

文章编号: 1000-7032(2026)07-1222-15

超辐射发光二极管制备技术与研究进展

赵 鑫, 王泱迪, 赵晓壮, 吴 丹, 栗 博*, 贾慧民, 唐吉龙, 魏志鹏*

(长春理工大学 半导体激光全国重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 超辐射发光二极管(Superluminescent diode, SLD)基于单程的自发辐射放大现象,具有高输出功率、宽发光光谱、弱相干性等特点,在生物医学成像、精密仪器、光纤通信等领域具有广阔的应用前景,是第三代半导体光电子器件的研究热点。本文从有源材料设计、波导结构调控、光学端面优化三个角度出发,详细综述了SLD器件的核心制备技术及研究现状。通过多种技术手段相融合,SLD器件在性能、稳定性和集成度上不断实现突破。在此基础上,归纳总结了其在光学相干断层扫描、干涉式光纤陀螺仪和光纤传感器系统等领域的应用进展,展现了SLD器件的独特优势。最后,简要分析了SLD器件研究中面临的主要问题并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 超辐射发光二极管; 量子阱; 波导结构; 光学相干断层扫描

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260067

CSTR: 32170.14.CJL.20260067

Preparation Technology and Research Progress on Superluminescent Diodes

ZHAO Xin, WANG Yangdi, ZHAO Xiaozhuang, WU Dan, LI Bo*,

JIA Huimin, TANG Jilong, WEI Zhipeng*

(National Key Laboratory of Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Authors, E-mail: libo@cust.edu.cn; zpweicust@126.com

Abstract: Based on the one-pass amplification phenomenon of spontaneous emission, superluminescent diodes (SLDs) exhibit outstanding advantages including high output power, wide emission bandwidth and low temporal coherence. Benefiting from these superior properties, SLDs have shown great application potential in biomedical imaging, precision measurement instruments and optical fiber communication systems, thus becoming one of the research hotspots in the field of third generation semiconductor optoelectronic light sources. This paper systematically reviews the recent research progress of SLD devices, focusing on three key fabrication technologies: active layer material design, waveguide structure optimization and facet treatment improvement. With the continuous development and integration of these technologies, the performance, service stability and integration level of SLD devices have been continuously improved. On this basis, this paper summarizes the typical application progress of SLDs in optical coherence tomography systems, interferometric fiber optical gyroscope systems and optical fiber sensing systems, and further demonstrates their unique technical advantages in practical application scenarios. Finally, the development trends are prospected.

Keywords: superluminescent diode; quantum well; waveguide structure; optical coherence tomography

收稿日期: 2026-03-06; 修订日期: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(12504334); 吉林省自然科学基金(YDZJ202401627ZYTS); 国家重点实验室基金(6142806240106); 长春市科技发展计划项目(2024GZZ23)

Supported by National Natural Science Foundation of China (12504334); Natural Science Foundation of Jilin Province (YDZJ202401627ZYTS); Fund for National Key Laboratory (6142806240106); Science and Technology Development Plan Project of Changchun (2024GZZ23)

1 引言

随着光纤通信^[1-2]、生物医学成像^[3-4]、精密仪器^[5-6]等领域的飞速发展,传统的半导体光源面临诸多物理效应带来的性能瓶颈,其工作性能与系统的稳定性受制于瑞利散射与非线性克尔效应所诱发的噪声影响,难以满足日益严苛的实际使用需求。现阶段,激光二极管(Laser diode, LD)、发光二极管(Light emitting diode, LED)和超辐射发光二极管(Superluminescent diode, SLD)等是主流的固态半导体光源。作为传统半导体光源的激光二极管基于受激辐射现象产生相干光,其具有较好的单色性、能量密度高且集中,但输出的激光光谱宽度却极窄,仅为纳米量级,且器件的注入电流也需要达到较高的阈值才能产生激光^[7-8],这就无法满足需要宽频带覆盖、低阈值驱动的场景需求。发光二极管虽然可以输出较宽且平坦的发光光谱,但其发光亮度与功率密度却存在一定的物理上限^[9-10]。此外,温度的不稳定性也制约了其在高精度检测、长距离通信等关键领域的应用。

超辐射发光二极管SLD是一种基于单程自发辐射放大现象的半导体光电子器件^[11],与激光二极管存在显著的谐振反馈现象不同,其通过多种手段抑制端面反射,以免形成激射振荡,使光场在增益介质中实现单次的放大输出。SLD器件的光学性能介于激光二极管与发光二极管之间,兼具高输出功率、宽发光光谱、高调制带宽和低相干性等光学特性^[12],有效弥补了传统半导体发光器件的诸多缺陷和不足,使其成为最具潜力的半导体光源。苏联应用物理科学研究所Kurbatov等^[13]在尝试提高激光二极管输出功率的过程中,成功研制出首个GaAs同质结SLD器件,并基于此提出了单程的自发辐射放大理论,为后续SLD器件领域的研究奠定了理论基础。随后,美国贝尔实验室Lee等^[14]成功研制了AlGaAs/GaAs有源层的双异质结SLD器件。自此,SLD器件领域的研究进入了飞速发展的新阶段。

高输出功率和宽发光光谱是SLD器件的关键性能特征^[15]。为了提高SLD器件的输出功率,通常需要增大器件的注入电流强度,随着载流子浓度的提升,器件有源区内受激辐射的跃迁比例显著提高,而自发辐射过程则会因此受到明显抑制^[16],进而导致器件的光谱线宽被压缩、发光范围

变窄。因此,想要同时实现SLD器件的高功率和宽光谱的输出是十分困难的,通常需要根据实际需要在二者之间进行权衡。自20世纪80年代以来,随着晶体外延生长技术如分子束外延(Molecular beam epitaxy, MBE)、金属有机化合物化学气相沉积(Metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)等^[17-18]的迅速发展,基于量子有源结构的SLD器件开始出现,使得其在性能上有了大幅度的提升,并为SLD器件在高功率与宽光谱之间实现平衡提供了全新的解决方案。

SLD器件作为第三代半导体光电子器件领域的研究热点,随着应用需求的不断提升,其在性能、集成度和可靠性等方面面临着诸多的挑战。本文首先从SLD器件的制备技术角度出发,分别阐述了有源材料技术、波导结构技术和端面优化技术等核心技术的发展现状以及其对器件性能的调控机制,展现了SLD器件在性能上不断更新迭代的进程。接着介绍了SLD器件在生物医学成像、光纤陀螺仪系统、光纤传感等领域的应用场景与技术优势,凸显其在诸多现实领域的研究价值。最后,从输出功率、光谱宽度和可靠性三个维度对SLD器件未来的研究重点和发展方向进行了总结与展望,为其后续的创新与发展提供参考与启示。

2 SLD器件研究现状

随着SLD器件领域研究的不断进展,对其性能的要求也随之提升,国内外众多科研团队相继开展高性能、低成本、高集成度SLD器件的研发工作^[19-21]。为了实现综合性能优异的SLD器件,主要可以从有源材料、波导结构和端面优化三个核心制备技术角度考虑(如图1所示)。(1)有源材料技术:通过对量子有源结构和材料体系进行优化,可以提高SLD器件的量子效率并降低其内部损耗^[22],进而获得较高的输出光功率。(2)波导结构技术:SLD器件通过设计不同的波导结构,可以有效抑制器件内部Fabry-Perot激射振荡,从而避免激光产生^[23],以此获得相对较低的光谱调制深度。(3)端面优化技术:通常借助涂覆抗反射涂层、设计倾角条形结构、引入吸收区等技术手段,能够有效地降低SLD器件端面的光反射,获得较小的光束发散角和稳定的光功率输出^[24]。

2.1 有源材料技术

SLD器件的有源材料经历了同质结、异质结、量子阱^[25]、量子点^[26]、量子级联^[27]的技术进程演变,

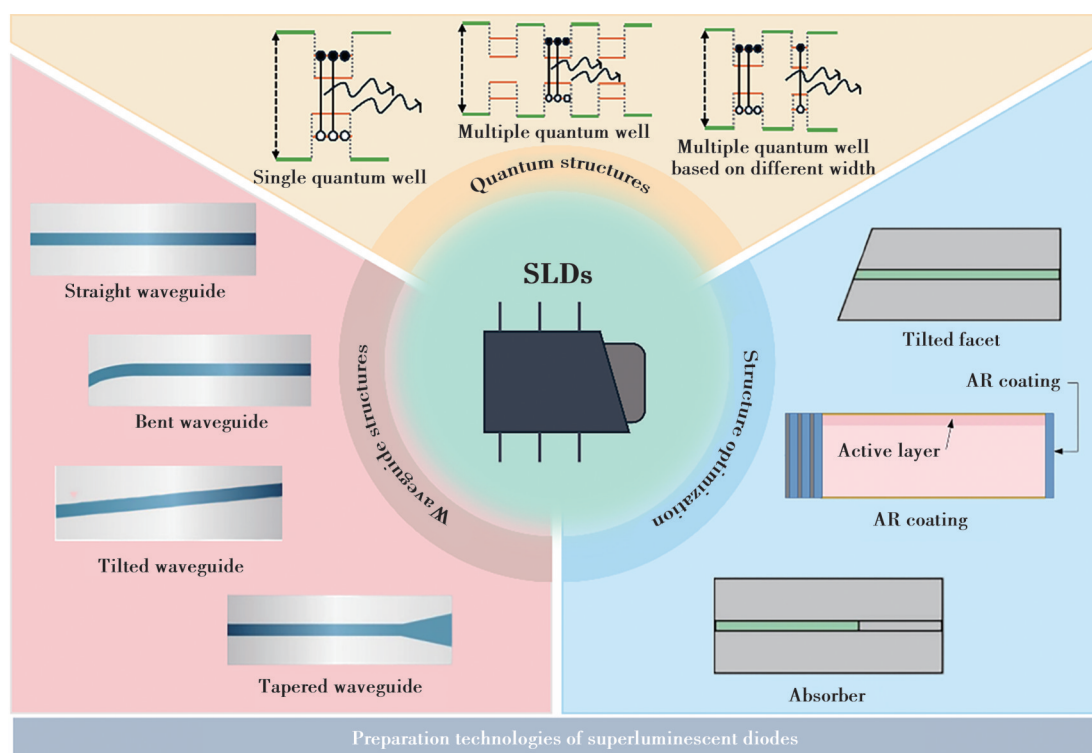


图1 SLD器件的核心制备技术

Fig.1 Core fabrication technologies of SLD devices

伴随着结构设计的不断优化,其在性能上得到了逐步的提升。早期受制于较为落后的制备技术条件,SLD器件的有源结构主要以三维体材料为主。同质结SLD器件的结构简单,有源材料层与两侧的光限制层均采用同一种半导体材料制备,但受限于同质结较弱的载流子与光场限制能力,同质结SLD器件存在外量子效率较低、阈值电流过高等缺陷。为了改善同质结SLD器件的诸多弊端,二十世纪80年代,基于异质结结构的SLD器件诞生于美国贝尔实验室^[14]。双异质结结构的SLD器件可以更好地限制载流子与光场,有效地降低光在非增益区的吸收损耗,进而实现更高的效率,注入电流的阈值也有所降低。除此之外,异质结结构的SLD器件产生的热量也得到了控制^[28],发射波长的温度稳定性进而有所提升,使得其可以在室温下连续稳定地工作。

三维体材料体系的SLD器件有源结构简单、易于制备,但其受制于材料组分的均一性,存在固有的性能缺陷,输出功率提升存在明显上限,无法满足现实需要。随着材料领域的不断发展和器件制造工艺的不断提升,量子功能材料凭借量子尺寸效应、量子隧穿等特性,逐渐成为SLD器件有源层的主流结构^[29-31],其中使用较为广泛的有源结构

就是量子阱(Quantum well, QW)结构。美国施乐帕洛阿尔托研究中心 Paoli 等^[32]采用 AlGaAs 应变层有源结构,成功地制备了具有较高输出功率的单量子阱结构 SLD 器件。单量子阱结构的有源势阱区的材料厚度通常小于电子在量子材料中的德布罗意波长,可以实现较低的阈值电流。此外,得益于单量子阱结构阶梯状的态密度变化,使其具有高增益的材料特性,易于实现 SLD 器件的高功率输出。然而,基于单量子阱结构 SLD 器件在工作的稳定性方面却不理想。于是,日本富士通研究所 Tabuchi 等^[33]摒弃了单量子阱结构,通过重复排列相同阱宽的量子阱实现了超宽可调谐的 In-GaAs/InGaAsP 多量子阱(Multiple quantum well)SLD 器件,在室温下连续工作的可调谐波长范围达到 240 nm。多量子阱结构大大提高了载流子的利用率和复合发光效率,在低密度电流注入的情况下,SLD 器件可以实现较高的调制带宽。福州大学薛正群等^[34]以多量子阱结构为基础,采用 InP/In-GaAsP 作为增益材料,通过在外延结构上采用宽带隙电子阻挡层来提高量子阱的电子限制效率,实现了 24 mW 的光功率输出,光谱宽度达到 80 nm,且具有优异的性能稳定性。日本光电子实验室 Kondo 等^[35]通过设计不同宽度的势垒层,在同一有

源结构中进行不同阱宽的多量子阱材料堆叠生长,实现了发射光波长可调谐的SLD器件。长春理工大学半导体激光重点实验室曲轶等^[36]针对量子阱SLD器件存在载流子运输效率不足、高功率下光谱稳定性较差等性能瓶颈,基于非均匀阱宽的多量子阱创新有源结构优化能级排布,并结合大光腔设计成功制备了发射波长为850 nm的SLD器件,在120 mA注入电流下实现6 mW的室温连续输出功率,与单模保偏光纤耦合输出功率达到1.0 mW。为了制备更高功率、更宽的SLD器件,并同时得到较大的单程增益并抑制饱和电流,曲轶等^[37]采用MBE方法制备高质量的GaAlAs/GaAs量子阱材料,并通过X射线双晶衍射、光致发光光谱和电化学方法等表征外延薄膜,证实了器件材料的生长具有较高的质量,并实现了SLD器件的超辐射高功率输出。

相比于传统的量子阱结构,量子点(Quantum dot, QD)SLD器件能够实现更宽的输出光谱带宽^[38]。中国科学院半导体研究所孙中哲等^[39]首次提出了量子点的概念,并借助系统的数值模拟方法从理论层面充分证实了基于量子点结构的SLD器件的可行性与显著性能优势。从材料制备特性角度来看,自组装生长的量子点材料在尺寸上具有不均匀性^[40-41],这种本征的结构非均匀性保证了量子点材料集合形成密度连续分布的宽增益谱,进而使得SLD器件能够获得较宽的输出光谱宽度。借助该理论基础,中国科学院半导体研究所张子旻等^[42]成功研制出发射波长为1 μm 的量子点SLD器件,其输出光谱宽度可达60 nm。

为了突破半导体晶体材料中电子的带间跃迁限制,美国贝尔实验室Gmachl等^[43]基于能带工程理论,提出了量子级联(Quantum cascade, QC)结构,并指出了其在半导体光源中具有潜在的价值,为后续量子级联SLD器件的研制奠定了发展基础。量子级联SLD器件是一种基于单极性输运机制的边发射半导体光源,其核心发光机制为电子在量子阱导带内的子带间跃迁,发光波长由子带间跃迁的能级差决定^[44-46]。基于量子级联结构的SLD器件能够实现较高的性能输出。中国科学院半导体研究所刘峰奇等^[47]基于双声子共振应变补偿结构,通过调控子带间跃迁过程与载流子弛豫行为,有效地抑制了载流子的损耗;同时拓宽了SLD器件的增益谱范围,在室温下连续波工作模

式下,实现了中心发射波长为5 μm 的稳定输出,其光谱半高全宽(Full width at half maximum, FWHM)大于200 cm^{-1} ,对应的光谱宽度达30 nm,同时获得了0.5 mW的连续输出功率。英国谢菲尔德大学Zibik等^[48]设计了一种三量子阱耦合的垂直跃迁量子级联SLD器件,每个不同的量子级联有源区均参与光子的生成,垂直的跃迁方式更是削弱了对材料界面的质量要求,因而实现了高达几十微瓦的峰值输出功率,显著优于传统量子阱结构SLD器件的性能。

在21世纪之前,针对SLD器件有源层的研究主要集中在二维量子阱(2 Dimensional quantum well, 2DW)结构,不同量子有源体系SLD器件的输出功率和光谱宽度的性能参数对比如图2所示,其性能提升空间逐渐趋于饱和。然而,在过去二十年的技术迭代进程中,伴随着啁啾多层量子阱、零维量子点、量子短线(Q-dash)等新型量子有源结构的相继出现^[49-51],SLD器件的性能优化迎来了新的突破,研究人员逐渐开始借助量子点和量子短线的尺寸涨落来有效拓宽SLD器件的光谱宽度。例如,KAUST光电子实验室Khan等^[52]借助量子阱与量子短线相结合的多层堆叠式结构,以此来放大SLD器件内部的自发辐射现象,实现了700 nm的光谱宽度,覆盖了O-E-S-C-L-U系统的整个通信频带;中国科学院半导体研究所杨涛和吕尊仁等^[53]为了抑制非辐射复合的损耗,拓宽器件的增益带宽,通过在InAs/GaAs量子点结构中直接进行硅掺杂来提高SLD器件的性能,实现了20.5 mW的输出功率以及105 nm的光谱宽度;青岛大学张子旻等^[54]以调控量子点尺寸的非均匀性

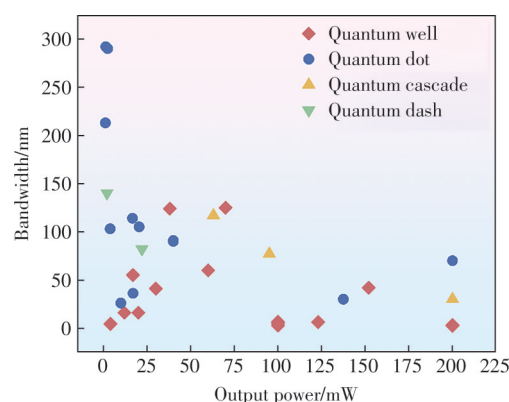


图2 不同有源材料技术SLD器件的输出功率与发光光谱宽度

Fig.2 SLD devices output power and spectra bandwidth of different active material technologies

为核心策略,通过优化分子束外延的生长条件,成功制备出具有较大量子点尺寸、高非均匀分布特征的五层量子点有源结构,并基于该结构获得了输出功率为 40 mW、光谱宽度为 91 nm 的 SLD 器件,实现了 SLD 器件输出功率与光谱宽度的协同提升。由此可见,以量子点、量子短线为代表的低维有源结构,凭借其独特的量子限域效应、更灵活的性能调控自由度,突破了传统量子阱结构的性能提升瓶颈,在提高 SLD 器件综合性能方面展现出巨大的应用潜力。

2.2 波导结构技术

SLD 器件主要以条形芯片结构为主,引入波导结构技术是从侧向即平行于结平面的方向限制载流子和光反馈,一方面能够降低器件工作的阈值电流,减少功耗并提升稳定性;另一方面能够优化光场分布,降低发散角,从而更易实现与光纤的高效耦合^[55]。SLD 器件的条形芯片以及波导结构如图 3 所示,常见的有直波导、斜波导、波导吸收区和弯曲波导等。为了合理设计波导结构,提升 SLD 器件的实际适配性,通常需要考虑波导及周围材料的有效折射率、波导蚀刻宽度等关键参数。

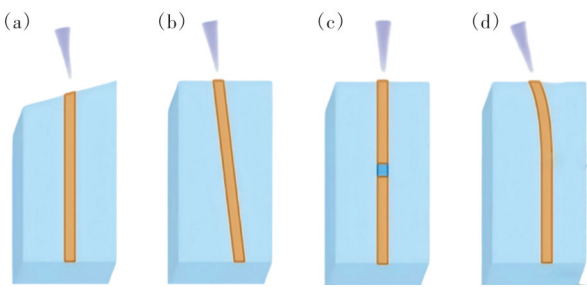


图3 SLD 器件条形芯片及其波导结构示意图。(a)直波导结构;(b)斜波导结构;(c)直波导吸收区结构;(d)弯曲波导结构

Fig.3 Schematic diagram of SLD device stripe chip and its waveguide structure. (a) Straight waveguide. (b) Tilted waveguide. (c) Straight waveguide with absorption. (d) Bent waveguide

直波导结构 SLD 器件通常是由直线型的有源区和吸收区组成,其结构简单、易于制备、稳定性也较高,通过对有源区和吸收区的长度进行优化和调节,能够实现器件的高功率输出^[56]。美国 Ortel 公司 Kwong 等^[57]以掩埋式的新月形激光器结构为基础,成功制备了 InGaAsP/InP 直波导结构的 SLD 器件,获得了低于 15% 的光谱调制深度和 40% 的单模光纤耦合效率。然而,直波导结构型 SLD 器件的吸收区通常较长,在高注入电流的激励作用

下对光反馈的抑制作用会显著降低,因此实际上器件的发光效率并不理想^[58]。为了实现更高的效率性能,随着芯片制备工艺的发展,基于新型波导结构设计的 SLD 器件开始逐渐出现。以直波导结构为基础,将条形有源区相对于端面倾斜角度 θ 角度形成斜波导结构。美国 Sarnoff 公司 Alphonse 等^[59]将倾斜波导结构制成特殊的“金刚石”形,由此将器件的输出功率提高到 175 mW。长春理工大学半导体激光重点实验室晏长岭等^[60]提出了一种双倾斜波导结构的 SLD 器件,该结构由两个倾斜波导和一个半环形波导组成,能够显著降低器件的光损耗和反射率,且具有良好的散热效果。但倾斜波导结构却存在明显的不足,会导致输出的光束截面形状产生失真问题,进而造成光纤耦合效率降低^[61]。因此,中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所刘建平等^[62]开始采用弯曲波导结构即让直波导具有一定的弯曲角度,实现了 510 mW 输出功率的 SLD 器件。研究团队通过实验验证,直波导部分的长度越长、弯曲角度越大,器件的输出功率提升越显著。

以上介绍的波导类型均是 SLD 器件发展进程中较为经典的结构,为后续创新型波导结构的器件提供了思路和指导,不同波导结构 SLD 器件的输出功率和光谱宽度的性能参数对比如图 4 所示。长春理工大学半导体激光重点实验室魏志鹏等^[63]基于纳米压印维纳制备工艺,利用增益钳制物理机制提出了 SLD 器件的新结构,即通过将非均匀阱宽三量子阱结构与非对称的大光腔波导结构相结合,以此来抑制中心波长的 Fabry-Perot 振荡,实现了室温下连续 14.63 mW 的功率输出以及

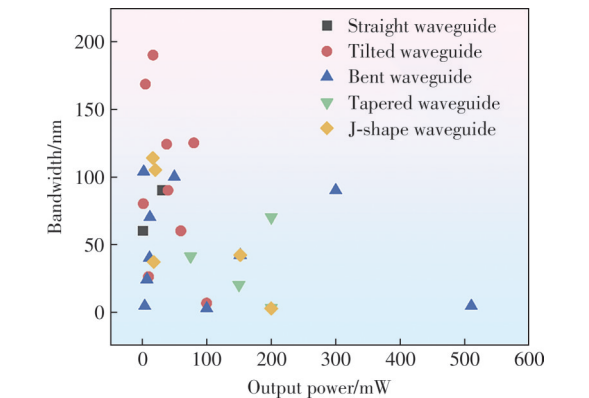


图4 不同波导结构技术 SLD 器件的输出功率与发光光谱宽度

Fig.4 SLD devices output power and spectra bandwidth of different waveguide structure technologies

22 nm 的 FWHM。波兰科学院 Kafar 等^[64]提出了一种全新的 J 形波导结构的 SLD 器件,其由等分的直波导结构和弯曲波导结构构成,波导轴线与窗口吸收区形成一定的角度,实现了超过 200 mW 的输出功率;长春理工大学半导体激光重点实验室魏志鹏等^[65]为了进一步优化 1 310 nm 波长 SLD 器件的性能,将波导弯曲 8° 同样形成 J 形弯曲波导结构,有效地避免了光学谐振的形成,其在室温及 500 mA 电流连续驱动下,实现了高功率的超辐射输出。以此为基础,为了提高 1 μm SLD 器件的输出特性,长春理工大学半导体激光重点实验室薄报学等^[66]对 J 型波导结构参数和外延结构进行优化研究,并缩小波导与限制层的组分差值来改善光束特性,成功制备了在 500 mA 连续电流注入下具有 118.1 mW 的输出功率和 32.5 nm 的光谱半宽的 SLD 器件。中国工程物理研究院王雪敏等^[67]将倾斜角为 10° 的斜波导结构与 20° 弯曲角的弯曲波导结构相结合,将量子级联 SLD 器件的输出功率提高到了 5.1 mW,光谱宽度拓宽到 168.5 nm,为提高量子级联 SLD 器件的性能在结构上提供了新思路。

2.3 端面优化技术

对于 SLD 器件来说,其与边发射激光二极管(Edge emitting laser diode)的主要区别在于 SLD 器件需要采取一定的措施来尽可能地抑制光反馈,以防止在增益介质中发生谐振现象,因此避免了激光振荡产生高相干性的发射光^[68]。为了破坏器件内部的光学谐振、抑制激光振荡,从而实现高功率与宽光谱发光,SLD 器件通常需要借助端面优化技术,主要的手段有端面的粗糙化处理、楔形输出解理面结构设计、端面抗反射镀膜、引入窗口吸收区以及腔面镀膜改性等^[69-72]。上述手段均可以有效地降低光反射率,以防止 SLD 器件形成纵模。长春理工大学半导体激光重点实验室张晶等^[73]利用数值模拟计算方法确定 InGaAlAs 材料的组分,设计不同阱宽的三量子阱结构提高载流子的自发复合效率,并采用非注入吸收区的结构抑制激光,实现了最大输出功率 26.1 mW 的 SLD 器件。

采用楔形的输出解理面主要是通过使器件的腔面与波导结构形成一定的倾斜角,这种倾斜的输出结构对光束传播存在一定的抑制作用^[74]。同时,楔形解理面还可以减少输出端面的菲涅尔反射与干涉条纹,降低光功率损耗,优化光束的输出

与耦合效率。为了抑制俄歇非辐射复合现象,提升 SLD 器件的工作能力,吉林大学宋俊峰等^[75]基于 InGaAsP/InP 材料体系对器件结构进行优化,将电流注入区的轴线进行一定角度的倾斜形成倾斜式结构,在 1.5 μm 处制备了一款输出功率超过 200 mW 的 SLD 器件。作为可见光通信领域的基础器件,基于楔形解理面结构的 SLD 器件在光通信领域的应用较为广泛,但其调制带宽会受到固有的限制。复旦大学沈超等^[76]采用楔形解理面结构制备了可以实现快速复合的 SLD 器件,并采用开关键控调制方案实现了 1.3 Gbps 的数据传输速率。为了进一步提高传输速率并降低误码率,沈超等^[77]同样地在器件的输出端采用楔形解理面,并与集成吸收层结构相结合,将数据的传输速率提高到 3.6 Gbps。不同端面优化技术 SLD 器件的输出功率和光谱宽度的性能参数对比如图 5 所示。

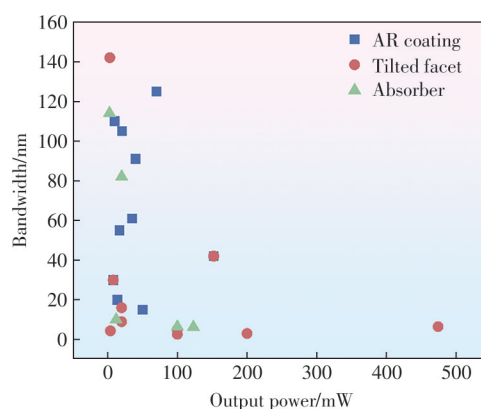


图5 不同端面优化技术 SLD 器件的输出功率与发光光谱宽度

Fig.5 SLD devices output power and spectra bandwidth of different facet improvement technologies

在 SLD 器件的端面涂覆抗反射涂层是降低其端面反射率一种常用的优化技术,一方面可以防止有源结构的氧化,提高器件的稳定性;另一方面,还可以提高器件的发光效率和输出功率等^[78-79]。常见的抗反射涂层材料有 SrO_2 、 SiO_2 、 Si_3N_4 、 TiO_2 等氧化物材料等。美国贝尔实验室 Kaminow 等^[80]最早尝试涂覆抗反射膜的技术手段,其在 SLD 器件的一端采用 Si_3N_4 涂层,另一端则采用 Au 涂层,以此来有效降低端面的反射率,成功制备了 1.3 μm 的 SLD 器件,其在室温下连续工作的输出功率可达 1.6 mW。美国 TRW 公司光电研究中心 Morrison 等^[81]以 Si_3N_4 抗反射涂层为基础,结合同相位的双通道激光器结构,在有效抑制光反馈的同时实现了较高的输出功率,并解决了高功率激光器阵列

的多瓣、发散角大等问题。为了进一步降低 SLD 器件的端面反射率,美国理海大学 Djie 等^[82]采用 ZrO 与 SiO₂ 两种材料相结合,将其涂覆到 SLD 器件的端面,将器件的端面反射率降低至 1%~2%。长春理工大学半导体激光重点实验室曲轶等^[83]为了提高单模保偏光纤耦合效率,通过优化设计器件的大光腔波导结构抑制发散角,基于 GaAs 材料体系,采用直波导吸收区结合出腔光面镀制 Au 抗反射膜,在 140 mA 电流注入下,将单模保偏光纤的耦合输出功率提高到 1.5 mW,并保证了 SLD 器件稳定的超辐射输出。但在实际应用中,单纯地借助抗反射膜这一种手段很难达到理想的效果即反射率难以降低至 10⁻⁵ 数量级。因此,通常会与其

他的手段相结合来实现理想的性能要求。中国科学院半导体研究所杨成奥、徐应强、牛智川等^[84]设计了一种级联腔结构的 SLD 器件,并在其表面涂覆了 Ta₂O₅/SiO₂ 超低反射率的涂层,其反射率最低可以达到 0.04%,同时实现了 152 mW 的输出功率以及 42 nm 的光谱带宽。

3 SLD 器件的应用领域

近年来,SLD 器件领域得到了迅速的发展,从早期的近红外 SLD 器件,逐步拓展至中红外、近紫外、可见光等工作波段范围^[85-87]。得益于良好的发光特性,SLD 器件被广泛地应用于各种低相干测量系统,其主要应用领域如图 6 所示。

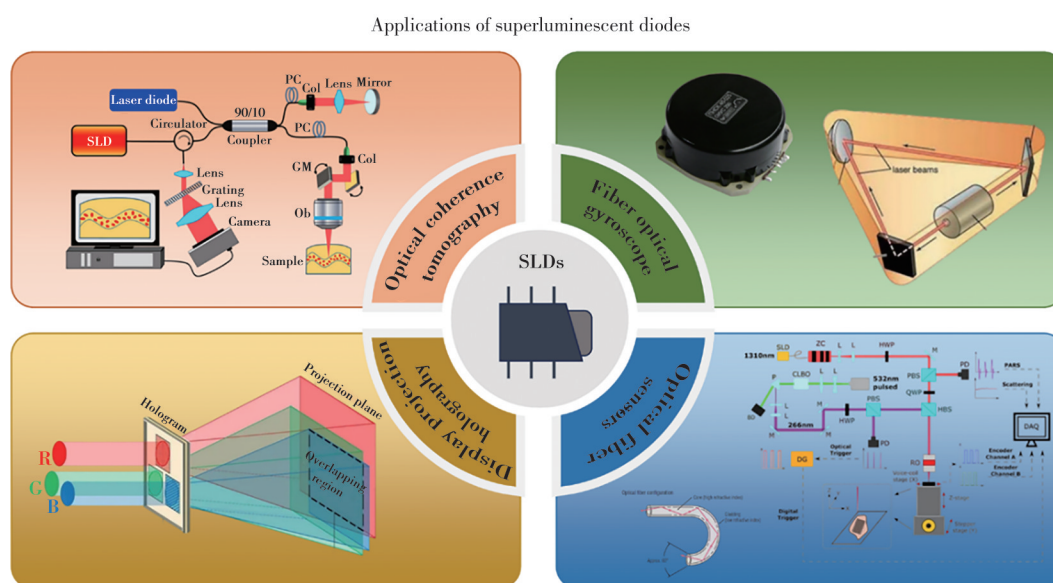


图 6 SLD 器件的应用领域

Fig.6 Multiple applications of SLD devices

3.1 SLD 器件在 OCT 系统中的应用

光学相干断层扫描技术(Optical coherence tomography, OCT)作为一种新型非侵入式的高分辨率生物学成像技术,被广泛地应用于眼科、心脏病、皮肤科等医学诊断^[88]。传统的 OCT 系统通常会采用 LED 光源、荧光光纤光源等,其中,LED 光源的成本较低,但其发光面积的展宽仅为毫米级别,频宽较窄,输出亮度也较低^[89]。而荧光光纤光源虽然具有良好的温度稳定性,但是成本偏高,且其非高斯线型的输出也会降低 OCT 系统的轴向分辨率与成像信噪比,进而严重影响 OCT 系统的成像质量^[90]。因此,兼具较高亮度、宽光谱输出、低相干性的 SLD 器件逐渐成为 OCT 系统的首选光源。

俄勒冈健康与科学大学 Huang 等^[91]首次将 SLD 器件用作 OCT 系统的光源,构建二极管光源和光纤耦合的模块化系统,实现了微米级的空间分辨率和高灵敏度的生物组织检测。研究中发现,相比于传统的超短脉冲激光器,基于 SLD 的低相干反射测量技术通过样本反射光的相干特性,获取来自样本内反射边界与后向散射点的时间延迟信息,成功生成内部组织微结构光学散射的二维图像,突出了 SLD 器件在分辨率和穿透范围等方面具有的独特优势。受制于当时的技术条件,SLD 器件的带宽相对有限^[92],采用 SLD 作为光源时 OCT 系统的轴向分辨率仅能达到 10 μm 。为了实现更高的分辨率,麻省理工学院 Ko 等^[93]开发了一款适用于超高分辨率 OCT(Ultrahigh resolution optical

coherence tomography)系统的宽带光源,极大地提升了OCT成像的临床应用价值。研究中将两个独立的SLD器件组成宽带光源,通过复用两个光学输出通道实现155 nm的带宽,输出功率高于4 mW,并分别在散射组织和视网膜中获得约2.3 μm 和3.2 μm 的轴向分辨率。这项成果证实了采用紧凑、易操作且较低成本的SLD光源实现活体超高分辨率OCT成像的可行性。新型SLD宽谱光源的开发将极大地提升超高分辨率OCT成像技术的应用普及度,为未来眼科等临床诊断领域提供了新的解决方案。SLD器件在血管成像领域也有广泛的应用。德国德累斯顿工业大学临床传感与检测研究组Hammer等^[94]提出一种基于傅里叶频域相干断层扫描(Fourier domain optical coherence tomograph)的共振多普勒血流成像测量方法,通过中心波长840 nm、带宽50 nm的短相干光源SLD器件,配备改良的迈克尔逊干涉仪,利用三态法对血流进行流速定量与成像分析。这种技术通过分析强度和相位信息,成功地将血流的测速范围提高了两倍,对于血管疾病的病理生理学及治疗方面具有重要意义。此外,为了填补970 nm波段SLD器件在OCT领域的应用空白,长春理工大学刘帅男等^[95]设计了弯曲脊形倾斜端面结构,并对激光波长与阱宽的关系进行模拟仿真,实现了在高功率输出下24 nm的FWHM。

基于SLD器件的OCT系统具有高分辨率、低噪声、稳定且精准的特性,相较于传统的激光器光源更具优势^[96]。为了进一步开发SLD在OCT系统中的应用,在保持合理的光输出功率的同时,提高SLD器件的光谱带宽、降低光的重吸收率将是未来该领域的研究重点。

3.2 SLD器件在IFOG系统中的应用

干涉式光纤陀螺仪(Interferometric fiber optical gyroscopes,简称IFOG)作为一种用于测量旋转角速度的高精度传感器,是现代惯性导航系统、航天测控系统与旋转传感应用的核心技术器件^[97]。基于铒或钕的光纤激光器与谐振式光纤激光器具高功率和温度稳定的特点,被认为是IFOG的理想光源,但激光器的相干长度较长,不利于抑制散射误差,导致IFOG系统的精度难以提高^[98]。而SLD器件相干度低、光谱较宽且波纹较小,利于抑制或消除菲涅尔背向反射、双折射效应带来的噪声和偏移。因此,兼具宽带光谱、低相干性、高功

率、小型化等特点的SLD器件得到研究人员的广泛关注^[99],逐渐成为开发IFOG系统的标准选择。

IFOG系统通常将光源、探测器、光耦合器、功率分配器、偏振器和相位调制器以分立元件的形式集成在一起。西德AEG-Telefunken研究中心Bohm等^[100]通过使用SLD器件作为光源,成功研制出无需使用偏振控制元件即可实现恒定标度因数的光纤陀螺仪,首次证实了SLD光源在光纤陀螺仪领域具有重要价值,自此越来越多的研究人员开始借助SLD器件研制高精度的光纤陀螺仪。重庆光电技术研究所廖柯等^[101]采用三层介质平板波导结构,设计并制备了中心波长850 nm的SLD器件,适用于中低精度的IFOG系统。

随着研究的不断深入,IFOG系统迫切地需要更高性能的SLD光源,而其性能主要会受到器件的输出功率、光谱宽度、中心波长的影响。北京航空航天大学伊小素等^[102]对SLD器件的温度稳定性进行了深入且系统的研究,发现对SLD器件内部结构或外部的驱动控制源进行调整设计,可以明显地改善其温度性能,提高其温度的稳定性。基于该理论基础,浙江大学杨建华等^[103]通过建立温度场仿真模型,设计实验研究了SLD内部结构的温度分布,根据实验和仿真结果在SLD器件的TEC控制电路中采用一种补偿热敏电阻来进行温度补偿,实验结果表明,经补偿的SLD光源的温度稳定性提高了62%。重庆大学臧志刚等^[104]设计了一种有源多模干涉耦合器用于降低SLD器件的热阻,适配耦合器的IFOG系统工作热阻值显著地降低了40%,而SLD器件的输出功率较之前提升了近两倍,为开发高精度、高可靠性的IFOG系统提供了启示。除了从SLD器件的内部结构进行温度稳定性的调整,还可以通过设计外部的驱动控制源来实现。南京理工大学微电子学院李衡等^[105]引入双层嵌套的PID(Proportional integral derivative controller, PID)光功率控制算法,通过调节控制参数,最大限度地降低SLD器件对温度条件的敏感度以及IFOG的光功率波动,使得光功率更接近目标值,并解决了极端温度条件下IFOG系统启动缓慢的问题。

SLD光源凭借着输出光功率高、相干长度短等固有特性,可以有效抑制IFOG系统非互易性误差的同时提升系统的探测信噪比与动态范围,在光纤陀螺仪系统中发挥着核心作用^[106]。在未来

的发展中,研究稳定、可靠、小型化的 SLD 光源用于开发高精度、高集成度和高稳定性的 IFOG 系统是该领域必然的发展趋势。

3.3 SLD 器件在光纤传感器系统中的应用

光纤传感器(Optical fiber sensor)是指利用光纤来测量压力、温度、电磁和辐射等多种物理量的装置,其可以将光特性的变化转换成可被测量的数据^[107]。光纤传感器具有灵敏度高、响应速度快、抗干扰、低损耗等特点,使得其在环境监测、药物输送、土木结构分析等诸多领域有着广泛的应用^[108]。随着光纤传感技术的普及,对于可用于光纤传感器和光学系统的宽带半导体光源的需求越来越迫切。凭借着宽光谱兼具低相干性的特征,越来越多的科研人员将 SLD 器件作为宽带光源集成到光纤传感器系统中。

美国国家航空航天局(NASA)Nguyen 等^[109]基于光纤的法拉第旋转效应,基于 SLD 器件宽带光源开发出一款用于飞机雷电电流测量的光纤传感器。相比于传统的传感器,其采用反射式偏振测量方案,能够测量总电流并适应不同的结构几何形状。该光纤传感器经过火箭触发闪电测试,结果与预期相吻合,证明了其在雷电环境下进行雷电电流测量的准确性和可行性。

随着生物技术的发展,SLD 器件从航空航天极端环境的监测逐步渗透并深刻变革了生物医学光纤传感领域。英国诺丁汉大学光学与光子学研究组 Morgan 等^[110]为了实现重症监护中的关键生理和药物参数监测,利用 SLD 器件与两个布拉格光栅连接组成光纤传感器,用于检测重症患者的呼吸特征,实现了 $50 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的浓度检测上限。微型光纤传感器的出现为医疗领域带来了全新的方法和手段。英国伦敦大学学院电子与电气工程学院 Poduval 等^[111]构建了一种具有封闭空气腔和亚微米级分辨率的微型外置光纤传感器,用于微创血管的内诊断。为了抑制光束在传感器外部及周围介质中产生的加热效应,该研究采用的是低功率的 SLD 器件进行低相干干涉光学检测,能够同步实现血管内压力和温度的原位测量。由此可见,基于 SLD 器件的单片式外置 Fabry-Perot 结构光学腔能够最大限度地减少其内部的光束发散,从而提高了光纤传感器的信噪比,同时也实现了 SLD 光源光纤传感器在微创医疗手术领域的成功应用。受该实验的启发,越来越多的科研人员开

始将光纤传感器应用到临床医学领域。维也纳工业大学 Djinovic 等^[112]通过结合低相关与高相干干涉测量,利用 SLD 器件与垂直腔面发射激光器耦合光源,提出了一种用于测量手术器械与视网膜之间的亚微米级距离的光纤传感技术,能够实现约在 2 mm 的较大动态范围内测量光纤传感尖端与目标之间的距离,其精度可以达到 655 nm。

SLD 凭借其体积小、功率高、易集成等特点,在微型光纤传感器中发挥着越来越重要的作用。在保证输出带宽的前提下,如何进一步提高 SLD 的输出功率、降低输出光的相干性以便于提高传感器的精度,则是未来研究方向的关键。同时,提高光纤传感器的集成度,使其变得更加微型化也是这个方向的研究重点。

4 总结与展望

超辐射发光二极管 SLD 凭借其高功率、宽光谱和弱相干性等特点,相比于激光二极管 LD、发光二极管 LED 等传统半导体光源展现出更为显著的综合性能优势与更广阔的应用前景。本文分别从有源材料体系设计、波导结构调控以及端面光学优化三个方面,系统综述了 SLD 器件制备技术的研究进展与发展现状。作为高性能的半导体光电子器件,纵观其几十年的发展历程,SLD 器件始终在朝着更高功率、更宽光谱、更高集成度的方向稳步推进。目前,SLD 器件已经在生物医学成像、精密光学仪器、光纤传感等领域实现规模化应用,但如何实现其输出功率与光谱宽度的协同优化始终是研究人员持续攻关的核心课题。

在提高 SLD 器件的输出功率方面,基于有源层结构和材料体系的精准调控能力,增大有源层的体积是一种简单、直接的提高器件输出光功率的方法。更大的有源区域体积可以提升电流注入阈值,通过激发更多的光子实现光功率的线性增长。此外,对 SLD 器件有源区的设计进行优化也是从物理机制上实现功率提升的一种方法,通常采用的方法有外延材料体系优化、改变量子结构等。对外延材料体系进行优化能够提高器件在高电流注入下的量子效率,进而实现从大体积向高效率的转变。而引入应变量子阱结构、量子短线等从量子结构层面进行改变则有助于提高微分增益。未来 SLD 器件将会从增大有源区体积、优化有源区设计、采用阵列集成技术等多路径、多方法融合并行,为提高其输出功率提供新的解决方案。

在拓宽SLD器件的光谱宽度方面,一是从量子阱的角度出发,通过不同阱宽的多量子阱进行堆叠来拓宽发光光谱的宽度;或是改变量子阱的局部能带结构,采用离子注入诱导无序或激光退火诱导层间扩散等技术形成组分渐变的缓变带隙量子区域,实现SLD器件的连续光谱展宽。二是从器件结构的角度来说,非对称波导结构能够改变光场分布,从而激发不同的能量跃迁;或是设计多段式紧凑结构的SLD器件,通过分段注入电流,拓宽发光光谱的宽度。三是可以通过外部的光谱合束技术,将多个不同波长的SLD的输出光进行空间或光纤合束,理论上可以实现超宽的光谱展宽。未来,拓宽SLD器件的发光光谱宽度可以从量子点与量子短线结构、混合集成与片上光谱合成等角度入手,实现性能与稳定性的新平衡。

此外,可靠性也是衡量SLD器件性能的重要指标之一。有源区退化、管芯与尾纤的耦合失效、热敏电阻老化等是SLD器件的主要失效模式。通过分析器件的敏感应力开展寿命加速测试,运用阿伦尼乌斯方程、图估计、无偏估计等数学方法对

实验数据进行分析拟合从而建立可靠性预计模型,是评估SLD器件可靠性的主要方法。在未来的可靠性研究中,借助实时原位监测技术避免离线误差、利用机器学习辅助数据筛选、开展多参数的融合建模等方法建立SLD器件全生命周期评估模型,是实现精准可靠性预测的有效途径。

综上所述,SLD器件在核心性能、长期运行可靠性、单片集成化水平等方面仍然有可提升的空间。通过不断地对SLD器件进行优化并拓展其在新型光学检测仪器、痕量气体检测等新兴领域的应用,将推动半导体光电子器件朝着更高性能、更高可靠性、更高集成度和更广泛的应用方向发展。展望未来,随着SLD器件的不断优化,其作为新型半导体光源的重要性将日益凸显,有望为光电子器件的进步提供有力支撑,为半导体激光器的发展注入新的活力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260067>

参 考 文 献:

- [1] LI D, MA C C, WANG J F, *et al.* High-speed GaN-based superluminescent diode for 4.57 Gbps visible light communication [J]. *Crystals*, 2022, 12(2): 191.
- [2] HUANG M H, SUN L H, GUAN C W, *et al.* High-speed blue superluminescent diode array for 34.17 Gbps visible light communication [C]. *Proceedings of the Science and Innovations 2025, Long Beach*, 2025: JPS100_34.
- [3] GUPTA A K, MENG R Y, DUELK M, *et al.* High-resolution visible light OCT of the human retina with combined superluminescent diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(12): 4070-4073.
- [4] ZHU D X, LI M, WANG Y H, *et al.* Broadband superluminescent diode-based ultrahigh resolution optical coherence tomography for ophthalmic imaging [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2011, 16(12): 126006.
- [5] HSIAO C W, FANG Y H, CHEN Y J, *et al.* Fabrication of superluminescent diode (SLD) for gyro light source with broadband, high power, and large polarization-extinction ratio performance [C]. *Proceedings of 2020 Opto-Electronics and Communications Conference, Taiwan, China*, 2020: 1-3.
- [6] ZHENG S J, REN M Y, LUO X, *et al.* A novel closed-loop control to solve light source power fluctuations in the fiber-optic gyroscope [J]. *Sensors*, 2023, 23(10): 4590.
- [7] YANG J, VAN GASSE K, LUKIN D M, *et al.* Titanium: sapphire-on-insulator integrated lasers and amplifiers [J]. *Nature*, 2024, 630(8018): 853-859.
- [8] LIU B S, XU S F, MA B W, *et al.* Low-threshold all-optical nonlinear activation function based on injection locking in distributed feedback laser diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2023, 48(15): 3889-3892.
- [9] BEHRMAN K, KYMISSIS I. Micro light-emitting diodes [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(9): 564-573.
- [10] BHATTARAI T, EBONG A, RAJA M Y A. A review of light-emitting diodes and ultraviolet light-emitting diodes and their applications [J]. *Photonics*, 2024, 11(6): 491.
- [11] CASTIGLIA A, ROSSETTI M, MALINVERNI M, *et al.* Recent progress on GaN-based superluminescent light-emitting diodes in the visible range [C]. *Proceedings of SPIE 10532, Gallium Nitride Materials and Devices VIII*, San Francisco, 2018: 159-167.

- [12] KAFAR A, STANCZYK S, SCHIAVON D, *et al.* Review—review on optimization and current status of (Al, In) GaN superluminescent diodes [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2020, 9(1): 015010.
- [13] KURBATOV L N, SHAKHIDZHANOV S S, BYSTROVA L V, *et al.* Investigation of superluminescence emitted by a gallium arsenide diode [J]. *Sov. Phys. Semicond.*, 1971, 4(11): 1739-1744.
- [14] LEE T P, BURRUS C, MILLER B. A stripe-geometry double-heterostructure amplified-spontaneous-emission (superluminescent) diode [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, 9(8): 820-828.
- [15] ONG T K, YIN M, YU Z, *et al.* High performance quantum well intermixed superluminescent diodes [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, 15(8): 1591-1595.
- [16] WU D D, REN X M, LI P, *et al.* Theoretical and experimental investigations on the performance of broad-sense quantum-well superluminescent diodes based on the concept of energy level divergence [J]. *Discover Nano*, 2025, 20(1): 218.
- [17] MOSLEHI MILANI N, ABSALAN H, GOLZAN M M, *et al.* Effects of cavity parameters on the output characteristics of InGaN/GaN superluminescent light emitting diodes [J]. *Iran. J. Sci. Technol., Trans. A: Sci.*, 2021, 45(4): 1485-1490.
- [18] PARK J, LI X. Theoretical and numerical analysis of superluminescent diodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, 24(6): 2473-2480.
- [19] MALINVERNI M, CASTIGLIA A, ROSSETTI M, *et al.* InAlN cladding implementation in green superluminescent diodes and lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(20): 201104.
- [20] MARCHAND P J, RIEMENSBERGER J, SKEHAN J C, *et al.* Soliton microcomb based spectral domain optical coherence tomography [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 427.
- [21] LI C X, ZHAO X Y, QI H C, *et al.* Integrated fiber-optic Fabry-Perot vibration/acoustic sensing system based on high-speed phase demodulation [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2024, 169: 110131.
- [22] GENG Z Q, YANG C G, CHEN Y H, *et al.* High power and broad spectrum GaSb-based 2.1 μm superluminescent diode with advanced cascade cavity suppression waveguide [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2025, 43(22): 10166-10172.
- [23] YAMATOYA T, MORI S, KOYAMA F, *et al.* High power GaInAsP/InP strained quantum well superluminescent diode with tapered active region [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, 38(9R): 5121-5122.
- [24] BOECK J, AMANN M C. AlGaAs/GaAs double-heterostructure superluminescent diodes for optical transmission systems [J]. *Frequenz*, 1979, 33(10): 278-283.
- [25] ALAM BHUIYAN I K, HILSKA J, PEIL M, *et al.* Broadband continuous-wave GaSb-based superluminescent diodes emitting at 2.1 μm [J]. *AIP Adv.*, 2025, 15(8): 085015.
- [26] MAJID M A. Engineering quantum dots: overcoming challenges in telecommunications and human-machine interaction [C]. *Proceedings of the 22nd International Learning and Technology Conference, Jeddah, Saudi Arabia*, 2025: 120-123.
- [27] WANG H, ZHANG J Y, SUN C, *et al.* Miniaturized fiber-optic photoacoustic gas sensor for sub-ppb-level detection of carbon monoxide based on quantum cascade laser and multipass cell [J]. *Anal. Chem.*, 2025, 97(14): 8120-8128.
- [28] LIU Q L, HOU C C, CHEN H M, *et al.* Effects of modulation P-doping on thermal stability of InAs/GaAs quantum dot superluminescent diodes [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2018, 18(11): 7536-7541.
- [29] KAFAR A, STAŃCZYK S, WIŚNIEWSKI P, *et al.* Design and optimization of InGaN superluminescent diodes [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2015, 212(5): 997-1004.
- [30] YAO R Z, LEE C S, PODOLSKIY V, *et al.* Single-transverse-mode broadband InAs quantum dot superluminescent light emitting diodes by parity-time symmetry [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(23): 30588-30595.
- [31] OH S H, KIM J, HA J, *et al.* Thresholdless coherence in a superradiant laser [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 239.
- [32] PAOLI T L, THORNTON R L, BURNHAM R D, *et al.* High-power multiple-emitter AlGaAs superluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, 47(5): 450-452.
- [33] TABUCHI H, ISHIKAWA H. External grating tunable MQW laser with wide tuning range of 240 nm [J]. *Electron. Lett.*, 1990, 26(11): 742-743.
- [34] 薛正群, 王凌华, 陈玉萍. 1.5 μm 高功率超辐射发光二极管的制备和性能 [J]. *发光学报*, 2024, 45(4): 644-650.
- XUE Z C, WANG L H, CHEN Y P. Preparation and performance of 1.5 μm high-power superluminescent diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(4): 644-650. (in Chinese)
- [35] KONDO S, YASAKA H, NOGUCHI Y, *et al.* Very wide spectrum multi-quantum well superluminescent diode at 1.5 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(2): 132-133.
- [36] 李辉, 曲轶, 张晶, 等. 短波长宽光谱超辐射发光二极管 [J]. *中国激光*, 2006, 33(S1): 23-25.

- LI H, QU Y, ZHANG J, *et al.* Short wavelength wide-spectrum superluminescent diode [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(S1): 23-25. (in Chinese)
- [37] 李梅, 李辉, 王玉霞, 等. GaAlAs/GaAs 非均匀阱宽多量子阱超辐射发光管材料制备及表征 [J]. *发光学报*, 2007, 28(6): 885-889.
- LI M, LI H, WANG Y X, *et al.* Research on material characteristics of GaAlAs/GaAs superluminescent diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2007, 28(6): 885-889. (in Chinese)
- [38] WANG L, WANG L, YU J D, *et al.* Abnormal Stranski-Krastanov mode growth of green InGaN quantum dots: morphology, optical properties, and applications in light-emitting devices [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(1): 1228-1238.
- [39] SUN Z Z, DING D, GONG Q, *et al.* Quantum-dot superluminescent diode: a proposal for an ultra-wide output spectrum [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1999, 31(12): 1235-1246.
- [40] PARK Y S, ROH J, DIROLL B T, *et al.* Colloidal quantum dot lasers [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2021, 6(5): 382-401.
- [41] UVIN S, KUMARI S, DE GROOTE A, *et al.* 1.3 μm InAs/GaAs quantum dot DFB laser integrated on a Si waveguide circuit by means of adhesive die-to-wafer bonding [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(14): 18302-18309.
- [42] ZHANG Z Y, WANG Z G, XU B, *et al.* High-performance quantum-dot superluminescent diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 27-29.
- [43] GMACHL C, SIVCO D L, COLOMBELLI R, *et al.* Ultra-broadband semiconductor laser [J]. *Nature*, 2002, 415(6874): 883-887.
- [44] BIASCO S, BEERE H E, RITCHIE D A, *et al.* Frequency-tunable continuous-wave random lasers at terahertz frequencies [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2019, 8(1): 43.
- [45] SAKURABA R, IWAKAWA K, KANNO K, *et al.* Tb/s physical random bit generation with bandwidth-enhanced chaos in three-cascaded semiconductor lasers [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(2): 1470-1490.
- [46] SINGH N, LORENZEN J, KILINC M, *et al.* Sub-2 W tunable laser based on silicon photonics power amplifier [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 18.
- [47] HOU C C, SUN J L, NING J Q, *et al.* Room-temperature quantum cascade superluminescent light emitters with wide bandwidth and high temperature stability [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(11): 13730-13739.
- [48] ZIBIK E A, NG W H, REVIN D G, *et al.* Broadband 6 μm < λ < 8 μm superluminescent quantum cascade light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(12): 121109.
- [49] MAXIMOV M V, GORDEEV N Y, SHERNYAKOV Y M, *et al.* Superluminescent diodes based on chirped InGaAs/GaAs quantum well-dot layers [J]. *Photonics*, 2023, 10(10): 1090.
- [50] WANG H, LV Z R, WANG S, *et al.* Broadband chirped InAs quantum-dot superluminescent diodes with a small spectral dip of 0.2 dB [J]. *Chin. Phys. B*, 2022, 31(9): 098104.
- [51] DJIE H S, DIMAS C E, WANG D N, *et al.* InGaAs/GaAs quantum-dot superluminescent diode for optical sensor and imaging [J]. *IEEE Sens. J.*, 2007, 7(2): 251-257.
- [52] KHAN M Z M, MAJID M A, NG T K, *et al.* Simultaneous quantum dash-well emission in a chirped dash-in-well superluminescent diode with spectral bandwidth > 700 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(19): 3720-3723.
- [53] WANG H, LV Z R, ZHANG Z K, *et al.* Enhanced performance of InAs/GaAs quantum dot superluminescent diodes by direct Si-doping [J]. *AIP Adv.*, 2020, 10(4): 045202.
- [54] JIANG C, WANG H P, CHEN H M, *et al.* Broadband quantum dot superluminescent diode with simultaneous three-state emission [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(9): 1431.
- [55] LIN C F, JUANG C S. Superluminescent diodes with bent waveguide [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(2): 206-208.
- [56] 马东阁, 石家伟, 陈维友, 等. 弯波导吸收区结构 1.3 μm InGaAsP/InP 超辐射发光二极管的设计 [J]. *激光与红外*, 1994, 21(1): 42-44.
- MA D G, SHI J W, CHEN W Y, *et al.* Design of 1.3 μm InGaAsP/InP superluminescent diode with a bent absorbing guide structure [J]. *Laser Infrared*, 1994, 21(1): 42-44. (in Chinese)
- [57] KWONG N S K, BAR-CHAIM N, CHEN T. High-power 1.3 μm superluminescent diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(4): 298-300.
- [58] MIZUNO T, KITOH T, ITOH M, *et al.* Optical spotsize converter using narrow laterally tapered waveguide for planar lightwave circuits [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, 22(3): 833-839.

- [59] ALPHONSE G A. Design of high-power superluminescent diodes with low spectral modulation [C]. *Proceedings of SPIE* 4648, *Test and Measurement Applications of Optoelectronic Devices*, San Jose, 2002: 125-138.
- [60] YANG J H, YAN C L, PANG C. Quantum cascaded superluminescent light emitting diodes with dual tilted waveguide structure [J]. *J. Russ. Laser Res.*, 2024, 45(6): 611-618.
- [61] KOPP F, EICHLER C, LELL A, *et al.* Blue superluminescent light-emitting diodes with output power above 100 mW for picoprojection [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2013, 52(S8): 08JH07.
- [62] XIONG W, HU L, LIU J P, *et al.* High power GaN-based blue superluminescent diodes with low spectral modulation [J]. *AIP Adv.*, 2021, 11(4): 045202.
- [63] 祝子翔, 张晶, 孙春明, 等. 增益钳制式 850 nm 波长超辐射发光二极管设计研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(2): 325-330.
ZHU Z X, ZHANG J, SUN C M, *et al.* Development of gain-clamped 850 nm superluminescent diode [J]. *Acta Armamenta.*, 2018, 39(2): 325-330. (in Chinese)
- [64] KAFAR A, STANCZYK S, TARGOWSKI G, *et al.* High-optical-power InGa_N superluminescent diodes with “j-shape” waveguide [J]. *Appl. Phys. Express*, 2013, 6(9): 092102.
- [65] 王拓, 陈红梅, 贾慧民, 等. 1 310 nm 高功率超辐射发光二极管的制备及性能研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(6): 0623002.
WANG T, CHEN H M, JIA H M, *et al.* Performance research and fabrication of 1 310 nm superluminescent diodes with high power [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2021, 50(6): 0623002. (in Chinese)
- [66] 伏丁阳, 高欣, 赵仁泽, 等. 1 μm 波段高功率超辐射发光二极管 [J]. *发光学报*, 2023, 44(12): 2231-2241.
FU D Y, GAO X, ZHAO R Z, *et al.* 1 μm high power superluminescent diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(12): 2231-2241. (in Chinese)
- [67] LIU Y, JIANG T, ZHAN Z Q, *et al.* Enhanced properties of the mid-infrared superluminescent emitter with a composite waveguide [J]. *Appl. Opt.*, 2024, 63(12): 3174-3177.
- [68] CONSOLI A, CASELLI N, LÓPEZ C. Electrically driven random lasing from a modified Fabry-Pérot laser diode [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(3): 219-225.
- [69] HARDY M T, KELCHNER K M, LIN Y D, *et al.* *m*-Plane GaN-based blue superluminescent diodes fabricated using selective chemical wet etching [J]. *Appl. Phys. Express*, 2009, 2(12): 121004.
- [70] ALATAWI A A, HOLGUIN-LERMA J A, KANG C H, *et al.* High-power blue superluminescent diode for high CRI lighting and high-speed visible light communication [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(20): 26355-26364.
- [71] MA H, CHEN S H, YI X J, *et al.* High power polarization-insensitive 1.3 μm InGaAsP-InP quantum-well superluminescent emission diodes grown by MOVPE [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, 19(7): 823-827.
- [72] DIMAS C E, DJIE H S, OOI B S. Superluminescent diodes using quantum dots superlattice [J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, 288(1): 153-156.
- [73] 孙春明, 张晶, 祝子翔, 等. 利用三量子阱结构拓宽 1 550 nm InGaAlAs 超辐射发光管光谱 [J]. *固体电子学研究* 与进展, 2018, 38(2): 121-126.
SUN C M, ZHANG J, ZHU Z X, *et al.* Spectrum broadening of 1 550 nm InGaAlAs superluminescent diode using three-quantum-well structure [J]. *Res. Prog. SSE*, 2018, 38(2): 121-126. (in Chinese)
- [74] GORDEEV N Y, PAYUSOV A S, SHERNYAKOV Y M, *et al.* Single-pass superluminescent diodes with grazing stripe waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(3): 956-959.
- [75] LIU Y, SONG J F, ZENG Y P, *et al.* High-power 1.5 μm InGaAsP/InP strained quantum wells integrated superluminescent light source with tilted structure [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40(6R): 4009-4010.
- [76] SHEN C, LEE C, NG T K, *et al.* High-speed 405-nm superluminescent diode (SLD) with 807-MHz modulation bandwidth [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(18): 20281-20286.
- [77] DONG M X, WANG J F, MA C C, *et al.* High-speed 405nm violet superluminescent diode for 3.6 Gbps visible light communication [C]. *Proceedings of 2023 7th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference*, Seoul, 2023: 1-3.
- [78] BURROW L, CAUSA F, SARMA J. 1.3-W ripple-free superluminescent diode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, 17(10): 2035-2037.
- [79] KHAN M Z M, ALHASHIM H H, NG T K, *et al.* High-power and high-efficiency 1.3- μm superluminescent diode with

- flat-top and ultrawide emission bandwidth [J]. *IEEE Photonics J.*, 2015, 7(1): 1600308.
- [80] KAMINOW I, EISENSTEIN G, STULZ L, *et al.* Lateral confinement InGaAsP superluminescent diode at 1.3 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, 19(1): 78-82.
- [81] MORRISON C B, ZINKIEWICZ L M, NIESEN J, *et al.* High-power superluminescent diode with reduced coherence length [J]. *Electron. Lett.*, 1985, 21(19): 840-841.
- [82] DIMAS C E, TAN C L, HONGPINGYO V, *et al.* Broadband flat-top superluminescent diode with low spectral modulation at 850 nm [C]. *Proceedings of 2008 IEEE PhotonicsGlobal@Singapore, Singapore*, 2008: 1-3.
- [83] 李辉, 王玉霞, 李梅, 等. 高功率850 nm宽光谱大光腔超辐射发光二极管[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 613-616.
LI H, WANG Y X, LI M, *et al.* High-power 850 nm large optical cavity wide spectrum superluminescent diode [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(5): 613-616. (in Chinese)
- [84] WANG T F, YANG C G, CHEN Y H, *et al.* High power GaSb-based superluminescent diode with cascade cavity suppression waveguide geometry and ultra-low antireflection coating [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(2): 021102.
- [85] 杨静航, 晏长岭, 刘云, 等. 红外波段超辐射发光二极管研究进展[J]. 发光学报, 2023, 44(9): 1621-1635.
YANG J H, YAN C L, LIU Y, *et al.* Research progresses on infrared superluminescent diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(9): 1621-1635. (in Chinese)
- [86] LU H, ALKHAZRAGI O, WANG Y, *et al.* Low-coherence semiconductor light sources: devices and applications [J]. *npj Nanophoton.*, 2024, 1(1): 9.
- [87] ZIA N, VIHARIÄLÄ J, KOIVUSALO E, *et al.* GaSb superluminescent diodes with broadband emission at 2.55 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(5): 051106.
- [88] 李晓静, 赵爽, 杨强, 等. 基于SLD的谱域OCT测距系统设计与实现[J]. 激光杂志, 2022, 43(12): 25-30.
LI X J, ZHAO S, YANG Q, *et al.* Design and implementation of spectral domain OCT ranging system based on SLD [J]. *Laser J.*, 2022, 43(12): 25-30. (in Chinese)
- [89] SCHMITT J M. Optical coherence tomography (OCT): a review [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, 5(4): 1205-1215.
- [90] NI S B, WEI X, NG R, *et al.* High-speed and widefield handheld swept-source OCT angiography with a VCSEL light source [J]. *Biomed. Opt. Express*, 2021, 12(6): 3553-3570.
- [91] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, *et al.* Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [92] ROSA C C, SHIDLOVSKI V, ROGERS J A, *et al.* Broadband SLD-based source for retina investigations [C]. *Proceedings of SPIE 5690, Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine IX, San Jose*, 2005: 540-547.
- [93] KO T H, ADLER D C, FUJIMOTO J G, *et al.* Ultrahigh resolution optical coherence tomography imaging with a broadband superluminescent diode light source [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(10): 2112-2119.
- [94] HAMMER D, WALTHER J, CUEVAS M, *et al.* Velocity analysis by using Doppler Fourier domain optical coherence tomography with variable reference length [M]. SLOTEN J, VERDONCK P, NYSEN M, *et al.* *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 811-815.
- [95] 刘帅男. 970 nm应变量子阱超辐射发光二极管的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
LIU S N. *Study on 970 nm Strained Quantum Well Superluminescent Light Emitting Diode* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [96] GUPTA A K, MENG R Y, SRINIVASAN V. A clinical visible light OCT system with superluminescent diodes (SLDs) [J]. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2025, 66(8): 1500.
- [97] CHEN X, JIANG L, YANG M F, *et al.* Research on the mean-wavelength drift mechanism of SLD light source in FOG [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, 1300(1): 012047.
- [98] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y. Broad-spectrum, wavelength-swept, erbium-doped fiber laser at 1.55 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1990, 15(16): 879-881.
- [99] 袁淑瑶, 李斌杰, 胡俊熠, 等. 小尺寸高精度宽谱光源驱动的谐振式光纤陀螺[J]. 光学学报, 2026, 46(13): 1306003.
QIU S Y, LI B J, HU J Y, *et al.* Compact and high-accuracy resonant fiber-optic gyroscope driven by a broadband source [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2026, 46(13): 1306003. (in Chinese)
- [100] BÖHM K, MARTEN P, PETERMANN K, *et al.* Low-drift fibre gyro using a superluminescent diode [J]. *Electron.*

- Lett.*, 1981, 17(10): 352-353.
- [101] 廖柯, 刘刚明, 周勇, 等. 850 nm 超辐射发光二极管 [J]. 半导体光电, 2004, 25(4): 257-261.
LIAO K, LIU G M, ZHOU Y, *et al.* Superluminescent diodes at 850 nm [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2004, 25(4): 257-261. (in Chinese)
- [102] 伊小素, 肖文, 魏铁钧. 大功率、宽光谱超辐射发光管的温度稳定性研究 [J]. 光子学报, 2004, 33(11): 1367-1369.
YI X S, XIAO W, WEI T J. Research on the thermal stability of high power and broader spectral width super luminescent diode [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2004, 33(11): 1367-1369. (in Chinese)
- [103] CHEN X, YANG J H, ZHOU Y L, *et al.* An improved temperature compensation circuit for SLD light source of fiber-optic gyroscope [J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2017, 916(1): 012027.
- [104] ZANG Z G, MUKAI K, NAVARETTI P, *et al.* Thermal resistance reduction in high power superluminescent diodes by using active multi-mode interferometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(3): 031108.
- [105] QIN S, ZUO Y, JIANG S K, *et al.* Research on light source power and temperature control and fast-start technology of fiber optic gyroscope [C]. *Proceedings of 2024 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering, Xi'an*, 2024: 1460-1464.
- [106] 周勇, 段利华, 张靖, 等. 低偏振高功率 1 310 nm 超辐射发光二极管的液相外延生长 [J]. 发光学报, 2015, 36(1): 69-74.
ZHOU Y, DUAN L H, ZHANG J, *et al.* 1 310 nm polarization-insensitive high power superluminescent diodes fabricated by liquid phase epitaxy [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 69-74. (in Chinese)
- [107] 曹辉, 杨一风, 刘尚波, 等. 用于光纤电流传感器 SLD 光源的温度控制系统 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 920-926.
CAO H, YANG Y F, LIU S B, *et al.* Temperature control system for SLD optical source of FOCS [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2014, 43(3): 920-926. (in Chinese)
- [108] ZHANG T Y, ZHENG Y, WANG C M, *et al.* A review of photonic crystal fiber sensor applications for different physical quantities [J]. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2018, 53(6): 486-502.
- [109] NGUYEN T X, ELY J J, SZATKOWSKI G G, *et al.* Fiber-optic sensor for aircraft lightning current measurement [C]. *Proceedings of 2012 International Conference on Lightning Protection, Vienna*, 2012: 1-7.
- [110] MORGAN S P, KORPOSH S, LIU L, *et al.* Optical fiber sensors for monitoring in critical care [C]. *Proceedings of 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Berlin*, 2019: 1139-1143.
- [111] PODUVAL R K, COOTE J M, MOSSE C A, *et al.* Precision-microfabricated fiber-optic probe for intravascular pressure and temperature sensing [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2021, 27(4): 7100412.
- [112] DJINOVIC Z, TOMIC M, PLANK N. A fiber-optic sensing technique for sub-micrometer distance measurement between the surgical tools and retina [C]. *Proceedings of 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, Opatija*, 2021: 1787-1792.



赵鑫(1998-),男,吉林延边人,硕士研究生,2021年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事半导体激光器的研究。

E-mail: patrickzhao.university@gmail.com



魏志鹏(1978-),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子材料与器件的研究。

E-mail: zpweicust@126.com



栗博(1994-),女,吉林通化人,博士,助理研究员,硕士生导师,2022年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体光电器件物理及应用研究。

E-mail: libo@cust.edu.cn