

GaAs/AlAs 波纹超晶格中的 激子局域化研究*

袁之良 徐仲英 许继宗 郑宝真 江德生 张鹏华 杨小平

(半导体超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文首次报道(311)面上生长的 GaAs/AlAs 波纹超晶格中的激子局域化效应. 在这种结构中, 波纹异质结界面的缺陷, 包括周期微扰和表面不平整将引入较深的激子束缚能级, 因此低温下其发光能量相对于(100)样品发生明显的红移. 在Ⅱ类超晶格中, 局域化能级成为 X 能谷电子向 Γ 能谷输运的通道, 从而加强了 X- Γ 电子态混合, 使实验观察到的 X 跃迁表现出 Γ 跃迁的某些性质.

PACC: 7135, 7855, 7865

在(311)GaAs 衬底上生长 GaAs/AlAs 波纹超晶格是近年来探索直接生长量子线结构的新方法^[1,2]. 它主要利用异质结界面的波纹结构, 对载流子引入新的横向限制. 当超晶格厚度足够薄时, 就会形成如图 1(a)所示的量子线结构. 其表面结构如图 1(b)所示, 具有一系列高低起伏的台阶, 台阶的高度为 10.2 Å, 横向周期为 32 Å.

已有一些工作研究过(311)衬底波纹超晶格(以下缩写为(311)CSL)的各种特性, 包括光学各向异性^[1]和电声子相互作用^[1,3]等. 本文报道了(311)CSL 结构中的激子局域化效应. 变温光致发光(PL)实验表明: (311)CSL 结构中的低温 PL 峰值相对(100)参考样品发光峰的红移, 主要是由于不同的激子局域化状态造成的, 而不应归结为对应(311)CSL 结构中较厚尺寸的 GaAs 发光^[1,2]. 在Ⅱ类 CSL 样品中, 我们发现在 10—300K 温度范围内, 光致发光光谱呈单一的 X 跃迁, 而没有观察到因载流子热布居引起的逐渐增强的 Γ 跃迁. 这个结果反映了 AlAs 中 X 电子向 GaAs Γ 能谷中的局域化能级有效转移, 并在谱线宽度的温度特性和激子发光能量的温度依赖关系中表现出明显的 Γ 特征.

本实验所用样品主要由德国马普所提供. MBE生长同时放入(311)和(100)GaAs衬底. (100)衬底样品用作参考样品, 这样在(311)衬底生长得到的波纹超晶格其平均厚度应与

* 国家攀登计划资助项目, 同时得到国家自然科学基金资助

袁之良 男, 1970年生, 博士研究生, 主要研究课题是量子阱中激子发光动力学及其温度特性、异质结界面特性等

徐仲英 男, 1942年生, 研究员, 主要从事半导体超晶格、量子阱光学性质研究, 包括快速弛豫过程、发光动力学、低维激子特性和光学非线性等研究工作

许继宗 男, 1939年生, 从事半导体超晶格、量子阱光学特性及相关实验技术研究

1994年8月15日收到初稿, 1994年10月13日收到修改稿

(100)衬底样品相同,并具有相同的光学质量^[2]. RHEED 测量结果表明:原(311)高指数面在生长过程中分解成有序的高低起伏的台阶. 样品结构为多周期超晶格结构,具体参数将在正文中提到. 样品制备细节可参阅文献[1].

光致发光实验采用常规的实验装置,由氩离子激光器,可变温低温系统, GaAs 阴极光电倍增管,光子计数器和微机组成.

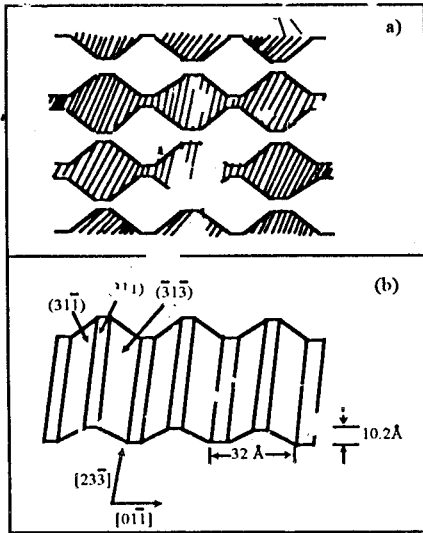


图1 (a)(311)GaAs 衬底上生长的波纹超晶格截面图
(b)(311)GaAs 表面结构

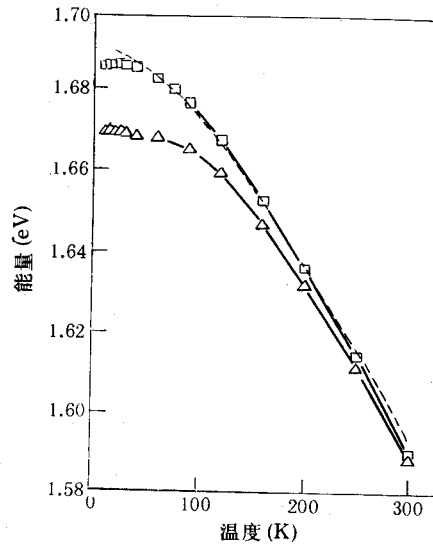


图2 PL 峰值光子能量与温度的关系
样品为 43/47 Å GaAs/AlAs 超晶格
—□—(100)实验数据
—△—(311)实验数据 — — — 计算

图2画出了一对 43/47 Å GaAs/AlAs 超晶格的光致发光峰值光子能量位置与温度的关系. 可以看到:对(100)衬底样品,光子能量基本遵循所对应的自由激子发光能量的温度关系(图中虚线所示),只是在低温有所偏离,10K 时偏离量为 4meV. 而(311)CSL 样品,在较大的温度范围内(10—120K),光子能量随温度的变化偏离自由激子发光能量的温度特性,10K 时最大的偏离量为 20meV. 这样,10K 时(311)样品 PL 峰值能量相对(100)样品将红移 16meV. 而到室温时,基本上不存在红移(如图2所示). 关于红移现象,文献中曾粗糙地解释为(311)PL 发光对应于波纹结构中较厚区域的 GaAs 层发光^[1,2]. 按照这种假设,室温下也应具有相同的红移,图中两条实验曲线应相互平行,显然这与我们的实验事实不符.

我们认为,低温下超晶格发光是局域化激子或者说束缚激子发光,而这些束缚态是由于界面不完整、粗糙起伏造成的. 对于(100)衬底超晶格量子阱材料,低温下激子局域化模型已经建立^[4,5],通常局域化能量(激子束缚能)为几个 meV. 其值可以用低温下激子发光能量偏离理论带隙的能量差或 Stokes 位移来估计^[4,5]. 对(311)CSL 结构来说,除了生长过程中不可避免的异质结界面起伏之外,(311)高指数面分裂过程中产生的缺陷将破坏波纹周期结构,引入新的局域化能级,而且能级较深,因而具有较大的局域化能量. 换句话说,此时激子被束缚在较深的能级上. 正是由于两种衬底样品具有不同的界面特性,因此激子束缚能也就不同. 这种束缚能的差异就构成了它们在低温下发光峰之间的红移. 对上述 43/47 Å GaAs/

AlAs 样品来说,由实验得到的(100)衬底样品的激子束缚能为 4meV,而(311)CSL 样品的激子束缚能为 20meV,两者相差 16meV,即(311)样品的发光峰能量位置相对于(100)衬底样品红移 16meV. 可以预见,这种束缚激子将在较高温度下被激活,使其成为自由激子,因此随着温度的上升,两种样品的发光能量渐趋一致.

我们研究了另一对 II 类超晶格样品,样品结构为 29/29 Å GaAs/AlAs 超晶格. 图 3 和图 4 分别给出了(100)和(311)衬底样品不同温度下的 PL 光谱. 低温下两个样品发光均发生在 AlAs 中 X 能谷电子和 GaAs 中 Γ 能谷空穴之间,称间接跃迁或 X 跃迁. 其性质已为时间分辨光谱(另文报道)和理论计算所证实. 对(100)衬底样品(图 3),当温度升至 60K 左右时,PL 高能侧出现一个新的发光峰,与 X 跃迁相距 42meV,该峰指派为直接跃迁或 Γ 跃迁,即光跃迁发生在 GaAs 层中 Γ 电子和 Γ 空穴之间. 随着温度的继续升高, Γ 发光逐渐增强,而 X 跃迁迅速减弱. 这是由于 GaAs 中 Γ 电子能级的热布居造成的,同时 Γ 跃迁几率远大于 X 跃迁.

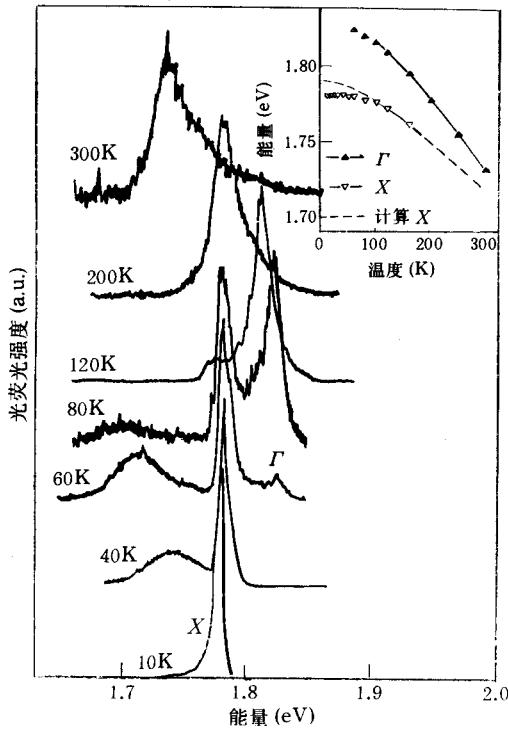


图 3 (100)GaAs 衬底 29/29 Å GaAs/AlAs 超晶格在不同温度下的 PL 光谱
图中插图给出了 PL 光子能量随温度的变化关系

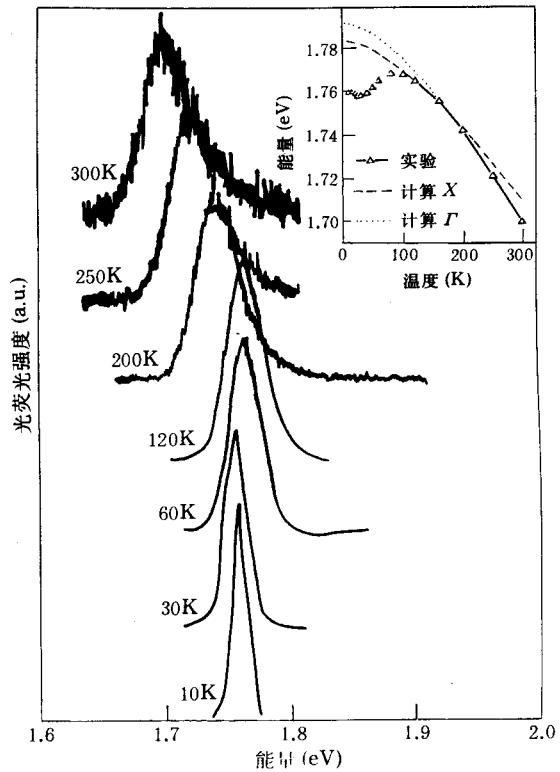


图 4 (311)GaAs 衬底 29/29 Å GaAs/AlAs 波纹超晶格在不同温度下的 PL 光谱
图中插图给出了 PL 光子能量随温度的变化关系
虚线为 X 跃迁的计算结果,而点线为 Γ 能谷的温度的变化关系,其能量位置是任意的

与此形成鲜明对照的是(311)样品的发光,尽管理论计算表明^[6],在 X 跃迁之上 52meV 存在 Γ 能级,但在整个测量温度范围内,实验上没有观测到 Γ 跃迁. 如图 4 所示,PL 光谱始终呈现单一的 X 跃迁发光. 为了解释这个实验现象,我们引入一物理图象^[7],如图 5 所示.

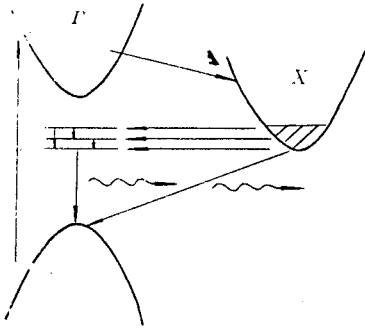


图 5 电子从 X 能谷向 Γ 能谷束缚态发生共振转移的物理模型

按照前面的分析,对(311)衬底样品,由于波纹结构的不完整加上异质界面的不平整,基态电子能级下面将形成一系列深浅不同的束缚能级.由于电子有效质量的差异, Γ 能谷中的局域化能级较深,不易发生热离化,我们假设这些能级位于 X 能谷附近(图 5).低温时,发光跃迁发生在 X 能谷束缚电子与 Γ 空穴之间.当温度升高时, X 能谷形成热布居,加上 X、 Γ 能谷因温度系数的差异造成的相对移动, X 能谷电子可以与 Γ 能谷下的局域化能级发生共振,返回到 Γ 能谷,这种电子转移可伴随强烈的 X- Γ 混合,相应 X 跃迁将表现出下列特性:(1)即使在高温下仍有很大的发光强度;(2)发光表现出某些 Γ 跃迁的特性.我们在实验中观测到上述特性:29/29 Å CSL 样品室温下的发光强度甚至比相应的(100)衬底样品高一个数量级,而且其发光峰宽度的温度依赖关系以及激子带隙的温度变化与(100)样品 Γ 发光有惊人的相似之处,这点将在下面详细叙述.

在图 3 和图 4 的插图中,给出了 PL 光子能量随温度的变化关系.可以看到:对(311)样品,在很大的温度范围内光子能量变化不遵循理论预示(图中虚线)的关系,特别在低温时,偏离很大,约为 23meV,而(100)衬底样品的偏离仅为 10meV.上面提到这种偏离可近似看作激子束缚能,因此这个实验结果再次支持了我们前面已经讨论的有关激子局域化模型.

如果把 29/29 Å 两个不同衬底样品的发光峰宽度(以 FWHM 表示)随温度的变化关系画在同一图上,我们会惊奇地发现:尽管高温下,(311)CSL 样品没有观察到 Γ 跃迁,但其 FWHM 随温度的变化却酷似(100)样品中的 Γ 发光,如图 6 所示.由图还可以看到:(1)(100)样品温度较低时($<80\text{K}$), X 跃迁的半宽随温度的增加迅速增加(斜率 $\sim 2k_B$).开始时的减小是由于不同发光谱线的叠加,本文不予讨论. $T > 80\text{K}$ 时, X 跃迁迅速淬灭,为 Γ 跃迁所替代.其 FWHM 随温度增加的速率变缓,大体可以用 Lee^[8]的经验公式来描述.关于 II 类超晶格中发光谱线随温度的变化的物理分析.我们将另文详细报道.(2)对(311)CSL 样品,尽管在 10—300K 中表现为单一的 X 跃迁,但其 FWHM 随温度的变化有一个明显的转折点.较高温时($T > 80\text{K}$),曲线走向几乎平行于(100)样品中的 Γ 发光,此外,仔细研究 29/29 Å (311)样品发光温度变化关系(图 4 插图)还可以发现高温时发光能量的变化遵循 Γ 发光的规律,而偏离 X 发光,即具有 Γ 发光的性质.这些实验事实表明高温下(311)CSL 样品中 X- Γ 电子的强烈混合作用,而这种混合是由于 X 电子共振输运到 Γ 能谷中的局域化能级造成的.

最后需要指出的是,有关波形超晶格乃至量子线、量子点中的激子局域化以及不同能谷

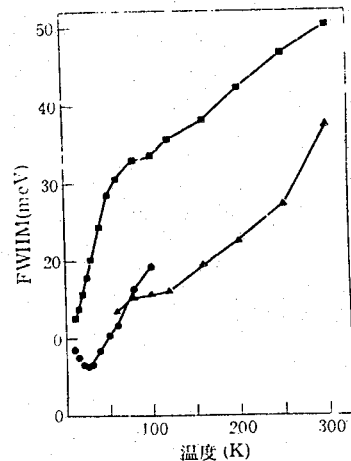


图 6 29/29 Å GaAs/AlAs 样品中发光半宽(FWHM)随温度的变化

—●—(100)X, —▲—(100)Γ, —□—(311)

最后需要指出的是,有关波形超晶格乃至量子线、量子点中的激子局域化以及不同能谷

电子之间的强耦合问题目前研究甚少,我们相信本文所报道的实验结果对研究非(100)衬底上生长的超晶格中的激子局域化问题具有普遍的意义.

致谢 本工作在分析讨论中,得到夏建白、朱邦芬、王炳燊教授的指导和帮助,特此致谢.

参 考 文 献

- [1] R. Nötzel, N. N. Ledentsov, L. Däweritz, M. Hohenstein and K. Ploog, Phys. Rev. Lett. , 1991, **67**:3812.
- [2] R. Nötzel, N. N. Ledentsov, L. Däweritz, K. Ploog and M. Hohenstein, Phys. Rev. , 1992, **B45**:3507.
- [3] D. S. Jiang, X. Q. Zhou, M. Oestreich, W. W. Rühle, R. Nötzel and K. Ploog, Phys. Rev. , 1994, **B49**:10786.
- [4] C. Delalande, M. H. Meynadier and M. Voos, Phys. Rev. , 1985, **B31**:2497.
- [5] G. Bastard, C. Delalande, M. H. Meynadier, P. M. Frijlink and M. Voos, Phys. Rev. , 1984, **B29**:7042.
- [6] Shushen Li and Jianbai Xia, Phys. Rev. , 待发表.
- [7] A. Zrenner, L. V. Butov, M. Hang *et al.* , Phys. Rev. Lett. , 1994, **72**:3382.
- [8] J. Lee, E. S. Koteles, and M. O. Vassel. Phys. Rev. , 1986, **B33**:5512.

Exciton Localization in Corrugated GaAs/AlAs Superlattices Grown on (311) GaAs Substrates

Yuan Zhiliang, Xu Zhongying, Xu Jizong, Zheng Baozhen, Jiang Desheng,
Zhang Penghua and Yang Xiaoping

*(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences and
National Laboratory for Superlattices & Microstructures Beijing 100083)*

Received 15 August 1994, revised manuscript received 13 October 1994

Abstract We report, for the first time, on the exciton localization effect in GaAs/AlAs corrugated superlattices grown on (311) GaAs substrates. In this novel structure, additional localized states are expected to be created below the ground states in the Γ -point of GaAs by the intrinsic macroscopic steps of the corrugated interfaces. It leads to the observed red-shift of the exciton emission relative to that in the (100) reference sample at low temperature. In type- II superlattices, the local potential minima constitute channels of electron transfer from X-point of AlAs to the localized states in Γ -point of GaAs, resulting in strong X band emission up to room temperature, but the Γ -transition-like behaviour in the temperature dependence of linewidth of X transition.

PACC: 7135, 7855, 7865