

用 MOCVD 在非平面衬底上生长的 量子阱、量子线及其光学性质*

钱毅^a 郑婉华^b 郑联喜^{a,b} 张霞^{a,b}

胡雄伟^{a,b} 陈良惠^a 王启明^{a,b}

(^a 中国科学院半导体所 北京 100083)

(^b 国家光电子工艺中心 北京 100083)

摘要 本文报道在 650℃ 的衬底温度下实现了 MOCVD 在(100)面和(111)面上生长 GaAs 与 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 的不同的选择性。这一衬底温度比国际上以前报道的要低,对制作适于光电器件的 GaAs/AlGaAs 量子阱层比较有利。用此技术,在 GaAs 非平面衬底上生长了 GaAs/ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱,并用扫描电镜、低温光致发光谱以及偏振激发的光反射率谱技术进行了研究。结果不仅证明了 MOCVD 外延生长 GaAs 和 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 的独特选择性,也证明了在 V 字形沟槽底形成了量子线。

PACC: 6855, 7865, 7320

利用分子束外延(MBE)和金属有机化学气相淀积(MOCVD)在非平面衬底上生长量子阱的技术已在光电器件制备中受到了广泛的重视^[1]。在外延生长过程中,非平面衬底的不同晶面上的量子阱外延层厚度各不相同,从而可以实现量子阱激子能级的横向变化并由此产生横向载流子限制效应^[2]。这种技术是在超高真空情况下原位(in situ)外延,因而外延层的界面缺陷少,而且量子阱外延层的图形特性可以通过在外延生长之前在非平面衬底上事先设计出合适的图形来实现。另外,这种技术工艺简单、兼容性强,有利于器件的集成^[3-5]。

MOCVD 在非平面衬底上的外延技术具有一个目前在 MBE 上尚未发现的特性,即当衬底温度达到某一合适的特征温度时, MOCVD 在(100)面和(111)面上外延 GaAs 和 AlGaAs 的选择性可以实现反转。当衬底温度小于这一特征温度时, GaAs 和 AlGaAs 在(111)面上都比在(100)面上长得快;当衬底温度达到这一特征温度时, AlGaAs 在(111)面上仍比在(100)面上长得快,但 GaAs 则相反,即在(100)面上比在(111)面上长得快。利用 MOCVD 的这种特性,已研制出了低阈值量子阱激光器^[3],新月型(crescent-shape)量子线及量子线激光器^[6]。目前国际上报道的这一衬底特征温度是 750℃^[3,4]。这样高的温度对提高外延层的表面(或界面)平整度很有利,但对于提高外延层的纯度却不

* 国家自然科学基金资助项目

本文 1993 年 10 月 5 日收到,修改稿 1993 年 11 月 16 日收到

太有利,显得偏高.在制作如激光器等的光电器件中,常常需要制作非故意掺杂的 GaAs/AlGaAs 量子阱层(如量子阱激光器的有源区),这既要求有好的界面平整度,也要求有较高的纯度.作为一种综合考虑,适当降低这一衬底特征温度对制作量子线光电器件是十分有利的.

本文报道在 650°C 的衬底温度下实现了 MOCVD 在(100)面和(111)面上生长外延 GaAs 与 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 的不同的选择性.用此技术,在刻有不同尺寸的沟槽结构的 GaAs 衬底上生长了 GaAs/ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱,并用扫描电镜、低温光致发光谱及偏振激发的光反射率谱技术进行了研究.结果不仅证明了 MOCVD 外延生长 GaAs 和 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 的独特选择性,也证明了在 V 字形沟槽底形成了量子线.其中,利用偏振激发的光反射率谱技术研究非平面衬底上的量子线的报道尚属少见.

GaAs(100)衬底首先沿 $[01\bar{1}]$ 方向刻出沟槽^[7,8].#1 样品沟是倒梯形的,顶宽约 8 μm ,底宽约 3 μm ;#2 样品沟底是尖的,呈 V 字形,沟顶宽约为 10 μm .#1 和 #2 样品的沟间距都是 100 μm .两个样品的沟都是以(111)面和 $(1\bar{1}\bar{1})$ 面为侧边的.#3 样品是平面衬底的.三块样品同时生长,生长时衬底温度为 650°C,外延层的结构如下:先生长 100 Å GaAs 层和 5 个周期的 100 Å GaAs/100 Å $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 超晶格缓冲层,接着依次是 2 μm $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, 100 Å GaAs, 300 Å $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, 75 Å GaAs, 300 Å $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, 50 Å GaAs, 0.1 μm $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, 最后是 200 Å 的 GaAs 顶盖层.

MOCVD 外延的选择性与衬底温度、材料组分、衬底上图形尺寸及形状等因素都密切相关^[3].这种选择性主要是因为不同晶面上处于不断分解和反应状态的源分子的扩散长度不同,分子在那些有利的晶面上优先找到晶格位置.为了了解 GaAs 和 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 在不同晶面上的生长特性,我们先在与 #1、#2、#3 样品同样的条件下作了在刻有同样倒梯形和 V 字形沟槽的 GaAs 衬底上仅生长 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 层和 GaAs 层的实验,结果表明,在此条件下, $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 在沟内(111)面上的生长速率高于(100)面,而 GaAs 则刚好相反,即 GaAs 在沟内(100)面上的生长速率高于(111)面,并且 GaAs 的这种在(100)面和(111)面上生长速率的差异在 V 字形沟槽底比在倒梯形沟槽底表现得更为明显,并将 V 字形尖底填平形成新月型.另外,沟外平台上的外延层一般要比倒梯形沟底的厚,但对于 V 字形尖底的 GaAs 层则不一定会如此.在我们的水平式 MOCVD 生长室中,气流是沿水平方向的,平台对沟内起到了一定的遮蔽作用,另外沟外平台尺寸比较大,这使得沟外平台在接受源分子时比沟内更有利;但在 V 字形沟底, GaAs 层比倒梯形沟底的 GaAs 层堆积结晶得更快并形成新月型,从而可能会抵消上述生长中沟的不利因素.需要强调的是此时衬底温度是 650°C.图 1(a),(b)(见图版 1)分别是扫描电镜显示的 #1 和 #2 样品的 $(01\bar{1})$ 横断面.由于外延层中 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 的总厚度大于 GaAs,所以 #1 样品的底边比外延前窄,而 #2 样品仍然保持 V 字尖形.

光致发光谱测量是在 10K 下进行的,激发光(波长为 5145 Å)由 Ar^+ 激光器中出射并经光学系统聚焦在样品上,其偏振方向与沟槽方向平行.光致发光谱如图 2 所示,其中 A、B、C 分别对应 50 Å、75 Å、100 Å 的 GaAs 量子阱层,1、2、3 分别对应于 #1、#2、#3 样品的量子阱光致发光峰位置,也就是相应的量子阱第一子能级电子-重空穴跃迁能量位置.#1 和 #2 中(111)面的量子阱不发光,这是由于(111)面上的 GaAs 量子阱层要比沟底的薄,

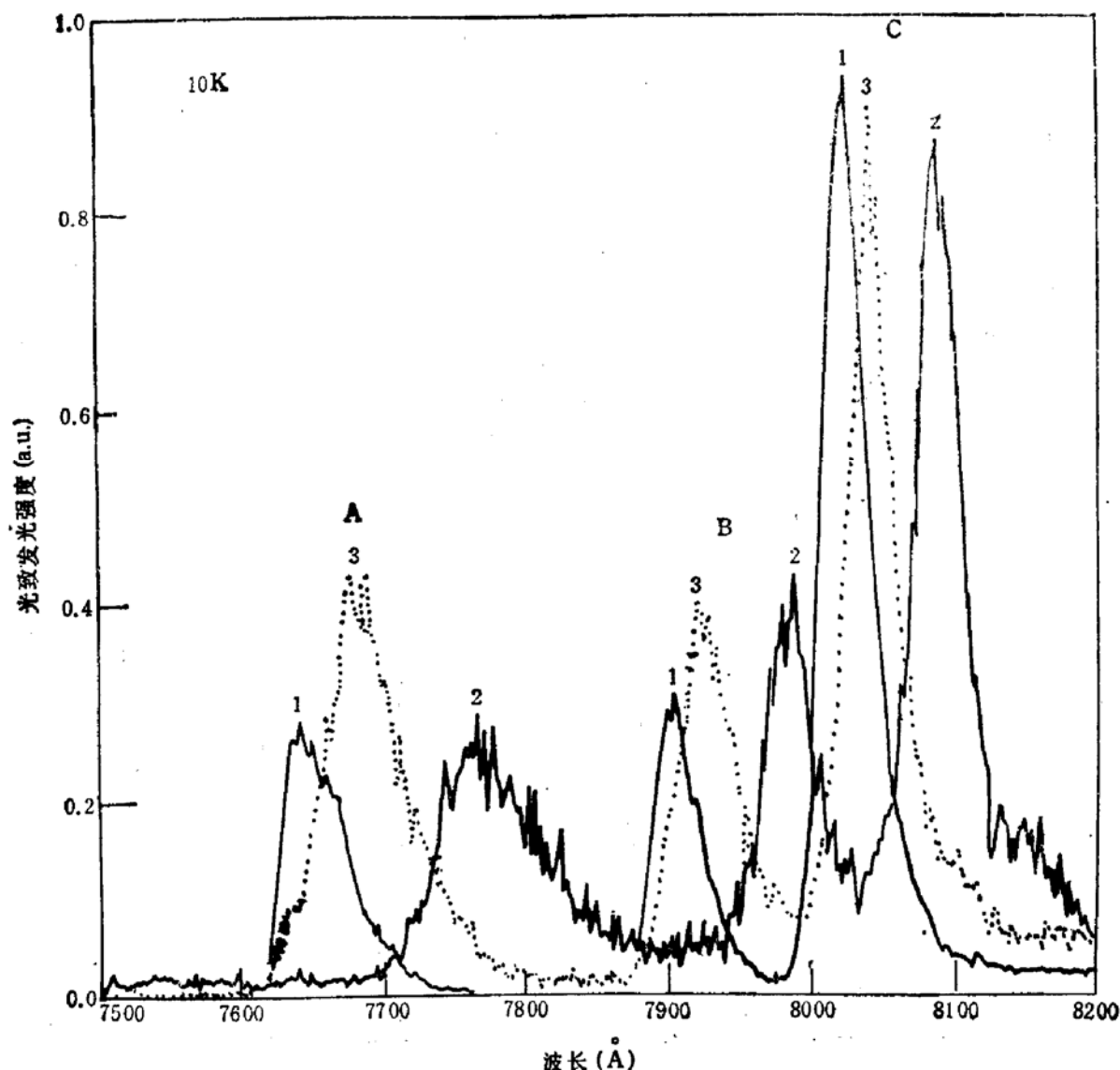


图2 10K下#1、#2和#3样品的光致发光谱

对应的能级位置高些,从而使得(111)面上的光生载流子热离化并弛豫至沟底参予此处量子阱层的发光^[9]。#1中沟底(100)面相对于#3,光致发光峰能量位置发生了蓝移,说明#1的沟底的量子阱比#3的要薄,而#3样品上各外延层厚度与#1的沟外的平台平面部分是相同的。这一点与前述结果一致。

对于象#2样品的V字形沟槽结构,由于GaAs和 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 在(100)面和(111)面上的外延的选择性刚好相反,而且作为势垒层的 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 总比作为量子阱层的GaAs厚,这样,在每一次GaAs层将尖的沟底填平之后, $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 可以将其恢复成V字尖顶形。这样就可以重复形成新月型结构^[4]。因为此时沟内(111)面上GaAs量子阱层比(100)面上的要薄得多,因而(111)面上GaAs量子阱能级位置要比(100)面上的高,从而在沟内(100)面GaAs量子阱层的两侧形成了一个横向能量势垒。如若这个势垒的横向有效作用尺寸在量子尺寸范围之内,那就可以增加一维横向的量子限制,从而形成量子线。从生长的角度来说,是否能实现量子线的关键是重复生长中沟底的V字尖形是否能恢复得好。在图2中,#2与#3相比,光致发光峰能量位置发生红移,说明#2的V字形

沟底的 GaAs 量子阱层形成了新月型并且较 #3 的 GaAs 层厚。

为了进一步证明 #2 样品的 V 字形沟底实现了量子线, 我们研究了 #2 样品的室温下偏振光激发的光反射率谱, 如图 3 所示。入射光是由 Ar^+ 激光器泵浦的可调谐染料激光器中出射的线偏振光, 被近似垂直地(入射角小于 10°)聚焦在 #2 样品的 (100) 面。当入射光偏振方向在衬底平面 (100) 面上分别平行于 (a) 和垂直于 (b) 沟的中心轴线 $[101\bar{1}]$ 方向时, 图 3 所示的反射率谱中对应 A 即 50Å 的 GaAs 层的结构显示出明显的各向异性, 而对应体材料以及 75Å 的 GaAs (B) 和 100Å 的 GaAs (C) 则未观察到这种反射率的各向异性。图 3 中的 A、B、C、2、3 的定义与图 2 中的相同, 并根据图 2 定出其相应的能量位置。

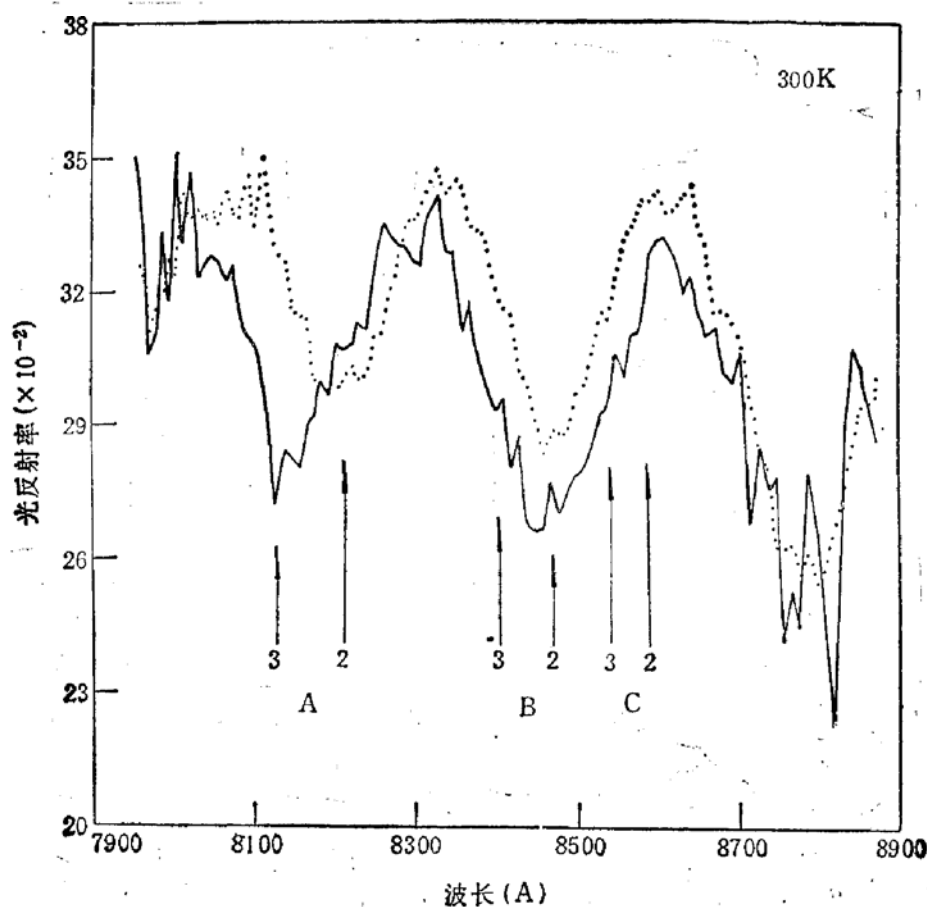


图 3 #2 样品的室温偏振光激发的光反射率谱
a, b 分别为激发光偏振方向在衬底平面 (100) 面上平行于和垂直于沟的中心轴线 $[101\bar{1}]$ 方向时所得的曲线

图 3 中对应 50Å 的这种在偏振光激发时光反射率的各向异性主要是由于 #2 样品的 V 字形沟槽底的 50Å 的 GaAs 量子阱层受到了横向的量子限制进而形成了量子线所造成的。在平行情况 a 时, 量子线重空穴吸收占主导地位, 对应重空穴能级位置的反射率较轻空穴的低; 相反, 在垂直情况 b 时, 量子线轻空穴的吸收占主导地位, 对应重空穴能级位置的反射率较轻空穴的高^[10], 由此而产生了光反射率的各向异性。体材料和一般的量子阱在 a 和 b 两种情况下不存在这种光吸收情况的不同, 因而也就不会产生这种光反射率的各向异性。图 3 中对应 75Å (B) 和 100Å (C) 的 GaAs 层的结构未发现这种各向异性,

可能是由于在生长 75 Å 和 100 Å 的 GaAs 层以及相应的 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 势垒层时 V 字尖形恢复得不够好,因而与之对应的量子线效应不明显。图 3 中三个近似于等间距的结构,是由于外延层中顶盖层与另一层外延层间形成了 Fabry-Perot 腔的结果。由于多束光的相互干涉,使得满足某种频率条件的光对于 Fabry-Perot 腔面具有更高的透过率^[11],从而产生了光反射率的振荡。

综上所述,我们在 650°C 的衬底温度下实现了 MOCVD 在(100)面和(111)面上生长 GaAs 与 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 的不同的选择性,并用此技术在非平面 GaAs 衬底上生长了 GaAs/ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱,而且在 V 字形沟槽底形成了量子线。我们所得到的 650°C 的特征衬底温度比国际上以前报道的要低,更有利于制作适于光电器件的 GaAs/AlGaAs 量子阱层,从而可以进一步提高量子线光电器件的质量。提高量子线质量的另一方面即增强量子线效应,这需要优化 V 字形沟底量子阱形状及组分等的设计。这些对制备高质量的量子线光电器件具有极其重要的意义。

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] E. Kapon, M. C. Tamargo and D. M. Hwang, Appl. Phys. Lett., 1987, 50(6):347.
- [3] R. Bhat, E. Kapon, D. M. Hwang, M. A. Koza and C. P. Yun, J. Crystal Growth, 1988, 93: 850.
- [4] K. M. Dzurko, E. P. Menu, C. A. Bayler, J. S. Osinski and P. D. Dapkus, IEEE, J. Quantum Electron, 1989, 25(6): 1450.
- [5] Yi Qian, Lianghui Chen and Qiming Wang, Solid State Communications, 1993, 87(4): 285.
- [6] E. Kapon, M. Walther, J. Christen, M. Grundmann, C. Caneau, D. M. Hwang, E. Colas, R. Bhat, G. H. Song and D. Bimberg, Superlattices and Microstructures, 1992, 12:491.
- [7] Yi Qian, Jinming Zhang, Junying Xu, Jianwei Xiao, Lianghui Chen, Qiming Wang, Xiaochuan Zhou, Jian Jiang and Zhantian Zhong, Superlattices and Microstructures, 1993, 13(2): 241.
- [8] 钱毅,徐俊英,徐遵图,张敬明,肖建伟,陈良惠,王启明,周小川,蒋健,钟战天,半导体学报,1993, 14(7): 456.
- [9] M. A. Herman, D. Bimberg and J. Christen, J. Appl. Phys., 1991, 70:R1.
- [10] M. Asada, Y. Miyamoto and Y. Suematsu, Jpn. J. Appl. Phys., 1984, 24:L95.
- [11] 朱祖华,信息光电子学基础,杭州:浙江大学出版社,1990年7月。

Growth and Optical Properties of Quantum Wells and Quantum Wires by MOCVD on Nonplanar Substrates*

Qian Yi^a, Zheng Wanhua^a, Zheng Lianxi^{a,b}, Zhang Xia^{a,b}

Hu Xiongwei^{a,b}, Chen Lianghui^b and Wang Qiming^{a,b}

(^a*Institute of Semiconductors, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(^b*National Research Center for Optoelectronic Technology, Beijing 100083*)

Abstract Here reports the different epitaxial selectivity of GaAs and $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ grown by MOCVD on (100) and (111) plane at substrate temperature of 650°C. Such substrate temperature of 650°C is lower than that reported previously, and is more benefit for fabricating GaAs/AlGaAs quantum wells (QWs) epitaxial layers of optoelectronic devices. With this approach, GaAs/ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ QWs are grown on GaAs nonplanar substrates. Measurements of transmission electron micrograph, low-temperature photoluminescence and photo-reflectivity excited by polarized light are applied to study the samples. The result not only demonstrates the unique epitaxial selectivity of GaAs and $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ grown by MOCVD at 650°C, and also shows formation of quantum wires at the bottoms of V-grooves on the nonplanar substrates.

PACC: 6855, 7865, 7320

* Supported by The National Nature Science Foundation of China

Received 5 October 1993, revised manuscript received 16 November 1993