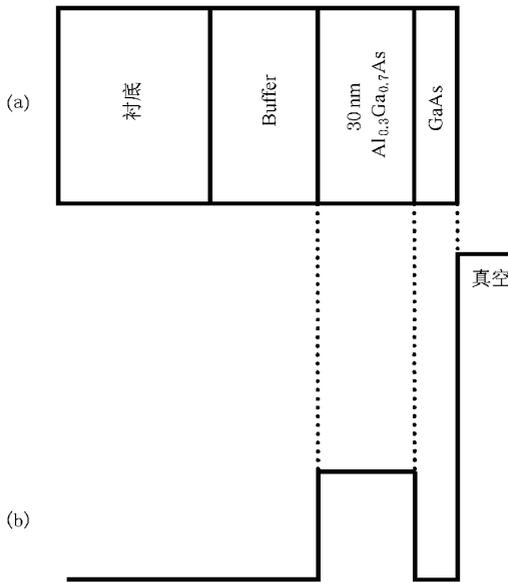


图 1 (a)样品结构;(b)能带结构

把生长后的样品传到 MBE 系统预处理室中,进行 PR 测量.预处理室真空度保持在 133×10^{-8} Pa.原位光调制光谱的探测光源为溴钨灯,调制光为 He-Ne 激光器的 632.8nm 线,通过单色分光后由硅光二极管探测器探测.探测信号由锁相放大器放大后经过 A/D 转换由计算机记录.测量范围为 650nm—900nm,扫描步长为 1nm.详细的实验装置参见文献[7]光调制光谱作为 MBE 生长中原位检测手段的应用”.

3 实验结果及讨论

图 2 为 5nm 和 10nm 表面单量子阱的原位光调制反射光谱,其中位于约 1.42eV 处结构 a 为 GaAs 的禁带光跃迁峰,位于 1.45—1.8eV 范围的结构 b, c 展宽较大,它们与表面单量子阱中的受限电子能态跃迁相关, d 为 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的禁带光跃迁峰.在 10nm 表面量子阱的光谱上不但可观测到结构 b 还可以清楚地看到与激发态相关的跃迁峰 c,而在 5nm 的光谱上则仅能观测到基态间的跃迁 b.另外相对于 5nm 表面量子阱的光谱,10nm 表面量子阱中 b 结构的展宽明显变小.

对实验光调制反射谱用 Lorentz 线型进行拟

合,所使用的公式为

$$\frac{\Delta R(E)}{R(E)} = \sum_j \frac{S_j \exp(i\Phi_j)}{(E - E_j - i\gamma_j)^{n_j}} + a + bE,$$

式中 R 表示反射率, E 表示能量, E_j 表示跃迁能量, S_j 为强度因子, Φ_j 表示位相, γ_j 表示展宽因子, n_j 为微分的阶,对于量子阱中的受限电子态间跃迁 $n_j = 1$,而对于体材料中的禁带跃迁取 $n_j = 3$.拟合结果如图 2 中的实线所示,与以圆点表示的实验结果符合良好.拟合参量如表 1 所示.

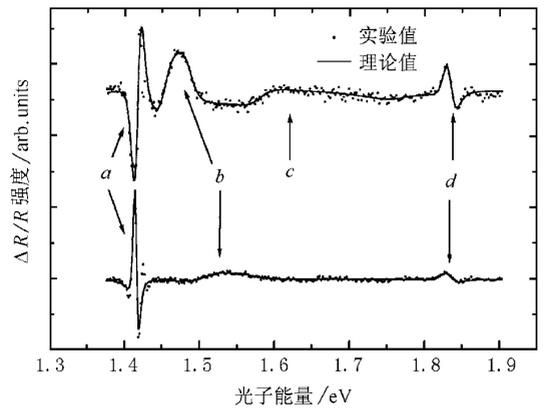


图 2 5nm 和 10nm 表面单量子阱原位光调制反射光谱 (实线为拟合曲线,圆点为实验光谱)

表 1 对实验光谱拟合后所得的参量

样品	j	E_j/eV	S_j	γ_j/eV	Φ_j	n_j
5nm 样品	1	1.416	1.97×10^{-4}	0.0065	-0.704	3
	2	1.508	1.26	0.026	0.197	1
	3	1.569	0.623	0.023	2.79	1
	4	1.832	4.03×10^{-4}	0.021	-0.860	3
10nm 样品	1	1.418	1.21×10^{-4}	0.012	-3.29	3
	2	1.452	0.380	0.013	-0.400	1
	3	1.485	0.512	0.017	2.66	1
	4	1.577	0.268	0.026	-0.330	1
	5	1.758	0.252	0.042	5.09	1
	6	1.834	7.82×10^{-5}	0.016	-0.569	3

从表 1 的拟合结果可以看到:

1. 当表面量子阱的宽度为 10nm 时, b 结构相应的轻重空穴子带到导带子带跃迁能量比 5nm 的表面量子阱的跃迁能量要小约 50meV,这同通常的子带间光跃迁能量与量子阱宽度依赖关系一致.

2. 在 10nm 表面量子阱的光谱中,我们不仅观测到结构 b,而且还明显看到与表面量子阱中激发

态间光跃迁相关的结构 c , 但在 5nm 表面量子阱的光谱中仅能观测到与表面量子阱中基态间光跃迁相关的结构 b 峰. 下文的有效质量近似理论计算表明, 在阱宽为 5nm 时, 导带中已不存在激发态, 这便是不能观测到 c 结构的缘故.

3. 在 10nm 的表面量子阱中, 展宽因子为 5nm 样品的一半, 说明真空势垒对 10nm 表面量子阱中受限电子态的散射相对较小.

在表面量子阱中, 量子阱的宽度分别为 5nm 和 10nm, 远小于德布罗意波的波长, 由于量子限制效

应, 其导带和价带中受限能态都分裂成若干子能级. 我们采用图 1(b) 所示的能带结构模型, 其中导带的真空势取 GaAs 材料的电子亲和势 5.0eV, 电子的有效质量为自由电子质量, 空穴的真空势则取为无穷大. AlGaAs 的禁带宽度为 $E(x) = 1.424 + 1.247x$, 取带阶参量为 0.6. 用有效质量近似理论可求得表面量子阱中电子与空穴受限能态的能量位置与相应的波函数. 采用的能带结构参数均为在生长过程中由 RHEED 测量获得的参量值. 算得的允许光跃迁能量值列于表 2.

表 2 由 PR 谱拟合获得的跃迁能量实验值与由有效质量近似理论计算的理论值

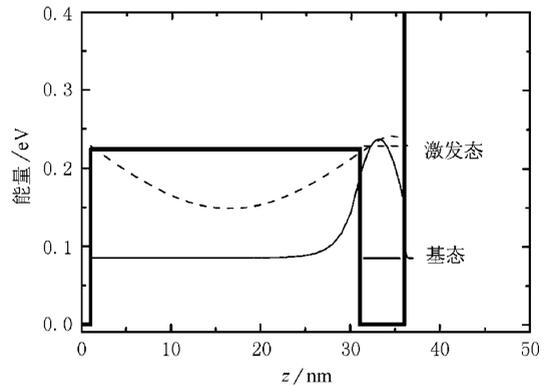
样品	数值类别	E_g /eV	hh1-e1	lh1-e1	hh2-e2	lh2-e2	lh2-e3	E_g /eV
		GaAs	/eV	/eV	/eV	/eV	/eV	AlGaAs
5nm 样品	理论值	1.424	1.537	1.586	—	—	—	1.798
	实验值	1.416	1.508	1.569	—	—	—	1.832
10nm 样品	理论值	1.424	1.462	1.482	1.586	1.664	1.754	1.798
	实验值	1.418	1.452	1.485	1.577	—	1.758	1.834

比较实验与理论值, 相互符合良好. 大部分的受限能态间光跃迁能量的实验值略小于理论值, 这可能起源于激子的束缚能(约 10meV), 原子层的涨落(约 5meV), 表面电场诱发的 Stark 效应(约 5meV) 等. GaAs 的禁带跃迁吻合良好, 而 AlGaAs 材料的禁带跃迁实验值略高于由 RHEED 定的 $x = 0.3$ 组分的禁带宽度值. 由 PR 谱测得的组分为 0.33, 与 RHEED 测得的组分是基本一致的.

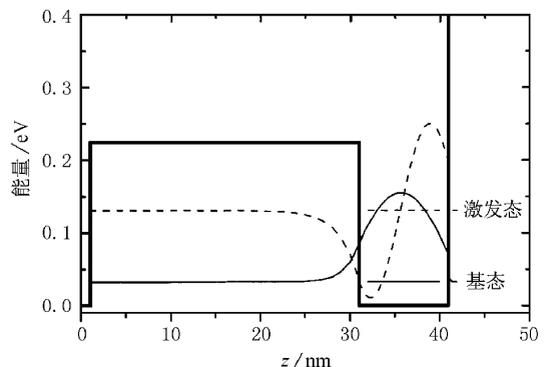
对 10nm 宽的表面量子阱结构, 由理论计算得到 lh2-e2 的跃迁能量为 1.664eV, 比实验上测得的表 1 中 $j = 5$ 的峰位小约 94meV. 这一差异明显大于其他所有的跃迁峰, 为此我们认为 $j = 5$ 的峰不能归结于 lh2-e2 的光跃迁. 从跃迁能量角度而言, 这一 1.758eV 的跃迁峰很接近与 lh2 能态向已处于势垒上的 e3 能态的跃迁 1.754eV. 但为何这一禁戒跃迁可被如此明显地观测到还有待进一步研究.

图 3 给出了用有效质量近似理论计算的表面量子阱的能态图和波函数.

可以看到对 5nm 表面量子阱, 阱中只有基态, 而第一激发态已位于势垒之上, 其波函数主要是分布在势垒区域. 而表面量子阱中空穴的基态与第一激发态均位于势阱内, 所以第一激发态的电子与空穴波函数交叠很小, 从而在实验上很难观测到这一跃迁. 对 10nm 量子阱的计算表明, 电子与空穴的基态和第一激发态均被束缚在量子阱中, 为此电子与



(a) 5nm 表面量子阱表面附近导带底的势函数及两种电子本征态的波函数



(b) 10nm 表面量子阱表面附近导带底的势函数及两种电子本征态的波函数

空穴相应能态的波函数交叠均较大,我们可观测到这两者的光跃迁.这正是我们在实验中观测到的光谱行为.由此可见由图 1(b)所示的表面量子阱模型是一个较好的适合于含真空势垒的表面量子阱结构,同时有效质量近似理论在这一结构系统中也依然适宜.

4 结 论

用分子束外延的方法生长了不同阱宽的表面单

量子阱结构,发现随着表面量子阱的阱宽增加,受限能态的跃迁峰向低能方向移动,跃迁峰的展宽因子减小,并在 10nm 表面量子阱的光调制反射谱中发现了激发态的跃迁峰.受限电子能态的变化规律依然符合有效质量近似理论,而且表面量子阱的能带结构可由含真空势垒的简单模型予以很好地近似.由光调制反射光谱测得的实验结果与理论值符合良好.

-
- [1] L. Esaki, H. Sakaki, *IBM. Disc. Bull.*, **20** (1997), 2456.
- [2] R. M. Cohen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **50**(23) (1987), 1675.
- [3] J. M. Moison *et al.*, *Phys. Rev.*, **B41**(1993), 12945.
- [4] J. Kreybrodt *et al.*, *Phys. Rev.*, **B48**(1993), 14741.
- [5] X. Q. Liu *et al.*, *Phys. Lett.*, **A225**(1997), 175.
- [6] Xing-quan Liu *et al.*, Proceedings of the Eighth International Conference on Narrow GAP Semiconductors (World Scientific, Singapore, 1997), p. 399.
- [7] Xing-quan Liu *et al.*, *Acta Electronica Sinica.* **25**(1997), 67 (in Chinese) [刘兴权等, *电子学报*, **25**(1997), 67].

IN-SITU PHOTO-MODULATED REFLECTANCE STUDY ON GaAs/Al_xGa_{1-x}As SINGLE SURFACE QUANTUM WELLS*

MIAO ZHONG-LIN CHEN PING-PING LU WEI XU WEN-LAN LI ZHI-FENG
CAI WEI-YING SHI GUO-LIANG SHEN XUE-CHU

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(Received 5 December 1999; revised manuscript received 11 September 2000)

ABSTRACT

We have studied the optical properties of surface quantum wells with different width of wells (5nm and 10nm) by means of In-situ photo-modulated reflectance (PR) spectroscopy on a molecular beam epitaxy system. The surface quantum well is confined on one side by the vacuum and on the other side by Al_xGa_{1-x}As barrier. In experiments, we have observed clearly the transitions between the confined heavy and light hole states to the confined electron states. The transitions of the excited states in 10nm surface quantum well are observed at first. The effects of the surface on the confined states have been well studied by combination of the PR spectra and the effective mass approximation theory.

Keywords : Surface quantum well (SQW), In-situ photo-modulated reflectance, macular beam epitaxy (MBE)

PACC : 7320, 7360, 7865, 4280

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69676014).