

文章编号: 1001-3806(2024)06-0790-09

高性能锑化物中红外半导体激光器的研究进展

曹钧天^{1,2}, 杨成奥^{1,2*}, 陈益航^{1,2}, 余红光^{1,2}, 石建美^{1,2}, 王天放^{1,2}, 闻皓冉¹, 王致远¹,
耿峙琦¹, 张宇^{1,2}, 赵有文^{1,2}, 吴东海^{1,2}, 徐应强^{1,2}, 倪海桥^{1,2}, 牛智川^{1,2*}

(1. 中国科学院 半导体研究所 光电子材料与器件重点实验室, 北京 100083, 中国; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049, 中国)

摘要: 半导体材料体系经历了3次重要迭代,在微电子、通信、人工智能、碳中和等重要领域得到了广泛应用。随着高新技术的快速发展,锑化物半导体作为最具发展前景的第4代半导体材料之一,在开发下一代高性能、小体积、低功耗、低成本的红外光电器件领域具有独特的优势和广阔的应用前景。综述了锑化物半导体激光器的发展过程和国内外的研究现状,分析了器件结构设计、材料外延、模式选择、波长扩展等关键问题,阐述了采用分子束外延技术生长高性能锑化物量子阱激光器,实现大功率、单模、高光束质量的锑化物激光器的设计方案和关键工艺技术,并对兼具低成本、高成品率、大功率等优异特性的单模锑化物激光器的研究前景进行了展望。

关键词: 激光器; 锑化物; 中红外; 量子阱激光器

中图分类号: TN248.4; TN214 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.003

Research progress on high performance mid-infrared antimonide semiconductor lasers

CAO Juntian^{1,2}, YANG Cheng'ao^{1,2*}, CHEN Yihang^{1,2}, YU Hongguang^{1,2}, SHI Jianmei^{1,2},
WANG Tianfang^{1,2}, WEN Haoran¹, WANG Zhiyuan¹, GENG Zhengqi¹, ZHANG Yu^{1,2},
ZHAO Youwen^{1,2}, WU Donghai^{1,2}, XU Yingqiang^{1,2}, NI Haiqiao^{1,2}, NIU Zhichuan^{1,2*}

(1. State Key Laboratory for Optoelectronic Materials and Devices, 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: Going through three important iterations, semiconductor material systems have been widely used in important fields such as microelectronics, communications, artificial intelligence, and carbon neutrality. With the rapid development of technologies, the research on a new generation of high-performance semiconductor materials and devices has become the focus of international advanced technology. As one of the most promising fourth-generation semiconductor material, antimonide semiconductor materials have unique advantages and broad application prospects in developing next-generation high-performance, small-volume, low-power, and low-cost infrared optoelectronic devices. In this paper, the development process and research status of antimonide semiconductor lasers at home and abroad were reviewed, the key issues such as design of device structure, material epitaxial growth, mode selection and wavelength expansion were analyzed, high-performance antimonide quantum well lasers have been grown by molecular beam epitaxy technology. The design scheme and key technology for realizing high-power, single-mode and high-beam quality antimonide lasers were emphasized, and the research prospect of single-mode antimonide lasers with excellent characteristics such as low cost, high yield and high power was predicted.

Key words: lasers; antimonide; mid-infrared; quantum well semiconductor laser

0 引言

光通信、量子信息、人工智能等高新技术的快速发

展,推动半导体技术向着高性能、低功耗、低成本的第4代半导体技术迭代,同时推动着新一代半导体材料的发展。由Al、Ga、In、As、Sb等III-V族元素为基础的多元化合物材料及其低维结构构成的锑化物半导体材料体系是最具发展前景的第四代半导体材料,基于其窄禁带、天然晶格匹配、能带可调节的特性,在下一代红外光电系统的发展中将发挥巨大应用价值。锑化物激光器作为重要的红外光电器件之一,通过能带结构

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62204238);山西省科技重大专项基金资助项目(202201030201009)

*通信作者: yangchengao@semi.ac.cn; zcniu@semi.ac.cn

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-02-28

设计、材料外延生长、器件制备工艺等方面的技术突破,已经实现了大功率、高光束质量、单模等一系列高性能铋化物量子阱激光器的室温连续工作,且波长能够完整覆盖短波红外到中红外波段,在诸多重要领域具有重要应用价值。

(a) 气体检测。常见气体分子的特征吸收谱线位于 $2\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$ 中红外波段,基于可调谐半导体激光器吸收光谱技术^[1],可以实现远距离实时检测。这种方法常用于检测工业生产中的危险气体(CH_4 、 CO);大气污染物(SO_x 、 NO_x 、 H_2S);用于疾病诊断的人体呼吸标志气体(NH_3 、 NO_2)。

(b) 激光医疗。 $2\ \mu\text{m}$ 激光在人体组织中会被剧烈吸收,穿透距离小,可以实现亚微米精度的切割,并使得手术过程中产生的创口面积大幅减小^[2]。 $2\ \mu\text{m}$ 波段的激光还具有促进凝血的作用,可以有效抑制手术过程中的出血现象。

(c) 新一代通信窗口。 $2\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$ 波段是新一代大气红外窗口波段^[3]。大气中的气体分子和溶胶颗粒会导致激光衰减和吸收散射,相比于 $850\ \text{nm}$ 和 $1550\ \text{nm}$ 通信波段, $2\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$ 具有更高的透过率、更低的太阳背景噪声、更低的瑞利散射,是未来开展自由空间通信的重要窗口波段。

(d) 量子通信。随着量子通信技术高速发展,量子密钥分发作为量子通信的核心技术引起科研人员的广泛关注。该技术的一个难点是在高增益的条件下,实现极低噪声单光子探测。上转换探测器是实现单光子探测的重要器件之一^[4],基于周期极化铌酸锂晶体的非线性效应,利用 $1950\ \text{nm}$ 的单模抽运激光将 $1550\ \text{nm}$ 的信号光上转换为 $800\ \text{nm}$ 波段的量子信号。为了进一步提升探测器的探测性能,高性能的单模大功率 $1950\ \text{nm}$ 激光器是未来研发的重点。

铋化物激光器在中红外波段的优异性能和广泛的应用引起了研究人员的关注,随着器件结构设计的改进,材料生长技术的发展,器件制造工艺的完善,铋化物中红外激光器正从单一器件的实验研究转向大规模生产应用。目前,国际上只有少数几家公司实现了铋化物中红外激光器的商用。由于国内铋化物半导体激光器的研制起步较晚,国内中红外激光器产业体系的发展受到严重影响,这使得发展国产高性能中红外铋化物激光器尤为重要。中国科学院半导体所联合国内多家科研单位在铋化物激光器领域已经开展了一系列工作,并作出了重要贡献。本文中介绍了国内外学者及笔者所在课题组在铋化物激光器的结构设计、外延生长和器件工艺等方面取得的重大突破,分析与总结了制备大功率、单模、高光束质量等一系列高性能铋化

物激光器的方法,展望未来重点研究方向。

1 铋化物大功率激光器

材料生长技术和器件外延结构是影响铋化物激光器输出功率的关键因素,经过数十年的发展和国内外相关研究单位的不断探索优化,在此方面取得了很大的进展。

1985 年,美国贝尔实验室首次采用液相外延生长技术制备了室温工作的铋化物脉冲激光器^[5]。随着材料生长设备的不断发展,金属有机化合物化学气相沉淀(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)和分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)替代液相外延成为了外延生长的主流技术。1986 年,CHIU 等人^[6]首次采用 MBE 技术生长了 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{Sb}$ 双异质结构激光器,阈值电流密度高达 $4.2\ \text{kA}/\text{cm}^2$ 。

由于激光器的阈值电流过高会严重影响器件性能,科研人员急需寻找新的外延结构改善器件性能。1992 年,美国林肯实验室的 CHOI 等人^[7]首次在铋化物激光器中采用量子阱结构作为有源区,制备了激射波长为 $2.1\ \mu\text{m}$ 的 $\text{InGaAsSb}/\text{AlGaAsSb}$ 量子阱激光器,由于量子阱中电子空穴较高的辐射复合,输出功率大幅提升至 $190\ \text{mW}$;同时由于应变效应和量子效应的作用,阈值电流显著降低至 $260\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。

激光器的内部损耗是限制输出功率的一个重要因素。1996 年,GARBUZOV^[8]研究团队首次在铋化物激光器中使用了分离限制异质结构(separated confinement heterostructure, SCH),并设计了宽波导的分离限制应变量子阱激光器,减少了高掺杂限制层中自由载流子的损耗,使内部损显著降低至 $2\ \text{cm}^{-1}$,单管激光器室温下输出功率高达 $1.2\ \text{W}$ 。减小激光器内部损耗的另一种重要方法是采用大光腔结构,大光腔结构具有更厚的波导层,有效降低了限制层中的自由载流子的损耗。RATTUNDE 等人^[9]设计并制备了 $4\ \mu\text{m}$ 大光腔铋化物激光器,激射波长为 $1.98\ \mu\text{m}$ 时的最大输出功率为 $1.7\ \text{W}$ 。

为了解决大光腔结构带来的串联电阻过大的问题,上述课题组随后采用窄波导结构并降低 Al 组分含量^[10],保证了在较低光损耗和较小串联电阻的工作模式下,激射波长 $2\ \mu\text{m}$,室温连续输出功率达到 $1.96\ \text{W}$ 。由于窄波导结构的引入会使得大部分光场进入高掺杂 P 型限制层,导致损耗增加,影响器件性能,2009 年,LI 等人采用非对称波导结构,如图 1 所示^[11]。由于空穴有效截面远大于电子有效截面,非对称波导的引入使光场偏离 P 型限制层,降低自由载流子的吸收损

耗,内损耗降低至 1 cm^{-1} ,单模输出功率达到40 mW,串联电阻仅为 1.5Ω 。

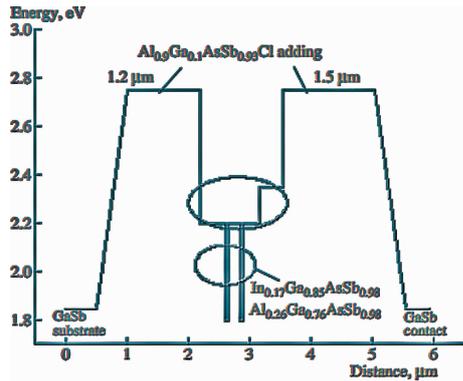


图1 非对称波导激光器能带结构^[11]

Fig.1 Schematic energy-band diagram of the diode laser with asymmetric waveguide structure^[11]

2010年,中国科学院半导体研究所首次采用MBE生长的 $2 \mu\text{m}$ InGaSb/InGaAsSb 激光器,实现了室温连续激光。2015年,笔者所在课题组通过MBE外延系统生长了GaSb基I型单量子阱激光器,室温连续输出功率达到了1.058 W。随后生长了InGaSb/AlGaAsSb压应变双量子阱结构激光器,室温连续工作输出最大功率为1.45 W,最大脉冲功率为2.83 W,同时制备了由20个单管组成的巴条阵列,在 10°C 时实现了8.56 W连续输出。对外延生长参数、外延层结构和器件加工工艺等关键因素进一步优化,采用数字合金法生长AlGaAsSb四元合金势垒,单管激光器在 $2.1 \mu\text{m}$ 处的室温连续输出功率达到 1.62 W ^[12],最大电光转化效率为27.5%,如图2所示。进一步制备了1976 nm 铽化物激光器巴条,最大输出功率为16 W,电光转化效率为26%^[13]。

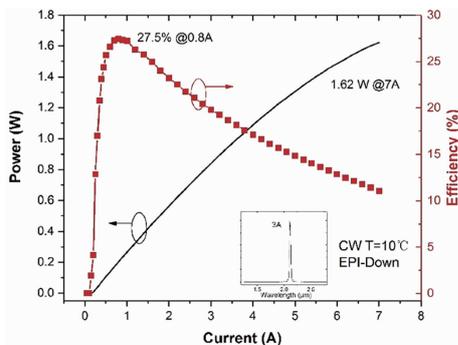


图2 10°C 时单管激光器功率-效率-电流关系曲线^[12]

Fig.2 Power-efficiency-current characteristics measured for a single laser at 10°C ^[12]

基于对新型外延结构的探索,笔者所在课题组提出了一种渐变Al组分的AlGaAsSb层生长方法^[14],通过精确控制MBE设备的生长温度和针阀位置,实现了

渐变层的完美晶格匹配和完整外延结构的原子级光滑表面。通过在含50%Al的限制层和含25%Al的波导层之间引入渐变层,结构如图3所示。实现了 0.144Ω 超低串联电阻,单管连续工作输出功率达到1.8 W,端面镀膜激光器巴条的连续输出功率创纪录地达到18 W,如图4所示。

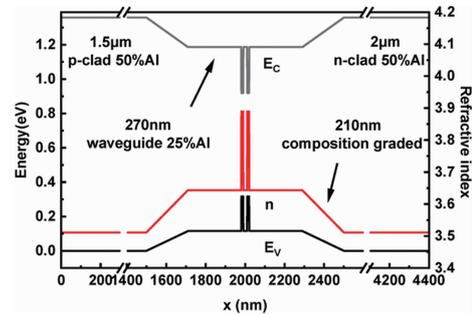


图3 引入渐变层结构的激光器的能带图和折射率分布^[14]

Fig.3 Energy band diagram and refractive index profile of diode lasers with composition-graded layer^[14]

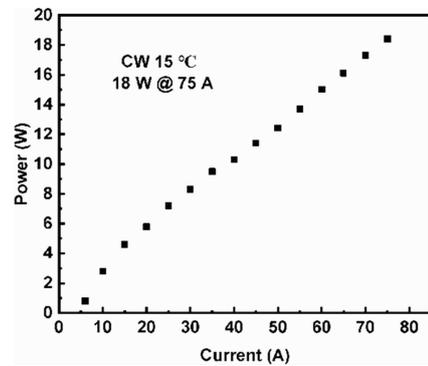


图4 15°C 时激光器巴条的功率-电流关系^[14]

Fig.4 Power-current characteristics measured for laser bar at 15°C ^[14]

大功率激光器通常采用宽波导结构,存在高阶横模输出,宽远场发散角的问题。笔者所在课题组针对此问题设计了一种用于模式滤波的片上微结构^[15],如图5所示,实现了良好的模场控制。进一步优化器件工艺,实现了室温连续工作输出功率1.3 W,与传统的

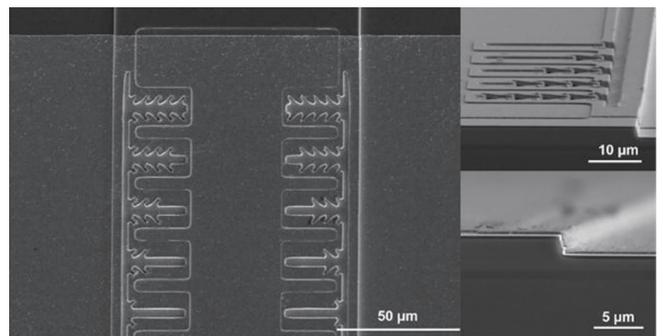


图5 片上微结构 SEM 图^[15]

Fig.5 SEM photographs of on-chip microstructure^[15]

二极管激光器相比,具有稳定的横向远场,发散度降低 45.6%,电流依赖性显著提高 75.5%,对于半最大全宽,最小发散度低至 5.64° 。图 5 为扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图。

在面向硅基集成的器件应用中,笔者所在课题组基于铋化物材料体系,设计了一种 GaSb 基超辐射发光二极管,采用高外延质量的 InGaSb/AlGaAsSb 量子阱增益材料实现功率提升,同时为了防止高电流注入时产生激射,采用反射率 0.04% 的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 超低抗反膜制备抑制腔。这种组合结构使得超辐射发光二极管在室温连续工作时性能取得突破性提高,在 $2\ \mu\text{m}$ 波段实现了 152 mW 的高单横模功率输出,42 nm 的宽光谱带^[16],如图 6 所示。与国际先进器件相比,在不牺牲光谱带宽的条件下功率提升 25%,为后续对吸收光谱应用和硅基光子集成技术的研究提供了有力支撑。

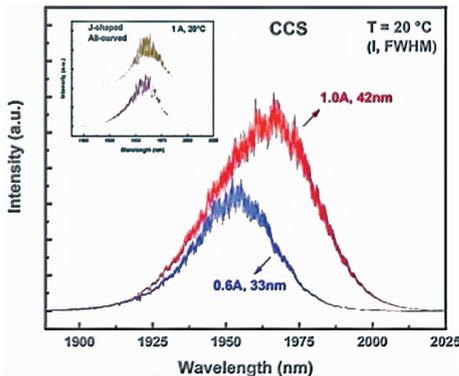


图 6 不同电流时具有级联抑制腔结构的超辐射发光二极管的光谱图^[16]

Fig. 6 Spectra of super luminescent diode with a cascade suppression cavity waveguide geometry measured at different currents^[16]

2 铋化物单模激光器

在气体检测、激光通信等重要应用中,需要激光器具有窄线宽和稳定单模的特性^[17]。大功率法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔激光器通常是多波长激射,难以实现单模输出,因此需要引入滤波结构进行波长筛选。国际上实现单模激光最有效的方法是引入周期性布喇格光栅,基于选模光栅不同的结构和位置,主要分为分布布喇格反馈 (distributed Bragg feedback, DFB)、分布布喇格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)、垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 等结构。

由于近红外通信波段的市场需求量大, GaAs 基和 InP 基单模激光器起步较早,技术发展相对成熟,已经实现大规模商用,传统的 InP 基 DFB 激光器制备采用 2 次外延技术,在无铝组分的波导层生长完成后,停止

生长,在波导层表面刻蚀光栅结构,清洗后将外延片送回生长室内完成激光器全结构的生长。

然而, GaSb 基单模激光器存在一个严重的问题:为了获得高质量的外延材料,通常需要在波导层和限制层中引入高含量 Al 组分,在 2 次外延生长过程中 Al 组分会发生氧化,严重影响激光器性能,导致其与 2 次外延生长法很难兼容。不仅如此,由于铋化物材料带隙较小,在湿法腐蚀过程中只能采用特定的几种溶液清洗生成的氧化物,导致刻蚀速度很慢,而干法刻蚀技术又容易引起材料的损伤,影响器件的光学和电学性能。

为了实现铋化物激光器的单模激射,国际上采用的主流方法是引入侧向耦合分布反馈结构。在一次外延生长完成后,直接将光栅刻蚀在脊波导两侧,通过光场与表面侧壁光栅的耦合作用实现模式筛选,避免了 2 次外延生长。1985 年,侧向耦合分布反馈结构首先由麻省理工学院的 LIAU 等人^[18]提出,在 GaInAsP/InP 异质结构顶部刻蚀光栅,获得了小于 32 dB 的边模抑制比。1999 年,维尔兹堡大学的 BLEUEL^[19]采用电子束刻蚀 (electron beam lithography, EBL) 技术将 1 阶金属 Cr 光栅制备在脊型波导两侧,实现 $2\ \mu\text{m}$ 脉冲输出,具有良好得单模特性,边模抑制比为 30 dB。2006 年,蒙彼利埃大学 SALHI 等人^[20]设计了脊波导宽度为 $4.7\ \mu\text{m}$,激射波长为 $2.3\ \mu\text{m}$ 的单模激光器,采用了 1 阶 Cr 光栅,实现了室温连续 5 mW 单模工作,线宽小于 2.2 MHz。2010 年,该研究团队采用 EBL 刻蚀金属光栅^[21],实现了 $3.06\ \mu\text{m}$ 单模激射,边模抑制比达到了 34 dB。

2010 年,坦佩雷理工大学的 HARING 研究团队^[22]采用纳米压印技术,以金属铬和氮化硅为媒介,将光栅掩模图形转移到外延层中,制备了 3 阶光栅。由于技术不成熟,进行了多次转移,导致光栅掩模图形产生了形变,影响光栅性能,边模抑制比为 35 dB。随后该课题组进一步优化纳米压印工艺技术,并且采用金属 Ni 转移掩模图形^[23],刻蚀了高质量光栅,SEM 如图 7 所示。实现了 1980 nm ~ 2035 nm 波段稳定单模

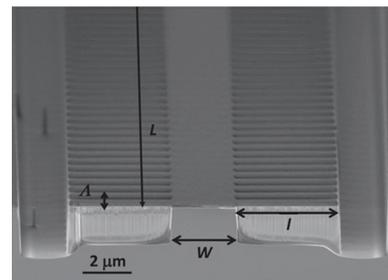


图 7 纳米压印制备的光栅结构的 SEM 图^[23]

Fig. 7 SEM photographs of the feedback grating fabricated by nanoimprint lithography^[23]

激光输出,边模抑制比高达 50 dB, 激射功率 25 mW, 如图 8 所示。

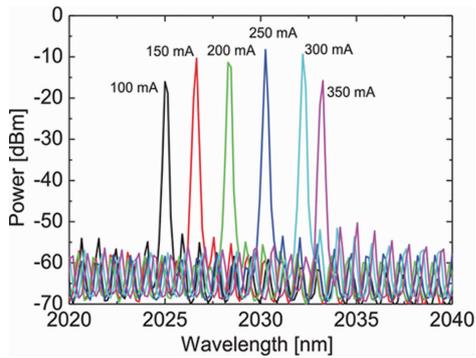


图 8 不同电流时激光器的光谱图^[23]

Fig. 8 Spectra of the laser at different working currents^[23]

国内关于铋化物激光器单模特性的研究起步较晚,中国科学院半导体研究所率先在该领域开展研究,掌握了铋化物单模激光器研制的核心技术,填补了我国在该领域的空白。2015年,笔者所在课题组首次报道了铋化物单纵模激光器^[24],制备出 2 阶侧壁光栅,室温连续工作时边模抑制比为 24 dB;后续对复耦合单模激光器进行了研究,采用剥离工艺,在条形波导两侧制备了 2 阶金属光栅侧向耦合分布反馈 (laterally coupled distributed feedback, LC-DFB),线宽为 60 MHz,边模抑制比达到 30 dB。2019年,进一步优化光栅结构工艺,实现室温连续工作下输出功率 40 mW,在不同温度和电流条件下,具有稳定的单纵模特性,边模抑制比高达 53 dB,达到国际领先水平,如图 9 所示^[25]。

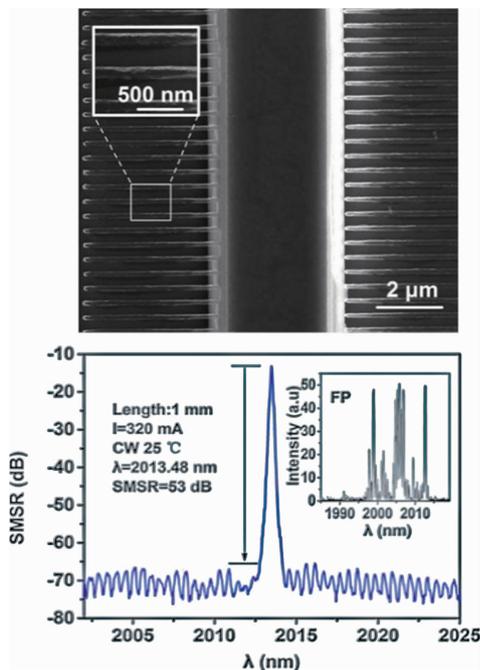


图 9 LC-DFB 激光器 SEM 图和光谱图^[25]

Fig. 9 SEM photographs and spectrum of LC-DFB laser^[25]

为了实现铋化物单纵模激光器从实验室到实际应用的转变,需要低成本、稳定的制造工艺。笔者所在课题组采用普通光刻技术在脊波导上制备了嵌入式光栅^[26],如图 10 所示。成功制作了工作波长在 1950 nm 的 GaSb 基激光器,在 10 °C ~ 40 °C 温度范围内获得稳定单模输出。由于只需要标准的光刻技术,器件制造简单,预期可在大规模生产中实现高产量和高收益。

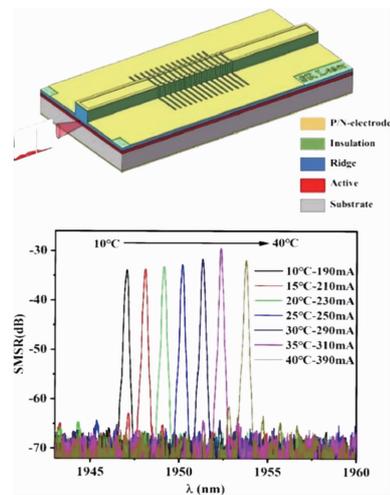


图 10 嵌入式脊波导激光器结构图和不同温度、电流时激光器的光谱图^[26]

Fig. 10 Schematic of the socketed ridge-waveguide laser and spectra at different currents and temperatures^[26]

高性能单横模铋化物激光器在许多应用领域中,如掺 Tm 或 Ho 的抽运光纤放大器、外腔激光器、医疗诊断,是理想光源。针对铋化物单横模激光器广阔的应用前景,笔者所在课题组在降低光束发散角、提高光束耦合性能等方面展开研究,设计了对称窄波导结构,通过光束近场扩展效应显著降低快轴发散角,210 nm 窄波导激光器具有 55% 单模光纤耦合效率和 113 mW

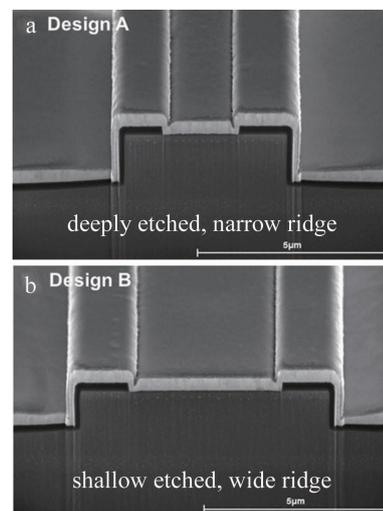


图 11 不同结构脊波导激光器 SEM 图^[28]

Fig. 11 SEM photographs of the different ridge waveguide laser^[28]

的耦合功率^[27]。进一步优化脊波导宽度、刻蚀深度和刻蚀工艺参数,不同结构的脊波导激光器如图 11 所示。制备了相对深刻蚀(2.05 μm)、窄脊波导(4 μm)激光器,在整个工作电流范围内具有稳定高光束质量($M^2 \approx 1.5$);制备了相对浅刻蚀(1.55 μm)、宽脊波导(7 μm)激光器,实现了 11.1° 窄发散角和 258 mW 高功率输出^[28],均达到国际领先水平。

3 铋化物激光器波长扩展

铋化物激光器的一个优势是波长覆盖范围广、易于实现波长调谐,可以通过能带工程调控实现 2 μm ~ 4 μm 波段有效覆盖。目前,实现波长拓展的方法主要有以下两种。

(a) 对由 I 型应变量子阱组成的有源区进行带隙和应变调控,实现激光器 2 μm ~ 3 μm 波段的覆盖。为了实现波长扩展,有源区内势阱层由 InGaSb 三元合金变为 InGaAsSb 四元合金,由于 As 组分的引入,势阱能带整体向下移动,价带差减小,空穴限制能力减弱,并且波长超过 2.7 μm 时,俄歇复合效应增强,激光器性能快速恶化。为了解决这个问题,2005 年, Walter Schottky 研究所在势垒区加入 In 组分,制备了 AlGaInAsSb 五元合金势垒结构, In 组分的引入将势垒区的能带整体向下移动,以适当减小导带带阶为代价来获得更大的价带带阶,提升了价带的空穴限制能力,实现了波长拓展^[29]。

(b) 采用带间级联结构实现激光器 3 μm ~ 4 μm 波段的覆盖。在级联结构中,电子和空穴得到重复利用,前一级量子阱中电子跃迁与空穴复合后会注入到下一级量子阱中,激光器的内量子效率得到大幅提高^[30]。带间级联激光器兼具量子阱结构中电子空穴高辐射复合的优势和级联结构高内量子效率的优势,不仅如此,相比于量子级联结构,带间级联激光器是基于带间跃迁,跃迁过程不需要声子辅助,不存在声子散射效应,因此具有更低的阈值电流和更高的特征温度。1994 年, YANG 首次提出带间级联激光器的概念^[31], 其基本结构如图 12 所示。

经过多年研究,2008 年,美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL)首次制备出室温连续工作的带间级联激光器^[32],通过探究载流子寿命、俄歇复合和材料生长质量等关键问题,设计了包含 5 个量子阱周期的级联结构,同时为了提高有源层的光限制因子,在有源区外加入了 200 nm 的分别限制层结构,将激光波长拓展到 3.7 μm 。随后, NRL 提出了“载流子再平衡”的重要概念^[33],通过改变级联结构中的电子

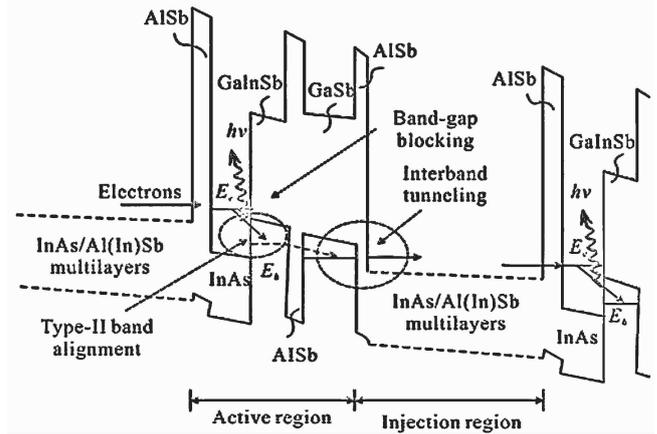


图 12 带间级联结构有源区能带图^[31]

Fig. 12 Band structure of the active region of interband cascade structure^[31]

注入区的掺杂浓度来平衡 II 型量子阱中的电子和空穴的数量,避免空穴浓度过高。这一新概念的引入使器件性能显著提升,激光波长达到 3.9 μm ,室温连续输出功率为 158 mW,阈值电流大幅降低至 170 A/cm²,功率转换效率提高至 13.5%。2014 年, NRL^[34]通过增加有源区的级联数和分别限制层的厚度实现了室温连续工作下输出功率 592 mW,如图 13 所示,并采用窄脊条结构使斜率效率提高至 815 mW/A。

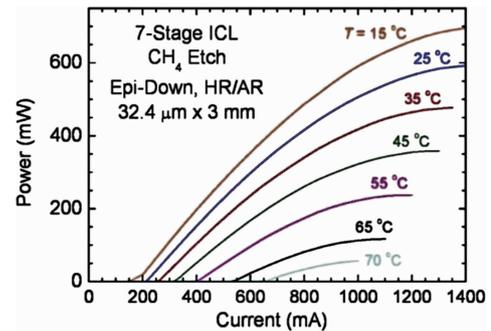


图 13 不同温度时连续工作的带间级联激光器的功率-电流关系曲线^[34]

Fig. 13 Power-current characteristics of interband cascade lasers at different temperatures^[34]

2018 年,笔者所在课题组制备了铋化物带间级联激光器,设计 5 个级联区,腔长 3 μm ,脊条宽度 25 μm ,激光波长 3452.3 nm,阈值电流 200 mA,室温连续输出功率为 41.4 mW,如图 14 所示^[35]。

笔者所在课题组进一步优化带间级联激光器有源区结构^[36],用八带 $k \cdot p$ 方法计算了不同 InAs 厚度的量子阱的发射波长,采用 MBE 生长了不同厚度的 InAs 量子阱结构,实现波长 3 μm ~ 4 μm 的完整覆盖,而且波长调谐过程中发光强度基本稳定不变,光致发光 (photoluminescence, PL) 光谱如图 15 所示。

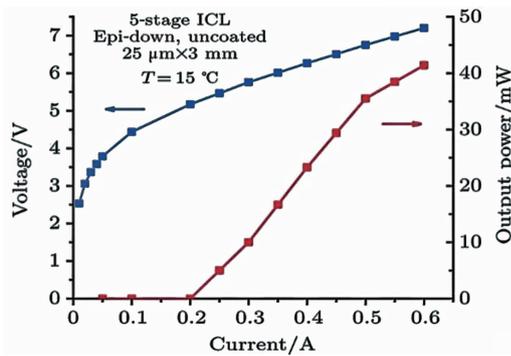


图 14 15 °C 时带间级联激光器连续工作的功率-电流-电压关系曲线^[35]
Fig. 14 Power-current-voltage characteristics of an interband cascade laser at 15 °C in continuous wave^[35]

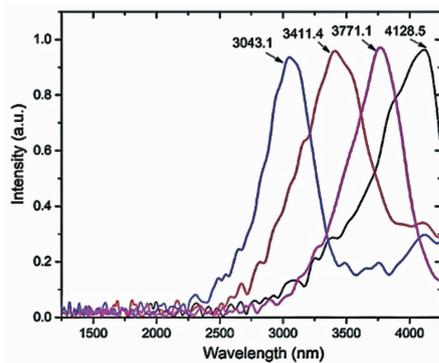


图 15 不同厚度 InAs 层级联结构有源区的 PL 发光谱^[36]
Fig. 15 PL spectra of the quantum wells with different InAs thickness^[36]

4 铋化物光抽运碟片激光器与光子晶体面发射激光器

光抽运半导体碟片激光器 (optically pumped semiconductor disk laser, OP-SDL) 兼具垂直腔面发射激光器的高光束质量、低阈值电流、圆形对称分布光场的优点和二极管抽运全固态激光器的高稳定性和高能量转换效率的优点,近年来引起了科研人员的广泛关注,OP-SDL 的基本结构如图 16 所示^[37]。

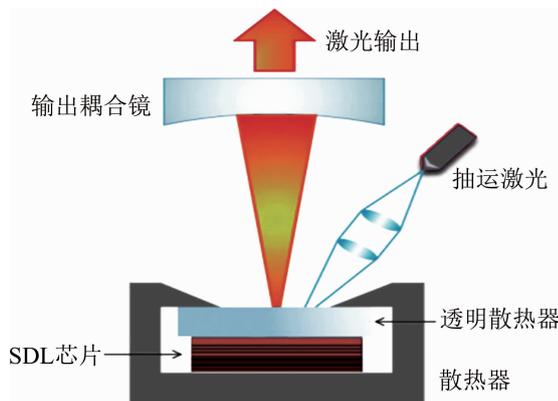


图 16 光抽运半导体碟片激光器结构图^[37]
Fig. 16 Schematic of typical OP-SDL^[37]

2003 年,蒙彼利埃大学的 CERUTTI 等人^[38]通过 MBE 技术生长了 GaSb/AlAsSb 布喇格反射器和 InGaAsSb/AlGaAsSb 有源层结构,首次实现了基于 GaSb 的 OP-SDL 在 2.1 μm 的激光输出。2008 年, HOPKINS 等人^[39]制备了高功率高光束质量的 OP-SDL,采用金刚石散热结构减小器件热量累积,最大输出功率达到 5 W,斜率效率 25%,在输出功率为 3 W 时仍保持高的光束质量 ($M^2 \approx 1.1 \sim 1.4$)。为了减小损耗和热量的产生,夫琅禾费研究所使用高质量 1470 nm 激光作为抽运源^[39],提高抽运光与输出光的转化效率,显著提高了输出功率,室温连续输出功率高达 17 W,如图 17 所示。

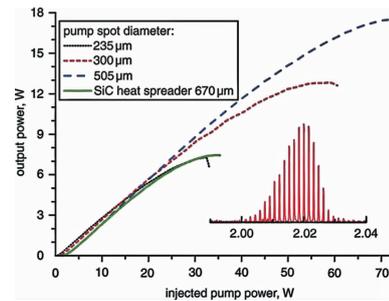


图 17 不同抽运光斑直径下,OP-SDL 的输出功率-注入抽运功率关系曲线^[39]
Fig. 17 Output power & injected pump power of the OP-SDL at different pump spot diameters^[39]

笔者所在课题组与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所合作,针对 OP-SDL 器件的难点,基于铋化物材料体系,设计了单横模输出的碟片光抽运激光器,激光波长 2 μm,在 10 °C 下的连续输出功率为 600 mW^[40]。

1987 年, YABLONOVICH 和 JOHN 分别独立提出光子晶体的概念^[42-43],经过科研人员的探索,光子晶体已经应用于光纤通信,光子器件集成等领域。近 10 年,人们利用光子晶体发展出了拓扑光子学等新兴前沿学科,成为了研究领域的热点。VCSEL 的输出功率通常受到小腔长的限制,基于 2 维光子晶体的带边共振效应的光子晶体面发射激光器 (photonic crystal surface-emitting lasers, PCSEL) 成为一种新型半导体激光器,基本结构如图 18 所示^[44],兼具高功率输出、单模

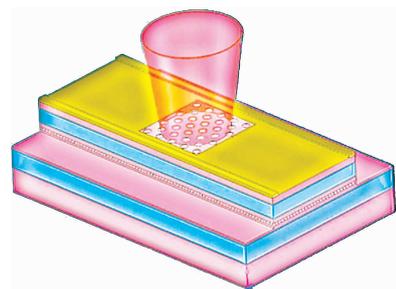


图 18 2 维光子晶体面发射激光器结构示意图
Fig. 18 Schematic of 2-D PCSEL

激射、高光束质量的优点,引起了国内外科研人员的广泛关注。

1999年,IMADA和MEIER等人^[44-45]等人提出了光子晶体带边模式面发射激光器。经过多年的发展,2019年,NODA课题组提出双光子晶体结构^[46],使得180°的衍射光相干相消,降低了反馈能力,分散了光场,因高阶模的损耗比基模更大,从而实现了单横模激射。PCSEL中光子晶体带边存在两个高 Q 模式的相互竞争,为了消除这种竞争实现模式简并,2022年,中国科学院物理研究所LU团队提出拓扑光子晶体面发射激光器(topological-cavity surface-emitting laser, TCSEL)的方案^[47],采用狄拉克涡旋腔设计光子晶体谐振腔,通过对光子晶体三角孔的kekule调制,实现了10 W输出功率、边模抑制比达到55 dB、远场发散角1°的单模面发射激光。2023年,香港中文大学(深圳)ZHANG课题组提出利用辅助轨道自由度的拓扑绝缘Majorana态的狄拉克涡旋腔激光器^[48],实现了0.4 kW/cm²阈值、线宽1.46 nm的远场线性偏振激光。目前,笔者所在课题组已经实现了1维光子晶体的瓦级功率输出,进一步将在材料外延生长,光子晶体谐振腔设计,器件制作工艺(孔径的直径、周期)等方面进行探索优化,利用铋化物的材料特性,期望在中红外波段实现高功率单模窄发散角的2维光子晶体面发射激光器。

5 结束语

基于铋化物材料的中红外激光器在医疗、通讯、环保等多个领域有着重要的应用价值,引起了科研人员的广泛关注。通过对外延生长、结构设计、器件工艺等方面进行探索和优化,铋化物半导体激光器的性能得到了显著提升并逐渐走向商用。为了实现更高性能器件的研制,铋化物半导体激光器仍存在一些难点需要解决:(a)由于GaSb材料热导性一般,为了实现更高的功率输出,需要通过波导层渐变掺杂、限制层渐变掺杂和非对称掺杂等激光器结构来降低串联电阻,进一步提高输出功率;(b)为了实现大规模商用,需要进一步优化器件工艺,探索低成本、高成品率的单模器件制备技术。

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,相信在科研工作者的不断努力下,高品质铋化物半导体激光器一定会满足国内工业需求。

参 考 文 献

[1] LIN W L, TSAI H K, LEE S C, *et al.* Identification of infrared absorption peaks of amorphous silicon-carbon alloy by thermal annealing

- [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(25): 2112-2114.
- [2] BACH T, HUCK N, WEZEL F, *et al.* 70 vs 120 W thulium: yttrium-aluminium-garnet 2 μm continuous-wave laser for the treatment of benign prostatic hyperplasia: A systematic ex-vivo evaluation [J]. *BJU international*, 2010, 106(3): 368-372.
- [3] RICCHIAZZI P, YANG S, GAUTIER C, *et al.* SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(10): 2101-2114.
- [4] PELC J S, MA L, PHILLIPS C, *et al.* Long-wavelength-pumped up-conversion single-photon detector at 1550 nm: Performance and noise analysis [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21445-21456.
- [5] CANEAU C, SRIVASTAVA A, DENTAI A, *et al.* Room-temperature GaInAsSb/AlGaAsSb DH injection lasers at 2.2 μm [J]. *Electronics Letters*, 1985, 18(21): 815-817.
- [6] CHIU T H, TSANG W T, DITZENBERGER J A, *et al.* Room-temperature operation of InGaAsSb/AlGaSb double heterostructure lasers near 2.2 μm prepared by molecular beam epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(17): 1051-1052.
- [7] 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.
- [8] GARBUZOV D Z, MARTINELLI R U, LEE H, *et al.* 4 W quasi-continuous-wave output power from 2 μm AlGaAsSb/InGaAsSb single-quantum-well broadened waveguide laser diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(22): 2931-2933.
- [9] 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.
- [10] 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): 081115.
- [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] XIE S, YANG C, HUANG S, *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, 130: 339-345.
- [13] XIE S W, ZHANG Y, YANG C A, *et al.* High performance GaSb based digital-grown InGaSb/AlGaAsSb mid-infrared lasers and bars [J]. *Chinese Physics*, 2019, B28(1): 014208.
- [14] CHEN Y, YANG C, WANG T, *et al.* High-power, high-efficiency gasb-based laser with compositionally linearly graded AlGaAsSb layer [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5506.
- [15] SHI J, YANG C, WANG T, *et al.* Ultra-stable and low-divergence high-power antimonide light emitters with on-chip mode filter [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(12): 121105.
- [16] WANG T, YANG C, CHEN Y, *et al.* High power GaSb-based superluminescent diode with cascade cavity suppression waveguide geometry and ultra-low antireflection coating [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(2): 021102.
- [17] LÜ G R, BIAN J T, WEN J Q, *et al.* Research progress of narrow-linewidth mid-infrared laser [J]. *Laser Technology*, 2023, 47(6): 742-750 (in Chinese).
- 吕国瑞, 卞进田, 温佳起, 等. 窄谱宽中红外激光技术研究进展 [J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 742-750.

- [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] BLEUEL T, BROCKHAUS M, KOETH J, *et al.* GaInAsSb/AlGaAsSb: Single-mode DFB lasers for gas sensing in the 2 μm wavelength range[J]. Proceedings of the SPIE, 1999, 3858: 372907.
- [20] 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.
- [21] BELAHSENE S, NAEHLE L, FISCHER M, *et al.* Laser diodes for gas sensing emitting at 3.06 μm at room temperature[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(15): 1084-1086.
- [22] HARING K, VIHARIÄLÄ 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.
- [23] VIHARIÄLÄ 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.
- [24] 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, 2016, B25(2): 024204.
- [25] YANG C A, XIE S W, ZHANG Y, *et al.* High-power, high-spectral-purity GaSb-based laterally coupled distributed feedback lasers with metal gratings emitting at 2 μm [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(2): 021102.
- [26] YU H, YANG C, CHEN Y, *et al.* Robust design of mid-infrared GaSb-based single-mode laser diode fabricated by standard photolithography with socketed ridge-waveguide modulation[J]. Optics Express, 2023, 31(21): 34011-34020.
- [27] WANG T, YANG C, CHEN Y, *et al.* Coupling performance enhancement of gasb-based single-transverse-mode lasers with reduced beam divergence obtained via near field modulation[J]. Photonics, 2022, 9(12): 942.
- [28] WANG T, YANG C, CHEN Y, *et al.* Promotion of specific single-transverse-mode beam characteristics for gasb-based narrow ridge waveguide lasers via customized parameter design[J]. Nanoscale Research Letters, 2022, 17(1): 116.
- [29] YANG Ch A, ZHANG Y, SHANG J M, *et al.* Research progress of 2~4 μm mid-infrared antimonide semiconductor lasers (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 20201075 (in Chinese).
杨成奥, 张一, 尚金铭, 等. 2~4 μm 中红外锑化物半导体激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 20201075.
- [30] ZHANG Y, ZHANG Y, YANG Ch A, *et al.* Research progress of 3~4 μm antimonide interband cascade laser (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1003003 (in Chinese).
张一, 张宇, 杨成奥, 等. 3~4 μm 锑化物带间级联激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1003003.
- [31] YANG R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells[J]. Superlattices and Microstructures, 1995, 17(1): 77-83.
- [32] 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): 191110.
- [33] VURGAFMAN 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.
- [34] CANEDY C, ABELL J, MERRITT C, *et al.* High-power CW performance of 7-stage interband cascade lasers[C]// 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications. New York, USA: IEEE Press, 2014: 126-132.
- [35] ZHANG Y, SHAO F H, YANG C A, *et al.* Room-temperature continuous-wave interband cascade laser emitting at 3.45 μm [J]. Chinese Physics, 2018, B27(12): 124207.
- [36] ZHANG Y, SHAO F H, YANG C A, *et al.* Wavelength tuning of type-II "W" quantum well of interband cascade laser[J]. Proceedings of the SPIE, 2018, 10052: 2521757.
- [37] SHANG J M, ZHANG Y, YANG Ch A, *et al.* Research progress of GaSb based optically pumped semiconductor disk lasers (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1003004 (in Chinese).
尚金铭, 张宇, 杨成奥, 等. GaSb 基光抽运半导体碟片激光器的研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1003004.
- [38] CERUTTI L, GARNACHE A, GENTY F, *et al.* Low threshold, room temperature laser diode pumped Sb-based VECSEL emitting around 2.1 μm [J]. Electronics Letters, 2003, 39(3): 290-292.
- [39] HOPKINS J M, HEMPLER N, RÖSENER B, *et al.* High-power, (AlGaIn)(AsSb) semiconductor disk laser at 2.0 μm [J]. Optics Letters, 2008, 33(2): 201-203.
- [40] 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.
- [41] SHANG J M, FENG J, YANG C A, *et al.* High quality 2 μm GaSb-based optically pumped semiconductor disk laser grown by molecular beam epitaxy[J]. Chinese Physics, 2019, B28(3): 034202.
- [42] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [43] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [44] IMADA M, NODA S, CHUTINAN A, *et al.* Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(3): 316-318.
- [45] MEIER M, MEKIS A, DODABALAPUR A, *et al.* Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(1): 7-9.
- [46] YOSHIDA M, de ZOYSA M, ISHIZAKI K, *et al.* Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams[J]. Nature Materials, 2019, 18(2): 121-128.
- [47] YANG L, LI G, GAO X, *et al.* Topological-cavity surface-emitting laser[J]. Nature Photonics, 2022, 16(4): 279-283.
- [48] MA J, ZHOU T, TANG M, *et al.* Room-temperature continuous-wave topological Dirac-vortex microcavity lasers on silicon[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 255.