

研究快报

GaAs/Al_xGal-xAs 超晶格中的纵光学声子模*

汪兆平 韩和相 李国华 陈宗圭 钟战天

(半导体超晶格国家开放实验室,中国科学院半导体研究所,北京)

1989年7月18日收到

本文报道 GaAs/Al_xGal-xAs 短周期超晶格结构中的纵光学声子模的室温 Raman 散射测量结果。除了限制在 GaAs 层中的 GaAs LO 限制模外,我们还首次观测到限制在 Al_xGal-xAs 混晶层中的类 AlAs LO 限制模。根据线性链模型,我们把测量到的 LO 限制模的频率按照 $q = \frac{m}{n+1} \left(\frac{2\pi}{a_0} \right)$ 展开,给出了 Al_xGal-xAs 混晶的类 AlAs LO 声子色散曲线。

主题词 超晶格,纵光学声子模,拉曼散射

一、引言

近几年来,对于 GaAs/AlAs 超晶格结构中的纵光学声子模已经被广泛地研究了(参看最近的评论性文章[1,2])。简言之,由于体 GaAs 和 AlAs 的纵光学声子色散曲线分布在不同的能量范围中, GaAs/AlAs 超晶格结构中的纵光学声子模是非传播的限制模, GaAs 模和 AlAs 模分别被限制在 GaAs 层和 AlAs 层中。实验上,这已经为 Raman 散射的测量结果所证实^[3-6]。但对于 GaAs/Al_xGal-xAs 超晶格结构,光学声子的情况比较复杂。Al_xGal-xAs 混晶的长波长光学声子谱呈现双模行为,分为类 GaAs 和类 AlAs 两支光学支^[7]。另外, Al_xGal-xAs 混晶中的类 GaAs 光学声子色散曲线和体 GaAs 的光学声子色散曲线的能量分布范围是部分分开,部分重叠,这有可能出现部分光学声子限制模,部分可传播的非局域化模。因此,尽管 GaAs/Al_xGal-xAs 是研究得最广泛的超晶格系统,但对其光学声子谱的实验研究,只有 Jusserand 等^[8]在 80K 下的 Raman 散射测量结果,他们首次观测到限制在 GaAs 层中的部分 LO 限制模。这里,我们报道在室温下, GaAs/Al_xGal-xAs 超晶格中纵光学声子模的 Raman 散射测量结果,除了限制在 GaAs 层中的 LO 限制模外,还首次观测到限制在 Al_xGal-xAs 层中的类 AlAs LO 限制模。

二、样品和实验

GaAs/Al_xGal-xAs 超晶格样品是由北京表面物理国家开放实验室的 VG-V80H 型

* 国家自然科学基金资助课题。

分子束外延设备生长的。在〈001〉晶向的半绝缘 GaAs 衬底上先生长一层 GaAs 缓冲层，然后交替地生长 Al_xGa_{1-x}As 和 GaAs 层，共生长 100 个周期左右，使得超晶格的总厚度达到 3000 Å 左右。表面是 GaAs 层，没有生长额外的盖层。对短周期超晶格的层厚，习惯上用单层数 n 来表示，一个单层是 2.83 Å 厚。超晶格结构记作 (GaAs) _{n_1} (Al_xGa_{1-x}As) _{n_2} 。生长时，层厚由生长时间用计算机自动程控，设计的层厚与双晶 X 射线衍射的测量结果^[9]是比较一致的。我们测量所用的两块样品的 (n_1, n_2) 和周期 d 值分别是 (5, 4), 25.6 Å 和 (7, 6), 38.0 Å。用 Raman 散射方法测量了在同样设备和同样条件下生长的厚片 Al_xGa_{1-x}As 混晶的组分 x 值，从其类 GaAs 的 LO (Γ) 在 276 cm⁻¹ 和类 AlAs 的 LO (Γ) 在 382 cm⁻¹，确定 $x \sim 0.33$ ^[7]。我们假设这就是超晶格中 Al_xGa_{1-x}As 薄层的组分 x 值。从测量到的超晶格中类 AlAs 和类 GaAs 的 LO 模的基频模的位置，证实这一假设是合理的。

Raman 散射光谱用配有三光栅单色仪的 JY-T800 型激光 Raman 光谱仪测量，采用背散射测量配置。激发光源用 SP-165-09 型氩离子激光器的 5145 Å 线。加在样品上的激光功率小于 300 mW，采用柱面透镜，保证没有样品加热效应。激光器的输出端加有配套的偏振旋转器，保证激光器输出所需要方向的线偏振光，散射光收集透镜后加有偏振分析器。所有测量是在室温下进行的。

三、结果和讨论

图 1 和 2 分别给出样品 (5, 4) 和 (7, 6) 的偏振和退偏振 Raman 散射光谱。与 GaAs/AlAs 超晶格一样，GaAs/Al_xGa_{1-x}As 超晶格结构具有 D_{2d} 点群对称性。 n 个纵光学声子限制模 LO_m ($m = 1, 2 \dots n$) 分别具有 B_2 (m 是奇数) 和 A_1 (m 是偶数) 对称性。如我们已经指出的^[5]，当我们取 $x \parallel (1\bar{1}0)$, $y \parallel (110)$ 和 $z \parallel (001)$ 时，在 $z(x\bar{x})\bar{z}$ 散射配置下， B_2 和 A_1 模都是 Raman 活性的，而在 $z(xy)\bar{z}$ 散射配置下，二者都是 Raman 非活性的。对于 Al_xGa_{1-x}As 层中的类 AlAs LO 模，由于其声子色散曲线和 GaAs 的 LO 声子色散曲线在能量分布范围上是分开的，因此，类 AlAs 的 LO 模是局域化在 Al_xGa_{1-x}As 层中的限制模。从图 1 和 2 的右图看到，样品 (5, 4) 的 4 个类 AlAs 的 LO_m 模和样品 (7, 6) 的 6 个 LO_m 模都在 $z(x\bar{x})\bar{z}$ 散射配置下观测到了，而在 $x(xy)\bar{z}$ 散射配置下，没有任何散射峰出现。如果我们取 $x' \parallel (100)$, $y' \parallel (010)$ 和 $z \parallel (001)$ ，则在 $z(x'y')\bar{z}$ 散射配置下，仅仅 A_1 模是 Raman 活性的，而在 $z(x'y')\bar{z}$ 散射配置下，只有 B_2 模是 Raman 活性的。如图 3 所示，样品 (7, 6) 的 6 个类 AlAs 的 LO_m 模中，三个具有 B_2 对称性的奇模 ($m = 1, 3, 5$)，在 $z(x'y')\bar{z}$ 散射配置下观测到了，而三个具有 A_1 对称性的偶模 ($m = 2, 4, 6$) 则出现在 $z(x'y')\bar{z}$ 偏振谱中。并且其峰值位置和图 2 的结果是一致的。

图 1—3 的左半图是 GaAs LO 声子能量范围 (240—300 cm⁻¹) 的 Raman 散射光谱。图中的 LO'_1 是 Al_xGa_{1-x}As 层中的类 GaAs LO 声子的基频模，其峰值位置略小于 $x = 0.33$ 的 Al_xGa_{1-x}As 混晶的类 GaAs 的 LO (Γ) 值 (276 cm⁻¹)。在 Raman 频移大于 LO'_1 的能量范围内，体 GaAs 的 LO 声子色散曲线和混晶 Al_xGa_{1-x}As 的类 GaAs 的 LO 声子色散曲线的能量分布范围不同，因此，GaAs 层中的 LO 模是局域化在 GaAs 层

中的限制模。但是，我们只观测到具有 B_2 对称性的奇模 LO_1 和 LO_3 ，没有观测到具有 A_1 对称性的偶模，这从图 3 左半图的 $z(x'x')\bar{z}$ 散射配置下的曲线在 $275-290 \text{ cm}^{-1}$ 范围内没有散射峰可以更清楚地看出。这也和先前 Jusserand 等^[8]的观测结果是一致的。他们指出，如果考虑 GaAs 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的电极化率分量 ϵ_{xx} 近似相等，则具有 A_1 对称性的偶模的 Raman 效率 R_{xx} 趋近于零。对于 x 值较小的情况下，这一近似应该是合理的。考虑到 GaAs/AlAs 超晶格 ($x=1$ 的情况) 中， A_1 模的强度本来就比 B_2 模小得多^[3-5]，在 x 值较小的情况下， A_1 模就更弱得难于观测到了。最近，朱邦芬等^[10]在线性链模型的基础上，利用键极化率近似，计算了 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 超晶格结构中的 LO 模的 Raman 强度，其结果更清楚地说明了上述观点。

在 Raman 频移低于 LO_1' 的能量范

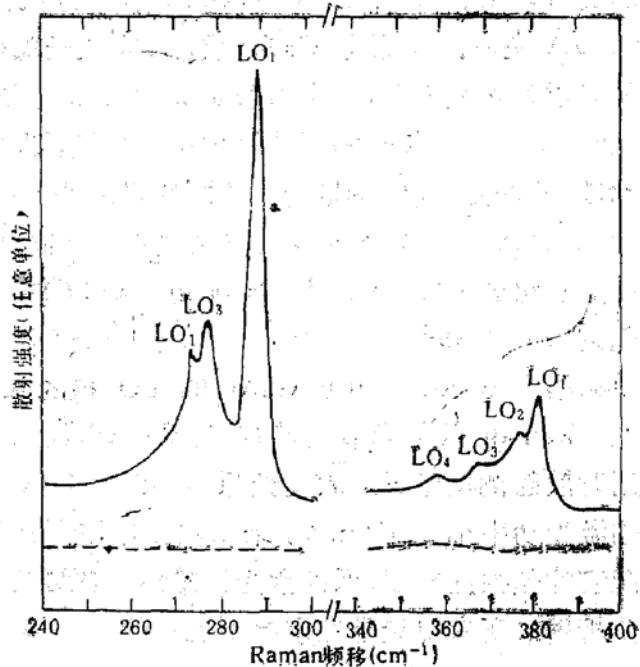


图 1 $(\text{GaAs})_x(\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})_4$ 超晶格结构的 Raman 散射光谱
— $z(xx)\bar{z}$ 散射配置, --- $z(xy)\bar{z}$ 散射配置, $x/(1\bar{1}0)$, $y/(110)$, $z/(001)$

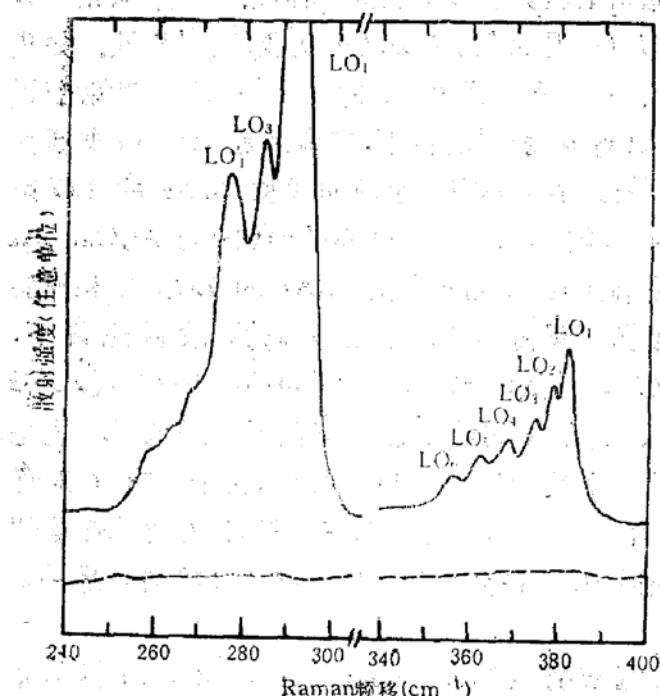


图 2 $(\text{GaAs})_x(\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})_4$ 超晶格结构的 Raman 散射光谱
— $z(xx)\bar{z}$ 散射配置, --- $z(xy)\bar{z}$ 散射配置,
 $x/(1\bar{1}0)$, $y/(110)$, $z/(001)$

同样适用于确定具有双模行为的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶的类 GaAs 和类 AlAs 支的光学声子色。

范围内，体 GaAs 的 LO 模和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶的类 GaAs LO 模的声子色散曲线的能量分布范围发生重叠。在这一范围内， $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 超晶格结构中的 GaAs LO 模应该成为具有一定可传播性质的非局域化模，有可能是类似于声学声子的折叠模。在图 3 左半图的 $z(x'x')\bar{z}$ 散射配置下的曲线中，在 $250-275 \text{ cm}^{-1}$ 的范围内，有一个宽而弱的峰。由于探测灵敏度的限制，我们还不能分辨出细致结构，但它似乎是具有类似声学声子折叠模的 A_1 对称性。对此，我们正在进一步研究。

我们曾经提出，超晶格结构的 Raman 散射测量可以提供一种确定晶体声子色散曲线的新方法，并且提供了 AlAs 晶体的光学声子色散曲线的第一套实验数据^[5,11]。我们设想，这一方法同

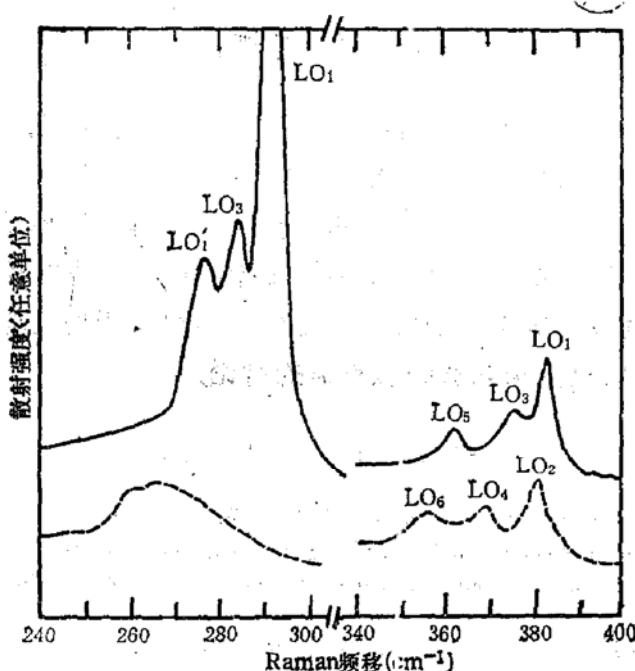


图3 (GaAs)₅(Al_{0.53}Ga_{0.47}As)₆ 超晶格结构的 Raman 散射光谱
— z(x'y')z 散射配置, --- z(x'x)z 散射配置, x'//(100), y'//(010), z//(001)

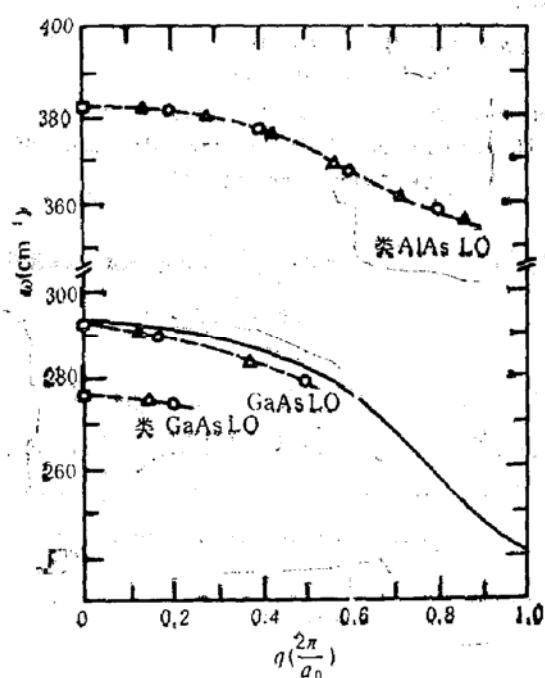


图4 测量的 GaAs/Al_{0.53}Ga_{0.47}As 超晶格的 LO 模的频率对

$$q = \frac{m}{n+1} \left(\frac{2\pi}{a_0} \right)$$

○ 样品(5,4) 本工作中 Raman 散射的测量数据

△ 样品(7,6) 本工作中 Raman 散射测量的体 GaAs 和 Al_{0.53}Ga_{0.47}As 混晶的类 GaAs 和类 AlAs LO(Γ) 值

——根据体 GaAs 在 10K 的中子散射实验数据描成的曲线^[14]

散曲线, 从线性链模型出发, 假设光学声子限制模被严格地限制在相应的层内, 则光学声子限制模的频率对应于在波矢

$$q = \frac{m}{n+1} \left(\frac{2\pi}{a_0} \right)$$

处相应体材料的光学声子频率^[12,13]。图4给出了这样的图示结果。其中实线是用中子散射方法测定的体 GaAs 的 LO 声子色散曲线^[14]。对于 Al_xGa_{1-x}As 混晶，其类 GaAs 和类 AlAs 支光学声子色散曲线既无实验测量数据，也无理论计算结果，只有用 Raman 散射方法测定的 LO(Γ) 值。图中的虚线是根据实验数据描绘成的相应的声子色散曲线。

我们感谢北京表面物理国家开放实验室提供实验测量所用的样品，感谢王玉田同志的双晶 X 射线衍射测量，感谢朱邦芬同志有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] M. Cardona, *Superlattices and Microstructures*, 5, 27 (1989).
- [2] J. Sapriel and B. Djafari Rouhani, to be published in *Surf. Sci. Reports*.
- [3] C. Colvard, T. A. Gant, M. V. Klein, R. Merlin, H. Morkoc and A. C. Gossard, *Phys. Rev.*, B31, 2080 (1985).
- [4] A. K. Sood, J. Menendez, M. Cardona and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.*, 54, 2111 (1985).
- [5] 汪兆平, 江德生, 半导体学报, 8, 558 (1987).
- [6] S. L. Zhang, M. V. Klein, J. Klem and H. Morkoc, *Phys. Lett.*, A131, 69 (1988).
- [7] 汪兆平, 韩和相, 赵学恕, 李国华, 涂相征, 半导体学报, 6, 634 (1985).
- [8] B. Jusserand, D. Paquet and A. Regreny, *Phys. Rev.*, B30, 6245 (1984).
- [9] 王玉田, 发光学报 10, 82 (1989).
- [10] B. F. Zhu and K. A. Chao, *Phys. Rev.*, B36, 4906 (1987).
- [11] 汪兆平, 韩和相, 李国华, 江德生, 半导体学报, 9, 559 (1988).
- [12] B. Jusserand and D. Paquet, *Phys. Rev. Lett.*, 56, 1752 (1986).
- [13] A. K. Sood, J. Menendez, M. Cardona and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.*, 56, 1753 (1986).
- [14] E. Richter and D. Strauch, *Solid State Commun.*, 64, 867 (1987).

Longitudinal Optical Phonon Modes in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Superlattices

WANG Zhaoping, HAN Hexiang, LI Guohua,

CHEN Zonggui and ZHONG Zhanjian

(National Laboratory for Semiconductor Superlattices and Related Microstructures and Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083)

Abstract

Room temperature Raman scattering studies of longitudinal optical phonon modes in GaAs/Al_xGa_{1-x}As short period superlattices are reported. In addition to the GaAs LO modes confined in GaAs layers, AlAs-like LO modes confined in Al_xGa_{1-x}As layers were also observed for the first time. Based on the linear chain model, the frequencies of confined LO modes measured by Raman scattering were unfolded according to $q = \frac{m}{n+1} \left(\frac{2\pi}{a_0} \right)$ and by which the dispersion curve of AlAs-like LO phonons in Al_xGa_{1-x}As mixed crystal was obtained for the first time.

KEY WORDS Superlattices, LO modes, Raman scattering