

GSMBE 生长 1.8—2.0 μm 波段 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱激光器*

柏劲松 方祖捷 张云妹 张位在 陈高庭

(中国科学院上海光学与精密机械研究所, 上海 201800)

李爱珍 陈建新

(中国科学院上海冶金研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 报道了气态分子束外延(GSMBE)生长1.8—2.0 μm波段InGaAs/InGaAsP应变量子阱激光器的研究结果。1.8 μm波段采用平面电极条形结构,已制备成功10 μm和80 μm条宽器件,器件腔长500 μm,室温下光致发光中心波长约为1.82 μm,在77 K温度下以脉冲方式激射,阈值电流分别约为250 mA和600 mA,中心波长分别在1.69 μm和1.73 μm附近。2.0 μm波段,制备成功8 μm宽脊波导结构器件,器件腔长500 μm,室温光致发光中心波长约为1.98 μm,77 K温度下以脉冲方式激射,阈值电流约为20 mA,中心波长约为1.89 μm,其电流限制和纵模限制效果优于平面电极条形结构器件。

关键词: GSMBE; 中红外波段; 应变量子阱激光器

PACC: 4255P; 6855; 8115G **EEACC:** 4320J; 0510D; 4250

中图分类号: TN 248.4; TN 405.984 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2001)01-0040-07

1 引言

90年代初以来, InGaAs 应变量子阱激光器引起人们的极大兴趣。这是因为它比一般的量子阱激光器有更低的阈值电流密度,更高的量子效率,更大的调制带宽和更宽的覆盖波段。比如 GaAs 基 InGaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器覆盖了 0.9—1.1 μm 波段, InP 基 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱激光器覆盖了 1.5—2.1 μm 波段^[1—3], 这是使用一般晶格匹配材料难以达到的波长范围。因此 InGaAs 应变量子阱激光器在光通信、光计算、医疗和军事等领域得到广泛应用。

对于中红外波段半导体激光器,研究较多的是 GaSb 基 III-V 族锑化物材料。因其^[4]激射波长可以

从 1.7 μm 延伸到 4.5 μm, 对于应用有比较大的选择余地,但材料生长和器件制作还存在不少困难。InP 基 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱材料虽然波长覆盖范围相对较窄,但它具有良好的材料生长和器件制备技术,并具有较低的串联电阻和热阻,因此成为很有吸引力的新材料。

1992 年 Fouruhau 等用金属有机化学气相沉积方式(MOCVD)研制 1.8—2.0 μm 波段 InP 基 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱激光器获得成功,相继报道了第一只波长 1.8 μm^[2] 和 2.0 μm^[3] 器件室温脉冲运转的结果。器件主要性能指标很快都取得了突破,目前均已获得室温连续大功率的激光输出^[5—7]。

GSMBE 技术是近年来分子束外延(MBE)技术的新发展。它克服了一般 MBE 由于磷蒸气压太高而难于生长 InP 体系材料的困难^[8]。本文报道我们用

* 中国科学院“九五”基础性研究重大项目资助(KJ951-81-706-06)。

柏劲松 男, 1967 年出生, 博士, 从事半导体激光器及其应用研究。

方祖捷 男, 1942 年出生, 研究员, 博士生导师, 从事半导体激光器、光纤光子器件、光通信技术等研究。

陈高庭 男, 1942 年出生, 研究员, 从事半导体激光器、微机械干涉测量、光通信技术等研究。

2000-01-09 收到, 2000-06-20 定稿

©2001 中国电子学会

GSMBE 生长的 1.8—2.0μm 波段 InP 基 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱材料研制激光器的结果。1.8μm 波段, 采用平面电极条形结构, 已制备成功 10μm 和 80μm 条宽器件; 器件腔长均为 500μm, 室温下器件的光致发光光谱中心波长约为 1.82μm, 在 77K 温度下以脉冲方式激射, 阈值电流分别约为 250mA 和 600 mA, 中心波长分别在 1.69μm 和 1.73μm 附近; 80μm 条宽器件呈现典型的多纵模运转, 10μm 条宽器件则表现出一定的纵模限制效果。2.0μm 波段, 制备成功 8μm 宽脊波导结构器件; 腔长为 500μm 的器件, 室温下光致发光中心波长约为 1.98μm; 在 77K 温度下以脉冲方式激射, 阈值电流约为 20mA, 中心波长在 1.89μm, 其电流限制和纵模限制效果优于平面电极条形结构器件。

2 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱材料的 GSMBE 生长及器件制备

2.1 器件结构

采用 GSMBE 设备, 根据设计要求生长 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱材料, 其典型结构如图 1 所示, 衬底采用掺 Si 的 n 型 InP 衬底。衬底除气后, 在上面依次生长以下各层: 1μm 掺 Si 的 InP 缓冲层, 0.15μm 掺 Si 的 InGaAsP($\lambda = 1.3\mu\text{m}$) 下波导层, 不掺杂的 InGaAs/InGaAsP 应变双量子阱有源层(阱为 10nm 厚 $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, x 取 0.70(1022# 外延片) 和 0.75(1023# 外延片), 分别对应于 1.0% 和 1.5% 的压应变, 相应室温下的波长分别为 1.80μm 和 2.0μm; 垒为 20nm 厚 InGaAsP($\lambda = 1.3\mu\text{m}$), 0.15μm 掺 Be 的 InGaAsP($\lambda = 1.3\mu\text{m}$) 上波导层, 1.8μm 掺 Be 的 InP 限制层, 0.2μm 重掺 Be 的 InGaAsP($\lambda = 1.5\mu\text{m}$) 欧姆接触层。

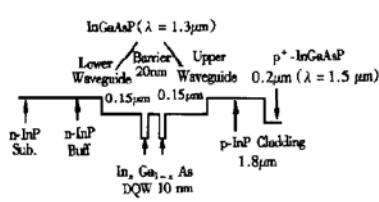


图 1 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱材料
FIG. 1 Conduction Band Profile of
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InGaAsP}$ Strained
Quantum Well Lasers

2.2 器件制作

器件结构采用三种, 一是适合于较大输出功率的增益导引平面电极条形激光器, 电极条宽为 80μm。二是 10μm 条宽的平面电极条形结构器件, 为观察阈值电流, 模式特性与条宽的关系而制作。以上制作均在 1022# 外延片上进行。三是折射率导引脊形波导结构激光器, 制作在 1023# 外延片上进行。

(1) 平面电极条形结构器件: 结构如图 2 所示。通过热解在 1022# 外延片表面沉积上 SiO_2 薄膜, 分别光刻出 10μm 和 80μm 宽的窗口。采用 AuZn/CrAu 进行 P 面欧姆接触的制作, 再把衬底面减薄到 100μm 左右, 采用 AuGeNi 进行 N 面欧姆接触的制作。然后在 300°C 下合金化 30s。最后解理为 500μm 腔长的管芯, 用 In 作焊料 P 面朝下焊装在 Cu 热沉上。

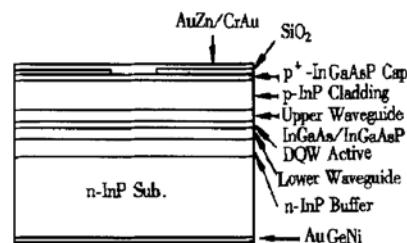


图 2 增益导引平面电极条形结构
FIG. 2 Gain-Guided Planar Electrode Stripe Structure

(2) 脊形波导结构器件: 用 1023# 外延片制作, 脊形波导结构是在光刻后用腐蚀双沟的办法得到, 结构如图 3 所示。脊形波导宽为 8μm, 腐蚀液为 $\text{HCl} : \text{H}_3\text{PO}_4$ (2 : 3), 腐蚀深度停止于上波导层。通过二次套刻和剥离技术, 形成电流限制。工艺其它方面与(1)相同, 解理管芯腔长均为 500μm。

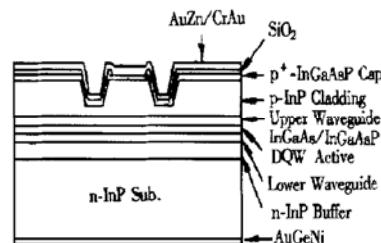


图 3 折射率结构的脊形波导结构
FIG. 3 Index-Guided Ridgewaveguide Structure

3 激光器的基本特性

3.1 室温直流 $I-V$ 特性

对平面电极条形结构和脊形波导结构的器件都进行了电学性能测量。它们的室温直流 $I-V$ 特性表现比较接近。图 4 为器件典型的室温直流 $I-V$ 特性。可以看到导通电压约为 0.4—0.5V，拐点明显；串联电阻为 1—2Ω，反向 250μA 电流对应的电压远大于 1V。这些都表明器件有较好的伏安特性。

3.2 $P-I$ 特性

器件在 77K 脉冲电流下（电流脉冲均为宽度 0.5ms，重复频率 100Hz）工作时，观察到随着电流

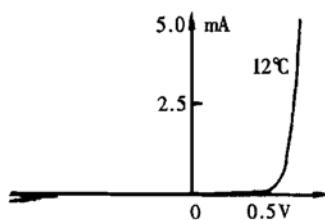


图 4 器件正反向伏安特性

FIG. 4 $I-V$ Characteristics at 12°C

增加到一定值时，光功率信号急剧上升的现象，这是器件激射的主要标志。光功率信号强度与电流的关系如图 5(a) 和(b) 所示，其中光输出信号强度未进行功率定标。图 5(a) 所示的 10μm 和 80μm 条宽器件，阈值电流分别为 250mA 和 600mA。图 5(b) 所示的 8μm 条宽脊波导结构器件，阈值电流为 22mA。

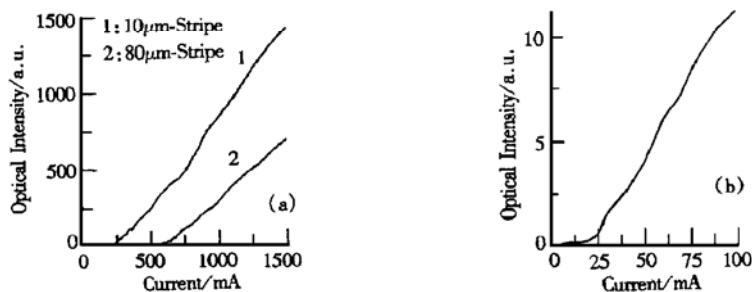


图 5 器件未定标光输出功率-电流曲线 (a) 平面电极条形结构，曲线 1 为 10μm 条宽器件，曲线 2 为 80μm 条宽器件；(b) 8μm 宽脊波导结构器件

FIG. 5 Characteristics of Output Power (Uncalibrated) Versus Current (a) Curve 1 and 2 Being with the 10μm and 80μm Wide Planar Electrode Stripe Structure Devices, Respectively; (b) 8μm-Wide Ridge waveguide Structure Devices

3.3 器件在 77K 下脉冲光谱

电流脉冲均为宽度 0.3ms，重复频率 100Hz

(1) 平面电极条形结构器件

图 6 为 80μm 条宽器件在 77K 下 550mA 电流下的荧光光谱，中心波长约 1.760μm。室温下的荧光很弱，难以测量。不过根据粗略的波长温度系数 0.3nm/°C^[13] 估算，室温下的光致发光中心波长约 1.82μm。

图 7 为 80μm 条宽器件在 77K 下 590—800mA 电流范围内的激光光谱。光谱表现多个纵模，而且随着电流增加，中心波长由 1.735μm 向长波方向移动

到 1.740μm。波长电流调谐系数约为 0.025nm/mA。

图 8(a) 和(b) 为 10μm 条宽器件在 77K 下 230—500 mA 电流范围内的激光光谱。由图 8(a) 和(b) 可以看到，器件在 230mA 电流处已经开始明显激射，而且随着电流增加，主模峰值波长向长波方向移动并有跳模现象，光谱表现为二至三个纵模。另外由图 5 可看到在 230—500mA 电流范围内峰值波长变化为 1.682—1.690μm，波长的调谐范围为 10nm。由此可粗略估算出器件电流变化对波长的调谐特性，其系数约为 0.03nm/mA。

上述窄条器件与宽条器件相比，表现出一定的电流限制和纵模限制效果。

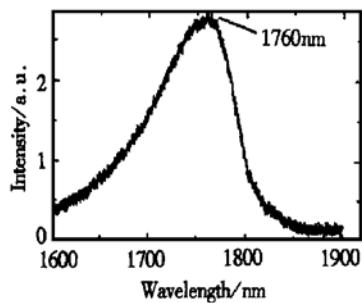


图 6 80μm 宽条器件 77K 脉冲运转下的光致发光光谱

FIG. 6 Pulsed Electrical Luminescence Spectrum of the 80μm-Wide-Stripe Device at Temperature of 77K

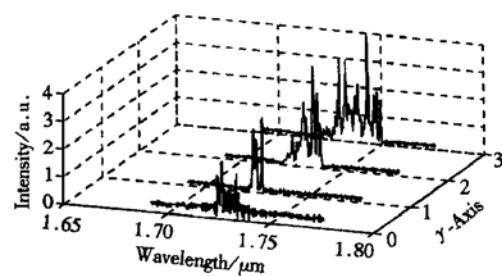


图 7 80μm 宽条器件在 77K 脉冲运转下的激光光谱
0, 1, 2, 3 代表的脉冲电流幅值分别为 590, 600, 700, 800mA

FIG. 7 Lasing Spectrum of Same 80μm-Wide-Stripe Device at the Pulsed Regime and 77K in Temperature. The number 0, 1, 2, 3 curves are measured under the pulsed current amplitude of 590, 600, 700, 800mA, respectively.

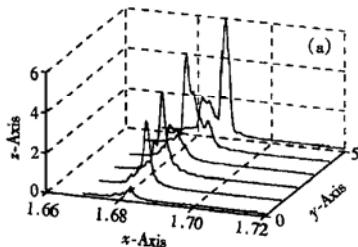


图 8 10μm 窄条器件在 77K 脉冲运转下的激光光谱(x 轴为波长, 单位为 μm ; z 轴为光强, 单位任意)

(a) 0, 1, 2, 3, 4, 5 代表的脉冲电流幅值分别为 230, 240, 245, 250, 280, 300mA; (b) 0, 1, 2, 3, 4, 5 代表的脉冲电流幅值分别为 300, 320, 340, 400, 450, 500mA.

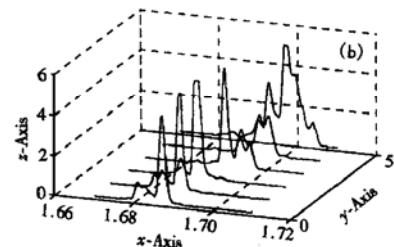


FIG. 8 Lasing Spectrum of the Same 10μm-Wide-Stripe Device at Pulsed Regime and 77K in Temperature (x —Wavelength: μm ; z —Intensity: a. u.) (a) The number 0, 1, 2, 3, 4, 5 curves are measured under the pulsed current amplitude of 230, 240, 245, 250, 280, 300 mA, respectively; (b) The number 0, 1, 2, 3, 4, 5 curves are measured under the pulsed current amplitude of 300, 320, 340, 400, 450, 500mA, respectively.

(2) 脊波导结构器件

器件脊形波导宽 8μm, 腔长 500μm. 图 9 为器件在 200mA 电流幅值室温下的光致发光光谱, 光谱中心波长约为 1.98μm, 半宽 150nm, 这表明材料组分和层厚控制十分精确. 图 10 (a) (b) 和(c) 为器件在 77K 不同电流幅值下的激光光谱. 由图 10(a) 可以看到, 器件在 18mA 电流处还处于强度很弱的超辐射状态, 而在 20mA 电流处已经开始明显激射, 峰值波长约为 1.87μm, 单模线宽约为 2nm. 图 10(a) 和(b) 显示在 20—110mA 电流范围内, 光谱表现为二至三个纵模, 其强度相差几个分贝, 而且随着电流增加, 主模峰值波长向长波方向移动并有跳模现象. 图 10(c) 显示在 200mA 电流附近, 器件表现

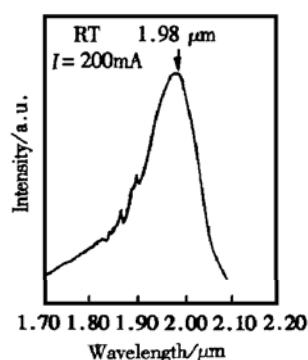


图 9 脊形波导器件室温电致发光谱

FIG. 9 Electrical Luminescence Spectrum of Ridgewaveguide Devices at Room Temperature

为单纵模运转, 边模抑制比大于 18dB. 当电流达到 240mA 时出现两个强度相差不多的纵模。进一步测量发现在 160—220mA 电流范围内均呈单纵模运转, 边模抑制比大于 15dB. 单纵模运转这对于红外光谱测量等应用具有重要意义。另外由图 6 可看到

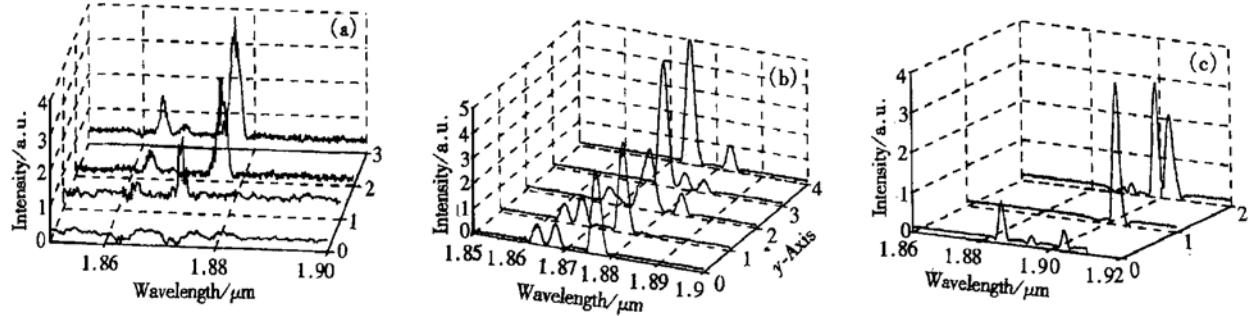


图 10 同一脊形波导器件在 77K 脉冲运转下的激光光谱 (a) 0, 1, 2, 3 对应的脉冲电流幅值分别为 18, 20, 22, 30mA; (b) 0, 1, 2, 3, 4 对应的脉冲电流幅值分别为 50, 60, 80, 100, 110mA; (c) 0, 1, 2, 3 对应的脉冲电流幅值分别为 125, 200, 245mA.

FIG. 10 Lasing Spectrum of Same Ridgewaveguide Device at Pulsed Regime and 77K in Temperature (a) The number 0, 1, 2, 3 curves are measured under the pulsed current amplitude of 18, 19, 22, 30mA, respectively. (b) The number 0, 1, 2, 3, 4 curves are measured under the pulsed current amplitude of 50, 60, 80, 100, 110mA, respectively. (c) The number 0, 1, 2 curves are measured under the pulsed current amplitude of 125, 200, 245mA, respectively.

4 器件性能分析

(1) 器件结构与侧向电流限制

在制作 2.0μm 波段脊形波导结构器件之前, 为检验外延片质量, 我们还制作了 80μm 条宽平面电极条形结构的器件, 其阈值电流为 200—250mA, 而 8μm 宽脊形波导结构器件阈值电流为 20—30mA, 两者相差约 10 倍。而 1.8μm 波段 10μm 条宽和 80μm 条宽平面电极条形结构器件, 阈值电流相差约 2 倍。比较之下脊形波导结构器件表现出较好的侧向电流限制效果。

(2) 纵模限制

对于 AlGaAs/GaAs 体系半导体激光器, 采用折射率导引结构可充分获得单纵模运转, 其机理文献^[9]已有论述。而 1.3—1.5μm 波段 InGaAsP/InP 体系折射率导引结构半导体激光器, 如果无分布反馈或分布布拉格反射结构, 均不能获得单纵模运转。这一点到目前还没有得到解释。

本文 80μm 条宽平面电极条形结构器件光谱表现多个纵模, 10μm 条宽平面电极条形结构器件和 8μm 宽脊形波导结构器件光谱表现为 2 至 3 个纵模, 其中脊形波导结构器件在 200mA 电流附近, 还表现为单纵模运转, 边模抑制比大于 18dB. 大体上

在 22—245mA 电流范围内峰值波长变化为 1.875—1.900μm, 波长的调谐范围达 25nm. 由此可粗略估算出器件电流变化对波长的调谐特性, 其系数约为 0.10nm/mA.

窄条器件与宽条器件相比, 表现出一定的纵模限制效果, 这一点可进一步通过增益谱和自发辐射因子的研究^[9]得到解释。而脊形波导结构器件不能很好地获得单纵模运转, 与上述 1.3—1.5μm 波段器件相似。这意味着要获得很好的单纵模运转, 需要制作分布反馈^[10, 11]或分布布拉格反射结构的器件。

(3) 脊波导结构器件的制作

实验发现, 控制好腐蚀深度是脊形波导器件制作成功的关键。当双沟腐蚀的深度超过有源层时, 器件伏安特性急剧退化, 不再有 PN 结特性, 测量器件无荧光。当双沟腐蚀的深度距离有源层约 0.15—0.25μm 时, 器件阈值电流达到约 130—150mA。当双沟腐蚀的深度很接近有源层时, 器件阈值电流达到约 20—30mA。

(4) 波长与量子阱结构的关系

1.8μm 和 2.0μm 两个波段的器件, 量子阱结构中只有阱材料 In_xGa_{1-x}As 组分和应变略有不同, x 值相差约 7%, 这说明波长对于组分和应变的变化较为敏感。我们对此结合文献[1—3]作了理论分析, 结果表明, 器件发射波长主要由量子阱材料组分、应变、阱宽、阱深和垒高决定。由于应变极限的存在, 该材料最大波长只能达到 2.1μm. 2.0μm 波段, 由于波长接近极限波长, 波长对于组分和应变的变化较为敏感., 因此材料生长过程中需要对阱层组分和应

变加以精确控制。

(5) 关于器件性能的提高

从以上结果来看, 器件工艺已较为完善。目前关键问题是器件只能在低温下激射, 而要获得室温激射器件, 还有待于器件结构的优化和材料生长质量等方面提高。

5 小结

用 GSM BE 生长的 1.8—2.0 μm 波段 InP 基 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱材料研制激光器获得成功。1.8 μm 波段, 采用平面电极条形结构, 已制备成功 10 μm 和 80 μm 条宽器件, 室温下器件的光致发光中心波长约为 1.82 μm , 在 77K 温度下两种条宽的器件以脉冲方式激射, 阈值电流分别约为 250mA 和 600mA, 中心波长分别在 1.69 μm 和 1.73 μm 附近。80 μm 条宽器件呈现典型的多纵模旋转, 10 μm 条宽器件则表现出一定的纵模限制效果。2.0 μm 波段, 制备成功 8 μm 宽脊波导结构器件, 器件在室温下的光致发光中心波长约为 1.98 μm , 在 77K 温度下以脉冲方式激射, 阈值电流约为 20mA, 中心波长约为 1.89 μm , 其侧向电流限制和纵模限制效果优于 10 μm 条宽平面电极条形结构器件。

参考文献

- [1] D. P. Bour, R. U. Martinelli, R. E. Enstrom *et al.*, Electronics Letters, 1992, **28**(1): 37—39.
- [2] S. Forouhar, A. Larsson, A. Ksendzov *et al.*, Electronics Letters, 1992, **28**(10): 945—947.
- [3] S. Forouhar, A. Ksendzov, A. Larsson *et al.*, Electronics Letters, 1992, **28**(15): 1431—1432.
- [4] Chen Gaotong, Bai Jinsong, Fang Zujie *et al.*, Chinese Journal of Lasers, 1998, **25**(12): 1069—1072(in Chinese).
- [5] M. Maiorov, R. Menna, V. Khalfin *et al.*, IEEE Photonics Technology Letter, 1999, **11**(8): 961—963.
- [6] S. Forouhar, S. Keo, A. Larsson *et al.*, Electronics Letters, 1993, **29**(7): 574—576.
- [7] J. S. Major, Jr., D. W. Nam, J. S. Osinski *et al.*, IEEE Photonics Technology Letters, 1993, **5**(6): 733—734.
- [8] Sun Dianzhao, Wang Xiaoliang, Li Xiaobing *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors., 1995, **16**(10): 725—729 (in Chinese).
- [9] K. Peterman, IEEE J. Quantum Electron., 1979, **15**(7): 566—570.
- [10] Ramon U . Martinelli, R . J . Menna *et al.* , IEEE Photonics Technology Letters, 1994, **6**(12): 1415—1417.
- [11] Mamoru Oishi, Mitsu Yamamoto and Kazuo Kasaya, IEEE Photonics Technology Letters, 1997, **9**(4): 431—433.

GSMBE-Grown 1.8—2.0 Micron Waveband InGaAs/InGaAsP Strained Quantum Well Lasers^{*}

BAI Jin-song, FANG Zu-jie, ZHANG Yun-mei, ZHANG Wei-zai and CHEN Gao-ting

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

LI Ai-zhen and CHEN Jian-xin

*(State Key Laboratory of Functional Materials of Informatics, Shanghai Institute of Metallurgy,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)*

Abstract: GSMBE (Gaseous Source Molecular Beam Epitaxy) grown 1.8—2.0 μm waveband InGaAs/InGaAsP/InP strained quantum well lasers are reported. At 1.8 μm ’s wavelength, the lasers with 10 μm and 80 μm wide planar electrical stripe structures are fabricated, which are observed with pulsed electrical luminescence at room temperature, and the estimated peak wavelengths is about 1.80 μm . At 77K, the 10 μm and 80 μm -wide-stripe lasers become lasing in the pulsed regime, with the threshold currents being about 250mA and 600mA; the center wavelengths of 1.69 μm and 1.73 μm , respectively. The 80 μm -wide-stripe lasers can be found with the multiple-longitudinal-mode operation, while the 10 μm ones with the two or three-longitudinal-mode operation. At 2.0 μm ’s wavelength, the lasers with 8 μm -wide ridgewaveguide structures are fabricated. At room temperature the pulsed electrical luminescence spectrum is observed with the peak wavelength about 1.98 μm . At 77K, the lasers become lasing in the pulsed regime, with the threshold current about 20 mA, center wavelength 1.89 μm and the single-longitudinal-mode operation in the current range of 160—230mA.

Key words: GSMBE; midinfrared waveband; strained quantum well lasers

PACC: 4255P; 6855; 8115G **EEACC:** 4320J; 0510D; 4250

Article ID: 0253-4177(2001)01-0040-07

* Project Supported by the Ninth Five-Year Basic Research Plan of The Chinese Academy of Science Under Contract No. KJ951-81-706-06.

BAI Jin-song male, was born in 1967, He became a Ph. D candidate in September, 1998. His research interests include semiconductor lasers, photonics devices and communication technology, etc.

FANG Zu-jie male, was born in 1942. He is a researcher and director of Ph. D candidate. His research interests include semiconductor laser, fiber-photonics devices and optical communication technology.

CHEN Gao-ting male, was born in 1942. He is a researcher. His research interests include semiconductor laser, interference measurement by micromachine, optical communication technology.