

可用于器件的侧墙 GaAs 量子线列阵结构*

牛智川 周增圻 潘 钟 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心 北京 100083)

R. Noetzel, K. Plog

(Paul-Drude 固体电子学研究所 德国柏林 10117)

摘要 本文介绍了一种可以实用的侧墙式 GaAs 量子线及其列阵结构。沿 (01-1) 方向腐蚀条形的 (311)A 衬底上, 分子束外延生长的各向异性导致了侧墙量子线结构的形成。用光栅刻蚀方法, 制备了横向周期为 $1\mu\text{m}$ 、纵向三层叠加的三维侧墙量子线列阵。阴极荧光谱研究表明: 在 5K 下, 发光主要来自量子线区域, 在两侧的量子阱区域只有很弱的发光峰; 认为低温下载流子主要束缚在量子线区域, 在量子阱区域也有少量载流子被外延层涨落产生的局域态所束缚。随温度升高到 85K 以上直至室温下, 只能观察到来自量子线区域的发光峰。这是由于束缚在量子阱局域态中的载流子大部分由于热激发而弛豫至量子线区域, 参与量子线的发光。这种量子线列阵横向限制能量达到了 220meV , 表明该量子线列阵结构可以用于制备发光等实用器件。

PACC: 7340L, 8115G, 7855

1 引言

随着低维结构制备和物理特性研究的深入, 人们已经观察到, 由于载流子的实空间扩散长度小于微米量级, 横向周期小于微米量级的高密度量子线列阵结构表现出不同于单量子线结构的物理特性。最具特点的是, 这种列阵结构中, 参与发光等物理过程的载流子总是被量子线区域俘获, 从而使得发光等特性主要集中在量子线区域, 这正是实现低维结构的实用化所希望的。为了进一步增加有源区体积, 除了要有一定的横向密度外, 在保证量子线具有足够的均匀性条件下, 还应该在生长方向上实现多层可重复性叠加, 即实现三维方向的列阵结构。这就对低维结构的制备方法提出了很高的要求。V 形和脊形量子线是目前研究较为深入和比较成功的一种结构^[1-3], 目前尝试制备了 V 形量子线分布反馈激光器^[4,5], 但当增加

* 本文的工作得到国家自然科学基金委的资助, 项目编号: 69606005
1998-10-14 收到, 1998-11-19 定稿

横向密度和纵向层数时, 由于选择生长特性的受到抑制, 在垂直方向的重复性生长有很大的不均匀性 特别是沿线方向非常不平整, 而其侧向量子阱构成的横向限制能量也局限在几十 meV 范围

最近, 我们实现了一种在 GaAs 腐蚀图形衬底上生长侧墙量子线结构的独特方法^[6,7]. 在(311)A 面上沿 [01-1] 方向刻蚀很浅(50nm) 的条形, 而构成条形的两个侧面取向各向异性, 分别为(111) 和{311} 面 由于 Ga 原子的择优迁移, 导致在{311} 一侧生长速度较大, 外延生长形成了“侧墙量子线”结构 用光致发光谱、阴极荧光谱及近场光学显微光谱等方法研究了单量子线的发光特性, 表明这种量子线具有准平面特点, 且沿线方向非常平整 侧墙量子线横向限制能量达到了几十 meV, 观察到了室温下量子线的发光峰

为实现器件应用的目的, 本文对侧墙量子线列阵结构的生长及发光特性进行了研究 实验结果发现: 在用光栅(周期为 $1\mu\text{m}$) 刻蚀后的衬底上生长的侧墙量子线列阵具有比单量子线结构更强的横向限制效应, 而且在垂直方向重复生长三层量子线均保持了很高的结构均匀性, 阴极荧光(CL) 屏测试结果表明: 在 5K 下, 发光主要集中在量子线区域, 发光峰强度是两侧量子阱区域发光峰强度的 17 倍以上; 随温度的升高, 量子阱发光峰迅速减弱; 在 300K 下, 只能观察到来自量子线区域的发光峰 本文讨论了量子线列阵的发光特性, 认为低温下量子阱区域的发光来自束缚在量子阱局域态(由外延层涨落产生) 中载流子(激子) 的辐射复合; 而随温度的提高, 这些载流子从局域态中热激发, 或弛豫到势垒区或参与一些非辐射复合, 但大部分则被量子线区域俘获, 有效地参与了量子线的发光 这些特性已经满足了制备发光等实用器件的基本要求

2 侧墙量子线生长原理及其列阵结构的制备

侧墙量子线的形成是 MBE 选择生长所导致的 图 1(见图版 D) 给出了侧墙量子线生长的原理示意 在 GaAs(311)A 衬底上沿 [01-1] 方向刻蚀条形, 用体积比为 1 : 8 : 40 的 H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O 化学溶液进行腐蚀, 可得到图 1 所示的台面结构, 其条形侧面分别为(111)A 面和{311}A 晶面 条形取向的各向异性导致生长速率的各向异性, 表现为在{311} 面 GaAs 生长速率大于其他两个面, 成为快速生长面 图 2(a)、(b) (见图版 D) 分别给出了沿{311} 侧墙的表面形貌的 AFM 和剖面结构的 TEM 测试结果 外延层中的黑色层为 GaAs 层 可以清晰地看到: 生长形成了凸面结构, 使得横向方向侧面较厚而两侧较薄从而形成对侧墙的横向势垒 研究表明^[6-8]: 生长的 GaAs/AlGaAs 量子阱已经构成对{311} 侧面几十 meV 的横向势垒, 而且在生长方向重复生长 3 层以上, 其结构的均匀性保持不变 但在{311} 侧面形成侧墙量子线结构的同时, 在(111)A 面也形成了粗糙表面, 这将不利于器件应用 为了把量子线结构实际应用到器件中, 需要首先获得高密度的量子线列阵结构, 同时要克服(111)A 面粗糙的问题, 并且应该尽可能地增强横向限制效应即提高量子线两侧的横向势垒高度 基于这样的考虑, 本实验开展了量子线列阵结构的生长制备研究

对于量子线列阵, 同样沿 [01-1] 方向刻蚀光栅, 周期为 $1\mu\text{m}$ (间隔 500nm). 用上述的化学溶液腐蚀出 15nm 高的条形台面, 用去离子水清洗后装入 MBE 系统(RBER 2300), 在制备室内用原子氢(由氢气 1800 摄氏度下高温裂解得到) 去除表面氧化层后进入生长室 典型的生长条件: GaAs 及 AlAs 的生长速率为 $0.5\mu\text{m}/\text{h}$, V/III 束流比为 5 : 1, 生长温度 620 . 外延层包括: 50nm 厚的 GaAs 过渡层, 第一层 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 势垒层为 50nm, 然后重

复生长 3 次 3nm 厚的 GaAs 势阱层, 间隔 10nm 厚的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 势垒, 然后生长 50nm 的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 势垒和 20nm GaAs 覆盖层. 同时在一个平面衬底上生长了做为参考的平面量子阱样品. 对量子线阵列做了 TEM、阴极荧光谱的分析研究.

3 实验结果与讨论

图 3(见图版 D)给出了三维量子线阵列剖面结构的 TEM 照片. 图中黑色层为 GaAs 量子阱. 如图所示: MBE 生长的结果在 {311} 侧墙面形成了三层均匀叠加的、横向间隔为 500nm 的侧墙量子线阵列. 更重要的是我们看到: 在这里没有出现单量子线结构中存在的 (111) 粗糙面, 整个量子线外延结构完整光滑. 这是由于 Ga 原子的表面迁移特性所决定的.

一般生长条件下, Ga 原子的迁移长度大于 $1\mu\text{m}$. 在周期为 $1\mu\text{m}$, 间隔为 500nm 的条形衬底上生长时, 由于 Ga 原子择优迁移至 {311} 侧墙面, 原本就是慢速生长面的 (111) 面的生长受到进一步的抑制, 最终在列阵量子线的生长中 (111)A 消失. 这使得整个侧墙量子线阵列结构非常均匀. 另外还可以看到, 量子线区域的生长厚度达到了两侧量子阱厚度的两倍, 显然大于单侧墙量子线结构, 证明在小于 μm 间隔的周期性条形台面衬底上的生长, 比单条形台面上的生长, 生长的选择性进一步加强, 即增加了量子线的纵向厚度, 同时导致了两侧量子阱层厚度的减小. 从而可以增强量子线横向势垒, 这一点在下面的阴极荧光谱的研究中得到了证实.

对该量子线阵列结构做了不同温度(从 5K 至 300K)下的阴极荧光谱测试研究. 结果如图 4 所示(见图版 D). 图中还给出了同时在平面衬底上生长的量子阱结构的 5K 阴极荧光谱. 激发谱测试面积为 $6 \times 4\mu\text{m}^2$. 可以清晰地看到: 5K 下荧光谱中, 位于 1.611eV 的主峰来自量子线区域的发光, 而位于 1.831eV 的发光峰来自量子阱区域. 一般而言, 载流子应该全部弛豫到能级位置较低的量子线区域发光, 但量子阱层中总是存在不可避免的涨落, 所以部分载流子被量子阱中的某些局域态束缚. 但量子线和量子阱区域发光强度的差别极大, 首先说明参与发光的载流子主要集中在量子线区域, 同时说明这种量子线结构对两侧量子阱中载流子的俘获能量较强. 量子线发光峰的半高宽和参考样品即平面量子阱的发光峰半高宽可比, 说明腐蚀图形上生长的量子线结构具有和普通量子阱样品同样的外延质量. 和单侧墙量子线结构相比: 量子线阵列结构中, 发光峰位移的幅度进一步增大, 说明生长选择性进一步加强. 由于该量子线阵列结构的横向势垒是由于两侧的平面量子阱构成的, 由量子线发光峰和量子阱发光峰位置的差异知道: 量子线的横向势垒达到了 220meV.

此外, 随着温度增高直至室温下, 量子线发光峰强度减小了一到两个量级. 这是由于一些非辐射复合几率随温度有所增加, 以及热激发可以使部分载流子进入势垒区域等效应^[9]. 然而随温度的升高, 量子阱发光峰强度迅速减弱, 显然是由于低温下局域态的载流子被热激发, 并在辐射前有效地弛豫到量子线区域. 这一点可以用量子线和量子阱发光峰强度比率 $I_{\text{QWELL}}/I_{\text{QWRE}}$ 随温度变化的曲线表示出来如图 5 所示(见图版 D). 由此图可见: 在 5K 到 50K 的温度范围内, 其比率下降了 1 个量级, 而在此以上的范围, 这一比率在测试灵敏度范围内保持为零. 说明这种量子线阵列结构不存在高温下载流子的重新分布问题, 这是由于该结构具有 220meV 的横向限制势垒. 而这一特性在具有 62meV 的单侧墙量子线结构中没有观察到^[8]. 由图 5 还可以得知在 5K 温度下, 量子阱和量子线发光强度的比率为 0.06, 这一比值应该和量子线对载流子的俘获时间与其在量子阱内辐射复合时间的比率相对应, 因为后者

为 100ns 的范围, 所以量子线对载流子俘获的时间上限应该在几个 ns 范围, 这一点已经被时间分辨谱测试所证明, 也和 V 形量子线结构的测试结果相吻合^[4, 10]

4 结 论

我们在 $\text{GaAs}(311)\text{A}$ 腐蚀条形衬底上成功地制备了具有器件质量的侧墙式量子线阵列结构。由于条形表面生长各向异性, Ga 原子择优迁移至侧墙的 $\{311\}\text{A}$ 面形成凸面结构。阴极荧光谱测试表明这种结构具有明显的横向载流子限制效应, 其横向限制能量达到了 220meV 。在 5K , 发光峰主要来自量子线区域, 而在 80K 以上只能观察到量子线的发光峰。说明这种量子线阵列结构中的载流子有效地弛豫至量子线区域, 参与量子线的发光。这些特性表明该量子线阵列结构可以用于制备发光等实用器件。

参 考 文 献

- [1] E. Kapon, M. C. Tamargo and D. M. Hwuang, *Appl Phys Lett*, 1987, **50**: 347.
- [2] 牛智川, 周增圻, 林耀望, 等, *半导体学报*, 1996, **17**: 228.
- [3] 程文超, 张子平, 李国华, 等, *半导体学报*, 1998, **19**: 631.
- [4] J. Christen, M. Grundmann, E. Kapon *et al*, *Appl Phys Lett*, 1992, **61**: 67.
- [5] M. Walther, E. Kapon, C. Caneau *et al*, *Appl Phys Lett*, 1993, **62**: 2170.
- [6] R. Notzel, J. Menniger, M. Ramsteiner *et al*, *Appl Phys Lett*, 1996, **68**: 1132.
- [7] R. Notzel, M. Ramsteiner, J. Menniger *et al*, *Jpn. J. Appl Phys* 1996, **35**: L297.
- [8] A. Richter, G. Behme, M. Suptiz *et al*, *Phys Rev. Lett*, 1997, **79**: 2145.
- [9] U. Jahn, J. Manniger, R. Hey, *et al*, *Appl Phys Lett*, 1994, **64**: 2382.
- [10] J. F. Ryan, A. C. Maciel, C. Kiener *et al*, *Phys Rev.*, 1996, **B53**: 4225.

Useful Sidewall Quantum Wire Arrays

Niu Zhichuan, Zhou Zengqi, Pan Zhong, Wu Ronghan

*National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

R. Noetzel, K. Ploog

Paul-Drude-Institute for Solid State Electronics, Hausvogteiplatz 5-7, D-10117, Berlin, Germany)

Received 14 October 1998, revised manuscript received 19 November 1998

Abstract Sidewall quantum wire (QWRs) structures and three-dimensional arrays are introduced in this work. The sidewall QWRs were formed during molecular beam epitaxy (MBE) growth on GaAs (311)A substrates patterned with stripes along $\{01-1\}$ directions due to selectivity of the growth. Three-dimensional arrays of quantum wires structures were grown on the GaAs (311)A substrates patterned with 500-nm pitch gratings. The cathodoluminescence (CL) spectra at 5K show that the dominated CL emission corresponds to the quantum wires and a very weak emission from the connecting quantum wells due to localization of excitons at random interface fluctuations. Only the strong emission from the quantum wires can be observed when the carriers in the quantum well become delocalized at higher temperature up from 85K to 300K, indicating perfect carrier capture into the quantum wires. Very high lateral confinement energy of 220 meV is achieved in this quantum wire arrays. Thus, device quality of this quantum wire structure is proved.

PACC: 7340L, 8115G, 7855

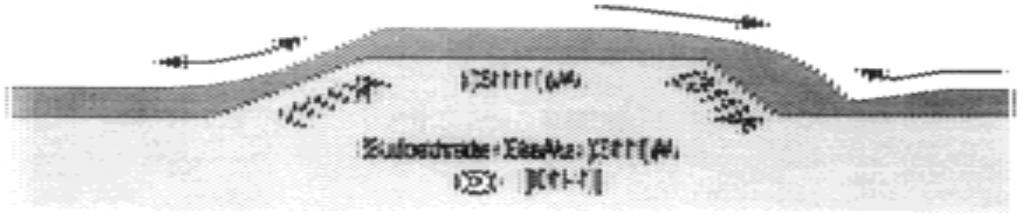


图 1 侧墙量子线生长示意图
{311}A 侧面为快速生长面, {111}A 面为慢速生长面

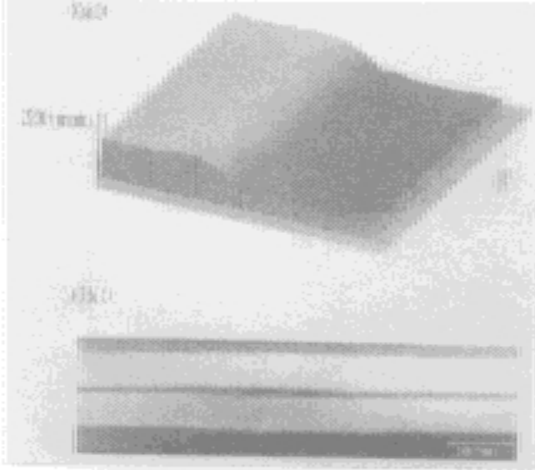


图 2 侧墙量子线外延形貌的 AFM 像 (a)
及剖面结构的 TEM 像 (b)
图中黑色层为 GaAs

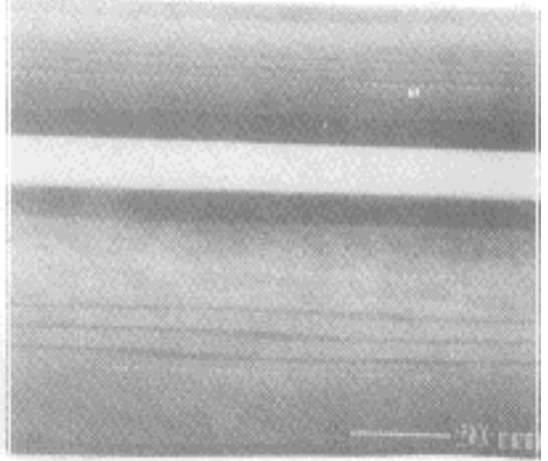


图 3 量子线阵列结构剖面 TEM 图象
图中黑色层为 GaAs 量子阱层,
侧墙量子线结构由白色虚线框标出

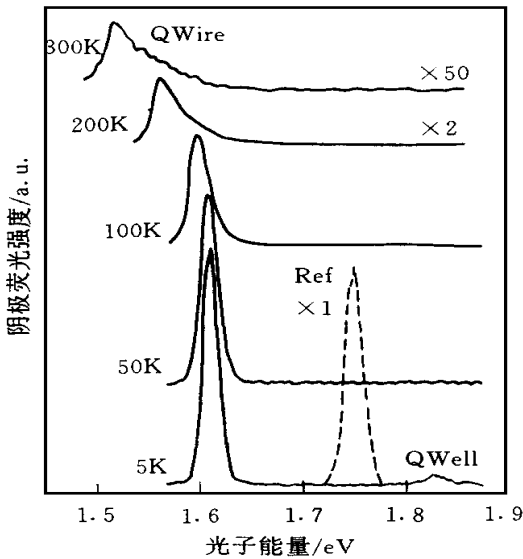


图 4 量子线阴极荧光光谱随温度 (5~ 300K) 的变化
图中虚线为平面衬底上同步生长的量子阱 5K 发光谱

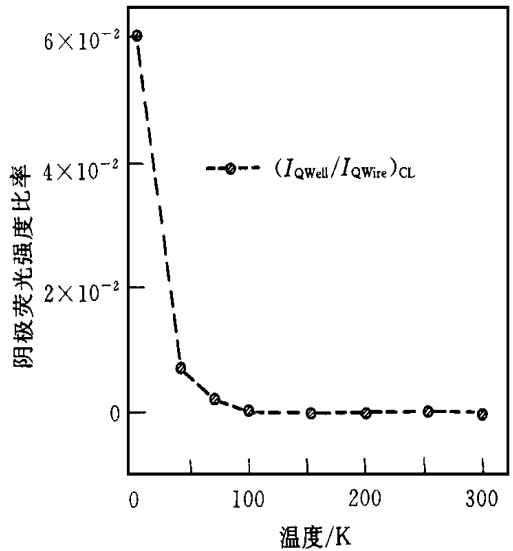


图 5 两侧量子阱发光峰值强度与侧墙量子线
发光峰值强度的比率随温度的变化关系