

基于 MBE 的 GaAlAs/GaAs 分布反馈式半导体激光器的制作新工艺*

罗毅 张盛忠 司伟民 陈镛 王健华

(清华大学电子工程系 集成光电子学国家重点实验室 北京 100084)

摘要 利用分子束外延 (MBE) 对 GaAlAs 和 GaAs 的选择性热蚀特性进行光栅上的二次外延生长, 既能获得清洁的外延界面, 又能精确控制光栅的形状. 采用这种方法, 我们在国际上首次成功地制作了完全 MBE 生长的内含吸收光栅的 GaAlAs/GaAs 多量子阱增益耦合型分布反馈式 (DFB) 半导体激光器. 并实现了激光器在室温下的脉冲激励, 器件表现出了 DFB 模式的单模工作特性.

EEACC: 0510D, 4320J

1 引言

分子束外延 (MBE) 是当今广泛用于化合物半导体光电子器件研制的重要技术之一, 它较液相外延 (LPE) 具有适应性广; 能够生长超薄层材料的优点, 较有机金属气相外延 (MOVPE) 具有安全、易控等优点. 尤其在我国 MBE 较 MOVPE 有更为广泛的应用. 我们在国内首先开展了采用 MBE 技术研制 GaAlAs/GaAs 分布反馈式 (DFB) 半导体激光器的工作.

GaAlAs/GaAs 增益耦合型 DFB 半导体激光器与传统的折射率耦合型 DFB 激光器相比, 有着诸如完全单纵模激励^[1-3]、高速调制下的极低啁啾^[4,5]等优点, 使其在光通信、光检测、光存储以及光子集成等领域有着广泛的应用前景.

GaAlAs/GaAs DFB 激光器制作的关键技术在于光栅上的二次外延, 而二次外延技术的核心又在于要同时获得清洁的界面和可控制的光栅形状. 已有采用 LPE^[6,7]、MOVPE^[8] 和 MBE^[9] 制作 GaAlAs/GaAs DFB 激光器的报道, 但是采用 MBE 进行 DFB 激光器二次外延的详细报道则几乎没有, 这是因为 MBE 极易受表面污染的影响, 因而用它进行光栅上的二次外延是很困难的.

此外, 国际上还未有过完全采用 MBE 制作 GaAlAs/GaAs 增益耦合型 DFB 激光器的报道. 本文中, 我们利用高温下 GaAlAs 和 GaAs 选择性热蚀的特点, 很方便地同时获得了清洁的二次外延生长界面和可控制的光栅形状, 并首次成功地制作了完全 MBE 生长的内含吸收性光栅的 GaAlAs/GaAs 多量子阱增益耦合型 DFB 激光器.

* 国家自然科学基金优秀中青年人才专项基金资助项目

1993年10月21日收到初稿, 1993年11月30日收到修改稿

作为预备实验,我们首先研究了非平面衬底上二次外延的特点。

2 非平面 GaAs 衬底上的外延

外延是在国产 FW-IV 型 MBE 上进行的, GaAs 的生长速率为 $1.0\mu\text{m/h}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($x = 0.44$) 生长速率为 $1.8\mu\text{m/h}$ 。

我们先在 n^+ -GaAs 衬底上制备出周期为 375nm 的三角形光栅,然后将衬底送入 MBE 生长室中交替生长了六组非掺杂的 GaAlAs($x = 0.44$, $0.2\mu\text{m}$) 和 GaAs ($0.2\mu\text{m}$) 层,生长温度为 580°C 。光栅的制作采用波长为 325nm 的 He-Cd 激光器为主的全息曝光系统曝光,然后用化学腐蚀方法,经 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 9:1:1$ 腐蚀液在 5°C 下刻蚀 4 秒,获得平行于 [011] 方向的三角形光栅。

经过摸索工艺条件,光栅上的外延获得了良好的表面状态。图 1 为外延片的断面扫描电镜照片(见图版 I)。该照片说明外延结晶质量良好。进一步的观察表明, GaAlAs 与 GaAs 在光栅上的生长表现出不同的趋势:当光栅上的外延层为 GaAlAs 时,光栅的形状保持完好;而当外延层为 GaAs 时,光栅很快就变得平坦了。此结果与 MOVPE 的实验结果有相同之处^[8]。利用此特性,有可能制作内含增益介质光栅的 DFB 激光器。

尽管取得了以上的一些结果,但我们发现在非平面衬底上特别是在 GaAlAs 光栅表面上,采用 MBE 进行二次外延生长远比用 MOVPE^[10] 困难,这是因为 MBE 的生长对表面污染更为敏感。为了解决这个问题,我们开发了一种新颖独特的二次外延技术,即利用高温下 GaAlAs 和 GaAs 选择性热蚀的特性,成功地实现了实际器件上的二次外延。

3 高温下 GaAs 和 GaAlAs 的选择性热蚀特性

早在 MBE 生长动力学研究的初期,人们就发现,高温下 GaAs 易于分解,As 将从 GaAs 表面脱附出来。而在 As_4 的气氛中,随着温度的提高, Ga 原子也将从 GaAs 表面脱附,这样的效果将起到热蚀 (Thermal Etching) 的作用,与此相反, GaAlAs 几乎不会发生这种热蚀现象。文献^[11]中采用这种对 GaAlAs 和 GaAs 的选择性热蚀特性来制造商用的 GaAlAs/GaAs 激光器。

为了研究 GaAlAs 和 GaAs 的热蚀特性,我们做了如下实验:

我们先用 MBE 在 GaAs 衬底上依次生长 GaAlAs($x = 0.21$, $1\mu\text{m}$) 和 GaAs($1\mu\text{m}$),然后溅射上一层 $0.27\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 作为掩模,刻蚀出条宽为 $30\mu\text{m}$ 的窗口,最后刻出深度分别为图 2(a) 和图 2(b) 的凹槽。

紧接着我们将 (a)、(b) 样品同时放入 MBE 生长室,在 As_4 的气氛中 (As 炉以外的源炉均关闭),衬底升温至 720°C ,维持 30 分钟后,降低衬底温度,取出样品。在显微镜下观察,发现 (a) 样品窗口内的表面光亮平整,与正常外延片表面无异;而 (b) 样品窗口内的表面粗糙。样品 (a) 和 (b) 热蚀后的结构分别如图 (c) 和 (d) 所示,台阶仪测量出 (c)、(d) 凹槽的深度分别为 $1.27\mu\text{m}$ 和 $1.14\mu\text{m}$ (含 SiO_2 厚度),对应原槽深分别为 $1.08\mu\text{m}$ 和 $0.38\mu\text{m}$,热蚀量分别为 $0.19\mu\text{m}$ 和 $0.76\mu\text{m}$ 。可见 (c) 已刻到了 GaAlAs 层,并且在

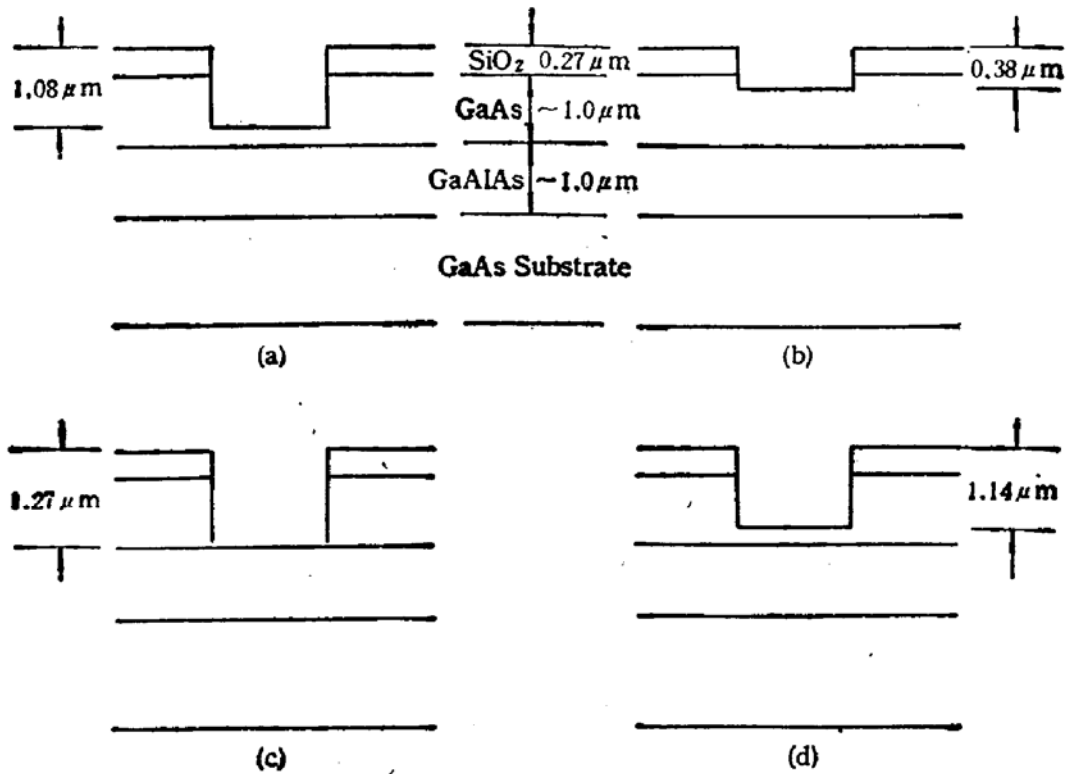


图2 用于热蚀实验的样品剖面结构

(a)、(b): 热蚀处理前的样品结构 (c)、(d): 分别为(a)、(b)经720℃热蚀30分钟后的结果

此温度下 GaAlAs 基本不蒸发。因此 GaAlAs 具有热蚀阻挡层 (Thermal Etching Stop Layer) 的作用, 此外, 正是因为有 GaAlAs 层的存在, 使得样品 (a) 在光学显微镜下呈现出良好的表面状态。这一点对器件研制是十分重要的。同时我们由 (b) 和 (d) 得到了 720℃ 下 GaAs 的蒸发速率约为 1.5 μm/h。

4 激光器结构与材料生长

图3为激光器的横向结构, 其中引入了导电型反转的吸收光栅^[12]。材料生长分四个步骤, 工艺流程如图4所示。一次外延生长了11层, 其中包括: n⁺-GaAs 缓冲层 (Si: $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 1.5 μm), n-GaAlAs/GaAs 超晶格缓冲层, n-GaAlAs ($x = 0.44$, Si: $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 1.2 μm) 下侧光阻挡层, 非掺杂 GaAlAs ($x = 0.21$, 0.15 μm) 下侧光导波层, 三量子阱有源层, 非掺杂 GaAlAs ($x = 0.21$, 0.15 μm) 上侧光导波层, p-GaAlAs ($x = 0.44$, Be: $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 0.15 μm) 载流子限制层, p-GaAlAs ($x = 0.21$, Be: $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 0.05 μm) 导波层, n⁺-GaAs (Si: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 0.05 μm) 吸收层, n⁺-GaAlAs ($x = 0.21$, Si: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 10 nm) 热蚀阻挡层和 n⁺-GaAs (Si: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 0.05 μm) 保护层。

一次外延后, 制作周期为 378 nm 的三角形吸收性光栅。

经常规清洗后的外延片放回 MBE 系统。在 As₄ 气氛中加热到 720℃, 持续 15 分钟后, n⁺-GaAs 保护层被热蚀掉, 而 n⁺-GaAs 吸收层由于有 n⁺-GaAlAs 热蚀阻挡层的保护而保持完好。同时光栅的厚度仅决定于一次外延, 而光栅的占空比是可以控制的^[13], 这样我们就能够同时获得清洁的生长界面和精确控制的光栅形状。在这之后, 在

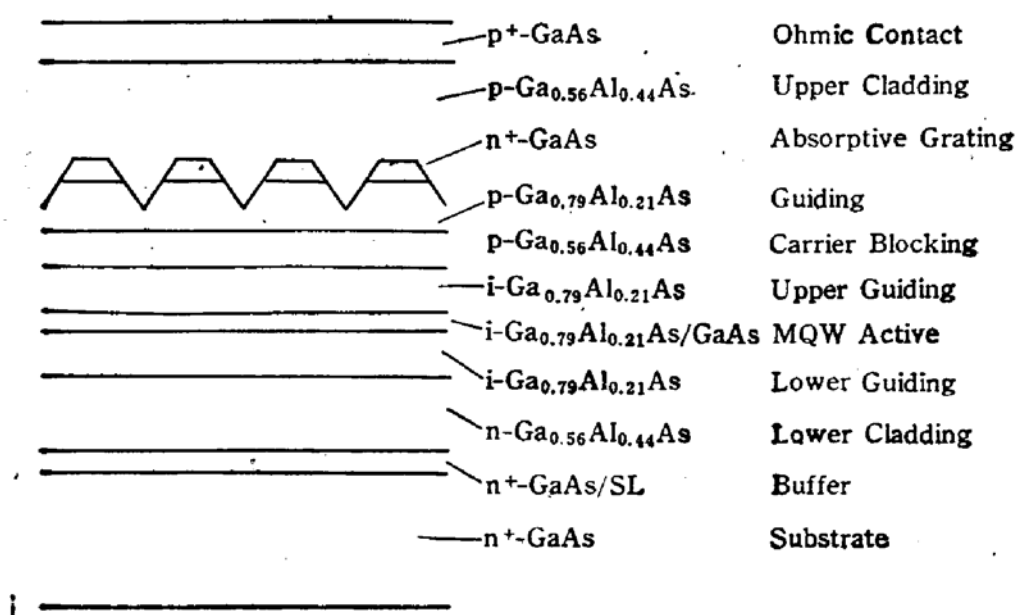


图3 激光器的横向结构

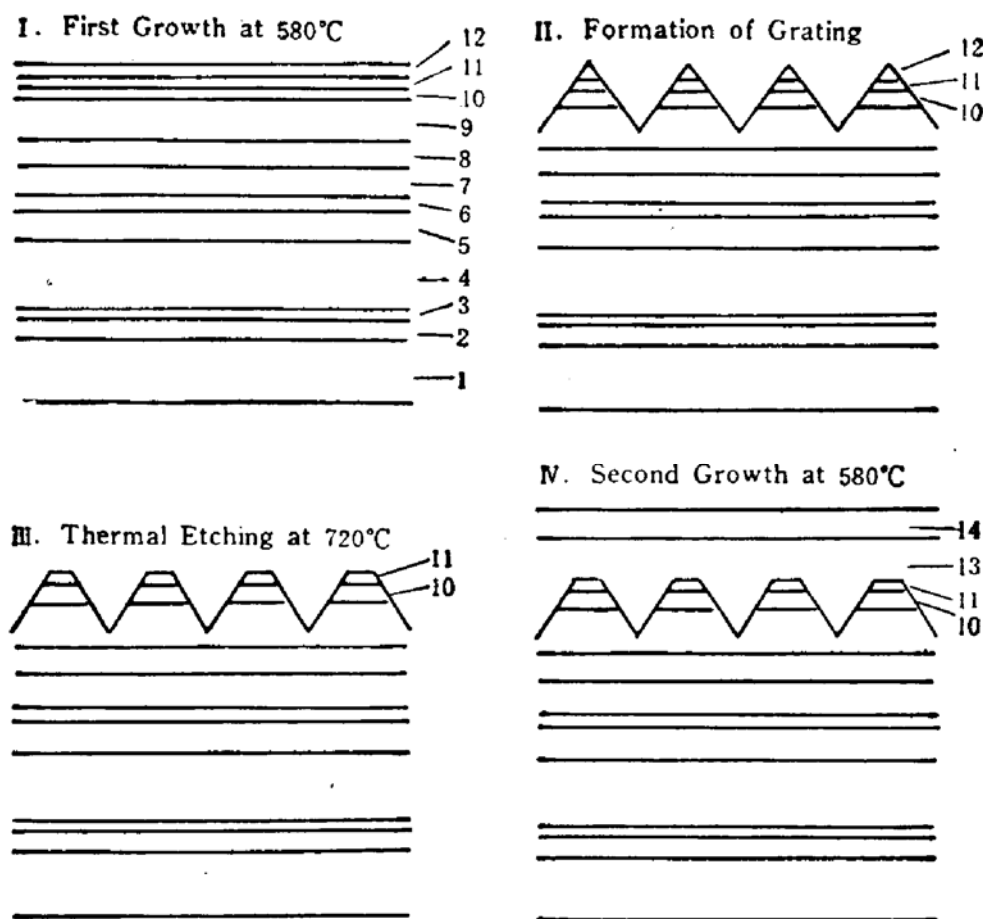


图4 激光器的材料生长工艺流程

图中的各层为:

- 1 GaAs 衬底 2 缓冲层 3 超晶格缓冲层 4 下侧光阻挡层 5 下侧光导波层 6 量子阱有源层
7 上侧光导波层 8 载流子限制层 9 导波层 10 吸收层 11 热蚀阻挡层 12 保护层 13 上侧光阻挡层 14 欧姆接触层

580°C 下继续生长 p-GaAlAs ($x = 0.44$, $\text{Be}; 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $1.2 \mu\text{m}$) 上侧光阻挡层和 p+-GaAs ($\text{Be}; 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $0.5 \mu\text{m}$) 欧姆接触层。

经热蚀处理后的外延片的表面状态较之未经处理的外延片有了很大的改善,并且与一次外延后的样品表面状态相同。图 5(a) 和图 5(b) 分别为未采用与采用上述新工艺进行二次外延所得外延片的断面扫描电镜照片(见图版 I)。未经热蚀处理的样品(a)在光栅处出现了周期性的孔洞,这是由于二次外延界面处的结晶质量不好,经 Stain Etching 处理后产生的。而经热蚀处理后的样品(b)则完全没有这样的问题。由此可见采用热蚀处理后的二次外延界面的结晶质量较未经热蚀处理的有了本质性的改善。

5 器件性能

将经上述热蚀处理的外延片制备成条宽为 $5-6\mu\text{m}$ 的氧化膜条形结构激光器。器件

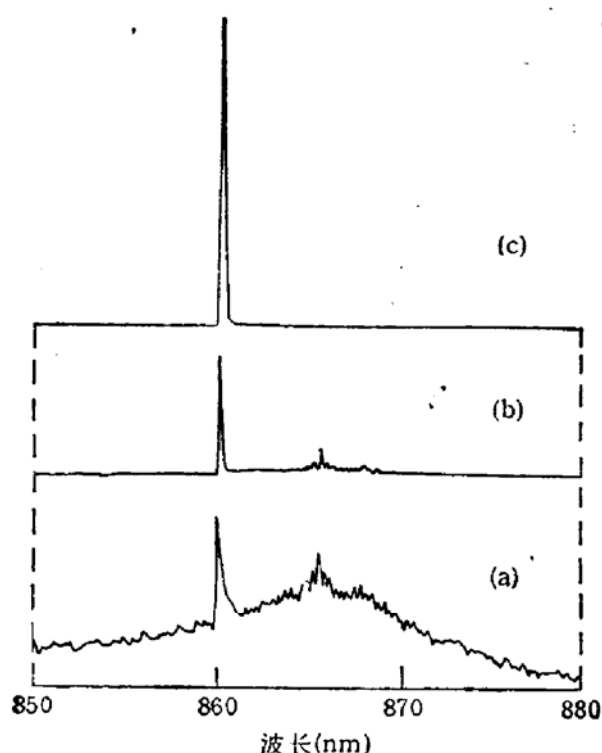


图 6 不同注入电流下的激光光谱
(a) $0.9I_{th}$ (b) I_{th} (c) $1.2I_{th}$

实现了室温脉冲激射。 $300\mu\text{m}$ 腔长的器件 20°C 下的阈值电流分布在 $200-700\text{mA}$ 的范围内。阈值电流偏高的原因主要是因为激光器采用氧化物电极条形构造,此外,一次外延的质量也有待提高。图 6 给出了同一器件在不同注入电流下的激射光谱。在注入电流约为 0.9 倍阈值时图 6(a),除增益峰处的 Fabry-Perot 模式外,偏离此峰值约 7nm 处的 DFB 模式得到了明显的加强,这是该模式比周围模式具有较大净增益的证据。当注入电流接近阈值时 DFB 模式开始激射图 6(b),激射波长约为 860nm 。并且当进一步加大注入电流时可得图 6(c) 所示的完全单模工作。单模工作的单端脉冲输出峰值功率至少不小于 20mW 。完全单模工作至少维持在 $0-80^\circ\text{C}$ 的范

围,且在此范围内没有跳模发生。激射波长随温度的变化约为 $0.07\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。这些特性表明我们采用新工艺制作的激光器工作在 DFB 模式上。

6 结论

GaAlAs/GaAsDFB 激光器的二次外延质量可以通过特殊设计光栅结构和热蚀处理而得到改进,这样既能获得清洁的外延界面,又能精确控制光栅的形状。采用这种方法,我们首次成功地制作了完全 MBE 生长的内含吸收性光栅的 GaAlAs/GaAs 多量子阱分布反馈式半导体激光器。器件在至少 0°C 到 80°C 的范围内始终保持单纵模激射。单模单端脉冲峰值功率超过 20mW 。

致谢 作者感谢学部委员周炳琨教授在推动本研究方面给予的关心和帮助以及国家光电子工艺中心的李力在光栅制作上给予的大力协作。感谢李德杰教授在部分器件制作工艺方面给予的大力支持和帮助以及彭吉虎教授、张克潜教授、江剑平教授给予的鼓励和支持。作者还特别感谢日本东京大学电子工学科多田邦雄教授、中野义昭副教授给以的指导。

参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik and C. V. Shank, *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**: 2327—2335.
- [2] Y. Luo *et al.*, Ext. Abst. of SSDM'88, pap. D-4-4, Tokyo, Japan, 1988, 327—330.
- [3] Y. Nakano *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**: 1606—1608.
- [4] Y. Luo *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 37—39.
- [5] C. E. Zah *et al.*, Tech. Dig. of OFC/IOOC'93, pap. TuM4, San Jose, CA, 1993, 61—62.
- [6] For example, M. Nakamura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**: 403—405.
- [7] Y. Nakano and K. Tada, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**: 2017—2033.
- [8] T. Ohata *et al.*, *J. Crystal Growth*, 1986, **77**: 637—642.
- [9] K. Kojima *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**: 570—572.
- [10] Y. Luo *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**: 1724—1731.
- [11] H. Tanaka *et al.*, *Japan. J. Appl. Phys.*, 1985, **24**: L89—L90.
- [12] Y. Luo *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**: 692—695.
- [13] H. L. Cao *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**: 1099—1102.

A Novel Fabrication Technique for GaAlAs/GaAs Distributed Feedback Lasers Based on Molecular Beam Epitaxy

Luo Yi, Zhang Shengzhong, Si Weimin, Chen Di and Wang Jianhua

(National Integrated Optoelectronics Laboratory, Department of Electronic
Engineering Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Molecular Beam Epitaxy (MBE) regrowth on corrugated surface is improved dramatically using a novel technique by which not only a clean surface can be obtained but also the shape of grating can be precisely controlled. A GaAlAs/GaAs multiquantum well gain-coupled distributed feedback (DFB) laser with an absorptive grating is grown all by MBE for the first time. DFB mode oscillation within a temperature range from 0°C to 80°C is achieved. Stable single longitudinal mode oscillation is maintained up to 20 mW.

EEACC: 0510D, 4320J