

2~4 μm 中红外锑化物半导体激光器研究进展 (特邀)

杨成奥^{1,2}, 张 一^{1,2}, 尚金铭^{1,2}, 陈益航^{1,2}, 王天放^{1,2}, 佟海保^{1,2},
任正伟^{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: 2~4 μm 波段是非常重要的红外大气窗口, 工作在这个波段的激光器在气体检测, 医疗美容和工业加工领域具有十分巨大的应用价值。锑化物半导体材料低维结构具有窄禁带直接跃迁发光的独特优势, 是实现中红外波段半导体激光器的理想材料体系。近年来, 国内外锑化物半导体激光器研究不断取得重要进展, 先后实现了量子阱发光的波长拓展、大功率单管和阵列激光器的室温连续激射, 也实现了多波段的单模激光器的室温连续工作。锑化物半导体低维材料组分复杂、界面钝化性质特殊, 材料外延和工艺制备技术难度较大。文中从锑化物半导体激光器的基本原理出发, 综述了国内外研究现状, 介绍了锑化物材料低维结构激光器的设计方案、关键制备技术的主要进展, 分析了今后该类激光器性能优化的重点研究方向等。

关键词: 锑化镓; 量子阱半导体激光器; 红外激光器

中图分类号: O47 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201075

Research progress of 2-4 μm mid-infrared antimonide semiconductor lasers (*Invited*)

Yang Chengao^{1,2}, Zhang Yi^{1,2}, Shang Jinming^{1,2}, Chen Yihang^{1,2}, Wang Tianfang^{1,2}, Tong Haibao^{1,2},
Ren Zhengwei^{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: The 2-4 μm band is a very important infrared atmospheric window. Lasers operating in this band have a wide range of applications in gas detection, medical application and industrial processing. The low-dimensional structure of antimonide semiconductor materials has the unique advantage of narrow forbidden band, direct transition luminescence, and is an ideal material system for realizing mid-infrared semiconductor lasers. In recent years, research on antimonide semiconductor lasers at home and abroad has made important progress, achieving wavelength expansion of quantum well luminescence, room temperature continuous lasing of high-power single chip and laser bars, and continuous room temperature continuous operation of multi-band single-mode lasers. Due to the complex composition of the low-dimensional materials of the antimonide and the special interface

收稿日期: 2020-10-26; 修订日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61790580, 61790581, 61790582, 61790583); 广东省重点研发计划 (2020B0303020001, 2018B030329001)

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

通讯作者: 张宇 (1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事锑化物红外半导体激光器方面的研究。Email: zhangyu@semi.ac.cn

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

passivation properties, the epitaxial materials and process preparation techniques are difficult. Based on the basic principle of antimonide semiconductor lasers, this paper reviewed the research status at home and abroad, introduced the design scheme of the low-dimensional structure lasers antimonide materials, and the main progress of key preparation techniques, and analyzed the performance optimization, focused on research and development direction of such lasers in the future.

Key words: GaSb; quantum well semiconductor laser; infrared laser

0 引言

以铋化物激光器为代表的中红外激光器在 2~4 μm 的红外窗口波段具有巨大的应用价值,可以广泛的应用于医疗美容,工业生产,环境监管等关系国计民生的重要领域^[1-4]。铋化物半导体材料指的包含 Al、Ga、In、As、Sb 等 III-V 族元素在内的多元化合物合金材料(见图 1)、具有窄禁带直接跃迁发光的独特优势,兼具重量轻、可直接调制、波长覆盖范围广等多种优势。越来越受到研究人员的关注,逐渐成为 2~4 μm 波段半导体激光光源的研究热点^[5]。

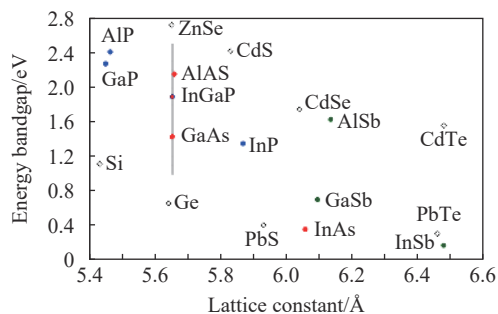


图 1 III-V 族部分合金带隙和晶格常数^[6]

Fig.1 Band gap and lattice constant of III-V part alloy^[6]

国际上铋化物激光器的研制源自 20 世纪 7、80 年代,早期的工作受限于材料生长技术,铋化物激光器各类指标参数都很低。进入 21 世纪后,多种结构的激光器被相继报道:包括优势波长在 2~3 μm 的 I 型应变量子阱结构、优势波长在 3~4 μm 的 II 型带间级联结构、基于侧向耦合分布反馈结构的单模激光器和可以实现大功率窄线宽的光泵浦碟片激光器结构。目前已经实现 2~4 μm 波长的完整覆盖,铋化物大功率激光器实现了室温连续激射功率 2 W、单 bar 条输出功率 16 W、叠阵输出功率 140 W 的指标记录;铋化物单模激光器则实现了几十毫瓦室温连续输出,边模抑制比覆盖 25~50 dB;铋化物光泵浦碟片激光器则实现了近衍射极限输出 17 W^[7-10]。多家公司

已经推出了基于铋化物材料的商用激光器,铋化物半导体激光器开始从实验室向商业化生产快速过渡。

中国科学院上海微系统所,长春理工大学等国内单位在铋化物材料的研究工作也做出了重要贡献,先后实现了该 2 μm 波段的 FP 腔激光器室温脉冲和连续激射^[11-12]。进入 21 世纪后,中国科学院半导体所在铋化物激光器研究和性能的进一步提升上发挥了巨大作用。2010 年实现了铋化物 FP 腔应变量子阱激光器的室温连续工作^[13],随后几年迅速将激光器输出功率提高到瓦量级,快速追赶国际指标^[14-17],2017 年通过优化外延生长技术和干法刻蚀技术,将激光器单管连续功率提升到 1.5 W,单 Bar 功率提高到 8.5 W,2019 年通过引入数字合金势垒结构进一步将铋化物 FP 腔激光器单管输出功率提高到 1.62 W,单 Bar 功率提高到 16 W,引领了国内铋化物大功率激光器的发展方向。2020 年进一步将铋化物单管输出功率提高到 2 W。在向长波长拓展方面,通过优化应变、引入五元势垒和改变能带结构,中国科学院半导体所组实现了 2~3 μm 波段全波长的覆盖式激射^[15]。2018 年,中科院半导体所采用 II 型带间级联结构,成功实现了 3.45 μm 波长的室温连续激射输出功率 40 mW,同年,与长春光机所合作的基于铋化物的 2 μm 波段光泵浦碟片激光器实现了国内的首次室温连续激射,近衍射极限输出,功率 0.5 W,2019 年进一步提高到 1.2 W。在单模激光器方面,2016 年半导体所实现了铋化物折射率导引分布反馈单模激光器的室温连续激射,边模抑制比 (SMSR) 达到 24 dB,单面输出功率 10 mW^[18],随后通过优化光栅的耦合系数,进一步将铋化物单模激光器的 SMSR 提高到 41 dB,输出功率也进一步增加到 35 mW,线宽压缩到 10 MHz^[19]。2018 年采用金属光栅结构将铋化物单模激光器的边模抑制比提高到 53 dB,输出功率超过 40 mW,线宽小于 9 MHz,同年国内首次实现了铋化物布拉格反射镜单模激光器室温连续激射。总的来说,中国科学院半

导体所着力于锑化物激光器的材料生长和器件制备工作, 引领了国内相关领域研究方向的同时, 部分器件性能指标已经接近或者超过国外最好水平, 极大的提高了国内锑化物激光器整体研究水平。

文中将针对锑化物激光器外延生长, 结构设计和制备技术进行分析与总结, 重点介绍锑化物激光器的外延、器件结构设计和已经实现的技术指标并指出该类激光器性能优化的重点研发方向。

1 锑化物大功率激光器

锑化物大功率多模激光器的发展与其外延结构的设计和研宄密不可分, 近些年来, 国内外相关研究单位在此方面取得了很大的进展。

(1) 应变量子阱结构: 应变量子阱结构相比于传统的双异质结结构可以有效的提高锑化物激光器的光电性能, 其引入的应变效应和量子效应, 对于降低激光器阈值电流密度和拓展锑化物激光器的波长覆盖范围具有重要作用, 其基本能带结构如图 2 所示。1992 年, Choi 等人首次报道了室温连续单面出光功率 190 mW 的量子阱结构器件^[20]。随后锑化物激光器输出功率得到大幅提升, 阈值电流密度稳步降低。1996 年 David Sarnoff 研究中心引入分别限制结构, 报道的锑化物 2 μm 波段激光器, 最大输出功率达 1.2 W。

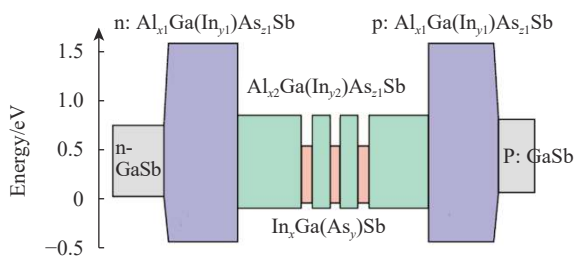


图 2 典型锑化物激光器能带结构^[6]

Fig.2 Schematic energy-band structure of antimonide laser^[6]

(2) 宽波导大光腔结构: 宽波导结构的主要出发点是为了降低掺杂在限制层中的自由载流子的光学损耗, 从而保证激光器工作在较低的内损耗模式下, 这种大光腔结构可以增大激光光束近场的尺寸, 减小出光面的光功率密度, 在增大激光器出光功率的同时, 有效增加器件的寿命。2002 年, Rattunde 等人报道了采用三对压应变量子阱 ($\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{Sb}/$

$\text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$) 结构, 有源区两边为 400 nm 的 $\text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 波导层, 限制层采用的是 2 μm 的 $\text{Al}_{0.84}\text{Ga}_{0.16}\text{As}_{0.06}\text{Sb}_{0.94}$ 。激射波长在 1.98 μm, 实现室温最大激射功率 1.7 W^[21]。

(3) 窄波导和非对称波导结构, 窄波导结构降低了外延层中铝组分的含量, 从 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 降低到 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$, 在优化了有源区光限制因子同时, 减少外延层中的光损耗, 避免了大光腔结构的引入所导致的串联电阻偏大的问题。2006 年, Rattunde 等人采用窄波导结构, 将远场发散角降低到半高宽 44°, 实现 2 μm 室温连续激射 1.96 W^[22]。然而, 窄波导的引入导致了光场与 P 面高掺杂的光学损耗区交叠程度增加, 影响了器件性能的进一步提升。通过引入非对称波导结构, 可以将光场压缩进光损耗较小的 N 面波导层, 利用 N 型掺杂限制层弱的自由载流子吸收降低有源区光损耗, 有效解决窄波导光损耗大的难题^[12]。

(4) 阻挡层和级联结构: 其基本能带结构如图 3 所示, 在长波长锑化物应变量子阱激光器的外延结构设计中, 小的价带带阶差是导致大的器件漏电流和较差的温度特性的直接原因, Jianfeng Chen 等人在引入非对称波导结构后, 为了补偿带阶过小, 在 P 面限制层和波导层之间增加了 20 nm AlSb 电子阻挡层; 在 N 面限制层和波导层之间增加了 5 nm AlAs_{0.1}Sb_{0.9}, 实现了 GaSb 基 2 μm 波段单管 1.5 W 功率输出。而利用 InAs 和 GaSb 的能带差异可以通过掺杂实现 GaSb/InAs 异质结界面载流子的带间隧穿, 而不会引入自由载流子吸收, 2016 年 Takashi Hosoda 等人利用这种特

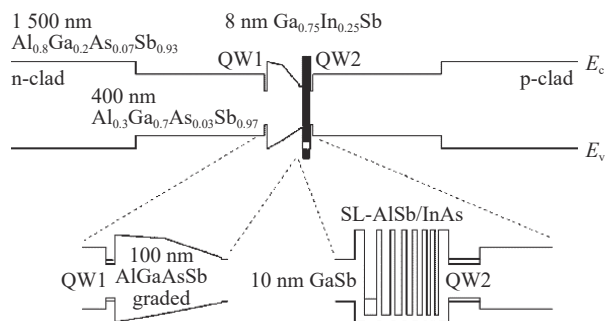


图 3 典型锑化物量子阱级联激光器平带能带图^[5]

Fig.3 Schematic band diagrams of the laser heterostructure under flat band condition^[5]

点,优化了 GaSb/InAs 隧穿结和载流子注入区,使其能实现 2 μm 波段级联泵浦,实现了 GaSb 基 2 μm 波段单管 2 W 的功率输出,为目前铋化物激光器报道的最高单管室温连续激光功率^[5]。

中国科学院半导体研究所在 2010 年首次报道了采用 MBE 生长的 2 μm InGaSb/InGaAsSb 多模激光器的室温连续激光^[14],通过激光器结构设计、外延生长优化和半导体制备工艺优化,逐步将单管激光功率提高到 1.62 W,Bar 条功率提高到 16 W^[6, 15-17]如图 4、5 所示。

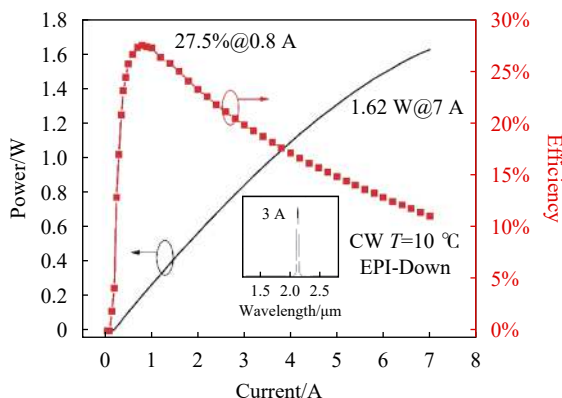


图 4 10 °C 下,连续波操作下,激光器单管(腔面增反/增透)功率-效率-电流关系曲线^[17]

Fig.4 Power-efficiency-current characteristics measured for HR/AR coated single laser at CW operation at 10 °C^[17]

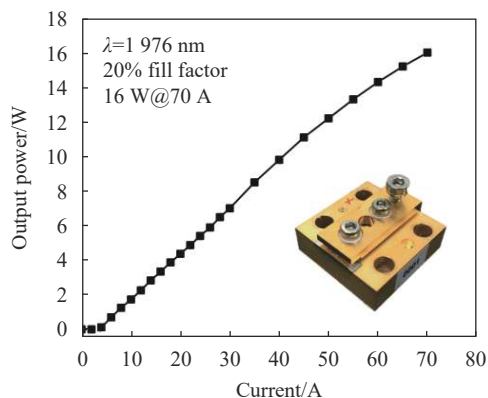


图 5 10 °C 下,连续波操作下,激光器 bar 条(腔面增反/增透)功率-效率-电流关系曲线^[16]

Fig.5 Power-voltage-current characteristics measured for HR/AR coated laser bar at CW operation at 10 °C^[16]

2 铋化物单模激光器

对于半导体激光器来说,实现单模激光的一个有

效方案就是在外延层中引入周期性的光栅结构。然而铋化物材料外延层中比例较大的铝组分容易氧化的特性使得 GaSb 基的单模激光器的制备工艺与 InP 基激光器广泛采用的二次外延技术不兼容;目前仅有少数研究机构掌握了铋化物材料的刻蚀技术;也仅有少数研究单位可以实现高质量铋化物材料的外延生长,这一系列的技术难题都大大增加了铋化物单模激光器的制备难度。

国际上主流的铋化物单模激光器为侧向耦合分布反馈(Laterally-coupled distributed feedback laser, LC-DFB)结构^[23-24]。这种结构采用一次外延技术,利用侧向光栅实现模式筛选,避免了二次外延技术的引入。但却同样存在着如何在器件的近波导层处制备高质量的光栅图形的难题^[19]。

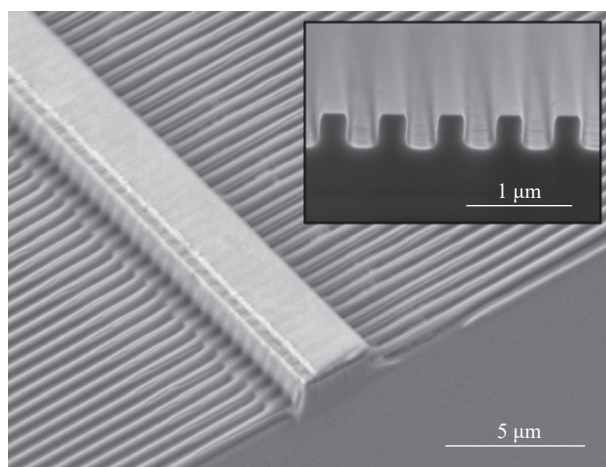


图 6 电子束曝光二阶 LC-DFB 扫描电镜图^[25]

Fig.6 Scanning electron microscope of 2nd grating fabricated by EBL^[25]

2013 年 Siamak Forouhar 等人采用二阶刻蚀光栅结构,如图 6 所示。在 2 mm 腔长的激光器上实现了 50 mW 室温连续工作。边模抑制比在 30 dB 左右^[25]。

2009 年 James.Gupta 等人采用一阶金属光栅。将铬作为金属光栅材料,实现了复耦合 DFB 激光器的制备,如图 7 所示,激光器室温连续工作,激光波长 2389 nm,输出功率 10 mW^[26]。

2015 年中国科学院半导体所第一次报道了铋化物单模激光器的制备。SMSR 约 24 dB,为国内首批报道的室温连续铋化物单模激光器的研究单位^[18]。随后中国科学院半导体所转入了复耦合单模激光器的制备工作中去,制备了二阶金属光栅 LC-DFB 和激

光器,如图 8 所示^[19]。2019 年,半导体所进一步优化单模激光器的结构设计方案,实现了边模抑制比 53 dB,室温连续 40 mW 的高性能单模激光,是目前已报道的铽化物单模激光器文献中唯一同时实现了高功率输出的同时保持高边模抑制比的器件结果。

3 铽化物激光器波长拓展和光泵浦碟片激光器

作为一种半导体激光器,铽化物激光器与其他中红外激光器相比,一个巨大的优势就是波长覆盖范围广和容易实现波长调谐,通过精细的能带工程设计,可以实现 2~4 μm 波段的完整覆盖。

目前,国际上铽化物长波长激光器所采用的方案又分为两类:

(1) 优势波段在 2~3 μm 的铽化物 I 型应变量子阱激光器,这类激光器通过调整有源区的带隙和应变,实现激光波长的拓展,2002 年, Sarnoff 研究中心实现了 2.5 μm 波段功率 1 瓦的室温连续激光。随着有源区中 In 组分的提高,虽然有源区带隙不断缩小,但是其价带带阶随之减小,空穴限制能力减弱,在波长小于 2.7 μm 时激光器仍能保持较高性能,然而在波长大于 2.7 μm 时,过小的价带带阶导致俄歇复合的急剧增加,激光器性能迅速衰减,为了解决这个问题,2005 年 Walter Schottky 研究所提出了五元势垒结构,将能带整体下移,通过牺牲导带带阶的方式获得更大的价带带阶,从而可以进一步缩小有源区带隙,实现波长的进一步拓展,2009 年 Belenky 实现了 3 μm I 型量子阱激光器 300 mW 的室温连续激光^[27]。2012 年 Walter Schottky 研究所采用五元势垒结构将铽化物量子阱激光器激光波长进一步拓展到 3.73 μm ^[28]。虽然压应变结构,特别是五元势垒材料的引入有效拓展了激光器的激光补偿,但由于 In 和 Ga 存在较大的不互溶隙,在材料生长过程中需要采用非热力学平衡的生长方式避免材料的偏析;随着应变的增大,有源区对载流子的限制更强烈,但是过大的应变和较低的生长温度会导致晶格缺陷的增多,甚至出现晶格弛豫,因此如何在众多的条件中获得一个最优的应变和较低的生长温度会导致晶格缺陷的增多,甚至出现晶格弛豫,因此如何在众多的条件中获得一个最优的生长窗口是此类器件材料生长的关键。

(2) 优势波段在 3~4 μm 的带间级联激光器,带间级联激光器由 R.Q.Yang 在 1994 年首先提出,是一种处于传统双极型带间跃迁激光器和单极型量子级联激光器中间的混合型激光器。这种结构的激光器既具有带间跃迁无需声子参与的优点,又通过载流子的

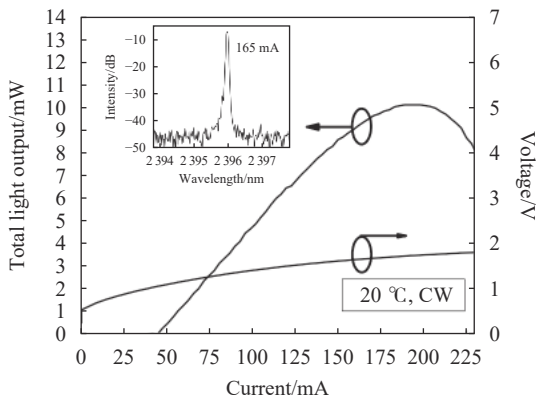


图 7 金属光栅 LC-DFB 激光器扫描电子显微镜图^[26]

Fig.7 Scanning electron microscope of LC-DFB with metal gratings^[26]

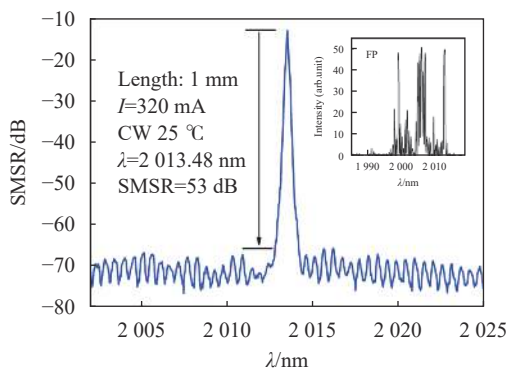
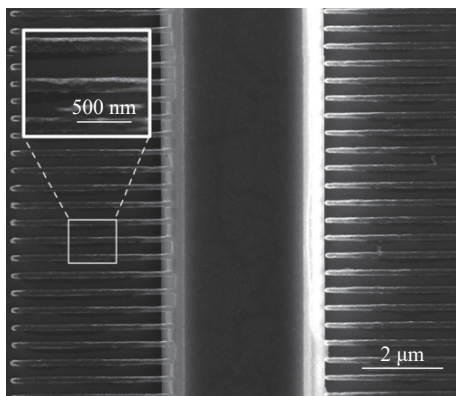


图 8 金属光栅 LC-DFB 激光器扫描电子显微镜图和光谱图^[19]

Fig.8 Scanning electron microscope and spectrum of LC-DFB with metal grating^[19]

隧穿跃迁实现单个电子发生多次跃迁产生多个光子, 具有很高的量子效率。这种激光器利用带间跃迁发射光子, 因此较好的避免了量子级联激光器中子带间光声子辐射引起的非辐射复合, 具有更低的阈值电流密度和更高的特征温度; 由于其有源区的激光波长主要由量子阱的宽度决定, 因此在外延层设计中可以采用成熟的材料结构, 通过调整阱宽获得更大范围的激光波长, 尤其在 3~4 μm 波段与 I 型量子阱结构相比具有绝对优势, 其基本能带结构如图 9 所示。

2008 年, 美国海军实验室 (NRL) 实现了第一支室温连续激光的带间级联激光器, 如图 10 所示, 激光波长在 3.7 μm ^[29]。2011 年 NRL 提出载流子再平衡概念, 通过改变电子注入区的掺杂浓度, 平衡有源区中过高的空穴浓度, 从而解决了有源区中电子和空穴数量不均等的问题, 其器件在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时实现了连续激光功率 158 mW^[30]。2014 年, NRL 进一步将带间级联激光器的室温输出功率提高到 592 mW, 是目前带间级联激光器的最高输出功率^[31]。

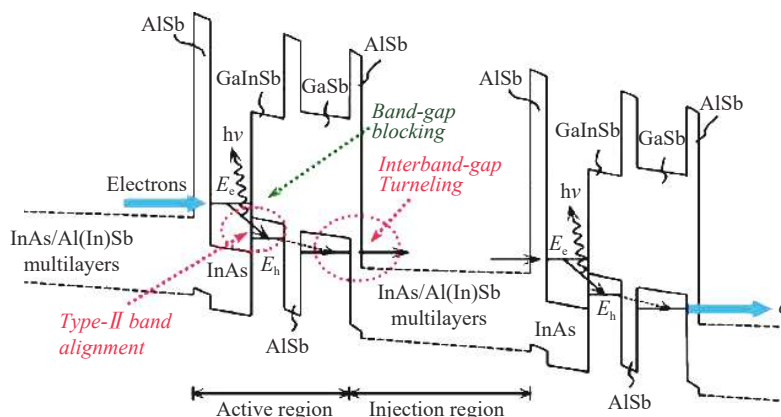


图 9 带间级联激光器有源区能带图^[29]

Fig.9 Band structure of the active region of ICL^[29]

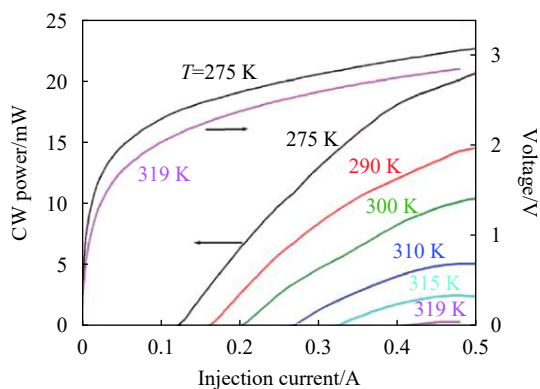


图 10 第一支室温连续激光的带间级联激光器的功率-电压-电流关系图^[29]

Fig.10 I-V-P performance of the first RTCW interband cascade laser^[29]

在碲化物的波长拓展和碟片激光器方面, 中国科学院半导体所也做了比较多的工作, 2015 年通过提高有源区铟组分和引入 AlGaInAsSb 五元势垒提高价带带阶, 优化了势垒层的生长温度和量子阱应变, 将碲化物 I 类量子阱光致发光波长拓展到 3.83 μm , 同年实现了 2.4 μm 激光器的室温连续激光。中国科学院半

导体所在 2017 年成功实现了 2~3 μm 激光器的激光, 其中 2.6 μm 激光器室温连续激光功率 325 mW, 如图 11 所示^[15], 随后完成了覆盖 2.6-3 微米的碲化物激光器室温连续激光, 光谱如图 12 所示。2018 年, 中国科学院半导体所采用 II 型带间级联结构, 成功实现了 3.45 μm 波长的室温连续激光输出功率 40 mW。

光泵浦半导体碟片激光器 (OP-SDL) 也称为光泵浦垂直外腔面发射激光器 (OPS-VECSEL), 其基本结构如图 13 所示, 它兼顾了半导体面发射激光器 (VCSEL) 与二极管泵浦全固态激光器 (DPSS) 的优点, 可以输出高功率、圆对称、近衍射极限的基模光束。2003 年蒙彼利埃大学的 Cerutti 等研究人员首次实现 GaSb 基 SDL 的激光输出。2008 年斯特拉思克莱德大学的 Hopkins 等人第一次实现室温下高光束质量的 GaSb 基 SDL 的瓦级功率的激光输出。2016 年夫琅禾费研究所, 改善增益芯片热特性在 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下实现 17 W 的激光输出, 这是迄今为止 GaSb 基 SDL

的最大输出功率,其功率谱图如图 14 所示^[32]。2018 年中国科学院半导体所与长春光机所合作的基于铽化

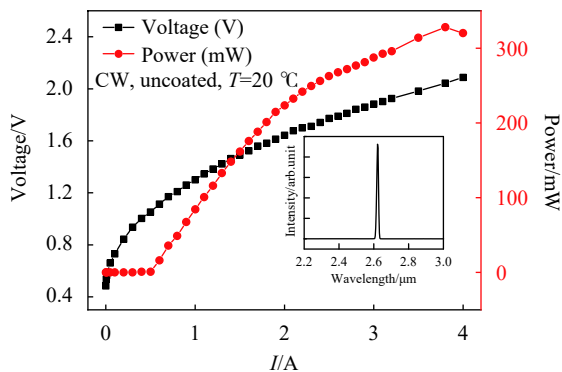


图 11 2.6 μm 激光器功率电流电压图^[15]

Fig.11 PIV performance of laser emitting at 2.6 μm^[15]

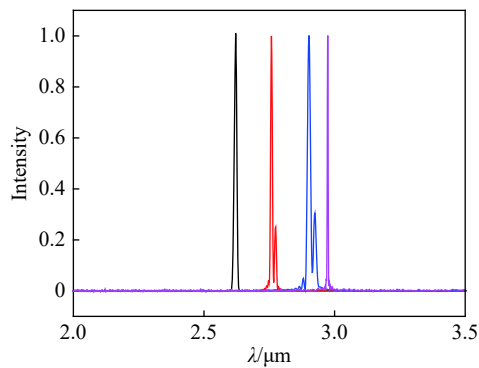


图 12 2.6~3 μm 激光器室温激射谱

Fig.12 Laser spectrum of laser emitting ranging from 2.6 μm to 3 μm at room temperature

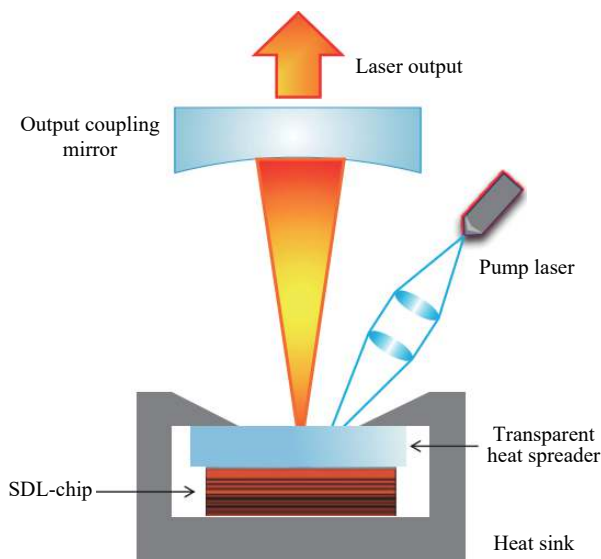


图 13 半导体碟片激光器 (SDL) 的结构示意图

Fig.13 Schematic of typical SDL

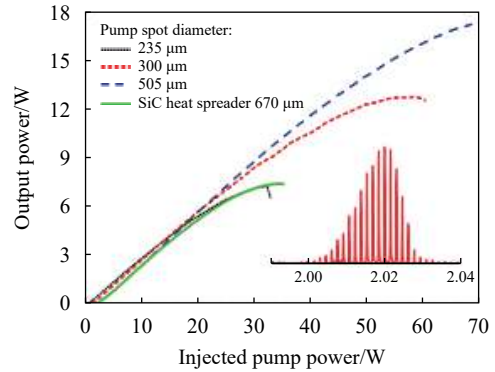


图 14 不同泵斑点光斑直径的 2.0 μm SDL 输出功率特性图^[32]

Fig.14 Output power characteristics of SDL at 2.0 μm with different pump spot diameters^[32]

物的 2 μm 波段光泵浦碟片激光器实现了国内的首次室温连续激射,输出功率达到 0.5 W。

4 结束语

基于铽化物半导体材料的中红外激光器的研究受到越来越广泛的重视,器件制备技术和性能不断取得重要进展。针对工业加工应用,铽化物单管和巴条功率还需进一步提升,这需要从外延结构到器件设计进行进一步的优化,同时良好的散热封装和可靠性验证,是此类激光器需要进一步开展的研究方向。铽化物单模激光器方面,实现器件性能和成本的平衡,即找到一个成本低和良品率高的设计方案实现单模激光器的批量重复制备,是此类激光器实现大规模商业化生产的前提。带间级联激光器的材料生长难度大,其多变的能带设计结构使得此类激光器在 3~5 μm 波段有望获得更多而广泛的应用,进一步的提高室温连续输出功率和保持好的波长稳定性,是该领域研究人员必须解决的问题。光泵浦碟片激光器功率高、光束质量好的特性,使得其在一些特定领域如量子通信、医疗美容有望实现广泛的应用,此类激光器的光路结构已经基本定型,高质量的外延结构是此类激光器制备的关键。目前国内的铽化物激光器的研究正处于实验室向产业化过渡的关键阶段。随着研究的不断深入器件稳定性和良品率不断获得提升,完全国产化、自主知识产权的铽化物半导体激光器实现规模应用指日可待。

参考文献:

[1] Gaimard Q, Cerutti L, Teissier R, et al. Distributed feedback

- GaSb based laser diodes with buried grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(16): 4-50.
- [2] Civis S, Horká V, Simecek T, et al. GaSb based lasers operating near 2.3 microm for high resolution absorption spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 2005, 61(13): 3066-3069.
- [3] Yang R Q. Interband cascade lasers: from concept to devices and applications[C]//Lasers and Electro-Optics, 2007. CLEO 2007. Conference on, 2008: 1-1.
- [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.
- [6] Xie Shengwen, Yang chengao, Huang Shushan, et al. Research progress of 2 μm GaSb-based high power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0503003. (in Chinese)
谢圣文, 杨成奥, 黄书山, 等. 2 μm GaSb基大功率半导体激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0503003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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): 031107.
- [10] Rong J, Xing E, Zhang Y, et al. Low lateral divergence 2 μm InGaSb/AlGaAsSb broad-area quantum well lasers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7246.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Zhang Yu, Wang Guowei, Tang Bao, et al. Molecular beam epitaxy growth of InGaSb/AlGaAsSb strained quantum well diode lasers [J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32(10): 103002.
- [14] Liao Y P, Yu Z, Yang C A, et al. High-power, high-efficient GaSb-based quantum well laser diodes emitting at 2 μm [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2016.
- [15] 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 & Millimeter Waves*, 2017.
- [16] Xie Shengwen, Zhang Yu, Yang Chengao. et al. High performance GaSb based digital-grown InGaSb/AlGaAsSb mid-infrared lasers and bars [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(1): 014208.
- [17] Xie Shengwen, Yang Chengao Huang, ShuShan, et al. 2.1 μm InGaSb quantum well lasers exhibiting the maximum conversion efficiency of 27.5% with digitally grown AlGaAsSb barriers and gradient layers [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 31(5): 054204.
- [18] Yang Chengao, Zhang Yu, Liao Yongping, 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): 339.
- [19] Yang Chengao, Xie Shengwen, Huang Shushan, et al. Research progress of antimonide infrared single mode semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0503002. (in Chinese)
杨成奥, 谢圣文, 黄书山, 等. 碲化物中红外单模半导体激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0503002.
- [20] Choi H K, Eglash S J. High-power multiple-quantum-well GaInAsSb/AlGaAsSb diode lasers emitting at 2.1 μm with low threshold current density [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(10): 1154-1156.
- [21] Rattunde M, Mermelstein C, Schmitz J, et al. Comprehensive modeling of the electro-optical-thermal behavior of (AlGaIn)(AsSb)-based 2.0 μm diode lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(22): 4085-4087.
- [22] Rattunde M, Schmitz J, Kaufel G, et al. GaSb-based 2.X μm quantum-well diode lasers with low beam divergence and high output power [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(8): 2931.
- [23] Liau 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.
- [24] 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.

- [25] Forouhar S, Briggs R M, Frez C, et al. High-power laterally coupled distributed-feedback GaSb-based diode lasers at 2 μm wavelength [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(3): 031107.
- [26] Gupta J A, Barrios P J, Lapointe J, et al. Single-mode 2.4 μm InGaAsSb/AlGaAsSb distributed feedback lasers for gas sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(4): 041104.
- [27] Belenky G, Donetski D, Shterengas L, et al. Interband GaSb-based laser diodes for spectral regions of 2.3-2.4 μm and 3-3.1 μm with improved room-temperature performance[C]//Quantum Sensing and Nanophotonic Devices V, 2008.
- [28] Belenky G, Shterengas L, Kipshidze G, et al. Type-I diode lasers for spectral region above 3 μm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(5): 1426-1434.
- [29] Kim M, Canedy C L, Bewley W W, et al. Interband cascade laser emitting at $\lambda=3.75 \mu\text{m}$ in continuous wave above room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(19): 77.
- [30] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, et al. Rebalancing of internally generated carriers for mid-infrared interband cascade lasers with very low power consumption [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 585.
- [31] Canedy C L, Abell J, Merritt C D, et al. High-power CW operation of 7-stage interband cascade lasers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2014: 1-2.
- [32] Holl P, Rattunde M, Adler S, et al. GaSb-based 2.0 μm SDL with 17 W output power at 20 $^{\circ}\text{C}$ [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(21): 1794-1795.