

锑化物中红外单模半导体激光器研究进展

杨成奥^{1,2}, 谢圣文^{1,2}, 黄书山^{1,2}, 袁野^{1,2}, 张一^{1,2}, 尚金铭^{1,2}, 张宇^{1,2}, 徐应强^{1,2}, 牛智川^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 锑化物材料因为其天然的禁带宽度较小的优势, 是 2-4 μm 波段半导体光电材料和器件研究的理想体系。近年来, 国内外在锑化物大功率半导体激光器方面的研究取得了很大的进展, 实现了大功率单管、阵列激光器的室温工作。然而, 由于锑化物材料与常见的半导体单模激光器制备工艺的不兼容性, 只有少数几个研究单位和公司掌握了锑化物单模激光器的制备技术。文中介绍了锑化物单模激光器常用的侧向耦合分布反馈激光器的基本原理, 分析了其设计的关键技术, 回顾了锑化物单模激光器的设计方案和制备技术, 并针对国内外锑化物单模激光器主要研究内容进行了总结。

关键词: 侧向耦合分布反馈激光器; LC-DFB; 量子阱; GaSb; 二阶布拉格光栅

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0503002

Research progress of antimonide infrared single mode semiconductor laser

Yang Cheng'ao^{1,2}, Xie Shengwen^{1,2}, Huang Shushan^{1,2}, Yuan Ye^{1,2}, Zhang Yi^{1,2}, Shang Jinming^{1,2},
Zhang Yu^{1,2}, Xu Yingqiang^{1,2}, Niu Zhichuan^{1,2}

- (1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Antimonide materials are the ideal system for the semiconductor photoelectric materials and devices of 2-4 μm due to its narrow bandgap. In recent years, great progress has been made in the research of antimonide high-power semiconductor lasers at home and abroad, and the room temperature operation of high-power single-tube and array lasers has been achieved. However, due to the incompatibility of antimonide materials with common fabrication technique of semiconductor single-mode lasers, only a few research institutes and companies have mastered the preparation of antimonide single-mode lasers. In this paper, the basic principle of the laterally coupled distributed feedback laser was introduced and the key technologies of the laser were briefly analyzed. The design scheme and preparation technology of the antimony single mode laser were also reviewed and summarized.

Key words: laterally-coupled distributed feedback laser; LC-DFB; quantum well; GaSb; second-order Bragg grating

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61790581, 61790582, 61435012); 国家重点基础研究发展计划(2014CB643903)

作者简介: 杨成奥(1990-), 博士生, 主要从事锑化物红外激光器方面的研究。Email: yangchengao@semi.ac.cn

导师简介: 牛智川(1963-), 研究员, 博士生导师, 主要从事低维半导体光电材料与量子器件方面的研究。Email: zcniu@semi.ac.cn

0 引言

2~4 μm 是非常重要的大气窗口波段,工作在这个波段的激光器在医疗器械、空间光通信、红外光电对抗等民用和军用领域也有着非常广泛的用途^[1]。该波段包含了非常多气体分子的特征吸收谱线,利用该波段气体分子的吸收特性可以实现高灵敏度、快速、非接触的气体检测、大气污染物监测,具有重要的应用价值^[2],美国好奇号火星探测器搭载了喷气推进实验室(JPL)研制的铋化物单模激光器,用于检测火星上的甲烷气体和甲烷同位素^[3];而在目前炙手可热的量子通讯领域,基于频率上转换技术的上转换探测器是目前可以实现量子通信单光子信号提取的一个重要技术方案^[4],这种技术的一个重要组成部件就是 1.95 μm 的单模激光器。对于这一特定波段来说,包括光纤激光器,固体激光器,气体激光器均已实现了高性能工作,与这些激光器相比,半导体激光器以其独有的体积小,光电转换效率高,波长覆盖广的优势,也逐渐成为 2~4 μm 激光器不可替代的一环,在常见的半导体激光器材料中,铋化物(Sb)材料因为其能带带隙位置的优势,激光性能在 2~4 μm 处于优势地位,也是目前唯一在该波段实现了瓦级的室温连续输出的半导体激光器^[5]。

国际上铋化物激光器的研究最早始于 1978 年,Dolginov 等人在 90 K 温度下首先从 GaSb/InGaAsSb/GaSb 异质结中实现了 1.9 μm 受激发射^[6]。而随着液相外延(LPE)、分子束外延(MBE)、金属有机化合物气相沉积(MOCVD)等材料生长技术的发展,铋化物材料的质量迅速提升,逐渐实现了室温连续工作。进入 21 世纪以来,铋化物红外激光器的发展速度被进一步加快,包括德国夫琅禾费研究所,法国蒙彼利埃大学,美国纽约州立大学石溪分校,马里兰大学,德国维尔兹堡大学等单位在 GaSb 基半导体激光器的研究工作上做出了重要的贡献^[5,7-9],目前已经实现了单管 2 W,巴条 17 W 的高功率输出,而多家公司已经实现 GaSb 基 2 μm 激光器的产品化。

国内铋化物材料的研究工作启动比较晚,相关的研究单位也比较少,1993 年上海微系统与信息技术研究所报道了 2 μm F-P 腔脉冲激射,之后实现了 6 mW 的连续激射^[10],2009 年长春理工大学报道了 2 μm 铋化物量子阱激光器 42 mW 室温连续工作^[11],并将工作波长进一步拓展到 2.2 μm 。笔者课题组所

在的中国科学院半导体研究所在 2010 年首次报道了 2 μm F-P 腔激光器的室温连续激射^[12],随后的几年将激光器室温连续功率逐步提高到 1 W^[13],2017 年通过优化腔面膜工艺进一步将 2 μm 激光器室温连续功率提升到 1.5 W,巴条室温连续输出功率达到 8.5 W,为目前国内铋化物 2 μm 大功率激光器研究的最高指标,此外,在向长波长拓展方面,笔者课题组通过提高有源区组分和引入 AlGaInAsSb 五元势垒提高价带带阶,成功实现了 2~3 μm 激光器的室温连续激射^[14-16]。不论是激射功率和波长拓展,笔者课题组在铋化物激光器方向的研究工作,均处于国内领先水平。

然而对于气体检测这一重要应用来说,大功率的 F-P 腔激光器并不适用,需要引入波长选模机制实现激光器的单模激射,而铋化物单模激光器的研制是在高质量的铋化物外延材料的基础之上,进一步进行光栅耦合机理和制备工艺的研究,其准入门槛和技术难度都比较高,虽然国际上多家研究单位已经实现了铋化物单模激光器室温连续激射,其波长也实现了 2~4 μm 的覆盖。国内却仅有中国科学院半导体研究所等少数单位有铋化物单模激光器的报道。笔者课题组也是国内最早掌握了铋化物单模激光器核心制备技术的课题组之一。

文中将针对铋化物单模激光器的制备难点,结构设计和关键制备技术进行分析与总结,重点介绍了铋化物单模激光器的最新研究进展,并对其未来发展方向进行了展望。

1 铋化物单模激光器的制备难点

由于近红外和通讯波段日益增长的市场需求,国内 GaAs 和 InP 基单模激光器的制备技术发展迅速,其广泛采用的二次外延技术选用不易氧化的材料作为光栅层,在生长完光栅层后中断外延生长,在平整的光栅层表面制备出光栅图形结构,然后将图形化后的外延片送回材料生长设备,完成激光器限制层和接触层的制备。得益于材料质量的提升和包括全息曝光等多种光栅制备技术的逐渐成熟,这种掩埋光栅结构在近红外和通信波段的高速单模激光器上已经逐步实现了国产化规模生产。

与目前国内发展迅速的 GaAs、InP 基半导体激光器材料不同,铋化物材料的激光器起步比较晚,铋化物激光器主要指的是基于 GaSb 衬底的 GaIn(Al)AsSb/AlGaAsSb 材料系统,而铋化物单模激光器制

备的一个主要难题就是铝组分的引入：在材料生长过程中,为了获得高质量无缺陷的外延材料,实现良好的晶格匹配和光场限制作用,通常需要在外延层中引入高比例的铝(Al)组分,铝容易氧化的特性大大增加了第二次外延材料生长的难度,因而在制备过程中很难直接借鉴 InP 基半导体激光器的制备技术,不仅如此,目前多元铋化物材料的刻蚀也是一个难题,因为其带隙较小,多元铋化物材料在湿法腐蚀过程中生成的氧化物只能溶于特定的几种溶液,刻蚀速度很慢,而包括反应离子刻蚀(RIE)、电子回旋共振等离子刻蚀(ECR)和感应耦合等离子体刻蚀(ICP)等多种干法刻蚀技术则容易引起材料的损伤影响器件的光学和电学性能。目前国际上也只有少量的课题组在进行 GaSb 基的二次外延技术的开发^[17]。为了解决这个问题,实现铋化物材料单模激光器的制备,1985 年麻省理工大学的 Z.L.Liau 等研究人员提出了侧向耦合分布反馈 (Laterally-coupled Distributed Feedback Laser, LC-DFB) 结构^[18],这种结构的激光器可以在一次外延中完成全结构材料的生长,将具有波长选模特性的布拉格光栅制备在条形波导的两侧,利用有源区外的倏逝场与布拉格光栅的耦合作用完成对激光器模式的筛选。这种结构的激光器大大降低了铋化物外延材料生长的难度,可以保持很高的外延质量,同时由于其光栅制备在近波导层,仅有比较小的耦合系数的衰减,可以实现具有良好单模特性的激光。如图 1 所示,目前国际上 GaSb 基 LC-DFB 的研究方向根据耦合原理的不同,主要分为两类:一类是折射率导引机制,利用外延层本身的材料制作布拉格光栅,通过外部填充折射率较小的绝缘材料,如 SiO₂、SiN_x 等,利用光栅区与注入区折射率之间的差异提供光场侧向的限制,这种方案可以实现几十个毫瓦功率的单模激光,但其单模特性受腔面随机反射相位的影响比较大,单模成品率比较低,边模抑制比普遍在 25 dB 左右;第二类方案使用金属作为光栅材料,利用金属材料较大的折射率虚部,对激光器提供额外的增益调制,由于金属对光场强烈的吸收作用,其器件激光功率基本小于 10 mW,但由于金属光栅引入的复耦合机制,金属光栅 LC-DFB 的单模特性得到大的提升,单模选择特性不受端面反射率的影响,边模抑制比典型值为 35 dB。对于气体检测来说,单模大功率器件并不适用,激光器输出功率在毫瓦量级即可满足需求,因

此,金属光栅 LC-DFB 也逐渐成为了铋化物单模激光器研究的主流方向。

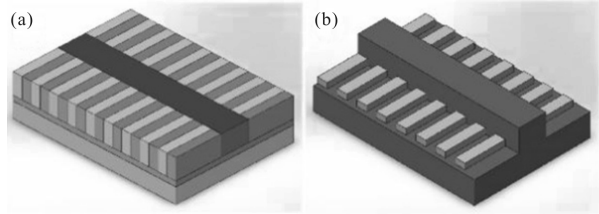


图 1 不同耦合原理的 LC-DFB 结构示意图

Fig.1 Schematic of different coupling type of LC-DFB

2 铋化物 LC-DFB 激光器的原理

与 DFB-LD 类似,LC-DFB 也是基于贝尔实验室的 Kogelnik 和 Shank 在 1972 年利用电磁场的耦合波理论对 DFB 激光器工作原理和特性的分析^[19],然而,由于 LC-DFB 的光栅位于条形波导的两侧,是光场较弱的区域,因此如何设计理想的光栅结构以取得较大的耦合系数是 LC-DFB 设计和制备过程中最重要的问题。LC-DFB 光栅的耦合系数与光栅材料、形貌、阶次、脊宽、剩余覆盖层厚度、光栅深度等参数密切相关,在设计的过程中也需要综合考虑半导体工艺制备过程中的误差。

从 Maxwell 方程组出发,可以得到含 Bragg 光栅的二维波导的耦合波方程为:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} + (-\alpha - j\delta - j\zeta_1)A &= j(\kappa_p + \zeta_2)B \\ -\frac{dB}{dz} + (-\alpha - j\delta - j\zeta_3)B &= j(\kappa_p + \zeta_4)A \end{aligned}$$

式中: δ 为激光器谐振频率与 Bragg 光栅频率的偏移量; α 是模式损耗; $\zeta_i(i=1, \dots, 4)$ 是自耦合系数; A, B 是前向波 $R(z)$ 和后向波 $S(z)$ 的振幅,耦合波方程的形式解为:

$$\begin{aligned} R(z) &= r_1 e^{-\gamma z} + r_2 e^{-\gamma^* z} \\ S(z) &= s_1 e^{-\gamma z} + s_2 e^{-\gamma^* z} \\ \gamma^2 &= (\alpha + i\delta + i\zeta_1)^2 + \kappa_{\text{eff}}^2 \\ \kappa_{\text{eff}} &= \sqrt{(\kappa_p + \zeta_2)(\kappa_p + \zeta_4)} \end{aligned}$$

对于矩形光栅来说:

$$\kappa = \frac{n_{\text{clad}}^2 - n_{\text{cover}}^2}{n_{\text{eff}} \lambda} \frac{\sin(m\pi g)}{m} \Gamma_{\text{grating}}$$

式中: Γ_{grating} 为光栅的限制因子; m 为光栅阶数; g 为光栅占空比; n_{eff} 为基模有效折射率; n_{clad} 和 n_{cover} 分别为光栅材料和光栅填充层的折射率^[20]。大的耦合系

数意味着光栅对光场的筛选作用越强,然而对于实际的器件来说,耦合系数并非越大越好,KL 的经验优化值一般在 1~2 之间。如果 KL 太小,激光器处于欠耦合状态,阈值增益和线宽都会相应增加;当 KL 值太大时,又会导致谐振腔中间处光场的高度局域化,引起空间折射率的改变,出现空间烧孔现象。如图 2 所示,LC-DFB 耦合系数随占空比变化的关系,对于折射率耦合 LC-DFB 而言,耦合系数峰值随着占空比的增大而增加,对于复耦合激光器而言,金属材料较大的虚折射率对光有着较强的吸收作用,当占空比增加时,光栅区的限制因子会相应降低。

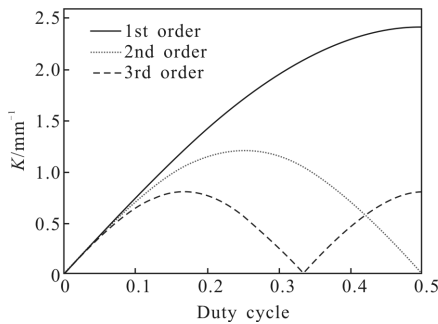


图 2 耦合系数与光栅阶数和占空比的关系

Fig.2 Coupling coefficient varies with the order of the grating and the duty cycle

DBR 激光器也是实现铋化物单模器件的一种解决方案,但目前国际上铋化物 DBR 器件的报道比较少,基本集中于片上集成的大功率器件,相对而言,DBR 有源区和光栅区的波导结构不同,制备工艺要难于 DFB,不仅如此 DBR-LD 的反射率在两个方面非常容易影响器件的性能,其最大反射率会影响阈值增益和外微分子效率,而反射率的半高宽又会影响器件的单模特性,较小的模式间隔和较大的反射谱半高宽容易导致多纵模激射,如图 3 所示

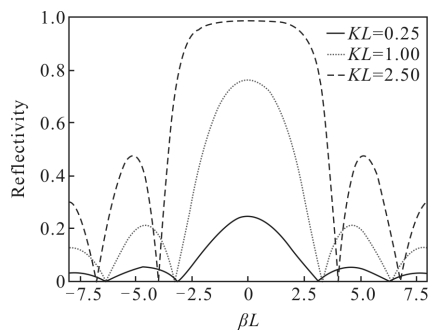


图 3 不同耦合参数下 DBR 光栅的反射率

Fig.3 Reflectivity of DBR grating under different coupling parameters

为 DBR-LD 在不同耦合系数 KL 值时的反射谱,过大的 KL 值会导致多模激射,而过小的 KL 值会导致选模特性的不是,因此相比于 DFB-LD,更需要对 DBR-LD 的耦合系数进行细致的优化。

3 铋化物单模激光器的典型结构

LC-DFB 结构虽然解决了铋化物材料二次外延难度大的问题,但同时也对光栅制备工艺提出了更高的要求,目前主流的光栅制备技术包括的全息曝光,纳米压印,电子束曝光,步进式光刻的设计原理均为在平整表面上进行掩膜图形的制备,而 LC-DFB 结构要求将平整表面的光栅掩膜图形通过微米量级厚度的限制层转移到近波导层,因此如何在一次外延生长后在器件的近波导层处制备高质量的布拉格光栅逐渐成为了铋化物 LC-DFB 激光器的研究重点。目前国际上典型的方案包括以下几种。

2010 年坦佩雷理工大学的 Haring K 课题组采用纳米压印技术在平整的外延片上制备三阶光栅掩膜^[21],如图 4 所示,其利用多次的掩膜图形转移,将

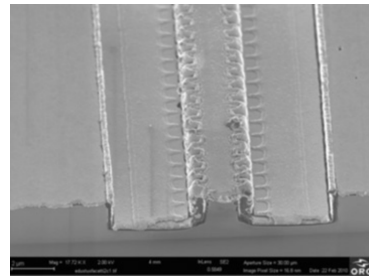


图 4 2010 年纳米压印三阶光栅 SEM 图

Fig.4 Scanning electron microscope of 3rd grating fabricated by nanoimprint in 2010

光栅掩膜通过金属铬和氮化硅转移到外延层中,实现了 2 μm 波段单模激射,边模抑制比 35 dB,如图 5 所示,单面输出功率约 2 mW,这种方案将光栅掩膜图形制备在平整外延片上,因此,可以与现有的纳米压印技术具有良好的兼容性,光栅掩膜质量较高,其三阶光栅设计周期 810 nm,占空比 0.5,但是由于需要刻蚀总厚度约为 2 μm 的接触层和限制层材料,将表面的胶掩膜图形转移到近波导层,其刻蚀深宽比达到 5:1,对于纯纳米压印胶来说,达不到如此高的选择比,因此需要引入金属和介质层作为掩膜转移的媒介,增加了整体的制备流程,同时,由于通过多次

的掩膜转移形成深刻蚀光栅，光栅质量也会有明显的下降。2016 年,该课题组通过优化纳米压印条件,通过金属 Ni 做图形掩膜转移媒介,实现了高质量光栅的刻蚀^[22],如图 6 所示,受益于纳米压印技术的优化和制备工艺的提升,其 LC-DFB 的光栅形貌与 2010 年报道的文献相比有了巨大的进步,同时其激光器还实现了 50 dB, 25 mW 的高性能单模激射,如图 7 所示。这也给了一个提示,随着纳米压印这种技术的进步,有望进一步取代全息曝光和电子束曝光成为铋化物 LC-DFB 激光器制备的主流技术路线。

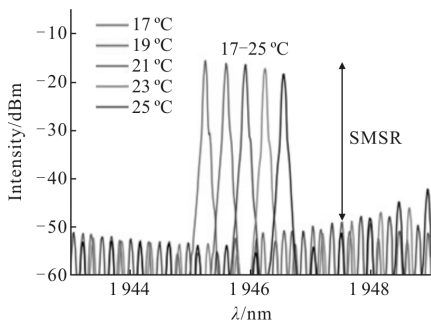


图 5 LC-DFB 激光器边模抑制比谱

Fig.5 Side mode suppression ratio of LC-DFB

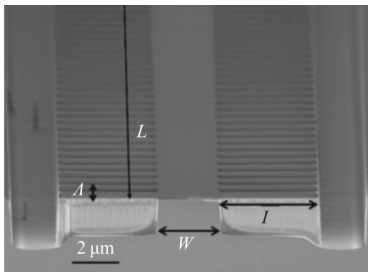


图 6 2016 年纳米压印三阶光栅 SEM 图

Fig.6 Scanning electron microscope of 3rd grating fabricated by nanoimprint in 2016

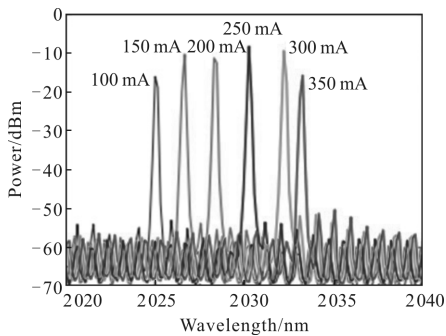


图 7 LC-DFB 激光器边模抑制比谱

Fig.7 Side mode suppression ratio of LC-DFB

2013 年马里兰大学 Apiratikul 对铋化物单模激光器的制备流程进行了进一步的简化,利用步进式光刻制备六阶光栅的掩膜图形,然后利用电感耦合等离子体刻蚀(ICP)技术将光栅图形转移到近波导层^[8],LC-DFB 器件结构见图 8,由于采用了高阶光栅,光栅周期为 1.64 μm,对应于 0.583 的占空比,光栅刻蚀深宽比降低到 2.2:1,激光器室温连续激射,最大功率达到 40 mW,从图 9 可以看到这种方案的 LC-DFB 边模抑制比在 25 dB 左右。

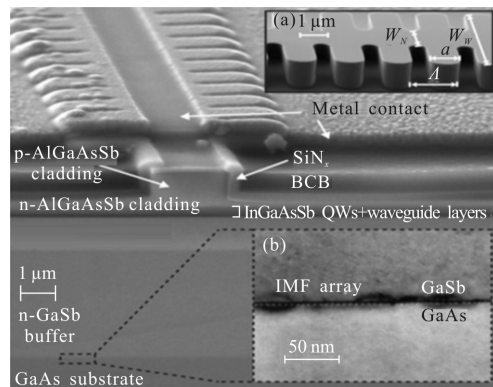


图 8 由 i-line 步进式光刻机制备的六阶 LC-DFB 扫描电子显微镜图

Fig.8 Scanning electron microscope of 6th-order grating fabricated by i-line photolithography

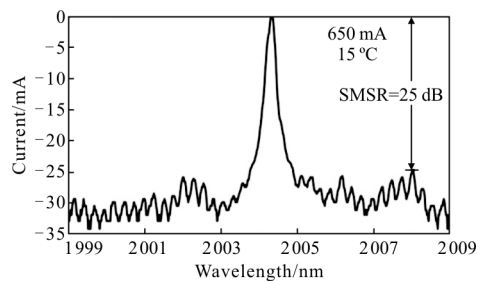


图 9 LC-DFB 激光器边模抑制比谱

Fig.9 Side mode suppression ratio of LC-DFB

2006 年蒙彼利埃大学的 Abdelmagid Salhi 课题组采用电子束曝光带胶剥离方案,首先用接触式光刻刻蚀形成条形波导,然后采用 lift-off 工艺在条形波导两侧制备一阶金属铬 Cr 光栅,其器件的扫描电子显微镜如图 10 所示,如图 11 所示这种方案实现了 2.3 μm, 35 dB, 10 mW 的室温连续激射,快轴和慢轴 M² 分别为 3.1 和 1.1,激光器线宽 2.2 MHz^[23]。

2015 年笔者课题组采用接触式光刻和全息曝光

的方法,将一次深刻蚀分解为两步刻蚀,即首先利用接触式光刻制备条形波导,然后利用全息曝光技术在条形波导两侧制备布拉格光栅^[20],由于是在非平整表面上制备光栅图形,条形波导两边和上方的胶厚均不同,为此优化了 ICP 刻蚀条件,形成 60° 倾斜角度的条形波导,有效解决了波导侧壁堆胶导致的光栅掩膜形变的问题,针对铋化物材料刻蚀技术的不完善,优化了 ICP 的刻蚀条件,采用不同比例的刻蚀气体($Cl_2/Ar_2/BCl_3$)和 RF 功率,制备了不同形貌和占空比的光栅,如图 12 所示^[24]。为耦合系数的优化和激光器性能的提升打下了基础。同时,还在条形波导上方设计了刻蚀牺牲层,在光栅掩膜图形转移的过程中有效保护了条形波导,保证了电流的良好注入。本课题组的这种方案,通过将条形波导和光栅的刻蚀分离,有效降低了光栅刻蚀时的深宽比,对于二阶光栅来说已经小于 2:1,大大降低了光栅刻蚀的难度,其器件结构和性能如图 13、14 所示,最终实现了激光器的室温连续工作,单面输出功率 10 mW,边模抑制比 24 dB。

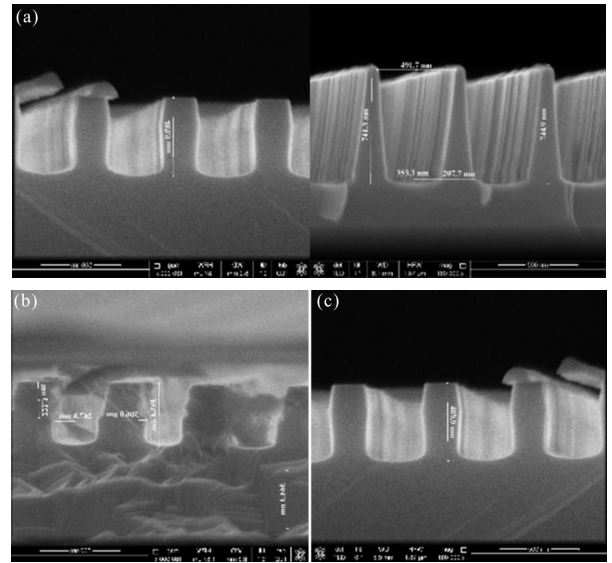


图 12 不同刻蚀条件下光栅形貌图

Fig.12 Shape of gratings under different etching conditions

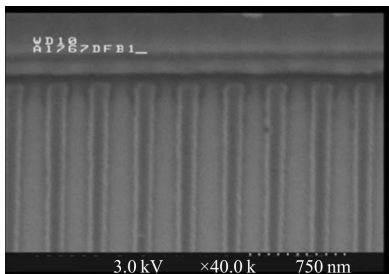


图 10 金属光栅 LC-DFB 激光器扫描电子显微镜图

Fig.10 Scanning electron microscope of LC-DFB with metal gratings

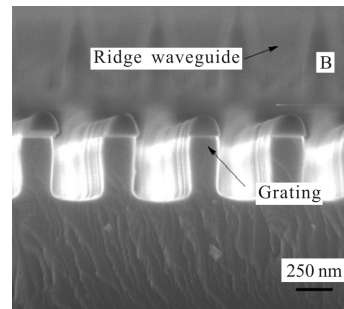


图 13 二阶光栅 LC-DFB 扫描电子显微镜图

Fig.13 Scanning electron microscope of 2nd order LC-DFB

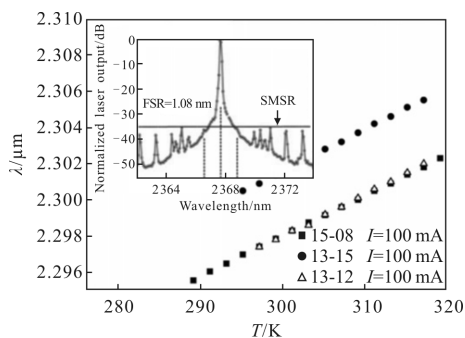


图 11 金属光栅 LC-DFB 激光器边模抑制比谱

Fig.11 Side mode suppression ratio of LC-DFB with metal grating

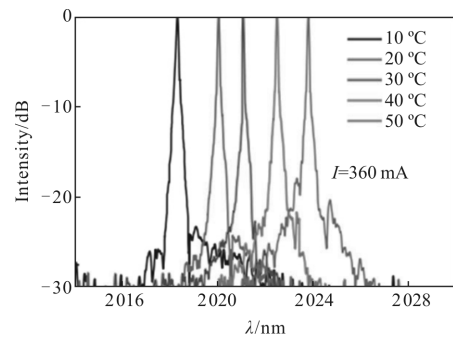


图 14 LC-DFB 激光器波长和边模抑制比随温度变化

Fig.14 Changes of wavelength and SMSR of LC-DFB with temperature

随后笔者课题组基于 Lift-off 工艺,在条形波导两侧制备二阶金属光栅,如图 15 所示,设计开发了铋化物金属光栅 LC-DFB,实现了 2 μm 波段单模激

光室温连续工作,激光器线宽如图 16 所示为 60 MHz,图 17 为激光器边模抑制比图,器件的典型边模抑制比达到 30 dB,通过优化耦合系数,将激光器室温输出功率提高到 20 mW,最终器件的功率-电压-电流谱如图 18 所示。为目前室温连续金属光栅方案铋化物单模激光器的最高输出功率。此外本课题组还开发了铋化物布拉格反射器单模激光器,将 2 μm 波段边模抑制比提高到 35 dB,线宽 20 MHz,通过片上集成功率放大器,进一步将输出功率提高到 35 mW,线宽 80 MHz,同时保持边模抑制比大于 30 dB。

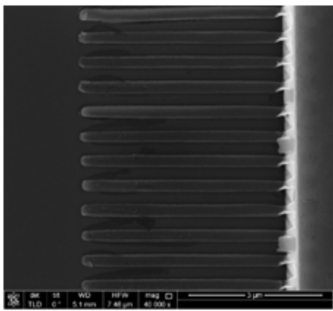


图 15 金属光栅 LC-DFB 激光器扫描电子显微镜图

Fig.15 Scanning electron microscope of LC-DFB with metal gratings

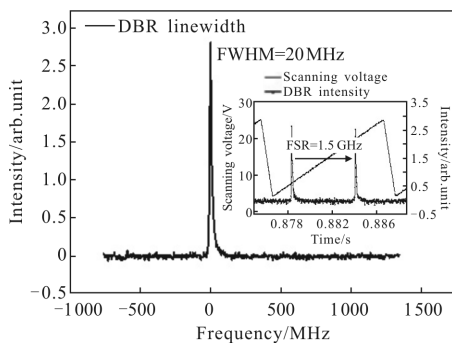


图 16 金属光栅 LC-DFB 激光器线宽

Fig.16 Linewidth of LC-DFB with metal gratings

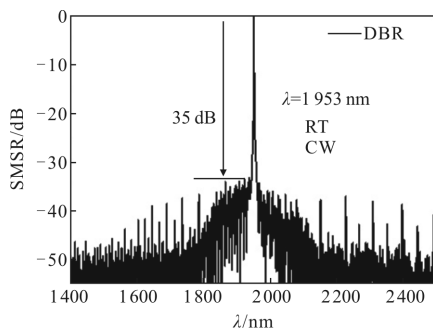


图 17 金属光栅 LC-DFB 激光器边模抑制比谱

Fig.17 Side mode suppression ratio of LC-DFB with metal grating

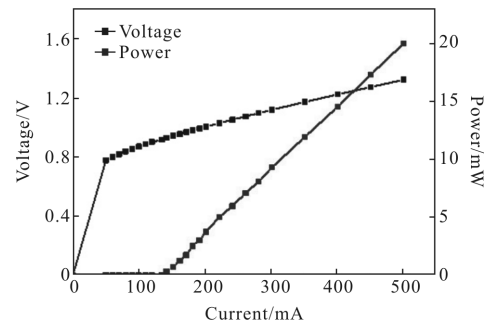


图 18 金属光栅 LC-DFB 激光器功率电压电流图

Fig.18 Power-voltage-current of LC-DFB with metal gratings

4 结 论

目前铋化物材料和器件的研究仍存在相当的难度:第一,突破铋化物材料的不互溶隙,进一步提高铋化物材料的生长质量;第二,铋化物激光器制备工艺的不成熟,包括 FP 激光器和 DFB、DBR 激光器在内的铋化物材料的刻蚀、制备工艺相较于 GaAs 和 InP 基材料,还有待于进一步的提升。第三,铋化物材料的热导率相较于 InP 和 GaAs 材料要低很多,因此还需要对铋化物激光器的封装工艺进行进一步的优化使得有源区的热量能及时传导出去,改善激光器的性能。

目前国际上铋化物单模激光器已经实现了商业化生产,而国内正处于实验室向产业化过渡的关键阶段,相信随着从业者的不断努力,完全国产的铋化物单模激光器有望很快进入市场,满足国计民生的重大需求。

参考文献:

- [1] Gaimard Q, Nguyen-Ba T, Larrue A, et al. Distributed-feedback GaSb -based laser diodes in the 2.3 to 3.3 μm wavelength range [J]. Semiconductor Lasers and Laser Dynamics Vi, 2014, 9134: 91341J.
- [2] Civiš S, Horká V, Šimeček T, et al. GaSb based lasers operating near 2.3 μm for high resolution absorption spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2005, 61(13-14): 3066-3069.
- [3] Yang R Q. Interband Cascade Lasers: from concept to devices and applications [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008: 1-4.
- [4] Shentu G L, Pelc J S, Wang X D, et al. Ultralow noise up-conversion detector and spectrometer for the telecom band[J].

- Optics Express, 2013, 21(12): 13986-13991.
- [5] Hosoda T, Feng T, Shterengas L, et al. High power cascade diode lasers emitting near 2 μm [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(13): 1089-1093.
- [6] Dolginov L M, Druzhinina L V, Eliseev P G, et al. Injection heterolaser based on InGaAsSb four-component solid solution [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1978, 8(3): 703-704.
- [7] Reboul J R, Cerutti L, Rodriguez J B, et al. Continuous-wave operation above room temperature of GaSb-based laser diodes grown on Si [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(12): 511-515.
- [8] Apiratikul P, He L, Richardson C J K. 2 μm laterally coupled distributed-feedback GaSb-based metamorphic laser grown on a GaAs substrate [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(23): 231101.
- [9] Rong J M, Xing E N, Zhang Y, et al. Low lateral divergence 2 mm InGaSb/AlGaAsSb broad-area quantum well lasers[J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7246-7252.
- [10] Zhang Y G, Li A Z, Zheng Y L, et al. MBE grown 2.0 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW ridge waveguide laser diodes[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 227(227): 582-585.
- [11] Li Z G, Liu G J, You M H, et al. 2.0 μm room temperature CW operation of InGaAsSb/AlGaAsSb laser with asymmetric waveguide structure[J]. Laser Physics, 2009, 19(6): 1230-1233.
- [12] Zhang Yu, Tang Bao, Xu Yingqiang, et al. Molecular beam epitaxy growth of in GaSb/AlGaAsSb strained quantum well diode lasers [J]. Journal of Semiconductors, 2011, 32(10): 103002.
- [13] Liao Y P, Zhang Y, Yang C A, et al. High-power, high-efficient GaSb-based quantum well laser diodes emitting at 2 μm [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(6): 672-675.
- [14] Chai X L, Zhang Y, Liao Y P, et al. High power GaSb-based 2.6 μm room-temperature laser diodes with InGaAsSb/AlGaAsSb type I quantum-wells[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(3): 257-260.
- [15] Xing J L, Zhang Y, Xu Y Q, et al. High quality above 3 μm mid-infrared InGaAsSb/AlGaInAsSb multiple-quantum well grown by molecular beam epitaxy [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 454-457.
- [16] Xing J L, Zhang Y, Liao Y P, et al. Room-temperature operation of 2.4 μm InGaAsSb/AlGaAsSb quantum-well laser diodes with low-threshold current density [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(5): 054204.
- [17] Gaimard Q, Nguyen -Ba T, Larrue A, et al. Distributed-feedback GaSb-based laser diodes in the 2.3 to 3.3 μm wavelength range [C]//Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VI, 2014: 91341J.
- [18] Liao Z L, Flanders D C, Walpole J N, et al. A novel GaInAsP/InP distributed feedback laser [J]. Applied Physics Letters, 1985, 46(3): 221-223.
- [19] Kogelnik H. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(5): 2327-2335.
- [20] Yang C A, Zhang Y, Liao Y P, et al. 2- μm single longitudinal mode GaSb-based laterally coupled distributed feedback laser with regrowth-free shallow-etched gratings by interference lithography [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 024204.
- [21] Haring K, ViheriääLää J, Viljanen M R, et al. Laterally-coupled distributed feedback InGaSb/GaSb diode lasers fabricated by nanoimprint lithography[J]. Electronics Letters, 2010, 46(16): 1146-1147.
- [22] Viheriala J, Haring K, Suomalainen S, et al. High spectral purity high-power GaSb-based DFB laser fabricated by nanoimprint lithography [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(11): 1233-1236.
- [23] Salhi A, Barat D, Romanini D, et al. Single-frequency Sb-based distributed-feedback lasers emitting at 2.3 μm above room temperature for application in tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Applied Optics, 2006, 45(20): 4957-4965.
- [24] Li H, Yang C A, Xie S W, et al. Laterally-coupled distributed feedback lasers with optimized gratings by holographic lithography etching [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(6): 147-151.