

特邀综述

半导体激光器研究进展

陈良惠^{1*}, 杨国文^{2,3**}, 刘育銜²

¹中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083;

²中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

³度亘激光技术(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215123

摘要 半导体激光器从诞生至今半个世纪,在理论、实践和应用方面取得了巨大进展,占据了整体激光领域的大部分市场,广泛应用于通信网络、工业加工、医疗美容、激光传感、航空国防、安全防护,以及消费电子等领域。本文在回顾国际国内早期半导体激光器发展历程的基础上,重点针对高功率泵浦源领域的 GaAs 基 8xx nm 和 9xx nm 半导体激光器,三维感知领域的 905 nm 隧道结激光器和 940 nm 垂直腔面发射激光器,以及光谱分析和红外感测领域的 GaSb 基红外激光器和 InP 基量子级联激光器进行了简单总结。内容包括半导体激光器的主要应用场景、所追求的主要目标、近 10 年国内外发展的最新进展,以及今后可能的发展趋势与方向。

关键词 激光器; 半导体激光器; 边发射激光器; 垂直腔面发射激光器; 红外激光器

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500001

Development of Semiconductor Lasers

Chen Lianghui^{1*}, Yang Guowen^{2,3**}, Liu Yuxian²

¹Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

³Dogain Laser Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract Semiconductor laser has been half a century since its birth, tremendous progress has been made in theory, practice, and applications, and the market occupies more than half of the entire laser field. It is widely used in communication networks, industrial processing, medical and beauty, laser sensing, aviation and defense, security protection, and even consumer electronics. On the basis of reviewing the development history of early domestic and international semiconductor lasers, this article mainly focuses on GaAs-based 8xx nm and 9xx nm semiconductor lasers in the field of high-power pump sources, 905 nm tunnel junction lasers and 940 nm vertical cavity surface emitting lasers in the field of three-dimensional sensing, and GaSb-based infrared lasers and InP-based quantum cascade lasers in the field of spectral analysis and infrared sensing, for a brief review. The content includes the main application scenarios, the main goals pursued, the latest developments in the past 10 years at home and abroad, and the possible development trends and directions in the future.

Key words lasers; semiconductor laser; edge emitting laser; vertical cavity surface emitting laser; infrared laser

OCIS codes 140.5960; 140.7260

1 引言

半导体激光器广泛应用于光通信、激光医疗、工业加工、激光显示、激光指示、激光传感、航空国防、安全防护等领域。随着高端制造业、智慧城市、智能家居、智能手机、虚拟现实、增强现实和智能驾驶等

领域的快速发展,半导体激光器的应用领域将进一步拓展。

III-V 化合物半导体激光器已有半个多世纪的发展历史,其波长覆盖范围从深紫外发展到远红外波段,输出功率从毫瓦级到千瓦级以上。比如 GaAs 基器件的发光波长范围大约为 610 ~

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-04-26; 录用日期: 2020-04-28

* E-mail: chenlh@semi.ac.cn; ** E-mail: yangguowen@opt.ac.cn

1300 nm^[1], 是激光显示的红光基色、大功率半导体激光器和 850 nm 数据通信的核心光源。其中 InGaP/InGaAlP 量子阱激光器的激射波长范围为 610~700 nm, 主要应用于激光显示等领域; (In)Ga(Al)As/AlGaAs 量子阱激光器的激射波长范围为 700~1100 nm, 在固态激光泵浦(Nd:YAG)、光纤激光泵浦和工业加工等领域有广泛应用; 如果 GaAs 基 InGaAs/GaAs 量子点激光器引入 N 元素, 其激射波长可以拓展到 1.3 μm 附近。InP 基器件的发光波长范围为 1250~1700 nm, 覆盖了两个石英玻璃光纤通信窗口: 1310 nm 和 1550 nm, 前者对应于光纤色散为零窗口, 而后者对应于光纤传输损耗最小窗口, 是光纤通信系统的核心器件。在短波长方向上, GaN 基 InGa(Al)N/AlGaIn 量子阱激光器已经实现了深紫外^[2]至绿光波段(220~530 nm)^[3]的激光输出, 是绿、蓝、紫及紫外半导体激光器的重要材料。在大约 2~4 μm 波段范围内, 则主要是碲化物材料的表演舞台, 其器件在气体探测和有机物成分分析中起到了重要作用。基于单极性量子阱级联技术的器件进一步将波长延伸到远红外直至太赫兹波段, 是实现工业气体检测、大气污染监测、易燃易爆危险品的安全检查, 以及反恐防爆的重要手段。

半导体激光器在器件结构上包含法布里-珀罗(F-P)型、分布式反馈型(DFB)、分布式布拉格反射型(DBR)等多种形式; 在光子产生机理上包括双极型(P-i-N)和单极型等器件。常见的可见光及近红外器件属于双极性器件, 而许多常用于中红外以及太赫兹应用的器件则是基于量子级联的单极性器件等。此外根据半导体激光器的发光方向可以分为出光方向平行于衬底平面的边发射激光器(EEL)和垂直于衬底平面的垂直腔面发射激光器(VCSEL)。图 1(a)和(b)分别展示了边发射激光器、VCSEL 典型的器件结构和主要特点。边发射激光器在材料结构上(即材料生长方向上)由有源区、波导和上、下波导包层组成; 在器件结构上, 通过刻蚀形成横向波导, 即形成所谓的脊波导结构。另外, 为了提高器件的出光效率以及保护半导体腔面免于因污染等而造成的损伤破坏, 前后腔面分别蒸镀减反射(AR)膜与高反射(HR)膜。当器件注入电流后, 在有源区产生受激放大, 当受激放大产生的增益超过器件损耗(包括内部损耗和腔面出光而折算的腔面损耗)时, 实现受激发射。其中, 有源区量子阱结构决定了发光波长, 而脊型波导结构可以有效地改善器件性能,

如降低阈值电流和改善光束质量。边发射激光器的主要优点是波长范围广、电光转换效率高、功率大, 非常适用于高功率泵浦源和激光加工等领域。与边发射谐振器结构不同, VCSEL 在其生长方向(垂直方向)上形成谐振腔结构, 而其谐振腔的反射是由材料生长时形成的 DBR 来完成的, 上 DBR 反射率约为 99%~99.7%, 而下 DBR 的反射率通常大于 99.9%。在 VCSEL 晶圆表面制作单个发光单元或发光点二维阵列, 实现垂直于外延层表面的圆形光束阵列, 其优点是: 光纤耦合效率高(因为天然的圆对称光束特性), 光功率密度低, 不易产生灾变性光学损伤(COD), 光谱线宽窄(通常 <1 nm), 温度系数很小(如对于 940 nm 器件, <0.07 nm/K), 仅为对应的边发射 FP 器件的 1/5 左右, 激光功率从毫瓦量级到数十瓦甚至上千瓦。因此是高速数据通信和 3D 感知以及工业应用的理想光源。常见的量子级联激光器的工作原理和特点是基于单极性结构, 载流子在半导体超晶格子带间的级联隧穿注入和子带内跃迁辐射复合产生中长波红外激光, 为了实现激光物理中所必须的粒子数反转, 材料结构需要精心设计, 以确保电子在高能级的寿命大于所对应的低能级寿命。

半导体激光器发展的前 25 年主要是基础理论与科研的发展, 而最近 30 年则主要受实际应用的巨大驱动作用, 无论是在芯片的设计方面, 还是在新材料的生长方面, 以及器件的精细化制备方面, 其设备与工艺都取得了巨大的进展。不同领域的广泛应用也使得半导体激光器的种类越来越多, 可以满足不同的实际需求。有的追求高功率, 有的追求高电光转换效率, 有的追求波长的稳定性, 有的追求极高的调制速率, 有的追求极高的工作温度, 有的追求极可靠的使用寿命。本文在回顾国际国内早期半导体激光器发展历程的基础上, 重点针对高功率泵浦源领域的 GaAs 基 8xx nm 和 9xx nm 半导体激光器, 3D 感知领域的 905 nm 隧道结激光器和 940 nm 垂直腔面发射激光器, 以及光谱分析和红外感测领域的 GaSb 基红外激光器和 InP 基量子级联激光器进行简单总结。内容包括应用场景、所追求的主要目标、近 10 年国内外发展的最新进展, 以及今后可能的发展趋势与方向。需要说明的是, 基于 GaAs 基的单模激光器和 InP 材料体系的半导体激光器是光纤通信系统的核心关键部件, 其所对应的半导体激光市场份额大约为整个市场的 1/3 以上, 所涉及的技术分支非常繁多, 对应的进展综述完全可以独立成篇。有鉴于此, 本文将不考虑这方面的进展综述。

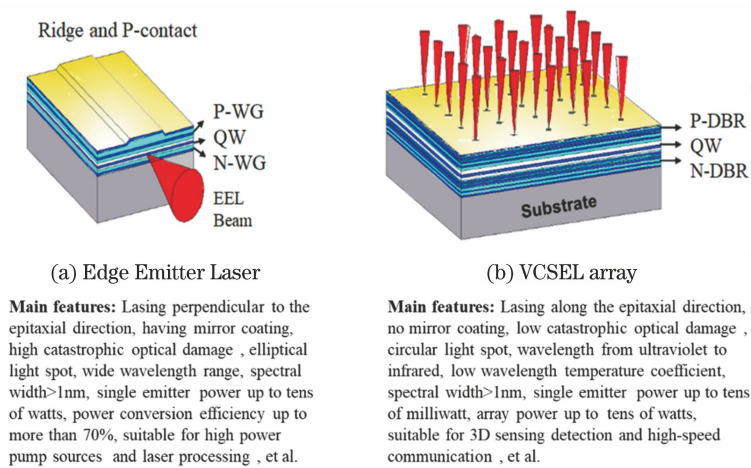


图 1 半导体激光器的基本结构和特点。(a)边发射半导体激光器;(b)垂直腔面发射半导体激光器

Fig. 1 Basic structure and characteristics of semiconductor laser.

(a) Edge emitter laser; (b) vertical cavity surface emitting laser

2 半导体激光器发展的回顾

2.1 国际半导体激光器的早期发展

1960年5月和12月,红宝石激光器和氦氖气体激光器先后获得成功;1961年,前苏联的巴索夫院士就科学地预见用半导体作为光增益介质也可实现受激发射;1962年GE公司的Hall等^[4],IBM的Nathan等^[5]和MIT林肯实验室的Quist等^[6]分别独立地以Ⅲ-V族半导体GaAs作为增益介质,通过扩散形成同质结,实现低温脉冲激射;在此期间,引入了液相外延技术,解理面形成谐振腔技术和窄条形成技术,是早期重要的技术进步,极大地改善了热效应,降低了阈值电流,但即便如此,激光器仍只能在低温、脉冲、高阈值电流密度的条件下工作。因此,为满足应用需求,在室温和连续条件下工作成为当时科学家的共同追求目标。

1963年美国Kroemer^[7]和前苏联Alferov院士提出把窄带隙的增益材料夹在宽带隙材料之间以形成异质结构激光器。1968—1969年,Alferov成功研制了GaAs/AlGaAs单异质结和双异质结激光器,图2为作者与Alferov院士合影。美国Panish等^[8]于1970年实现了室温连续激射。日本东京工业大学的Soda等^[9]于1977年提出垂直腔面发射激光器的设想,1988年实现室温下连续激射^[10],这是半导体激光器发展的一次飞跃。

长期从事光导纤维在通信领域运用研究的高锟先生在1957—1965年期间,开创性地提出:以光代替微波,以光纤代替微波传输线作长距离信息传输介质,将带来通信的革命。他分析发现,当时光纤损



图 2 作者与 Alferov 院士合影

Fig. 2 Group photo of author and Alferov

耗高达 1000 dB/km 是石英光纤的纯度与杂质等引起的,并指出当光纤损耗下降到 20 dB/km 时,光纤通信就可进入实用阶段。为了充分利用石英光纤的两个通信窗口:色散为零的 1.31 μm 窗口和损耗低至 0.2 dB/Km 的 1.55 μm 窗口,有必要研究相应波长的发射光源和接收器件,为此美国 MIT 林肯实验室的谢肇金先生用液相外延技术生长 InP 基 InGaAsP DH 激光器,于 1977 年成功实现了 1.3 μm 的室温连续激射,在 1979 年用于 1.55 μm 窗口的激光器也取得成功,此时,用于相应波段的 InGaAs/InP PIN 和雪崩光电二极管(APD)也相继问世,为光纤通信推向实用奠定了基础。光纤通信向长距离大容量的推进,促使人们研究窄光谱线宽的激光光源。这是因为基于 F-P 腔结构的激光器,有多个纵模存在,其谱线宽度约为 1 nm,而光纤色散效应的存在限制了其在光纤通信中的带宽-距离乘积。实

现单纵模最有效的办法是引入布拉格光栅,依靠光栅来实现光的反馈,即分布反馈激光器^[11]。1979—1982年长波长DFB激光器研制成功,且可以在室温连续条件下稳定单纵模工作。

1970年美国IBM公司的江崎玲于奈和朱兆祥提出超晶格量子阱的概念,其后,借助于新型近原子层材料生长技术,即分子束外延(MBE)和金属有机物化学气相淀积(MOCVD)技术,使量子阱激光器的制作成为可能。著名物理学家黄昆先生把它称为可与40年代末肖克莱和巴丁发明晶体管相比拟的20世纪科学的重大突破。

量子阱激光器就是其有源区由具有显著量子效应的量子阱结构构成的半导体异质结激光器,一般量子阱厚度大约为2~15 nm,其具体厚度取决于多种因素,包括:材料体系、可用的量子阱材料组分选取、波长以及结构优化考虑等。量子阱的引入导致了器件物理上的多重变化(与相应的体材料相比),包括载流子的状态密度的不同、轻重空穴的分离(非简并)、材料增益的增强,以及有源区体积的减小等。上述变化进一步优化了量子阱激光器的优点:1) 阈值电流密度低;2) 阈值电流密度的温度依赖性小;3) 调制速率高;4) 偏振特性以及波长可调谐。所以说,量子阱激光器的推出,是在引入异质结之后的又一次新的飞跃、新的里程碑,被誉为新一代理想的半导体激光器。美国Bell实验室的曾焕天先生用分子束外延技术制备出了具有优越特性的量子阱激光器,Dupuis和Dapkus等则是运用MOCVD研制了量子阱激光器。此后,可以说只要谈到或用到的半导体激光器,一般都是指量子阱激光器。

2.2 我国半导体激光器的早期发展

早期的半导体激光器研究包含很重要的两方面工作,一方面是器件的设计和制作,其中包括材料生长、PN结形成的扩散技术和端面谐振腔的镜面磨抛技术等;另一方面,按照当时理解的激光的三判据:光谱变窄、空间干涉条纹和电流光强关系的陡增开展条件建设和测试研究。经过日日夜夜的努力奋战,终于在1963年底和1964年初,中国科学院半导体研究所(以下简称中科院半导体所)和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(以下简称长春光机所)先后成功实现了液氢(20 K)温度下GaAs二极管的脉冲电注入受激发射,与当时国际上成功发布的时间相差不过一年左右。这是我国半导体激光器发展的第一个里程碑。

室温连续激射是半导体激光器走向实用化的必

要一步。1972年冬,中国科学院下达了“研制室温连续激光器”的重大任务,中科院半导体所组织了由王启明主持的团队,在1969—1972年期间的单异质结脉冲激射基础上,进行外延系统的改进,1975年4月实现了双异质结激光器的室温连续激射,其后又通过克服外延生长中杂质和氧沾污引起的非辐射复合中心,改善了条形工艺和引入真空键合,在1978年攻克寿命难关,工作寿命突破了1000 h,而后通过对激光器退化机理研究,着力消除热应力、位错和点缺陷的影响,最终在1980年突破室温连续工作寿命10万小时的目标^[12],这是我国半导体激光器发展的又一里程碑。针对当时光纤通信波长向1.31 μm 和1.55 μm 长波转移的需求,中科院半导体所及时开展了InGaAsP/InP长波长激光器研究,于1981年实现1.3 μm 激光器的室温连续激射,至1985年阈值电流低至30 mA,工作寿命达到3万小时。1988年4月实现了1.55 μm 激光器的室温连续激射,阈值电流小于20 mA,工作寿命大于10万小时,初步满足了第二代光纤通信的需要^[13]。1987年国家863计划光电子主题专家组认识到动态单纵模光源的重要性,通过预支持竞争评测,选出承担单位,中科院半导体所为主要承担单位之一,在关键设备MOCVD禁运情况下,采用液相外延技术,克服了光栅回熔等难关,于1988年底成功研制出边模抑制比大于30 dB的1.55 μm 脊形波导DFB,为我国未来高速大容量光纤通信做出重要贡献^[14]。

同期,中科院半导体所筹建了中国第一个量子阱激光器的研究小组,开展器件设计和理论研究,并基于国产分子束外延设备进行材料生长和器件制作。在基金委的支持下,先后立项开展《量子阱激光器物理特性研究》和《量子线激光器研究》,初步实现了量子阱激光器的室温脉冲激射。国家863计划光电子主题专家组战略规划的两项重大目标,一是开展量子阱光电子器件研究,二是开展光电子集成研究。在量子阱激光器方向,中科院半导体所成为唯一承担单位,随之,AlGaAs/GaAs量子阱激光器也取得了重大突破。1989年,在极低阈值和高速超短脉冲两方面都取得重要成果,通过中国科学院技术鉴定,其中,量子阱激光器达到1.55 mA的极低阈值,是国际上当时最好的水平之一^[15],且在1991年被China Daily评为中国十大科技成果之一。同时,该项成果也成为国家863计划光电子主题完成其战略目标之一,使我国光电子器件迈上量子阱光电子的新台阶。其后,中科院半导体所科研团队根据任务需

求延拓不同波长并开展大功率量子阱激光器研究和开发,使激光器真正走向实用^[16-17]。根据大容量光盘光存储的需求,开展了 AlGaInP 四元系 650 nm 和 635 nm 红光激光器研发,形成年产数十万只生产能力。在国家 863 计划光电子主题专家组支持下,根据光纤通信的需求,采用分子束外延技术发展大功率 980 nm 应变量子阱激光器,满足了掺 Er 光纤放大器泵源的需要,与此同时,采用 MOCVD 技术,开展长波长量子阱激光器和长波长量子阱 DFB 激光器的研究,先后取得突破,为我国光通信的发展提供重要支撑。同时,还开展了 GaN 基蓝光激光器研究^[18-20],也在国内率先实现增益波导和脊型波导激光器的室温脉冲激射,阈值电流密度分别为 50 kA/cm² 和 5 kA/cm²,激光发射波长为 405.9 nm。

3 半导体激光器的研究进展

3.1 高功率半导体激光器

高功率半导体激光器的主要应用方向之一就是工业加工及先进制造,如激光切割、激光焊接、激光打孔以及激光熔覆、3D 打印等。其应用方式有两种:1)作为固态激光器和光纤激光器的泵浦光源,这样可以充分利用半导体激光器谱宽窄、能量密度高、泵浦效率高的特点,然后再将上述固态或光纤激光集成到激光加工设备系统中;2)近年来兴起的直接半导体高功率加工系统。此外由于其相对比较容易实现宽的光波长范围,因而在特定波长的激光医疗应用方面也大显身手,如激光手术、激光脱毛、激光美容,以及激光光动力治疗等。同时高功率半导体激光器在激光雷达、激光制导等安全防御领域也具有非常重要的应用。

高功率激光器最为重要的三个参数指标是:1)输出功率;2)电光转换效率;3)长期运行可靠性。虽然在实验室测试条件下,器件测试可以达到更高的输出功率,但实际可靠运行功率总是远小于实验室测试的最大功率值。这是因为器件具有失效率,按照经验,该值与器件的电流密度和光功率密度的平方近乎成正比。为了突破可靠工作的功率,首先要提高最高可输出功率,而该功率提高受到几个方面的限制:1)器件的设计导致的高电流注入时的严重载流子泄漏造成功率热反转,而无法达到额定功率输出;2)功率密度太高对激光输出端面提出了极高的要求,端面处理不当会造成端面的非辐射复合,导致发热造成带隙收缩而进一步加强光吸收的恶性循环,从而导致端面的光学灾变损伤,造成器件失

效。从设计上,通过降低光场密度,即采用所谓的低光场限制因子设计;从工艺上,不断提高腔面的处理与镀膜工艺,这是突破功率限制的另两个重要因素。对于电光效率来说,主要考虑的因素包括:1)内量子效率;2)芯片结构的电阻;3)材料结构中各异质结界面上的寄生额外电压降;4)材料结构中的光损耗;5)器件的阈值电流。内量子效率可以通过优化量子阱结构得到解决;阈值电流对电光转换效率的损失贡献接近 10%,但寻求低阈值电流设计的方法与为提高可靠性而采取的低光场限制因子设计存在矛盾,需要设计平衡。采用所谓的大光腔结构设计可以很好地将低光场限制因子设计、低芯片内阻以及低腔内光损耗完美地统一起来,这也是近十几年以来,大光腔结构设计变得越来越流行的根本原因。总之,为了研制输出功率大、电光转换效率高、寿命长、可靠性好的高功率半导体激光器,首先需要精心设计芯片,包括激光器的有源区、波导层与限制层结构的优化设计、器件结构的优化设计,以及工艺制备流程的设计等;同时还需要低缺陷密度的高质量外延材料生长;低缺陷低应力的器件制备工艺,特别是高功率工作条件下的腔面抗损伤镀膜工艺,这是避免灾变性光学失效并提高器件寿命与可靠性的核心技术;然后需要采用合适的封装技术,改善和解决散热与应力等诸多问题。目前,GaAs 基近红外波段 8xx nm 和 9xx nm 半导体激光器是高功率半导体激光器中应用非常广泛和相对比较成熟的一种激光器。

3.1.1 8xx nm 系列大功率半导体激光器

8xx nm 大功率半导体激光器,主要是指波长从 730~880 nm 的特定波长系列并以(In)(Al)GaAs/AlGaAs 量子阱为代表的一类激光器。例如 808 nm 半导体激光器是 Nd³⁺:YAG 固态激光器最理想和高效的泵浦光源;830 nm 半导体激光器则常见于工业打印系统;880 nm 半导体激光器主要用于泵浦增益介质为 Nd³⁺:YVO₄ 等的固态激光器。随着全固态激光器使用要求的提高,对激光器的各项性能指标也提出了更高的要求,这主要体现在以下方面:1)提高输出光功率,满足全固态激光器工业加工的需求;2)提高电光转换效率,使激光系统能够节省运行成本并兼具体积小和重量轻等优点;3)提高激光器的可靠性,使其能够长时间稳定工作。为了实现上述目标,国际和国内多个研究团队都做了大量的工作,包括采取前述的设计理念与各自专有的腔面工艺技术,取得了一系列研究进展。

单管方面:2010年美国 nLight 公司设计了条宽为 200 μm ,输出功率为 10 W 的高温工作 808 nm 单管芯片。器件可以在高达 60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下持续工作,当输出功率为 10 W 测试温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,器件寿命可达 20000 h。老化后的单管仍然具有 20 W 的热翻转功率,表现出较高的工作可靠性。2018 年山东华光和山东大学研究团队通过优化腔面镀膜条件,提高了激光器的 COD 水平,成功研制了 808 nm 连续输出 13.6 W 单芯片大功率激光器^[26]。在实际产品化方面,国际上主要的供应商为美国的 Coherent, nLight, 以及德国的 Jenoptik, 典型产品为 190 μm 发光宽度的 10 W 左右产品,其他宽度如 100 μm 和 400 μm 发光宽度的功率为 5 W 和 15~20 W 左右。国内在这方面成熟的可靠产品在市场上尚不多见。

巴条方面:如表 1 所示,2010 年美国 Lasertel 公司 Cao 等^[21]报道了 808 nm 的 50 W 巴条研究成果,系统地研究了 InGaAsP 压应变量子阱(TE 模式)和 GaAsP 张应变量子阱(TM 模式),并优化了它们的应变和厚度,通过改进 P 型包层降低了焦耳热对器件的影响,并且通过增加 InGaP 波导的铟(In)含量引入压应变来改变波导的带隙,获得了在测试温度为 5 $^{\circ}\text{C}$ 时电光转换效率高达 67%、而室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下效率为 64% 的好结果。在材料的选择上, AlGaAs 材料具有较高的电导率和热导率,与衬底 GaAs 晶格高度匹配,通过组分渐变和掺杂控制容易实现低的串联电阻和热阻,并且 GaAs 基材料的外延生长工艺成熟可靠,因此是实现 808 nm 半导体激光器高电光转换效率最理想的材料。德国 Jenoptik 公司在 2015 年针对巴条获得了脉冲条件(占空比 1%)下 4 kW 的输出功率,转换效率 55%。美国 nLight 公司在 2017 年巴条方面获得了峰值功率为 1.8 kW 的脉冲输出(占空比 <1%),电光转换效率达到 61%。中科院半导体所、长春光机所和中国科学院西安光学精密机械研究所(以下简称西安光机所)同样做了大量出色的工作。中科院西安光机所研究团队在 808 nm 连续(CW)和准连续(QCW)大功率半导体激光器方面取得了一系列重要成果。通过改进 InAlGaAs/AlGaAs 量子阱和采用非对称宽波导结构设计,对 P 型波导层厚度和组分进行优化,光吸收损耗降低至 <0.63 cm^{-1} 。在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下,列阵 Bar 器件在注入电流为 135 A、工作电压为 1.76 V 时,输出光功率 >150 W,在 15~25 $^{\circ}\text{C}$ 温度下 100 W 连续激光输出时的效率高达

66%~71%,达到国际领先水平^[22]。2017 年,通过设计极低损耗 808 nm 半导体激光芯片外延结构,实现腔内损耗 <0.5 cm^{-1} 。采用该高效率外延结构研制出高功率 808 nm 巴条芯片(填充因子为 80%,60 个发光点,发光区宽度为 140 μm ,腔长为 2 mm),在准连续(脉冲宽度为 200 μs ,重复频率为 400 Hz,占空比为 8%)的工作条件下,500 A 工作电流对应的峰值输出功率达到 613 W,斜率效率达 1.3 W/A,峰值波长为 807.5 nm,光谱半峰全宽为 2.88 nm。在准连续 300 W 的条件下进行了寿命验证,可靠性超过 3.63×10^9 个脉冲,电流变化率小于 10%^[23]。

未来 8xx nm 半导体激光器的主要发展方向是更高的输出功率、更高的效率、更长的可靠工作寿命,以及进一步提高的性价比。目前虽仍在追求功率和效率等性能的提高,但水平逐渐接近理论极限,研究报道也在逐步减少。而在国内,虽然性能上取得了一些重要进展,但最关键的是提高其可靠性、稳定性和重复性,在产品化和批量产业化方面仍有大量细致的工作。这其中包括高质量的外延材料、器件的精细化工艺制备和解决腔面的抗损伤阈值等核心关键技术。另外,在不断满足新的特定应用需求方面,波长和器件种类扩展也是进一步发展的方向。

3.1.2 9xx nm 系列大功率半导体激光器

9xx nm 半导体激光器主要是指波长从 900~1100 nm 并以 InGaAs/(Al)GaAs 量子阱为代表的系列激光器,激光器芯片一般分为单管型(SE)和巴条型。工作模式又分为连续、准连续和脉冲三种模式,其主要应用在 915 nm、940 nm、976 nm 和 1060 nm 波段。其中,915 nm 和 976 nm 波长主要用于掺镱光纤激光器和光纤放大器泵浦源,因为掺 Yb³⁺ 光纤激光器对于 915 nm 和 976 nm 波段具有较强的吸收^[27]。940 nm 波段主要作为固体激光器泵浦源(Yb³⁺:YAG 固体激光器对 940 nm 波段具有较强的吸收^[28])和静脉曲张切除、激光美容和激光焊接、熔覆等领域;另外 976 nm 波段也用于掺铒光纤放大器(EDFA)泵浦源、光动力治疗、外科手术、牙科等领域。随着激光在工业加工领域的快速发展,作为光纤激光器和固体激光器泵浦源的 9xx nm 大功率半导体激光器已经成为业界竞争最为激烈的热点之一。

与 8xx nm 大功率激光器的发展趋势类似,人们对 9xx nm 大功率半导体激光器的要求是:更高的输出功率、更高的电光转换效率、更好的光束特

表 1 GaAs 基 8xx nm 大功率半导体激光器的研究进展

Table 1 Research progress of GaAs-based 8xx nm high-power semiconductor lasers

| Material | Lasing wavelength /nm | Device type | Key parameter | Year | Group | Reference |
|----------------------|-----------------------|-------------------------------|--|------|--|------------------------|
| InGaAsP QWs | 808 | Bar 1 cm, 20% fill factor | 50 W@CW PCE:64%@25 °C Max PCE:67%@5 °C | 2010 | USA, Lasertel Company | [21] |
| GaAs /AlGaAs QWs | 808 | Bar | 200 W @ QCW PCE:62% @25 °C | 2011 | Institute of Semiconductors, CAS | Internal communication |
| InAlGaAs /AlGaAs QWs | 808 | Bar 50% fill factor | 106 W @ CW PCE: 66%@25 °C Max PCE: 71%@25 °C | 2017 | Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS | [22] |
| InAlGaAs /AlGaAs QWs | 808 | Bar | 613 W @QCW, 8% duty cycle, slope efficiency: 1.34 W/A | 2017 | Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS | [23] |
| GaAs /AlGaAs QWs | 880 | Stacked array | 4 kW@1% duty cycle slope efficiency: 1.2 W/A, PCE: 55% | 2015 | Germany, Jenoptik company | [24] |
| GaAs /AlGaAs QWs | 880 | Bar 1 cm, cavity length: 3 mm | 1.8 kW@200 μs @14 Hz, PCE: 61 % | 2017 | USA, nLight company | [25] |

性,以及更高的可靠性和更低的成本。如何实现更高功率、更高效率、更高可靠性等性能指标是近 10 年来国内外各团队的研究热点,也依然是今后的研究热点。

过去 10 多年以来,国内外工业界与学术界的研发团队进行了不懈努力,在结构设计、外延生长质量等方面取得了大量成果,通过采用非对称结构设计、掺杂优化、腔面工艺研究、空间烧孔效应和双光子吸收等基本机理方面的研究,为 9xx nm 半导体激光器性能提升起到了巨大的推动作用。

目前在 9xx nm 大功率半导体激光器的技术和市场领域形成了美国、德国和日本三国鼎立的局面。如表 2 所示,单管器件相关研究取得优异成绩,美国方面:2015 年,nLight 公司报道了 5 mm 腔长、150 μm 条宽的 915 nm,980 nm 单管器件,室温连续条件 18 W 输出时,电光转换效率分别达到 58% 和 55%^[29];同年,JDSU 公司报道了 5.7 mm 腔长、100 μm 条宽的 950 nm 单管器件,实现室温连续条件下,最高输出功率达到 29.5 W^[36]。2017 年,美国的 IPG 公司报道了 4 mm 腔长、100 μm 条宽的 976 nm 单管器件,室温连续条件下,最高转换效率达 73%,12 W 工作功率输出时,电光转换效率达到 69.5%^[37]。德国方面:2015 年,Jenoptik 公司报道

了 4 mm 腔长、100 μm 条宽的 915 nm 单管器件,室温连续条件下,实现最高转换效率 70%,12 W 工作功率输出时,电光转换效率达到 68%^[40]。2018 年 1 月,德国 FBH 研究中心报道采用双极端非对称设计,实现 4 mm 腔长、100 μm 条宽的 940 nm 单管器件,室温连续条件下,最高转换效率 68%,14 W 输出时效率达到 63%,高温 75 °C 连续条件下,实现最高转换效率 59%,14 W 输出时效率仍高于 50%^[41]。日本方面:2017 年,日本的 Fujikura 公司报道,采用非对称的异质结限制层设计,实现 4 mm 腔长、220 μm 条宽的 915 nm 单管激光器,室温连续条件下,最高电光转换效率达到 68%,27 W 功率输出时,电光转换效率大于 60%^[30]。2019 年,日本 Fujikura 公司 Kaifuchi 等^[38]报道了 4 mm 腔长、180 μm 条宽的 975 nm 单管器件,室温连续条件下,实现最高转换效率 72.5%,20 W 功率输出时,电光转换效率达到 66.7%,文中认为是当时世界最好成果。

近 5 年左右,以中科院半导体所、西安光机所、山东华光和深圳瑞波光电公司为代表的国内研究团队在高功率半导体激光器芯片性能提升方面也取得了许多成果。单管方面:2017 年,中科院半导体所提供商用的器件,4 mm 腔长,100 μm 条宽的 915 nm 单管器件,在室温连续条件下,实现 21.6 W

表 2 GaAs 基 9xx nm 大功率半导体激光器的研究进展

Table 2 Research progress of GaAs-based 9xx nm high-power semiconductor lasers

| Material | Lasing wavelength /nm | Device type | Power and PCE | Year | Company/ research group | Reference |
|--------------------------|-----------------------|---|---|------|---|---------------------------|
| InGaAs /AlGaAs QWs | 915 | Single emmitter 5 mm, 150 μ m | 18 W@25 $^{\circ}$ C@CW, PCE:58% | 2015 | USA, nLight | [29] |
| AlInGaAs /GaAs QWs | 915 | Single emmitter 4 mm, 220 μ m | Max 68 W@QCW; Max 33 W@CW; 17 W@25 $^{\circ}$ C @CW:PCE:65%; Max PCE: 68% | 2017 | Japan Fujikura | [30] |
| InGaAs /GaAs QWs | 915 | Single emmitter 4 mm, 100 μ m | 21.6 W@25 $^{\circ}$ C @CW, PCE \geq 65%, Max PCE: 74% | 2017 | Institute of Semiconductors of CAS | Internal communication |
| InGaAs /AlGaAs QWs | 915 | Single emmitter 4.8 m, 95 μ m | 12 W@ 25 $^{\circ}$ C@CW, PCE: 63.5%, Max PCE:66.5% | 2018 | Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen and Raybow company | [31] |
| InGaAs /GaAs QWs | 940 | Single emmitter 2 mm, 100 μ m | 10 W@25 $^{\circ}$ C@CW, PCE: 56%, Max PCE: 76% | 2014 | Shandong University, Shandong Huaguang company | [32] |
| InGaAs /GaAs QWs | 940 | Bar 41% fill factor | 100 W@25 $^{\circ}$ C, PCE:76% | 2007 | USA, JDSU company | [33] |
| InGaAs /GaAs QWs | 940 | Bar 80% fill factor, 4 mm | 1 kW @25 $^{\circ}$ C QCW, 2% duty cycle | 2015 | Institute of Semiconductors of CAS | Internal communication |
| InGaAs /GaAs QWs | 940 | Bar 75% fill factor, 4 mm | 1 kW@203 K@QCW (1.2 ms,10 Hz), PCE:70% | 2016 | Germany, FBH | [34] |
| InGaAs /GaAs QWs | 940 | Bar 75% fill factor 2 mm | 660 W@600 A@ 25 $^{\circ}$ C QCW (600 μ s,160 Hz), PCE: 64.7%, Max PCE: 72.4% | 2019 | Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS | [35] |
| InGaAs /GaAs QWs | 950 | Single emmitter 5.7 mm, 100 μ m | 29.5 W@25 $^{\circ}$ C@CW, Max PCE: 61% | 2015 | USA, JDSU company | [36] |
| InGaAs /GaAs QWs | 976 | Single emmitter 4 mm, 100 μ m | 12 W@25 $^{\circ}$ C@ CW, PCE: 69.5%, Max PCE: 73% | 2017 | USA, IPG company | [37] |
| InGaAs /GaAs QWs | 975 | Single emmitter 4 mm, 180 μ m | 20 W@25 $^{\circ}$ C@CW. PCE: 66.7%, Max PCE: 72.5% | 2019 | Japan Fujikura | [38] |
| InGaAs /GaAs QWs | 975 | Single emmitter 4 mm, 100 μ m | 12 W@25 $^{\circ}$ C@CW, PCE \geq 65%, Max PCE: 72.4% | 2017 | Institute of Semiconductors of CAS | Internal communication |
| InGaAs /GaAs QWs | 976 | Bar | 200 W @25 $^{\circ}$ C@CW PCE>72% | 2016 | Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS | [39] |

功率输出,最高转换效率 74%。2014 年,山东大学和山东华光团队报道了 2 mm 腔长、100 μm 条宽的 940 nm 单管器件,室温连续条件下,实现最高转换效率 76%,在 10 W 工作功率输出时,电光转换效率为 56%^[32]。2018 年,深圳清华研究院报道了 4.8 mm 腔长,95 μm 条宽的 915 nm 单管器件,室温连续条件下,在 12 W 工作功率输出时,电光转换效率达到 63.5%^[31];同年,该团队报道 4 mm 腔长,190 μm 条宽的 976 nm 单管器件,室温连续条件下,最高电光转换效率达到 68.5%。巴条方面:2015 年中科院半导体所提供的商用器件,4 mm 腔长的 940 nm 巴条,室温准连续工作,2% 占空比的功率输出可达 1 kW。2016 年,中科院西安光机所报道了 976 nm 巴条,室温连续条件下,输出功率大于 200 W,器件的电光转换效率大于 72%^[39]。2019 年,中科院西安光机所报道了 75% 填充因子、2 mm 腔长、190 μm 条宽的 940 nm Bar 条器件,室温 QCW(600 μs , 160 Hz)测试条件下,在 600 A 时输出功率达到 660 W,电光转换效率达到 64.7%^[35]。

为了推动整体激光产业的快速发展,满足各行业对高功率 9xx nm 半导体激光器的大量需求,高功率、高效率、高亮度、高可靠性的持续突破仍是各研究团队的追求目标。下一步的主要发展方向包括:1)开发并优化外延结构和器件结构设计,协调功率、电压和发散角的平衡关系,从设计的角度实现更高性能指标;2)开发并优化外延生长、芯片制备和封装工艺,实现更高的可靠性;3)优化 976 nm 半导体激光器波长锁定技术,提高光纤激光器的泵浦效率和预期寿命;4)拓展应用领域,提高大功率半导体激光器直接于医疗美容、工业加工、航天航空等领域的市场份额。对于国内半导体激光器的挑战不仅是技术上的不断突破,更重要的是技术与产品的转化,目前国内半导体激光器市场仍处于国外产品近乎垄断的局面,全国产化的半导体激光器芯片短缺仍是卡脖子问题,发展上主要是可靠性、稳定性、重复性的大力提升和不懈努力。

3.2 905 nm 隧道结半导体激光器

905 nm 脉冲半导体激光器具有水汽吸收低、界面反射损耗小、空气中传播距离远等优点,同时波长与硅基雪崩光电二极管(Si-APD)的峰值响应波长匹配,光电探测灵敏度很高,是用于对象检测和激光雷达所需的最重要的核心元器件,广泛应用于自由空间通信、测距、医疗、自动驾驶和车载防撞系统中。

为提高激光器的探测距离需要较高的信号强

度,为提高激光雷达的分辨率需要减小探测光斑大小。因此,实现高峰值功率和高亮度成为国内外 905 nm 半导体激光器研究热点。传统的脉冲半导体激光器主要通过提高驱动电流来获得更高的激光输出功率,但是激光器的腔面损伤限制了其输出功率。利用隧道结技术在材料外延生长过程中直接将多个激光器外延层串联^[42-47],可以在更小的空间内集成多个激光器,这种激光器最早由北京工业大学沈光地教授发明并研制,被命名为多源区隧道再生激光器,简称为隧道结激光器。隧道结激光器突破了传统激光二极管内量子效率 <1 的理论极限,实现了输出功率的成倍增加。需要说明的是,尽管内量子效率得到了成倍的提升,但这并不意味着能量守恒的破坏,这是因为在内量子效率成倍提升的同时,芯片的结电压也相应地成倍增加。尽管如此,一个精心设计的多结型芯片的整体电光转化效率有可能会等同甚至高于同样输出功率的单结型芯片的效率,这是因为多结型芯片在工作时所产生的焦耳热会显著小于单结型芯片的焦耳热,当然隧道结会带来额外的功率损耗,因为当电流穿过隧道结时,会有额外的压降产生。另与采用分立管芯叠层烧结的激光器相比,该器件降低了激光器的输出功率密度,增强了端面发光亮度,提高了成品率和可靠性。

当下高性能 905 nm 边发射隧道结激光器国外厂商主要有:美国 Excelitas 公司、OSI LaserDiode 公司、Laser Components 公司、德国 Osram 公司、英国 WaveSpectrum 公司。Excelitas 公司制备的叠层 905 nm 激光器具有高达 4 个发光区,脊宽为 225 μm ^[48],在 30 A 脉冲电流下达到 300 W 的激光输出。德国 Osram 公司研发的 GaAs 基双隧道结 905 nm 高功率半导体激光器芯片,在 1~100 ns 短脉冲、0.1% 占空比、10~40 A 大工作电流驱动下实现 25~125 W 峰值功率的高速调制激光^[46],满足车载激光雷达对 200 m 处目标物体的距离和相对运动速度信息的精准探测,在自动驾驶和物流机器人市场前景十分广阔。图 3 给出了典型的三结型 905 nm 半导体激光器的示意图,三个单独的 PIN 激光器通过外延级的高掺杂 NP 隧道结层叠起来。

国内的长春理工大学^[44]在 2013 年报道了基于双隧道结、三个 200 μm 宽发光区的 905 nm 边发射激光器,在 30 A 脉冲电流下实现 80 W 的峰值功率,斜率效率为 3.0 W/A;重庆光电技术研究所^[49]在 2018 年报道了单隧道结、双发光区,脊宽为 200 μm 的 907 nm 边发射激光器,在 30 A 脉冲电流

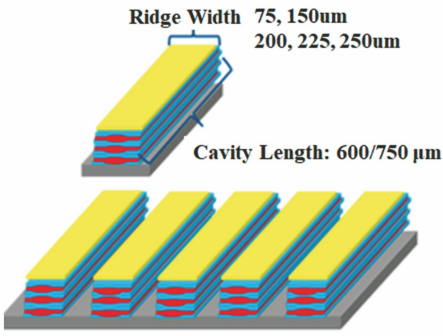


图3 905 nm多结型半导体激光器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 905 nm multiple junction lasers

下实现了50 W的峰值功率。该905 nm激光器采用了宽波导结构提高了COD阈值,最高峰值功率达70 W。但是,目前一个突出问题是905 nm激光器的3个发光区近场光斑很不一致,底部光斑明显宽于上层光斑^[44,49],光束发散角较大。引起这一现象的原因是载流子横向扩展导致底部光斑变宽,需要通过深刻蚀和侧壁钝化或者离子注入等方法抑制载流子横向扩展,实现1~4个整齐发光区的905 nm激光光斑^[48,50]。最近一年,苏州度亘激光技术公司和深圳瑞波光电公司研制出3个发光区甚至4个发光区的高性能905 nm激光器,纳秒级短脉冲峰值功率达75~150 W。

针对905 nm隧道级联多源区半导体激光器作为远距离高精度能适应多场合的雷达在对象检测和自动驾驶等领域的应用需求,下一步的主要研究方向:1)更高质量的隧道结生长,低电阻低损耗的隧道结是高效率、高可靠性905 nm激光器的关键;2)外延结构的进一步优化,实现更高效率和更高温度范围的综合特性;3)实现单位发光宽度更高峰值功率,如实现同样功率采取更窄的发光宽度,或者同样发光宽度,而实现更高峰值功率,另外3个结逐步增长到4个结甚至5个结或以上的结构,从而获得更高的单位面积的峰值功率密度;4)优化器件结构设计,抑制隧道结器件的电流扩散,同时控制横向模式竞争,降低发散角提高光束质量;5)极短脉冲的片上集成模块,由于LiDAR等领域的应用需求,905 nm激光器需要输出短至几纳秒的脉冲输出,需要集成高速开关电路。

3.3 VCSEL

相比于边发射激光,VCSEL具有诸多优点:1)阈值电流小,一般单颗芯片阈值电流约为1 mA,甚至可以小到0.1 mA;2)功耗低;3)调制速率高,

目前报导最高超过70 Gb/s;4)温度特性好,工作温度超过120 ℃;5)圆对称光束,易于与光纤耦合;6)工艺简单,成本低廉;7)天然的易于制作阵列器件,可以应用于高功率场景。

VCSEL由上DBR、光学谐振腔、量子阱、下DBR组成。对于基于GaAs衬底的VCSEL器件,上、下DBR分别由不同材料组分的AlGaAs形成(如850 nm DBR通常由Al_{0.12}GaAs/Al_{0.92}GaAs形成),从而提供激光谐振腔所必须的反射率,通常上DBR(出光方向)的反射率大约在99%~99.7%之间,而下DBR的反射率一般会超过99.9%。量子阱用来提供增益。自从VCSEL发明以来,在材料生长技术、芯片结构与器件结构设计,以及应用方面持续进步,目前已经发展出基于GaAs、InP、GaN和GaSb衬底的多种VCSEL结构和芯片,激光波长覆盖紫外到中波红外波段。GaAs基VCSEL的有源区包含了GaAs/AlGaAs晶格匹配量子阱以及InGaAs应变量子阱、InGaAsN应变量子阱、In(Ga)As/GaAs量子点等晶格失配的三元或四元超晶格材料,其发光中心波长主要覆盖800~1100 nm波段。由于Al(Ga)As/GaAs多周期DBR与GaAs衬底和有源区材料接近晶格匹配,可以外延生长出高质量的完整结构VCSEL材料,其芯片工艺成熟,已经有808 nm、850 nm、910 nm、940 nm、980 nm、1060 nm和1100 nm等多种芯片产品,并广泛应用于激光器泵浦源、激光加工、激光医疗、高速数据通信、3D感知和激光雷达等领域,尽管其应用领域较多,但VCSEL目前主要应用于两大领域:基于850 nm器件的数据通信和基于940 nm的3D感知。

3.3.1 数据通信VCSEL

对于850 nm数据通信应用来说,其主要参数要求是尽可能高的单横模功率,以及最重要一点,尽可能高的调制速度。表3列出了用于数据通信VCSEL的芯片带宽进展^[51-56]。文献研究表明,VCSEL的调制速率(NRZ)从2001年的20 Gb/s稳步提升到2013年的57 Gb/s。近几年的速率提升有赖于驱动电子学^[55-56]、调制方式(如PAM4)等方面的技术进步,而在带宽方面于2015年达到最高30 GHz后^[57],并没有显著进展。

除芯片带宽指标外,用于数据通信的VCSEL还有一个重要的技术指标,即能量利用效率,其定义为能量对数据速率的比值(P/BR),这里P是芯片电功率,而BR是数据速率。今后用于数据通

表 3 数据通信 VCSEL 的芯片带宽的研究进展

Table 3 Research progress of data communications VCSEL lasers

| Research group | Wavelength /nm | Speed /(Gbit/s) | Year | Reference | Notes |
|------------------|----------------|-----------------|------|-----------|-------------------|
| IBM | 850 | 20 | 2001 | [51] | |
| Finisar | 850 | 30 | 2008 | [52] | |
| Chalmers U. | 850 | 40 | 2010 | [53] | |
| Chalmers U. | 850 | 57 | 2013 | [54] | |
| IBM | 850 | 64 | 2013 | [55] | With equalization |
| IBM- Chalmers U. | 850 | 71 | 2015 | [56] | With equalization |

信 VCSEL 的发展方向包括:1)持续改善芯片 VCSEL 的带宽;2)提高数据的能量利用效率;3)波长向更长的方向延伸,如工作在 1.31 μm 通信窗口,在此窗口,石英光纤的色散为零,而且光纤损耗也远小于 850 nm 处的损耗,从而容许通信距离延伸到 20 km 以上。

3.3.2 3D 感知 VCSEL

对应用于手机 3D 感知的 940 nm VCSEL 芯片,其基本要求是:1)能量转换效率(PCE)高,目前商业上,要求电光转换效率 PCE 不小于 39%;

2)阵列芯片的输出功率大约 1.2 W 以上;3)光束特性好,远场发散角(半峰全宽)不超过 25° 。940 nm VCSEL 材料结构采用 GaAs/AlGaAs 材料体系,量子阱一般是 InGaAs 三量子阱或四量子阱。受光束质量以及芯片能量转换效率随芯片孔径的变化而变化等因素制约,一般单孔芯片的孔径(电流注入孔径)约为 10 μm ,如此一来,限制了其功率输出只有 6 mW 左右,为了获得所需要的瓦级输出功率,通常采用阵列的方式来提高整体芯片的功率输出。

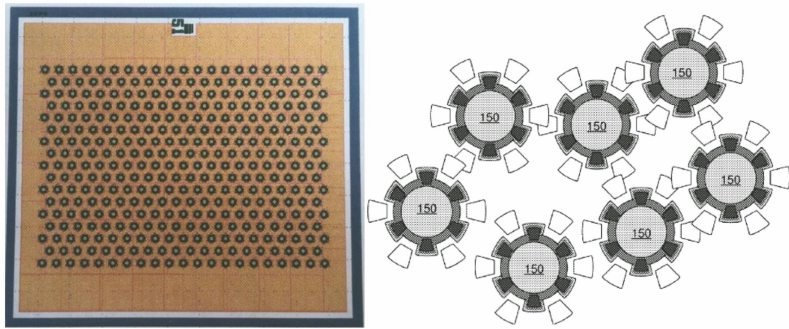


图 4 Lumentum 公司高密度 VCSEL 阵列和单管芯片的结构图^[58]

Fig. 4 High density VCSEL array and single emitter chip structure diagram from Lumentum^[58]

940 nm VCSEL 阵列是 3D 感知系统的理想光源。之所以如此,是因为早期的 850 nm 光源,太阳光背景强、信噪比弱。而更长波段的光源,如 1550 nm,其红外成像探测器要昂贵得多。2017 年,Lumentum 公司将 940 nm VCSEL 阵列芯片集成在 iPhone X 的 3D 感知相机中,实现了人脸识别功能,掀起了 VCSEL 芯片的 3D 感知应用研发热潮。目前国际著名 VCSEL 厂商 Finisar、Lumentum、II-VI、Princeton Optronics (AMS) 和 Philips Photonics 的多种波长的 VCSEL 芯片广泛应用于 3D 感知、激光雷达和激光照明。Lumentum 拥有自主设计的材料结构和高密度 VCSEL 器件结构(图 4)和芯片技术路线,分别通过自主和代工方式完成 VCSEL 材料外延生长和芯片工艺。Lumentum 的 VCSEL 芯片的 3D 感知市场目前占据绝对优势。

2019 年,Lumentum 在 Photonics West 会议上进行报告,研制氧化孔径为 10 μm 的 940 nm VCSEL 阵列,在 50 $^\circ\text{C}$ 准连续(QCW)的测试条件下,最大电光转换效率达到了 43%,在 3.5 A 的工作电流下,峰值输出功率达到了 2.9 W,电光转换效率为 38%。Lumentum 的 VCSEL 在高温达 125 $^\circ\text{C}$ 的工作温度下也有优异表现,对于驾驶舱内、高级驾驶辅助系统(ADAS)等汽车应用都能提供可靠的发光模块。Lumentum 每月产出最高可超过 5000 万颗 VCSEL 芯片,以满足快速发展的 3D 感知市场需求。

Philips Photonics 在 2018 年报道了氧化孔径为 8 μm 、尺寸为 2 mm^2 的阵列,在很低的占空比(0.2%,不考虑热效应的影响)脉冲测试条件下,100 A 的工作电流时,输出功率达到了 70 W^[59]。2019 年,Princeton Optronics (AMS) 报道了在

5 kA/cm² 电流密度下, 电光转换效率为 43%、发散角为 12° 的单发光点器件。通过改变氧化孔的位置以及在腔中增加模式过滤层, 实现了发散角在 10°~45° 的调制^[60]。

近年来, 国内的三安集成电路、乾照光电、武汉光讯科技、常州纵慧芯光、苏州长光华芯、泰州华芯半导体、宁波睿熙科技、重庆威科赛乐、度亘激光、北京工业大学等公司和高校都在研发 940 nm VCSEL 芯片, 瞄准的最具爆发性市场是 3D 感知领域。

目前, 根据会议报告, 常州纵慧芯光通过在 50 °C 峰值功率转换效率达 45%, 在 25~75 °C 范围内 PCE 维持在 40%, 在 85 °C 高温的情况下 PCE 也能达到 38%。其他几家国产 VCSEL 芯片公司, 也相继实现了 35%~45% 左右的峰值功率转换效率。2019 年, 北京工业大学报道了以 InGaAs/GaAsP 应

变补偿量子阱作为有源区的 940 nm VCSEL, 其通过自主外延和芯片制作工艺, 得到了斜率效率和阈值电流分别为 0.96 W/A 和 0.95 mA, 在 6 mA 和 2.0 V 工作条件下光功率达到 4.75 mW 的器件^[61]。2020 年初, 台湾中央大学报道了利用无氧化和锌扩散技术, 实现了准单模输出, 较高可用最大功率 (4 W, 1% 占空比)、较窄的发散角 (1/e², 14°) 和快速上升时间 (98 ps) 的 940 nm VCSEL 阵列^[62]。

除上述 3D 感知应用以外, 高功率 VCSEL 的发展也在拓展其他应用, 由于 VCSEL 能够输出径向对称的圆形光束, 便于二维集成, 且能够避免受到光学灾变损伤的影响, 因此是一种理想的高功率激光光源。表 4 列出了几种大功率 VCSEL 阵列的研究进展, 在输出功率上取得了与边发射激光器几乎接近和可相媲美的成果。

表 4 GaAs 基大功率 VCSELs 阵列研究进展

Table 4 Research progress on GaAs-based high-power VCSELs array

| Company/ research group | Wavelength /nm | Test condition | Peak power output /W | Year | Reference |
|------------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------|------|-----------|
| Princeton Optronics | 975 | CW | 230 | 2008 | [63] |
| Princeton Optronics | 975 | Pulse (2 kA, 100 ns) | 2200 | 2008 | [63] |
| Hamamatsu Photonics K.K. | 980 | QCW (390 A, 50 μs, 20 Hz) | 216 | 2014 | [64] |
| Princeton Optronics | 808 | QCW (100 μs, 100 Hz) | 100 | 2015 | [65] |
| Princeton Optronics | 976 | QCW (100 μs, 100 Hz) | 450 | 2015 | [65] |
| Changchun Institute of Optic | 980 | Pulse (105 A, 30 ns, 2 kHz) | 226 | 2016 | [66] |
| Princeton Optronics | 808 | QCW (100 μs, 100 Hz) | 800 | 2017 | [67] |
| TriLumina Corp. | 940 | CW (15 ns, 10 kHz) | 400 | 2018 | [68] |

今后作为 3D 感知应用的 VCSEL 主要发展方向依然是提高功率、电光转换效率以及光束质量。电光转换效率在很大程度上受到 DBR 电阻的影响, 简单的实验测试分析表明, 因电阻焦耳热带来的能量损失比例约为 30%, 但是通过提高掺杂比例来降低电阻并不能带来实际的整体效率提升, 这是因为降低电阻意味着需要更高的掺杂比例, 这又反过来会导致芯片内损耗的增加, 从而降低了器件的外量子效率。采用隧道结技术将会显著提升器件的效率, 这是因为在同样输出功率的前提下, 如果采用双结型结构, 因电阻产生的焦耳热 (暂且忽略隧道结电阻) 将会是单结焦耳热的 1/4。

3.4 红外半导体激光器

虽然波长长于 760 nm 的激光均可被称为红外激光, 如基于 GaAs 材料体系的 808 nm 激光和基于 InP 材料体系的 1550 nm 通信激光, 但本节限定所讨论范围是波长为 2 μm 以上中远红外与激光器件。在此波段, 有两种不同的发光机理: 基于碲化物

材料体系的双极性器件和基于多种材料体系 (如 GaAs、InP) 的单极性器件, 其中后者均采用量子级联结构, 以提高器件效率。中红外激光在国防、安防、医疗、科学研究等方面均有广泛的应用前景。如图 5 所示, 许多气体分子的特征光谱在可见光波段和中长波红外波段, 利用红外光谱分析气体或有机物的分子结构和成分是一种无损伤、快捷、精准的科学研究手段和工业分析技术。红外波段波长可调谐半导体激光器广泛应用于环境气体分析, 大气污染和汽车尾气监测, 工业生产的特种气体监测以及火车站、机场危险品监测和预警等, 同时在物理、天文、气象、遥感、生物、医学等领域也有广泛应用。

3.4.1 GaSb 基红外半导体激光器

GaSb 基超晶格材料能够组成全部三类微观能带结构并实现 Type-I GaInAsSb / AlGaAsSb 量子阱激光器、Type-II GaInAsSb/GaSb 量子阱激光器和 Type-III W-型能带结构 (图 6) 的 InAs/GaInSb 三类红外半导体激光器以及基于 InAs/Ga(In)Sb/

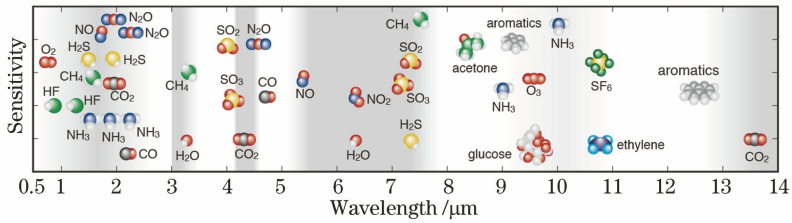


图 5 红外波段分子吸收特征光谱图

Fig. 5 Molecular absorption characteristic spectrum in infrared band

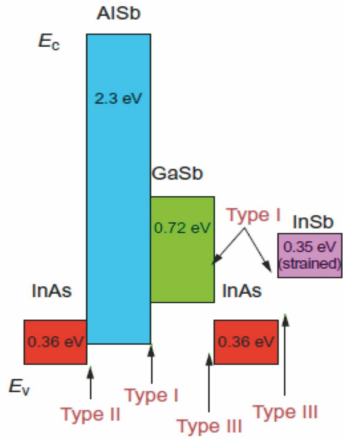


图 6 碲化物和 InAs 半导体材料的能带关系^[70]

Fig. 6 Energy band diagram for Sb-compound and InAs semiconductor material^[70]

AlSb 超晶格的带内跃迁量子级联激光器^[69], 是红外光谱分析的重要光源。本节将重点介绍红外半导体激光器和量子级联激光器。

最近 10 年来,人们在 GaSb 基一类 (Type-I) 结构的短波红外激光器的研究中取得了很多新进展。美国纽约州立大学石溪分校的科研人员研发的 GaSb 基 InGaSb/AlGaAsSb 量子阱激光器在室温下实现了最高连续激射功率近 2 W 的 1.9~3.5 μm 的红外激光^[71-73], 包含 22 个 GaSb 基 Type-I InGaSb/AlGaAsSb 量子阱激光器的 2.2 μm 红外激光器巴条在室温下可以实现峰值为 27 W 准连续激射和 10 W 激射^[74], 峰值电光转换效率为 20%。2018 年,英国 Aston 大学研究者将外腔光栅与 GaInAsSb/AlGaAsSb 量子阱激光器结合, 实现了 3.05~3.30 μm 的波长可调谐红外激光器^[75]。2017 年中科院半导体所报道了 2.6 μm 的 InGaAsSb/AlGaSb Type-I 量子阱激光器实现高功率室温连续工作^[76], 2018 年又开展了红外波段分布反馈单模激光器的研制^[77]。2019 年取得新突破, 研制金属光栅侧向耦合分布反馈 (LC-DFB) 量子阱单模激光器, 实现 2 μm 波段高边模抑制比 (约为 53 dB) 条件下的高功率 (>40 mW) 室温连

续输出。大功率激光器单管和巴条组件分别实现 1.62 W 和 16 W 的室温连续输出, 一举突破高端激光器进口限制的规定条款, 可用作 LiDAR 和温室气体检测的光源^[78]。

3.4.2 量子级联激光器

量子级联激光器 (QCL) 利用多层半导体形成的周期性超晶格结构中子能带之间的电子跃迁实现粒子数反转和受激辐射发光, 其显著优点是: 1) 没有俄歇复合过程, 从而改善了器件的阈值电流同时提高了阈值电流的温度特性等性能; 2) 器件的输出波长与有源区量子阱厚度有关, 可通过温度或电流进行调谐, 因此波长调节范围极广。量子级联激光器的激光波长主要在中红外波段 (3~8 μm), 可延伸至长红外 (8~14 μm), 甚至拓展到甚长波红外 (14~30 μm) 和太赫兹波段。利用法布里-珀罗腔边发射激光器结构的量子级联激光器是多纵模量子级联激光器 (FP-QCL), 量子级联激光器和 DFB 技术结合可以实现单纵模量子级联激光器 (DFB-QCL)。自 1994 年美国贝尔实验室研制出第一台量子级联激光器以来, 各国的科学家们都在努力提高量子级联激光器的工作温度、输出功率和可调谐激光波长范围^[79-81]。通过结合 DFB 和外腔 (EC) 调制技术, 实现了单模、3~25 μm 宽波段、高温度和大功率激光发射^[82], 从而实现了量子级联激光器的商品化。大量的气体分子特征吸收光谱分布在 0.7~30 μm 红外波段^[83], 研发和生产激光波长在该波段的量子级联激光器, 特别是 DFB-QCL, 在气体传感、液相检测、毒品和易燃易爆品侦测、反恐、交通安全监测和科学光谱分析研究等领域有非常广的应用前景。

3.4.2.1 InP 基量子级联激光器

InP 基量子级联激光器发展的最为成熟, 其波长范围广、工作温度高。早在 2007 年英国谢菲尔德大学就研制出室温工作的 3 μm InGaAs/AlAsSb/InP 量子级联激光器^[84]; 美国西北大学 Razeghi 研究组在 2014 年实现了 5.2~11 μm 多波长量子级联激光器^[85]。此后通过去除脊上的 SiO₂ 钝化层, 显著

提高了激光器的散热性能并降低钝化界面光吸收,同时提高了激光器的工作温度和性能。在2017年报道的InP基InGaAs/InAlAs超晶格量子级联激光器在高达373 K的工作温度产生16 μm甚长波红外激光^[86],在303 K实现了720 mW峰值光功率和4.8 mW的平均光功率,处于非常高的水平。苏黎世联邦理工大学Faist教授团队在2014年采用双金属波导结构的InP基InGaAs/AlInAs量子级联激光器的激光波长更是达到24.4 μm,最高工作温度为240 K。像BTX芳香族化合物(苯、甲苯和二甲苯同分异构体)这样的大型有机烃分子的特征吸收峰在12~16 μm波段区域,因此研制16 μm量子级联激光器对石油炼制和石化工业的气体侦测非常重要。

InP基量子级联激光器单元可以输出功率大于1 W,可调谐单模4.5 μm中红外激光^[87]。中科院半导体所研究团队1996年开始QCL和可调谐QCL的研究,目前已达到实用化水平,波长复盖3.5~16 μm,已用于脑科学、环境、同位素检测等;2016年他们研制的InGaAs/InAlAs量子级联激光器阵列^[88],可以产生40 W、4.6 μm的中波红外激光,是一种高性能红外光源。美国西北大学Razeghi研究组和佛罗里达中部大学分别在2011年和2016年研制出

总体电光转换效率超过27%^[89-90]的InP基量子级联激光器,其载流子注入效率达到75%,最高斜率效率高达4.9 W/A^[90]。另外在波长可调谐方面,利用通过外腔(EC)耦合InP基量子级联激光器技术,实现了4.5 μm^[87]、7 μm^[91]、9 μm^[92]和10 μm^[93]附近可调谐梳状激光光谱。

3.4.2.2 InAs基量子级联激光器

InAs/GaSb是二类超晶格的典型材料组合,基于InAs衬底或GaSb衬底外延生长的AlSb/InAs/GaInSb/InAs/AlSb量子阱超晶格材料是新型红外探测器和量子级联激光器的重要基材。InAs基带间跃迁量子级联激光器的激光波长在3~20 μm范围^[94-96];InAs基带内跃迁量子级联激光器的激光波长在3~10.4 μm范围^[97-100]。2015年,美国Oklahoma大学杨瑞青教授课题组^[99]在有源区两侧引入高导热性和低折射率的高掺杂n⁺-InAs取代InAs/AlSb超晶格(SL)作为外包层,不仅提高了激光器的散热性能和光场限制因子,还显著降低了外延过程中的累积应力和阈值电流,所研制的InAs基带内级联激光器在300 K实现了阈值电流仅为247 A/cm²的4.6 μm中波红外激光,温度升至377 K后,激光波长红移至5.1 μm(图7),温度调谐范围超过500 nm。

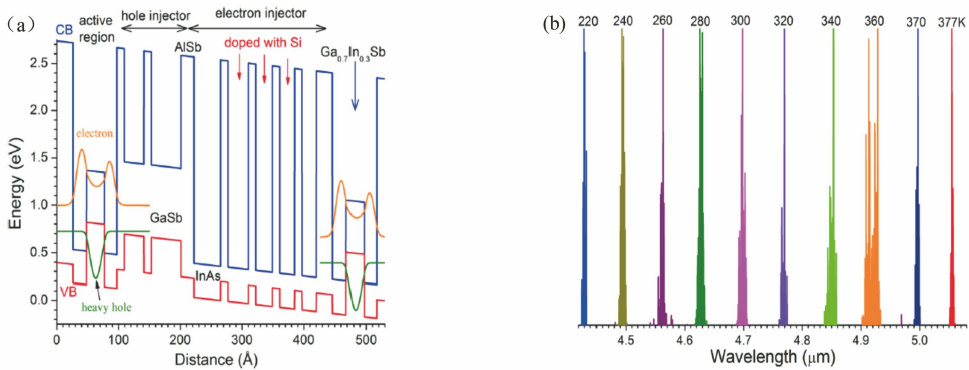


图7 模拟和实验结果。(a)带内级联激光器能带结构;(b)温度调谐激光波长^[99]
Fig. 7 Simulation and experimental results. (a) Intraband cascade laser energy band diagram; (b) temperature tuned lasing wavelength^[99]

相对而言,目前GaAs基和InP基量子级联激光器的材料质量和器件工艺水平较高,特别是InP基量子级联激光器不仅实现了3~24 μm宽波段激射,而且在室温下实现28%以上的电光转换效率以及4.9 W/A的斜率效率,代表着量子级联激光器的最高水平。与此同时,InAs基或GaSb基量子级联激光器也取得了显著进步,其激光波长也覆盖2~20 μm,工作温度甚至高于400 K,实现了4.6~

5.1 μm温控调谐中红外激光以及波长电流系数仅为0.016 nm/mA的4.5 μm单模红外激光。

随着应用领域对中远红外激光器提出越来越高的要求,可以预见,今后红外激光器件发展方向是:功率进一步增加,器件效率进一步改善,光谱特性(如光谱线宽)及其可调谐性不断改善,以及环境工作温度进一步提升等。GaSb基一类微观结构半导体激光器在2~3.5 μm短波红外范围实现高量子

效率($\geq 30\%$)、高功率($\geq 30\text{ W}$)和高工作温度(\geq 室温); InP 基量子级联激光器在中长波($3\sim 14\ \mu\text{m}$)和甚长波($14\sim 24\ \mu\text{m}$)范围实现高效率($\geq 30\%$),高功率(单管功率 $\geq 2\text{ W}$)、高峰值工作温度($\geq 373\text{ K}$)和宽波长范围($3\sim 25\ \mu\text{m}$)的红外激光光源。

4 结束语

本文根据作者的经历简单地回顾了国内外半导体激光器早期发展过程,随后有针对性地重点介绍了近 10 年来欧美日和中国的研究机构和企业 III-V 族化合物半导体激光器几个方面的研究进展概述: 1) 高功率半导体激光器方面。GaAs 基 8xx nm 和 9xx nm 边发射激光器作为固体和光纤激光器的泵浦源和核心器件,技术发展和指标水平不断提高,而实际的产品仍然严重依赖进口,研发和生产高性能高可靠的大功率半导体激光器是满足高功率激光器产业的旺盛需求,提高我国高端制造业竞争力的关键。2) 3D 感知半导体激光器方面。最近 5 年来,我国发展出近百家激光雷达和 3D 感知公司,作为激光雷达核心光源的 905 nm 边发射激光器国际上也取得了非常瞩目的进展,本土公司所生产的芯片在性能指标上接近和媲美国际同类产品的水平,但仍然需要在产品和产业化方面得到加强和快速提升。3) VCSEL 器件方面。国际无论在通信还是 3D 感知方面都取得了巨大的技术进步和广泛的实际市场应用。国内虽取得了可喜的进展,但仍需要大幅提高自主芯片的性能、可靠性和稳定性,满足不断增长的市场批量需求,满足未来发展需要。4) 红外半导体激光器方面。美国和日本研究机构与公司在 GaSb 基边发射红外激光器、InP 基和 InAs 基量子级联激光器为主的中远红外和太赫兹波段的激光光源研究居国际领先。国内在此领域取得了重要的成果,正在加快走向应用满足需求,但产业化方面更需努力。

总而言之,欧美和日本在半导体激光器技术和市场的优势显著,中国的研究机构和企业需要密切合作,瞄准高功率光纤激光器泵浦源、高速光通信激光器和消费类电子等领域,研究和开发高性能边发射激光器和垂直腔面发射激光器,提高芯片的可靠性和良率,利用国产激光芯片武装我国的高端制造、5G 和未来 6G 通信设备和系统,实现自主知识产权的激光芯片,增强我国光电产业的核心竞争力。也坚信今后几年内会获得更加快速的研究开发与产业

化发展!

参 考 文 献

- [1] Epperlein P W. Semiconductor laser engineering, reliability and diagnostics[M]. Oxford, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- [2] Zhang J, Zhao H P, Tansu N. Large optical gain AlGa δ N-delta-GaN quantum wells laser active regions in mid- and deep-ultraviolet spectral regimes[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(17): 171111.
- [3] Murayama M, Nakayama Y, Yamazaki K, et al. Watt-class green (530 nm) and blue (465 nm) laser diodes[J]. Physica Status Solidi, 2018, 215(10): 1700513.
- [4] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions[J]. Physical Review Letters, 1962, 9(9): 366-368.
- [5] Nathan M I, Dumke W P, Burns G, et al. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions[J]. Applied Physics Letters, 1962, 1(3): 62-64.
- [6] Quist T M, Rediker R H, Keyes R J, et al. Semiconductor maser of GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1962, 1(4): 91-92.
- [7] Kroemer H. A proposed class of hetero-junction injection lasers[J]. Proceedings of the IEEE, 1963, 51(12): 1782-1783.
- [8] Panish M B, Hayashi I, Sumski S. Double-heterostructure injection lasers with room-temperature thresholds as low as 2300 A/cm^2 [J]. Applied Physics Letters, 1970, 16(8): 326-327.
- [9] Soda H, Iga K I, Kitahara C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [10] Iga K, Koyama F, Kinoshita S. Surface emitting semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(9): 1845-1855.
- [11] Wang S. Proposal of periodic layered waveguide structures for distributed lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(2): 767-780.
- [12] Wang Q M. The development and development of semiconductor opto-electronics in the Institute of Semiconductors [C] // Anthology of the 40th Anniversary of the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2000: 109.
王启明. 半导体光电子学在半导体所的开拓和发展 [C] // 中国科学院半导体研究所建所四十周年纪念文集, 2000: 109.
- [13] Peng H D, Ma C H, Wang X J, et al. $1.5\ \mu\text{m}$ InGaAsP/InP P substrate buried crescent (PBC)

- lasers [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1989, 10(2): 143-145.
- 彭怀德, 马朝华, 汪孝杰, 等. 1.5 μm InGaAsP/InP P型衬底埋新月型(PBC)结构激光器[J]. 半导体学报, 1989, 10(2): 143-145.
- [14] Wang W, Zhang J Y, Wang X J, et al. Low threshold current 1.5 μm PBR-DFB lasers [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1992, 13(5): 279-286, 327.
- 王圩, 张静媛, 汪孝杰, 等. 低阈值1.5 μm 平面掩埋脊型(PBR)分布反馈激光器[J]. 半导体学报, 1992, 13(5): 279-286, 327.
- [15] Xiao J W, Xu J Y, Yang G W, et al. Extremely low threshold current, buried-heterostructure strained InGaAs-GaAs multiquantum well lasers [J]. Electronics Letters, 1992, 28(2): 154-156.
- [16] Chen L H. Quantum well lasers and their applications [J]. International Journal of High Speed Electronics & Systems, 1996, 7(3):373-381.
- [17] Chen L H. The development of quantum well optoelectronic devices and formation of Chinese optoelectronic industry [J]. Engineering Science, 1999, 1(3): 75-78.
- 陈良惠. 量子阱光电子器件的发展与中国光电子器件产业的形成[J]. 中国工程科学, 1999, 1(3): 75-78.
- [18] Zhang S M, Zhu J J, Li D R, et al. Characteristics of domain wavelength and light output-power of GaN-based LED [J]. Journal of Semiconductors, 2005, 26(6): 158-160.
- 张书明, 朱建军, 李德尧, 等. 氮化镓基发光二极管的发光光谱和功率特性[J]. 半导体学报, 2005, 26(6): 158-160.
- [19] Chen L H, Ye X J, Zhong M. Gallium nitride based blue laser diodes[J]. Physics, 2003, 32(5): 302-308.
- 陈良惠, 叶晓军, 种明. GaN基蓝光半导体激光器的发展[J]. 物理, 2003, 32(5): 302-308.
- [20] Yang H, Chen L H, Zhang S M, et al. Material growth and device fabrication of GaN-based blue-violet laser diodes [J]. Journal of Semiconductors, 2005, 26(2): 414-417.
- 杨辉, 陈良惠, 张书明, 等. GaN基蓝紫光激光器的材料生长和器件研制[J]. 半导体学报, 2005, 26(2): 414-417.
- [21] Cao C S, Fan L, Ai I, et al. Recent development of high-power-efficiency 50 W CW TE/TM polarized 808 nm diode laser bar at lasertel[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 75830L.
- [22] Wang Z F, Li T, Yang G W, et al. High power, high efficiency continuous-wave 808 nm laser diode arrays[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 97: 297-301.
- [23] Wang Z F, Li T, Yang G W, et al. Development of 808 nm quasi-continuous wave laser diode bar with 600 W output power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601004.
- 王贞福, 李特, 杨国文, 等. 808 nm准连续600 W高功率半导体激光芯片研制[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601004.
- [24] Pietrzak A, Woelz M, Huelsewede R, et al. Heading to 1 kW levels with laser bars of high-efficiency and emission wavelength around 880 nm and 940 nm[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480E.
- [25] Kanskar M, Chen Z G, Dong W M, et al. High power and high efficiency 1.8-kW pulsed diode laser bar[J]. Journal of Photonics for Energy, 2017, 7(1): 016003.
- [26] Li P X, Yin F J, Zhang C S, et al. 808 nm single emitter high power laser with 13.6 W[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 101013.
- 李沛旭, 殷方军, 张成山, 等. 808 nm连续输出13.6 W单芯片大功率激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 101013.
- [27] Xu Y, Fang Q, Xie Z X, et al. Single fiber quasi-single mode 2 kW all-fiber laser oscillator based on single-end 915 nm semiconductor laser forward-pumping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401003.
- 许阳, 房强, 谢兆鑫, 等. 基于915 nm半导体激光单端前向抽运的单纤准单模2 kW全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401003.
- [28] Yang P Z, Deng P Z, Xu J, et al. Spectroscopy and laser performance of Yb³⁺ doped YAG crystal[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(1): 132-135.
- 杨培志, 邓佩珍, 徐军, 等. Yb:YAG晶体的光谱和激光性能[J]. 光学学报, 1999, 19(1): 132-135.
- [29] Bao L, Kanskar M, Devito M, et al. High reliability demonstrated on high-power and high-brightness diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480C.
- [30] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, et al. Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 100860D.
- [31] Qiu B C, Hu H, Wang W M, et al. Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers [J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 590-603.
- 仇伯仓, 胡海, 汪卫敏, 等. 12 W高功率高可靠性915 nm半导体激光器设计与制作[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 590-603.

- [32] Jiang K, Li P X, Shen Y, et al. 76% maximum wall plug efficiency of 940 nm laser diode with step graded index structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0402003.
蒋锴, 李沛旭, 沈燕, 等. 76%光电转换效率梯度渐变折射率结构 940 nm 半导体激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402003.
- [33] Matthew P, Victor R, Matthew E, et al. High-power high-efficiency laser diodes at JDSU [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6456: 64560G.
- [34] Frevert C, Bugge F, Crump P, et al. 940 nm QCW diode laser bars with 70% efficiency at 1 kW output power at 203 K: analysis of remaining limits and path to higher efficiency and power at 200 K and 300 K [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330L.
- [35] Zhao Y L, Wang Z F, Yang G W, et al. Research on 940 nm kilowatt high efficiency quasi-continuous diode laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11170:1117040.
- [36] Abdullah D, Matthew P, Richard D, et al. 29. 5 W continuous wave output from 100 μ m wide laser diode [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480G.
- [37] Gapontsev V, Moshegov N, Berezin I, et al. Highly-efficient high-power pumps for fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008604.
- [38] Kaifuchi Y, Yoshida K, Yamagata Y, et al. Enhanced power conversion efficiency in 900 nm range single emitter broad stripe laser diodes maintaining high power operability [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10900: 109000F.
- [39] Wang Z F, Yang G W. 808 nm / 976 nm high efficiency, high power semiconductor laser chip [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0815001.
王贞福, 杨国文. 808 nm/976 nm 高效率、高功率半导体激光芯片 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0815001.
- [40] Sebastian J, Hülsewede R, Pietrzak A, et al. Research on 9xx nm diode laser for direct and pumping applications [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92550Y.
- [41] Kaul T, Erbert G, Crump P, et al. Suppressed power saturation due to optimized optical confinement in 9xx nm high-power diode lasers that use extreme double asymmetric vertical designs [J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(3): 035005.
- [42] Lian P, Yin T, Gao G, et al. Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascaded via tunnel junction [J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(12): 2374-2377.
廉鹏, 殷涛, 高国, 等. 新型多源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器 [J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2374-2377.
- [43] Vinokurov D A, Konyaev V P, Ladugin M A, et al. A study of epitaxially stacked tunnel-junction semiconductor lasers grown by MOCVD [J]. Semiconductors, 2010, 44(2): 238-242.
- [44] Li H, Qu Y, Zhang J J, et al. High power 905 nm InGaAs tunnel junction series stacked semiconductor lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2517-2520.
李辉, 曲轶, 张剑家, 等. 高功率 905 nm InGaAs 隧道结串联叠层半导体激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2517-2520.
- [45] Si D H, Li J J, Fu Y Y, et al. 905 nm uncoupled double active region semiconductor laser with tunnel junction [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(2): 139-144.
司东海, 李建军, 付莹莹, 等. 905 nm 隧道带间级联非耦合双有源区半导体激光器 [J]. 光电子 • 激光, 2016, 27(2): 139-144.
- [46] Knigge A, Christopher H, Liero A, et al. Wavelength stabilized high pulse power laser bars for line-flash automotive LIDAR [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11262: 112620F.
- [47] Knigge A, Klehr A, Wenzel H, et al. Wavelength-stabilized high-pulse-power laser diodes for automotive LiDAR [J]. Physica Status Solidi, 2018, 215(8): 1700439.
- [48] Excelitas Technologies. 905 nm pulsed laser semiconductor diodes datasheet [EB/OL]. [2020-04-12]. <https://www.excelitas.com/product-category/905nm-pulsed-semiconductor-laser-diodes>.
- [49] Chen J, Liao K, Xiong Y, et al. Fabrication of high-power single tunnel junction semiconductor lasers [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(3): 345-349.
陈健, 廖柯, 熊煜, 等. 大功率单隧道结半导体激光器的研制 [J]. 半导体光电, 2018, 39(3): 345-349.
- [50] Qiu Y Z, Xie Y H, Wang W M, et al. Ultra-high-power and high-efficiency 905 nm pulsed laser for LiDAR [C] // 2019 IEEE 4th Optoelectronics Global Conference (OGC), September 3-6, 2019. Shenzhen, China. IEEE, 2019: 32-35.
- [51] Kuchta D M, Pepeljugoski P, Kwark Y. VCSEL modulation at 20 Gb/s over 200 m of multimode fiber using a 3. 3 V SiGe laser driver IC [C] // Leos Summer Topical Meeting. 2001:941906.
- [52] Johnson R H, Serkland D K. 17 G directly

- modulated datacom VCSELs[C] // 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics, May 4-9, 2008. San Jose, CA, USA. IEEE, 2008: CPDB2.
- [53] Westbergh P, Gustavsson J S, Ko'gel B, et al. 40 Gbit/s error-free operation of oxide-confined 850 nm VCSEL[J]. Electronics Letters, 2010, 46(14): 1014-1016.
- [54] Westbergh P, Safaisini R, Haglund E, et al. High-speed 850 nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s[J]. Electronics Letters, 2013, 49(16): 1021-1023.
- [55] Kuchta D M, Rylyakov A V, Schow C L, et al. 64 Gb/s transmission over 57 m MMF using an NRZ modulated 850 nm VCSEL[C] // Optical Fiber Communication Conference, San Francisco, California. Washington, D. C. : OSA, 2014.
- [56] Kuchta D M, Rylyakov A V, Doany F E, et al. A 71 Gb/s NRZ modulated 850 nm VCSEL-based optical link [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 577-580.
- [57] Haglund E, Larsson A, Geen M, et al. 30 GHz bandwidth 850 nm VCSEL with sub-100 fJ/bit energy dissipation at 25-50 Gbit/S[J]. Electronics Letters, 2015, 51(14): 1096-1098.
- [58] Barve A V, Yuen A. Compact emitter design for a vertical-cavity surface-emitting laser: US009742153B1[P]. 2017-08-22.
- [59] Moench H, Gronenborn S, Gu X, et al. VCSELs in short-pulse operation for time-of-flight applications [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10552: 105520G.
- [60] Okur S, Scheller M, Miglo A, et al. High-power VCSEL arrays with customized beam divergence for 3D sensing applications [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10938: 109380F.
- [61] Yu H Y, Yao S, Zhang H M, et al. Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(6): 064207.
于洪岩, 尧舜, 张红梅, 等. 940 nm 垂直腔面发射激光器的设计及制备[J]. 物理学报, 2019, 68(6): 064207.
- [62] Khan Z, Shih J C, Chao R L, et al. High-brightness and high-speed vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. Optica, 2020, 7(4): 267-275.
- [63] Jean-Francois S, Chuni L, Viktor K, et al. High-power vertical-cavity surface-emitting arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6876: 68760D.
- [64] Gao S J, Zhang X, Zhang J W, et al. Miniaturized VCSEL pulsed laser source with high peak power at 980 nm [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(5): 578-583.
- 高世杰, 张星, 张建伟, 等. 980 nm 高峰值功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源 [J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 578-583.
- [65] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, et al. Progress on high-power high-brightness VCSELs and applications[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9381: 93810B.
- [66] Aoki Y, Maeda J, Yoshida H, et al. 200 W operation of an ion-implanted vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(7): 510-514.
- [67] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, et al. Progress on high-power 808 nm VCSELs and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10122: 1012206.
- [68] Warren M E, Podva D, Preethi D C, et al. Low-divergence high-power VCSEL arrays for lidar application[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10552: 105520E.
- [69] Joullié A, Christol P. GaSb-based mid-infrared 2-5 μm laser diodes[J]. Comptes Rendus Physique, 2003, 4(6): 621-637.
- [70] Tournié E, Baranov A N. Mid-infrared semiconductor lasers [M] // Advances in Semiconductor Lasers. France: Elsevier, 2012: 183-226.
- [71] Chen J, Hosoda T, Tsvit G, et al. Type-I GaSb based diode lasers operating at room temperature in 2 to 3.5 μm spectral region [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7686: 76860S.
- [72] Shterengas L, Kipshidze G, Hosoda T, et al. Cascade pumping of 1.9-3.3 μm type-I quantum well GaSb-based diode lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-8.
- [73] Hosoda T, Feng T, Shterengas L, et al. High power cascade diode lasers emitting near 2 μm [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(13): 131109.
- [74] Liang R, Chen J F, Kipshidze G, et al. High-power 2.2 μm diode lasers with heavily strained active region [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(10): 603-605.
- [75] Chichkov N B, Yadav A, Zhrebtsov E, et al. Wavelength-tunable, GaSb-based, cascaded type-I quantum-well laser emitting over a range of 300 nm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(22): 1941-1943.
- [76] 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.
- 柴小力, 张宇, 廖永平, 等. 高功率 GaSb 基 2.6 微米 InGaAsSb/AlGaAsSb I 型量子阱室温工作激光器[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(3): 257-260.
- [77] Yang C A, Xie S W, Huang S S, et al. Research progress of antimonide infrared single mode semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5): 0503002.
- 杨成奥, 谢圣文, 黄书山, 等. 铋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.
- [78] 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.
- [79] Müller A, Beck M, Faist J, et al. Electrically tunable, room-temperature quantum-cascade lasers [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(11): 1509-1511.
- [80] Rochat M, Hofstetter D, Beck M, et al. Long-wavelength ($\lambda \approx 16 \mu\text{m}$), room-temperature, single-frequency quantum-cascade lasers based on a bound-to-continuum transition [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(26): 4271-4273.
- [81] Lu Q Y, Razeghi M. Recent advances in room temperature, high-power terahertz quantum cascade laser sources based on difference-frequency generation[J]. Photonics, 2016, 3(3): 42.
- [82] Razeghi M, Lu Q Y, Bandyopadhyay N, et al. Quantum cascade lasers: from tool to product[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8462-8475.
- [83] Rothman L S. The evolution and impact of the HITRAN molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010, 111(11): 1565-1567.
- [84] Revin D G, Cockburn J W, Steer M J, et al. InGaAs/AlAsSb/InP quantum cascade lasers operating at wavelengths close to 3 μm [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(2): 021108.
- [85] Bandyopadhyay N, Bai Y, Slivken S, et al. High power operation of $\lambda \sim 5.2\text{-}11 \mu\text{m}$ strain balanced quantum cascade lasers based on the same material composition [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7): 071106.
- [86] Szerling A, Slivken S, Razeghi M. High peak power 16 μm InP-related quantum cascade laser[J]. Opto-Electronics Review, 2017, 25(3): 205-208.
- [87] Chevalier P, Piccardo M, Anand S, et al. Watt-level widely tunable single-mode emission by injection-locking of a multimode Fabry-Perot quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(6): 061109.
- [88] Yan F L, Zhang J C, Jia Z W, et al. High-power phase-locked quantum cascade laser array emitting at $\lambda \sim 4.6 \mu\text{m}$ [J]. AIP Advances, 2016, 6(3): 035022.
- [89] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(18): 181102.
- [90] Lyakh A, Suttinger M, Go R, et al. 5.6 μm quantum cascade lasers based on a two-material active region composition with a room temperature wall-plug efficiency exceeding 28% [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(12): 121109.
- [91] Hugi A, Villares G, Blaser S, et al. Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser [J]. Nature, 2012, 492(7428): 229-233.
- [92] Lu Q Y, Razeghi M, Slivken S, et al. High power frequency comb based on mid-infrared quantum cascade laser at $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(5): 051105.
- [93] Vijayraghavan K, Jiang Y, Jang M, et al. Broadly tunable terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2021.
- [94] Laffaille P, Moreno J C, Teissier R, et al. High temperature operation of short wavelength InAs-based quantum cascade lasers[J]. AIP Advances, 2012, 2(2): 022119.
- [95] Bahriz M, Lollia G, Baranov A N, et al. InAs/AlSb quantum cascade lasers operating near 20 μm [J]. Electronics Letters, 2013, 49(19): 1238-1240.
- [96] Loghmani Z, Bahriz M, Meguekam A, et al. Continuous wave operation of InAs-based quantum cascade lasers at 20 μm [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(15): 151101.
- [97] Soibel A, Wright M W, Farr W, et al. High-speed operation of interband cascade lasers[J]. Electronics Letters, 2009, 45(5): 264-265.
- [98] Tian Z, Li L, Ye H, et al. InAs-based interband cascade lasers with emission wavelength at 10.4 μm [J]. Electronics Letters, 2012, 48(2): 113.
- [99] Li L, Jiang Y C, Ye H, et al. Low-threshold InAs-based interband cascade lasers operating at high temperatures[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(25): 251102.
- [100] Jiang Y C, Li L, Ye H, et al. InAs-based single-mode distributed feedback interband cascade lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(9): 1-7.