

GaAs-AlAs 多量子阱结构的 光调制反射光谱*

汤寅生

(中国科技大学基础物理中心)

江德生

(中国科学院半导体研究所)

摘要——报道了 GaAs-AlAs 多量子阱(MQW)结构的室温光调制反射(PR)光谱。与 2K 下光荧光激发谱的对比表明室温下激子作用的重要性。讨论了 GaAs-AlAs MQW 结构的 PR 调制机制,指出它仍可能是表面电场调制,但不同于体材料的情形,而是具有一阶微商本质,并且在弱场条件下以量子化子带及相应激子带隙的斯塔克移动的调制为主。

一、引言

光调制反射谱(PR)作为研究半导体超晶格、量子阱等微结构的有力工具,已有大量报道^[1~9],但有关调制机制的报道则不多见。许多作者都用类似于体材料电反射谱(ER)的三阶微商谱来解释 PR 光谱,虽然 Aspnes 三阶微商线形公式^[10]在表观上亦可较好地拟合实验线形^[9],但研究表明^[8]低温下激子的一阶微商线形可更好地拟合实验曲线。Shana-brook 等人^[9]讨论了组分超晶格的 PR 调制机制,从形式上推测光调制可能通过对样品各临界点的跃迁能量、展宽参数及其积分振子强度的调制起作用,指出在低温下电场对激子带隙的调制是引起 PR 光谱中相应于允许跃迁的结构的主要原因。本文报道了 GaAs-AlAs 结构的室温 PR 谱及其它一些实验现象,发现即使在室温下样品的光跃迁仍具有明显的激子特征,明确指出了弱场条件下 PR 谱中的允许跃迁主要由临界点跃迁能量的调制引起,并讨论了 GaAs-AlAs MQW 结构的 PR 调制机制,说明了一阶微商谱的产生过程。

二、实验结果

样品采用分子束外延(MBE)方法制备。首先在(001)半绝缘 GaAs 衬底上外延生长

本文 1987 年 7 月 6 日收到。修改稿 1987 年 11 月 1 日收到。

* 国家自然科学基金资助课题,并得到中国科技大学结构分析实验室部分资助。

0.5 μm 厚的 GaAs 缓冲层, 然后交替生长若干层等厚的 GaAs、AlAs 层, 每层厚度为 5~20

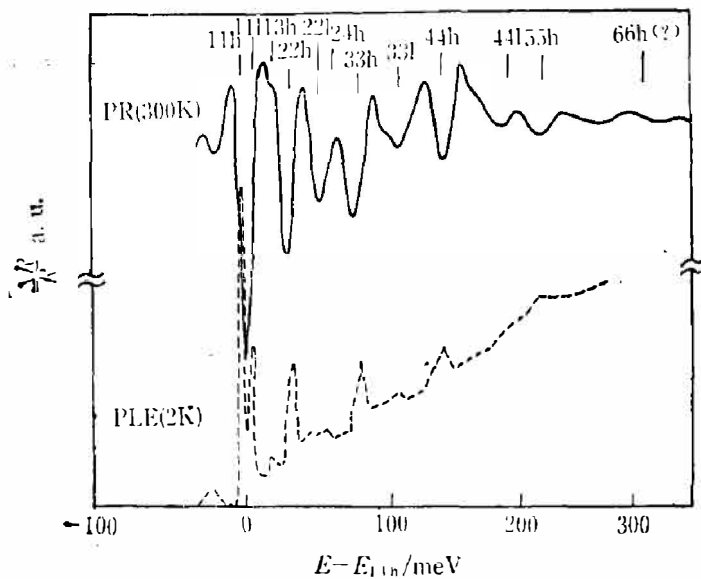


图 1 GaAs(20nm)-AlAs(20nm)样品的室温 PR 谱及 2K 下的 PLE 谱

Fig. 1 PR at room temperature and PLE at $T=2\text{K}$ spectra of GaAs(20nm)-AlAs(20nm) sample.

nm。样品厚度用 X 射线双晶衍射法测定^[11], PR 实验原理参阅参考文献 [4], 调制光源为 632.8 nm 经机械斩波的 3 mW He-Ne 激光器, 斩波频率为 125 Hz, 调制光功率密度约 2~50 mW/cm²。为提高测量信噪比, 用 PIN 硅二极管代替光电倍增管作探测器。

图 1 示出了 GaAs、AlAs 层厚各为 20 nm 的样品的室温 PR 谱及 2 K 下的光荧光激发 (PLE) 谱, 图中 $E_{11h}^{\text{PR}} = 1.430 \text{ eV}$ 、 $E_{11h}^{\text{PLE}} = 1.524 \text{ eV}$, 符号 $mnh(l)$ 表示第 m 个电子子带到第 n 个重(轻)空穴子带间的跃迁。各跃迁过程的指认是根据 PLE 谱实验值与由 Kronig-Penney 模型计算值的比较确定^[12], 计算中取 $Q_c = 0.60$ 。为了

便于比较, 该图中的两个光谱的能量坐标已作了相对移动, 并取 11h 跃迁能量为参考零点。由图可见, PR 谱中特征峰与 PLE 谱结构的能量间隔基本一一对应 (包括与杂质有关的跃迁), 相对能量差小于 2 meV, 这与 Shanabrook 等人低温下的实验结果^[6] 一致, 量子阱中激子的束缚能约为 8 meV。量子阱子带间跃迁光荧光 (PL) 峰值位置随温度的依赖关系与 GaAs 体材料带边随温度的变化规律一致, 这表明样品在室温下仍以激子跃迁为主^[13]。我们将在后文进一步讨论 PR 谱中光谱峰值位置与子带间跃迁能量之间的关系。

改变调制光强的实验表明, 当激发光强增大到很强时, PR 谱中结构的尖锐程度随该光强的增加而下降, 直到部分结构在光谱中消失, 甚至无法看到任何与量子阱材料有关的 PR 信号。大量实验事实还表明, 样品的表面状态直接影响其 PR 信号的强弱, 有些样品的 PL 谱很强但 PR 信号反而较小。当在样品表面涂上一层很薄的透明极性有机物膜以改变表面态密度时, 在同样的实验条件下, PR 信号明显加强。这说明在超晶格材料中 PR 信号与表面状况有关, 很可能是由于光强对表面电场的调制而产生的。

三、讨 论

为解释上述实验现象, 必须对 GaAs-AlAs MQW 结构 PR 谱的产生机制作进一步讨论。我们认为, 由于表面态的存在, 通常在多量子阱的表面附近形成一个表面势场, 相当于体材料的表面能带弯曲, 如图 2 所示, 表面电场的大小直接与样品表面的费密能级位置有关。当光注入电子-空穴对时, 在上述表面电场的作用下, 电子、空穴将分别向相反方向运动。与体材料的光反射调制过程类似^[14], 这将使表面势垒降低, 从而引起表面附近能带弯曲程度的变化。这样, 在样品上施加交变光强的照射就相当于在垂直于表面的方向引入了调制电场。

对量子阱中的电子态来说, 由于在 Z 方向(沿量子阱材料外延生长方向)产生能量量子化, 其有效质量特别大(准二维特征), 当沿该方向引入调制电场时, 特征电光能量很小, 因而三阶微商谱产生的影响很小。

如果多量子阱的介电函数主要由激子效应决定, 并且吸收曲线可近似用洛伦茨线形表示, 则介电函数为^[15]

$$\epsilon(E, 0) = 1 - \sum_i \frac{I_i}{E - E_{gi} + i\Gamma_i} \quad (1)$$

式(1)中 $\epsilon(E, 0)$ 为零场下激子的介电函数, E_g 为激子带隙能量, Γ 为展宽参数, I 为积分振子强度, Σ 表示对所有临界点求和。

对三维激子而言, 外加调制电场对零场激子束缚能及展宽参数的影响决定了光谱的微商线形; 而量子阱中的激子则不同, 由于激子被约束在准二维空间范围内, 因而 Z 方向电场引起的激子展宽效应相对较小, 甚至可以忽略不计。但由于电场作用将引起量子阱中子带能量发生斯塔克移动^[16], 因此使相应的激子带隙 E_{gi} 受到调制。此外, 虽然积分振子强度的变化也可能对介电函数的调制产生影响, 但按照式(1), 积分振子强度 I_i 的调制引起的介电函数变化与激子带隙 E_{gi} 调制引起的介电函数变化之比应为 $\frac{\partial \epsilon}{\partial I_i} / \frac{\partial \epsilon}{\partial E_{gi}} = \frac{E - E_{gi} + i\Gamma_i}{I_i}$, 在临界点 E_{gi} 附近该比值很小。因此, 在弱场条件下, 介电函数随电场的变化主要是由于激子带隙的调制引起的。由式(1)可得到弱场下介电函数的相对变化为

$$\Delta \epsilon = \epsilon(E, F) - \epsilon(E, 0) \propto \sum_i \frac{I_i}{(E - E_{gi} + i\Gamma_i)^2} \quad (2)$$

显然有 $\Delta \epsilon \propto \sum_i \frac{\partial \epsilon(E, 0)}{\partial E_{gi}}$, 即 $\Delta \epsilon$ 为零场下介电函数对激子带隙能量的一阶微商。

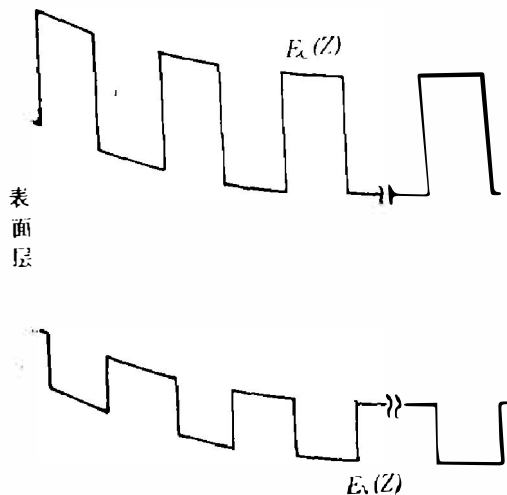


图2 存在表面电场时 GaAs-AlAs MQW 结构的能带图

Fig. 2 Energy diagram of GaAs-AlAs MQW structures in the presence of a surface electric field.

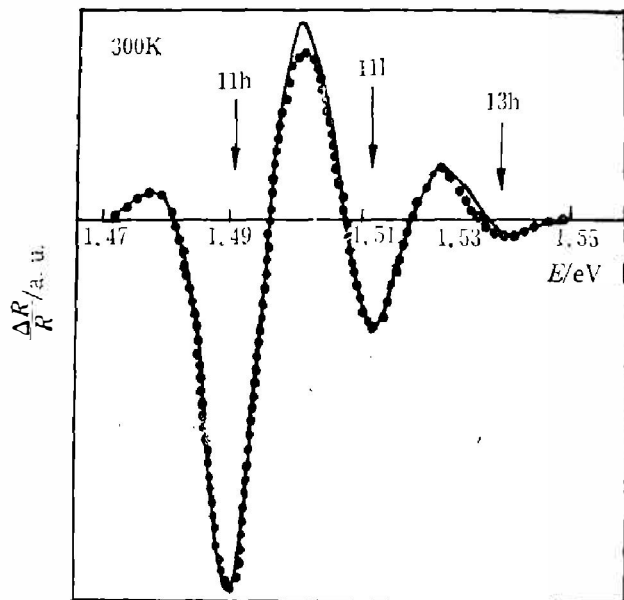


图3 GaAs(10nm)-AlAs(10nm)样品的室温 PR 谱及其对式(3)的最小二乘拟合

Fig. 3 PR spectrum of GaAs(10nm)-AlAs (10nm) sample at room temperature and the least square fit to equation(3).

对 GaAs 材料来说, 在带边附近 Seraphin 系数^[17] $\alpha \gg \beta$ 。假定该条件对 GaAs-AlAs MQW 结构仍然成立, 则 PR 谱的线形仅由 $\Delta\epsilon$ 的实部决定, 即

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \text{Re} \left[\sum_i \frac{I_i}{(E - E_{gi} + i\Gamma_i)^2} \right]. \quad (3)$$

将式(3)对能量作图(参见图3), 可看出该线形具有这样几个特点: (1) 每个谱结构有3个峰(极值), 2个较小的正峰分居在1个较大的负峰两侧; (2) 负峰顶点位置恰好为激子带隙能量(即子能级间距能量减去激子束缚能), 这就是图1中 PR 谱与 PLE 谱结构一一对应的原由。

图3为 GaAs 和 AlAs 层厚均为 10nm 的样品的室温 PR 谱及根据式(3)对实验曲线(图中实线)作最小二乘拟合的结果(图中虚线), 其中 $E_{11h} = 1.491\text{eV}$, $\Gamma_{11h} = 6.0\text{meV}$; $E_{11l} = 1.512\text{eV}$, $\Gamma_{11l} = 6.4\text{meV}$ 。这些跃迁能量与有限势垒量子阱模型的计算结果基本一致。由图3可见, 激子的一阶微商线形对实验结果拟合得很好。

当调制光强增加到使弱场条件不成立时, PR 谱将不再是由式(3)描述的简单的一阶微商谱, 此时调制光强中的直流分量将使表面能带的弯曲程度降低, 同时必须考虑光调制对展宽参数 Γ 及积分振子强度的影响。例如, 展宽参数 Γ 的增大将使 PR 谱的分辨本领下降, 甚至使某些光谱结构无法分辨, 从而使 PR 谱不再具备弱场调制下的诸多优点。

四、结 论

本文的研究结果表明, GaAs-AlAs MQW 结构的 PR 谱很可能仍然是以表面电场调制为主的, 在弱场条件下, 量子阱结构的 PR 谱主要由临界点能量斯塔克移动的调制决定, 因而具有一阶微商线形, 而不是类似于体材料的三阶微商谱。并且, 即使在室温下, 二维限制的激子特点仍对跃迁过程起着决定性作用。

致谢——作者感谢西德 Max-Planck 固体研究所 K. Ploog 博士提供的 MBE 样品, 感谢柏林洪堡大学 R. Enderlein 教授的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] Glembocki O. J. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **46**(1985), 10:970.
- [2] Shen H. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **49**(1986), 10:653.
- [3] Parayanthal P., et al., *Appl. Phys. Lett.*, **48**(1986), 19:1261.
- [4] Tang Yinsheng, Jiang Desheng, *Chin. Phys. Lett.*, **4**(1987), 6:283.
- [5] Shen H. et al., *Solid State Commun.*, **59**(1986), 8:557.
- [6] Shen X. C. et al., *Superlatt. Microstructures*, **2**(1986), 6:503.
- [7] Tang Y. S. et al., *Solid State Commun.*, **63**(1987), 9:793.
- [8] Shanabrook B. V. and Glembocki O. J., in *Proc. 18th Int. Conf. on Phys of Semicond.*, Stockholm, Sweden, Aug. 1986.
- [9] Shanabrook B. V., Glembocki O. J. and Beard W. T., *Phys. Rev.*, **B35**(1987), 4:2540.
- [10] Aspnes D. E., in *Handbook on Semiconductors*, Ed. by T. S. Moss, North-Holland, N. Y., 1980, P. 109.
- [11] Isu T., Jiang D. S. and Ploog K., *Appl. Phys.*, **A43**(1987), 1:75.
- [12] D. S. Jiang et al., to be published in *J. Appl. Phys.*
- [13] Xu Z. Y. et al., *Solid State Commun.*, **61**(1987), 11:707.
- [14] Shay J. L., *Phys. Rev.*, **B2**(1970), 4:803.

- [15] Aspnes D. E. and Frova A., *Phys. Rev.*, **B2**(1970), 2:1037.
[16] Miller D. A. B. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 22:2173.
[17] Hamakawa Y. and Nishino T., in *Optical Properties of Solids-New Developments*, Ed. by B. O. Seraphin, North-Holland, N. Y.,1976, P. 256.

PHOTOREFLECTANCE SPECTROSCOPY OF GaAs-AlAs MULTIPLE QUANTUM WELL STRUCTURES*

TANG YINSHENG

(Centre of Fundamental Physics, University of Science and Technology of China)

JIANG DESHENG

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

ABSTRACT

Photoreflectance (PR) spectra of GaAs-AlAs multiple quantum well (MQW) structures at room temperature are measured and compared with the photoluminescence excitation spectrum at 2K. The results show that the excitonic process is very important for GaAs-AlAs MQWs even at room temperature. The PR modulation mechanism of GaAs-AlAs MQW structures is discussed. It is pointed out that the PR modulation is mainly caused by the optical modulation of the surface electric field. In contrast to the case of bulk materials, the PR spectra of MQWs have mainly the first derivative functional lineshapes. Under the low field condition, they are dominated by the stark shifts of quantized subbands and corresponding excitonic energy gaps.

* Project supported by the National Natural Science Fund.