

# 完全 MBE 生长的内含吸收型光栅 GaAlAs/GaAs 多量子阱增益耦合型 分布反馈式半导体激光器

罗毅 司伟民 张盛忠 陈楠 王健华 蒲锐

(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** 我们首次完全采用 MBE 技术成功地制作了内含吸收型光栅的 GaAlAs/GaAs 量子阱增益耦合型分布反馈式半导体激光器。激光器在室温下的激射波长为 860nm, 单模单端输出光脉冲峰值功率超过 20mW。器件在至少 0℃到 80℃的范围内始终保持单纵模激射。作为初步结果, 条宽为 5~6μm 的氧化物条形结构器件的脉冲工作阈值电流约为 700mA。

EEACC: 43.20J, 05.10D

## 1 引言

分布反馈式 (DFB) 半导体激光器是大规模、长距离光纤通信中最重要的器件之一, 随着光电子技术的发展, 它在光信息处理、光测量等领域也越来越受到重视。DFB 激光器存在两种反馈机理, 即折射率耦合型和增益耦合型<sup>[1]</sup>。载流子和光导波分别限制结构的引入使折射率耦合型 DFB 半导体激光器进入实用, 并成为 DFB 半导体激光器的主流。但是, 折射率耦合型 DFB 激光器存在着光的传输阻止带 (stop band), 并在该阻止带两侧存在着具有相同阈值增益的两个最低模式<sup>[1]</sup>。因此折射率耦合型 DFB 激光器在原理上并不是单模工作的, 尤其在动态工作条件下这一问题更为突出。采用  $\lambda/4$  相移结构<sup>[2]</sup>、调制条宽结构<sup>[3]</sup>或高反/无反镀膜<sup>[4]</sup>能够克服模式简并, 提高单模成品率, 但其单模稳定性易受空间烧孔<sup>[5]</sup>和端面反射的影响<sup>[6]</sup>。

与此相反, 增益耦合型 DFB 激光器仅有一个阈值增益最低的模式位于 Bragg 波长上, 因而增益耦合型 DFB 激光器在本质上是真正单模工作的。即使对于增益耦合与折射率耦合的复合耦合型 DFB 激光器也能彻底消除模式简并, 实现单模工作<sup>[7]</sup>。

近年来基于对增益耦合型 DFB 半导体激光器的潜在优越性的认识, 国际上对该种激光器的研究越来越活跃。迄今为止, 将增益耦合机理引入 DFB 半导体激光器有两种方法, 一种是在激光器中制备一个增益介质光栅 (gain grating), 例如采用 OMVPE 技术在非平面衬底上生长的特点在活性层上制备光栅<sup>[8,9]</sup>; 另一种方法是在激光器的活性层附近引入一个吸收性损耗光栅 (loss grating), 使得激光器的净增益受到周期性调制<sup>[10]</sup>。

基于这两种方法实现的增益耦合型 DFB 半导体激光器比通常的折射率耦合型 DFB 激光器表现出高单模成品率<sup>[11,12]</sup>、高速动态调制下的极低啁啾<sup>[13,14]</sup>、单模超短脉冲发生能力<sup>[13]</sup>及外部反射光引起的噪声低<sup>[15]</sup>等优点,从而证明它将在光通信等领域扮演重要角色。

内含吸收型损耗光栅的增益耦合型 DFB 半导体激光器因其制作工艺不需特殊要求而越来越受到重视。国际上采用 OMVPE、LPE 和 CBE 方法研制成功了 GaAlAs 系, InGaAlAs 系和 InGaAsP 系材料的该类器件<sup>[10,14,16,17,18]</sup>。在本文中,我们在国际上首次成功地实现了完全采用 MBE 技术生长吸收型光栅 GaAlAs/GaAs 多量子阱增益耦合型 DFB 激光器结构,在国内首次成功地实现了增益耦合型 DFB 半导体激光器的室温脉冲激射。

## 2 器件结构与制作工艺

激光器的横向结构如图 1 所示。活性层采用多量子阱结构以进一步优化器件性能。

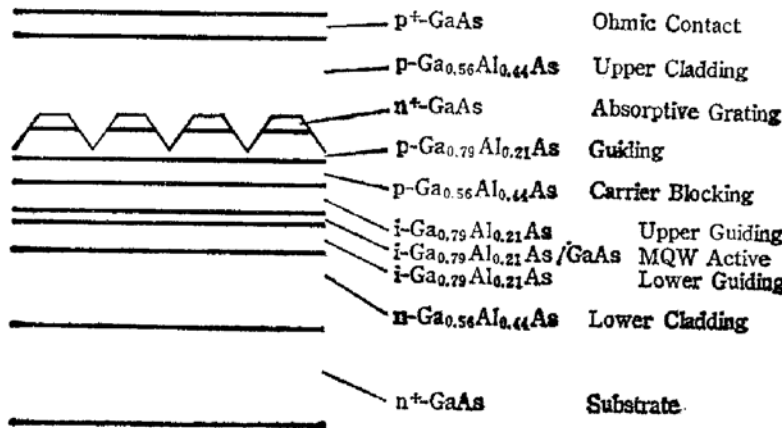


图 1 器件的横向结构

在活性层上侧引入吸收性损耗光栅,使激光器的纵向光场受到一个周期性损耗的调制,这等效为光场模式的净增益沿纵向受到周期性调制,从而将增益耦合机理引入激光器结构中。在本结构中将吸收性损耗光栅的导电型改变为与周围的 P 型相反的 n 型,具有进一步降低阈值并改善吸收饱和引起的非线性工作的作用<sup>[18]</sup>。反映

因周期性增益引起的光反馈强弱的参数——增益耦合系数直接与吸收光栅的材料吸收系数、光栅厚度等因素有关,为此我们计算了吸收层厚度与增益耦合系数的关系<sup>[19]</sup>。考虑到实际制作情况,我们仅计算了三级光栅。计算结果在图 2 中给出。当吸收层厚度大于 50nm 时,规一化的增益耦合系数将大于 0.8,这对于改善器件性能是足够大的了。另一方面,增加吸收光栅的厚度也将增加周期性损耗的直流分量,即增加平均模式损耗,进而增加器件的阈值电流。所以吸收光栅的厚度定为 50—80 nm。在上侧光导波层与吸收光栅之间引入了一个载流子限制层,以便有效地将注入载流子限制在活性层内。吸收光栅的下侧导入了一层折射率较大的外延层,即 Al 组分较低的层,它一方面起到一定的导波作

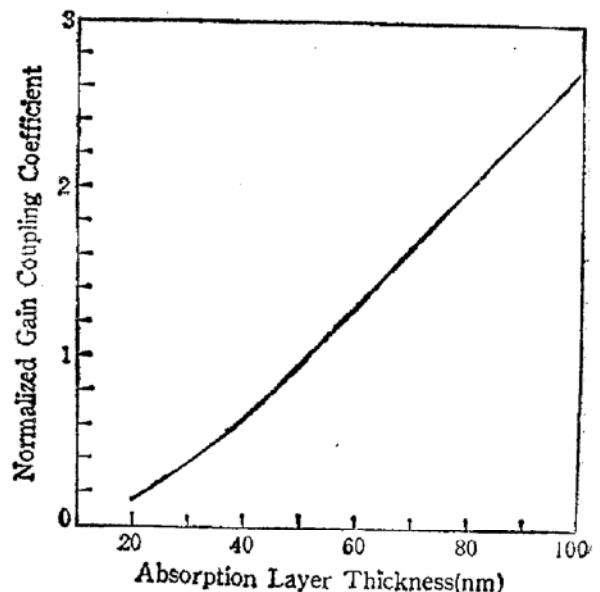


图 2 体材料吸收系数为  $5000\text{cm}^{-1}$  条件下的增益耦合系数与吸收层厚度的关系

用,用来增强光栅部分的影响,增大耦合系数,另一方面避免了制作光栅时因含高 Al 层暴露在空气中可能带来的氧化与污染。

在第一步 MBE 外延中,在 Si 掺杂 GaAs 衬底 ( $1\sim 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ) 上顺序生长 n-Ga<sub>0.56</sub>Al<sub>0.44</sub>As 下侧光阻挡层 ( $1.5\mu\text{m}$ ,  $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ), Ga<sub>0.79</sub>Al<sub>0.21</sub>As 下侧光导波层 ( $0.25\mu\text{m}$ , 非掺杂), Ga<sub>0.79</sub>Al<sub>0.21</sub>As/GaAs 三量子阱有源层(阱宽 10nm, 垒宽 12nm, 非掺杂), Ga<sub>0.79</sub>Al<sub>0.21</sub>As 上侧光导波层 ( $0.25\mu\text{m}$ , 非掺杂), p-Ga<sub>0.56</sub>Al<sub>0.44</sub>As 载流子阻挡层 ( $0.15\mu\text{m}$ ,  $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ), p-Ga<sub>0.76</sub>Al<sub>0.24</sub>As 光导波层 ( $0.05\mu\text{m}$ ,  $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ), n<sup>+</sup>-GaAs 吸收层 ( $0.05\mu\text{m}$ ,  $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )。

因为用常规方法在 GaAlAs/GaAs 系材料中,制作一级光栅是不可能的,而二级光栅制作的可控性又较差,所以我们采用了三级光栅,它在一定条件下也能获得足够大的耦合系数<sup>[18]</sup>。采用波长为 325 nm 的紫外激光器为主的全息曝光系统,制备了周期为 378 nm 的三级光栅。然后,用化学腐蚀方法,经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O = 9:1:1 腐蚀液在 5°C 下刻蚀 4 秒,获得了形状为三角形的吸收性损耗光栅。

在第二步 MBE 外延中,在光栅上继续生长 p-Ga<sub>0.56</sub>Al<sub>0.44</sub>As 上侧光阻挡层 ( $1\mu\text{m}$ ,  $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ) 和 p<sup>+</sup>-GaAs 欧姆接触层 ( $0.5\mu\text{m}$ ,  $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ )。采用 MBE 方法研制 DFB 激光器在国内未见报道,国际上先例也极少。MBE 方法制作 DFB 激光器的最大困难在于光栅上的二次外延,原因在于两次生长界面的氧化与污染将破坏结晶质量与表面形貌。本研究也在这方面遇到了很大的麻烦。我们利用 MBE 生长的特点,开发出新颖独特的二次外延技术<sup>[20]</sup>,从根本上解决了这一问题。

为简化工艺,器件采用最基本的氧化膜条形结构,用高频溅射方法沉积厚度约为 200 nm 的 SiO<sub>2</sub> 薄膜,用缓冲氢氟酸溶液刻蚀出 5—6 μm 宽的条形,并蒸上 Au-Cr 作为 P 型接触;n 型接触采用 Au-Ge-Ni。

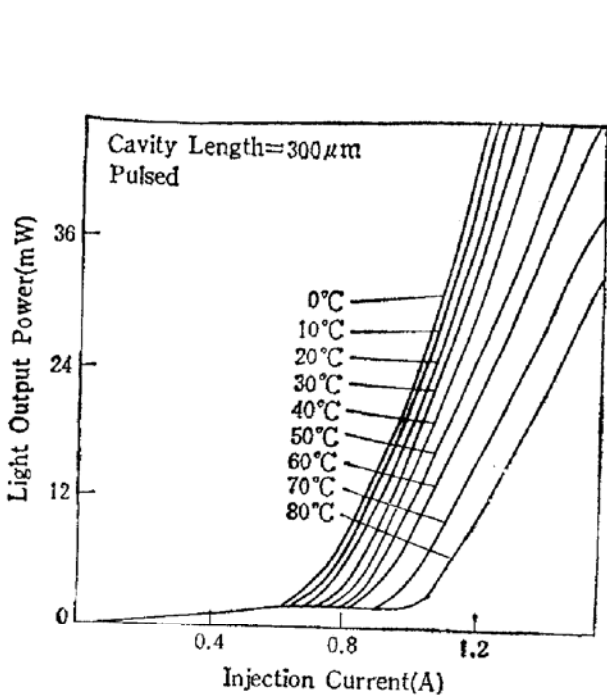


图 3 输出光脉冲峰值功率与注入电流的关系

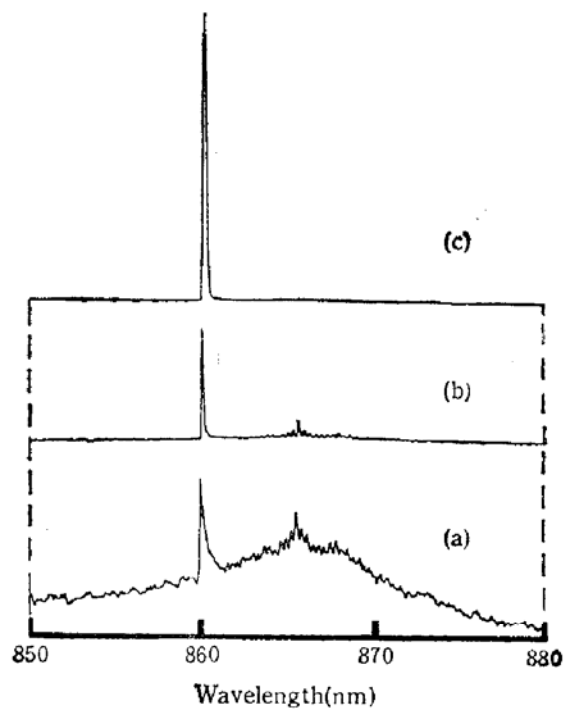


图 4 不同注入电流下的发光光谱  
(a)  $\sim 0.9I_{th}$ ; (b)  $\sim I_{th}$ ; (c)  $\sim 1.2I_{th}$

### 3 器件性能

器件成功地实现了室温脉冲激射。图 3 为腔长  $300\mu\text{m}$  的器件在  $500\text{ns}$ ,  $1\text{kHz}$  脉冲工作下的输出光强-注入电流特性。 $20^\circ\text{C}$  下器件的阈值电流约为  $700\text{mA}$ 。阈值电流偏高的原因主要是激光器构造未加横向限制,此外,一次外延的质量也有待提高。在图 4 中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 4(a)),除增益峰处的 Fabry-Perot 模式外,偏离此峰值  $7\text{nm}$  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阈值增益差的证据。当注入电流接近阈值时 DFB 模式开始激射(图 4(b)),激射波长约为  $860\text{nm}$ 。当进一步加大注入电流时可得(图 4(c))所示的完全单模工作。值得一提的是,含增益耦合机理的 DFB 激光器,一般较难观察到明显的 stop band,我们的器件也是如此。

此外,单模工作的光脉冲峰值输出功率至少不小于  $20\text{mW}$ ,因担心光电倍增管损坏,更大功率下的光谱没有测量。但从图 3 看,器件的脉冲峰值输出功率至少不小于  $50\text{mW}$ 。这除了本器件结构中的光导波层较厚带来的大光腔效应外,也表征了增益耦合型 DFB 激光器在大功率下不易受空间烧孔效应影响的优点。

图 5 为激光器的激射波长随温度的变化关系。由于设备的限制,我们只测了  $0^\circ\text{C}$  到  $80^\circ\text{C}$  的范围,在此范围内没有跳模发生。激射波长随温度的变化约为  $0.07\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,这是又一个有力的证据表明我们的激光器工作在 DFB 模式上。相应各温度下的激射谱记录在图 6 中,由此可以清楚地看到完全单模工作持续到至少  $80^\circ\text{C}$ 。

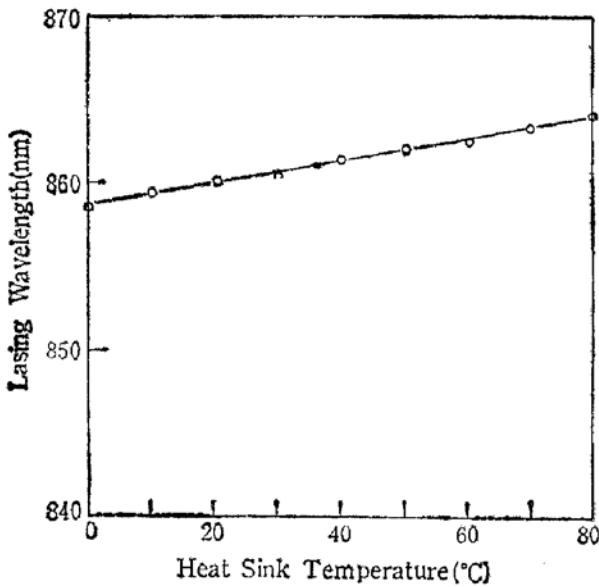


图 5 激射波长与温度的关系

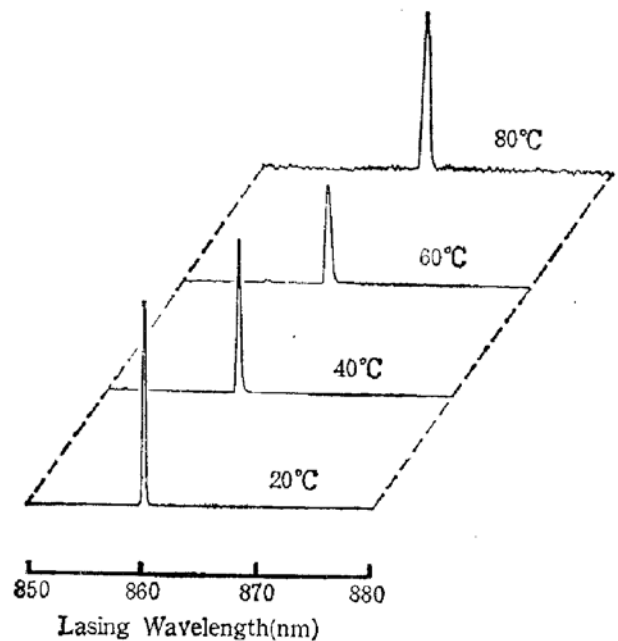


图 6 不同温度下的激射光谱

### 4 结论

我们首次完全采用 MBE 技术成功地制作了内含吸收型光栅的  $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$  量子阱增益耦合型分布反馈式半导体激光器。激光器在室温下的激射波长为  $860\text{nm}$ ,  $20^\circ\text{C}$  下的脉冲工作阈值电流为  $700\text{mA}$ 。器件在  $0^\circ\text{C}$  到  $80^\circ\text{C}$  的范围内始终保持单纵模激射,室温下单模单端输出光脉冲峰值功率可超过  $20\text{mW}$ 。

**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, 国家光电子工艺中心的李力在光栅制作上给以的大力协作。感谢李德杰教授在部分器件制作工艺方面给以的大力支持和帮助以及彭吉虎教授、张克潜教授、江剑平教授给以的鼓励和支持。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] K. Sekartedjo, N. Eda, K. Furuya, Y. Suematsu, F. Koyama, and T. Tanbun-ek. *Electron. Lett.*, 1984, **20**: 80—81.
- [3] K. Tada, Y. Nakano and A. Ushirokawa. *Electron. Lett.*, 1984, **20**:82—84.
- [4] W. Streifer, R.D. Burnham and D.R. Scifres, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975 **QE-11**: 154—161.
- [5] H. Soda, Y. Kotaki, H. Ishikawa, S. Yamakoshi and H. Imai, *IEEE J. Quantum Electron.* 1987, **23**: 804—814.
- [6] K. Utaka, D. Akiba, K. Sakai and Y. Matsushima. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**: 1042—1051.
- [7] E. Kapon, A. Hardy and A. Katzir. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**: 66—71.
- [8] Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu and H. Iwaoka. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 1620—1622.
- [9] Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu and H. Iwaoka. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**: 1724—1731.
- [10] Y. Luo, Y. Nakano and K. Tada. *Extended Abstracts Internat. Conf. Solid State Devices and Materials*, D-4-4, Tokyo: 1988. 327—330.
- [11] Y. Nakano, Y. Luo and K. Tada. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**: 1606—1608.
- [12] K. David, G. Morthier, P. Vankwikelberge, T. Baets, T. Wolf and B. Borchert. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**: 1714—1723.
- [13] Y. Luo, R. Takahashi, Y. Nakano, K. Tada, T. Kamiya, H. Hosomatsu and H. Iwaoka. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**:37—39.
- [14] C.E. Zah, P.J. Delfyett, R. Bhat, C. Caneay, F. Favire, B. Pathak, P.S.D. Lin, A.S. Gozdz, N. C. Andreadakis, M.A. Koza, M.Z. Iqbal, H. Izadpanah and T.P. Lee. *OFC/IOOC'93 Technical Digest Series*, Vol. 4, pp. 61—62, TuM4, San Jose, 1993.
- [15] Y. Nakano, Y. Deguchi, K. Ikeda, Y. Luo and K. Tada. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**: 1732—1735.
- [16] B. Borchert, K. David, B. Stegmuller, R. Gessner, M. Beschorner, D. Sacher and G. Franz. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**: 955—957.
- [17] W.T. Tsang, F.S. Choa, M.C. Wu, Y.K. Chen, R.A. Logan, A.M. Sergent and C.A. Burrus. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**: 212—215.
- [18] Y. Luo, H.-L. Cao, M. Dobashi, H. Hosomatsu, Y. Nakano and K. Tada. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**: 692—695.
- [19] 罗毅, 蒲锐, 司伟民, 彭吉虎, 第六届全国光纤通信学术会议, 北京, 1993年
- [20] Y. Luo, W. Si, S. Zhang, D. Chen and J. Wang, to be published in *IEEE Photon. Technol. Lett.*, January 1994.

## GaAlAs/GaAs Multiquantum Well Gain-Coupled Distributed Feedback Lasers with Absorptive Gratings All Grown by MBE

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

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

**Abstract** GaAlAs/GaAs multiquantum well gain-coupled distributed feedback (DFB) lasers with conduction-type-inverted loss gratings are fabricated using molecular beam epitaxy technique for the first time. At room temperature, single mode operation with lasing wavelength of 860 nm and high power of 20 mW has been achieved under pulse conditions. DFB mode oscillation maintains at least within a temperature range from 0°C to 80°C. As a primary result, a pulsed threshold current of 700 mA is obtained.

**EEACC:** 43.20J, 05.10D