

用 MBE 在非平面衬底上生长的掩埋脊形多量子线列阵*

钱 毅 徐俊英 徐遵图 张敬明
肖建伟 陈良惠 王启明

集成光电子学国家重点联合实验室,中国科学院半导体研究所,北京 100083

周小川 蒋 健 钟战天

中国科学院表面物理实验室,北京, 100080

(1992 年 12 月 9 日收到;1993 年 2 月 3 日收到修改稿)

本文在国际上首次报道,在用常规光刻技术和化学腐蚀技术制备的非平面 GaAs 衬底上,利用一次分子束外延技术研制成功掩埋脊形 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子线列阵结构。电镜及常规光致发光和微区光致发光测量给出了二维量子限制的证据,理论分析和数值计算也表明了横向载流子限制的有效尺寸是在量子尺寸范围之内。

PACC: 7320, 7340L, 7865, 6116D

近年来,量子线(QWW)及量子点(QWD)结构及器件的研究已经受到了广泛的重视。由于其态密度的变化,用 QWW 和 QWD 结构做成的器件预计可以得到比一般量子阱(QW)器件更为优越的特性^[1]。为了实现 QWW, 比较直接的做法是在量子阱材料上直接刻蚀出“线”来,但这常常会在量子线的界面产生大量缺陷,从而大大降低其量子效率。为了避免这种情况,可以采用在超高真空情况下原位(*in situ*)外延技术一次制备成掩埋型的量子线结构。目前,利用这种技术有在倾斜衬底上生长^[2]和在非平面衬底上生长^[3]两种方式。在非平面衬底上生长量子线的工作在国际上已取得一定进展,其中已有用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术制成新月型量子线激光器^[4]。分子束外延(MBE)在非平面衬底上生长的量子线仅有生长结构的报道^[5],但采用了全息光刻等复杂工艺,而且刻蚀后的沟槽很小(宽约为 200nm,深约为 100nm),不利于器件制作。我们在此报道,在用常规光刻和化学腐蚀技术制备的 GaAs 非平面衬底上,用一次 MBE 外延技术制成掩埋脊形 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子线列阵。这种技术和结构的特点一是衬底制备技术较简便且目前已较成熟,二是图形尺寸相对较大,达几微米,有利于具有多层结构的器件制作。据我们所知,具有这些特点的 MBE 生长的脊形 GaAs/AlGaAs 多量子线列阵结构在国际上尚属首次报道。

* 国家自然科学基金资助项目。

脊形量子线样品是由 MBE 生长在(100)GaAs 非平面衬底上的,用常规光刻和湿法化学腐蚀技术在(100)GaAs 衬底上沿[01 $\bar{1}$]方向刻出以四个沟,三个台为一组的周期性列阵结构,腐蚀液为 H₂SO₄ : H₂O₂(30%) : H₂O(体积比为 1 : 8 : 40). 样品在进行 MBE 生长之前进行常规处理,包括在体积比为 5 : 1 : 1 的上述腐蚀液和在 HCl 中分别腐蚀 45 秒和 30 秒. 最后,样品脱水吹干.

MBE 生长时衬底温度为 600℃,并且衬底旋转. 一次生长出的外延层沿生长方向依次为 20 个周期的 20 Å GaAs/20 Å Al_{0.3}Ga_{0.7}As 超晶格缓冲层, 0.5 μm GaAs 层, 10 个周期的 55 Å GaAs/150 Å Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的量子阱层, 最后是一个 200 Å 的 GaAs 顶盖层.

值得注意的是脊形量子线样品中图形的尺寸,如图 1(a)所示的(01 $\bar{1}$)横断面(见图版 I),以(111)面和(1 $\bar{1}\bar{1}$)面为两边的沟以及以(311)面和(3 $\bar{1}\bar{1}$)面为两边的台顶的宽度分别为约 2.5 μm 和 2 μm, 沟底与台顶之间的距离为 2 μm. 每一组列阵总宽为 22 μm, 列阵间为平面部分, 宽约 80 μm. 另外需要强调的是量子线形成在列阵的台的脊形顶尖部,而不是在沟底,这将在后面得到证明.

生长后的样品的表面是非平面的并且图形尺寸较小,这给光学检测带来了困难. 为此,除了电镜和常规的光致发光测量外,我们还利用微区光致发光测量技术. 在光致发光测量中,激发光(波长 5145 Å)由 Ar⁺激光器中出射经光学系统照在样品上,其偏振方向与线的方向平行. 在常规测量中一般照在样品上的光斑直径大于 1 mm, 所以样品上列阵的沟内,台上以及平面上的结构很难被分辨开来. 然而,在微区光致发光测量中,激发光经过显微光学系统被聚焦在样品上,其光斑直径可达 2 μm. 这样高的分辨率足以使列阵的沟内、台上以及平面上的结构在测量中分开来,从而可以确认各自相应的光致发光峰位置. 电镜测量包括扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM). 这些测量不仅给出了图形的面貌,而且给出了量子阱层的厚度变化,由这些数据可以经过计算来拟合光学测量值.

图 1(a)的 SEM 照片表明,生长前后其横断面图形有所变化. 最明显的就是沟的尖底被填平出现新的(100)面(B),而台顶的(100)面逐渐变窄乃至消失,最后呈现出尖的脊形顶(A). 另外,(311)面和(3 $\bar{1}\bar{1}$)面(C)在生长前与各邻面的交界比较圆滑,而生长后则变得尖突.

脊形量子线产生在列阵的台尖顶处. 由图 1(b)可发现在横向(x 方向)量子阱层厚度的变化(见图版 I). 其中, GaAs 层厚度变化为 A 处 58 Å, C 处 42 Å, (111)面上 27 Å, B 处 60 Å, 而平面 D 处为 55 Å; Al_{0.3}Ga_{0.7}As 层厚度变化则分别为 A 处 153 Å, C 处 121 Å, (111)面上 91 Å, B 处 158 Å, 最后 D 处为 155 Å. 这种量子阱层的横向厚度变化与晶体生长过程中原子互相聚结成晶面的过程以及原子在各个不同的晶面上的表面迁移过程有关,由此引起了有效能带的横向调制,从而除了纵向(z 方向)的量子化限制,载流子还受到沿 x 方向的横向限制. 当这种横向限制区域的有效尺寸达到了量子尺寸时,这种横向限制也就变成了量子化限制,这样就实现了量子线. 这种情况发生在台的脊形尖顶处. 然而,沟底在生长过程中由尖变平,使得横向限制的有效尺寸过大,难以达到量子限制. 需要注意的是,在生长过程中, Ga 原子比 Al 原子更易于在表面发生迁移,所以不同晶面上 AlGaAs 层的 Al 组分可能会有变化. 但由于我们的生长温度较低,所以原子的表面迁移效应并不明显,对量子阱和量子线的光学特性产生的影响极小. 故在后面的讨论中,我们

忽略这种微小变化.

图 2 显示的是在 77K 下微区光致发光谱. 其中 $11H_A$ 、 $11H_B$ 、 $11H_C$ 分别代表 A、B、C 处量子阱第一子能级电子-重空穴跃迁能量位置, $11L_B$ 代表 B 处量子阱第一子能级电子-轻空穴跃迁能量位置. 虚线(a)是当激发光被聚焦在 B 处时在 B 处的量子阱层的发光谱. 激发光也会照在(111)面和($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)面上, 但其量子阱层都没有发光, 因为它们的能级位置要比 B 处的高得多, 被激发的光生载流子都热化(thermalization)^[6]并弛豫至 B 处, 参与 B 处的发光. 当激发光被聚焦在 A 处时, 就得到了如实线(b)所示的发光谱. 由于(311)面和($\bar{3}\bar{1}\bar{1}$)面与 A 处近邻且与(100)面偏角较小, 照射其上的激发光仍然很强, 所以在 C 处产生的光生载流子除了热化弛豫至 A 处也会在自己原有的能级上发生光跃迁. 同时出现的 B 处发光是由于也有一部分的激发光照在 B 上了.

在图 2 中我们还可以发现, C 处的量子阱对应的发光峰能量位置比 A 处的高. 正是由于这一能量差在 A 的两边形成一个能量势垒, 使得处于阱内的 A 处的原来的量子阱的能级升高, 也即蓝移. 这在图 3 中得到了证实. 在图 3 的 110K 下的常规光致发光谱中, 可以发现对应 A、B、D 处的发光峰, $11H_A$ 相对于 $11H_B$ 发生了 13meV 的蓝移, 尽管 A 处的量子阱层(58 Å)要比 D 处的(55 Å)厚. 这说明在 A 处发生了横向载流子限制效应, 从而产生了量子线. 虽然量子线的量子效率较量子阱的高, 但在本样品中 A 处量子线发光区域却比 B 处的量子阱的要小得多. 当 A 处的激发强度增加时, 其发光强度上升, 正如图 2(b)所示的情况. 从图 3 中还可以发现, $11H_B$ 相对于 $11H_D$ 发生了红移, 这是由于生长过程中发生的量子阱层厚度的横向变化, 使得 B 处量子阱层比 D 处的厚.

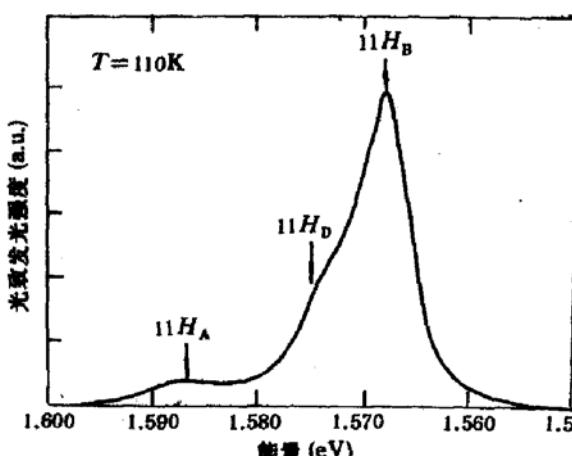


图 3 110K 下常规光致发光谱

为了进一步证实 A 处脊形量子线的存在, 我们计算了 A 处横向载流子限制效应的有效尺寸. 考虑到不同晶面上重空穴有效质量的不同^[7], 利用 Kronig-penny 模型进行计算发现, 在 300K 时 58 Å 的 GaAs 层量子阱(正是由图 1 中所测的 A 处量子阱层的厚度)相对应的 $11H_A$ 应位于 1.495eV 处, 而根据实际所测 $11H_A$ 在 77K 时为 1.595eV, 在 110K 时为 1.586eV, 由此可推算得到在 300K 时 $11H_A$ 实际位置为 1.513eV, 也就是说存在 17meV 的蓝移. 如前所述, 这种蓝

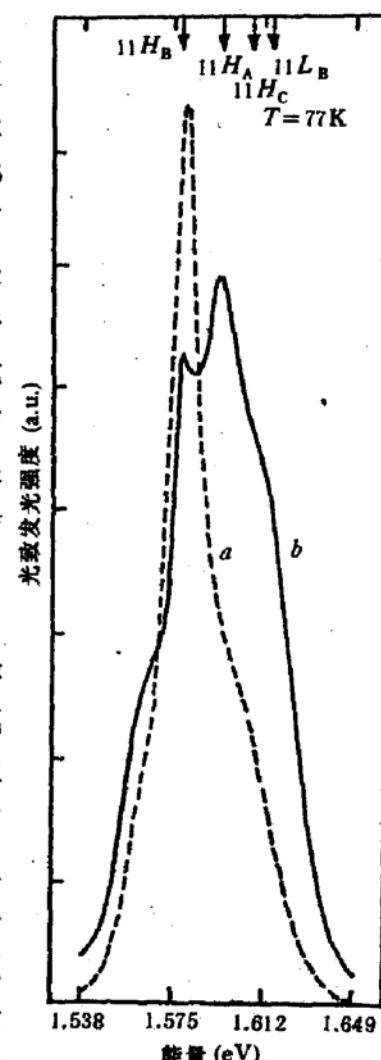


图 2 77K 下微区光致发光谱
(a) 激发光聚焦在 B 处时得到的光谱 (b) 激发光聚焦在 A 处时得到的光谱

移是由于 C 处量子阱层在 A 两边形成的能力势垒所产生的横向载流子限制所造成的,这个势垒为 37meV。理论计算表明,在这种 37meV 的势垒下,要使 $11H_A$ 产生 17meV 的蓝移,其有效限制尺寸约为 100 Å。可见 A 处的载流子已在横向(x 方向)被限制在量子尺寸范围内了。所以说,理论计算也证明了 A 处量子线的存在。需要说明的是,其它实测的发光峰能量位置也都与计算结果吻合得较好。图 3 中 $11H_B$ 相对于 $11H_D$ 发生的红移是由于 B 处量子阱层比 D 处的厚所造成的,B 处并没有形成量子线。

我们在非平面 GaAs 衬底上研制成功掩埋脊形多量子线列阵结构,并且从电镜和光学测量以及理论计算中得到了证实。这种非平面的结构中衬底图形尺寸较大(达几个微米),有利于制作具有多层结构的激光器、波导、探测器等多种器件。

致谢:感谢李国华,刘振先等同志的支持。

参 考 文 献

- [1] 陈良惠、钱毅,半导体超晶格/量子阱物理与光电子器件讲习班教程,广州,1991 年 1 月。
- [2] M. S. Miller, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**(23), 3464(1992).
- [3] E. Kapon, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 347(1987).
- [4] S. Simphony, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2225(1991).
- [5] Keisuke Kojima, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **56**(2), 154(1990).
- [6] M. A. Herman, et al., *J. Appl. Phys.*, **70**, R1(1991).
- [7] Jian-Bai Xia, *Phys. Rev.*, **B43**, 9856(1991).

Buried Ridge-Multi-Quantum-Wire Arrays on Nonplanar Substrates Grown by MBE

Qian Yi, Xu Junying, Xu Zuntu, Zhang Jingming

Xiao Jianwei, Chen Lianghui and Wang Qiming

NIOEL Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083

Zhou Xiaochuan, Jiang Jian and Zhong Zhan Tian

National Laboratory for Surface Physics, Academia Sinica, Beijing 100080

(Received 9 December 1992; revised manuscript received 3 February 1993)

Abstract

The buried GaAs/AlGaAs ridge-multi-quantum-wire arrays were grown for the first time by *in situ* one-step MBE technique on GaAs substrates processed by conventional photolithography and wet chemical etching. Electron microscopy, conventional photoluminescence and confocal photoluminescence were performed and gave the evidence of 2-dimensional quantum-confinement. Theoretical analyses and calculations also demonstrated that the effective dimension of the lateral carrier confinement reached quantum size.

PACC: 7320, 7340L, 7865, 6116D