

文章编号: 1000-7032(2024)04-0644-07

1.5 μm 高功率超辐射发光二极管的制备和性能

薛正群^{1*}, 王凌华², 陈玉萍³

(1. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362251; 2. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350116;

3. 厦门市芯诺通讯科技有限公司, 福建 厦门 361011)

摘要: 超辐射发光二极管作为光纤陀螺的核心元件,其性能直接影响光纤陀螺的精度;其中超辐射发光二极管出光功率越高,光纤陀螺接收信号信噪比越好。InP/AlGaInAs 增益材料具有电子限制效率高的优点,然而由于Al元素容易氧化,面临一定的应用可靠性问题。本文采用InP/InGaAsP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。试验结果表明,激光芯片最大出光功率从69 mW提升至92 mW。在此基础上,通过优化材料沉积速率改善增益区和应变电子阻挡层材料质量。结果显示,激光芯片可靠性得到较为明显改善,经过1 000 h寿命老化,样品阈值和功率变化率在合格范围之内。最后,进行超辐射发光二极管芯片制备。测试表明,电子阻挡层使得室温下SLD芯片饱和出光功率从19 mW提高至24 mW,饱和工作电流也有所提高,光谱宽度达到80 nm,光谱中心波长在1 500 nm附近;芯片1 000 h寿命老化阈值和光功率变化稳定,未出现性能退化样品。

关键词: 超辐射发光二极管; InP/InGaAsP; 电子阻挡结构; 材料生长速率

中图分类号: TN312.8; O472 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230321

Preparation and Performance of 1.5 μm High-power Superluminescent Diodes

XUE Zhengqun^{1*}, WANG Linghua², CHEN Yuping³

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China;

2. School of Physical and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

3. Xiamen Xinnuo Communication Technology CO., Ltd., Xiamen 361011, China)

* Corresponding Author, E-mail: zqxue@fzu.edu.cn

Abstract: As the core component of fiber optic gyroscopes (FOG), the performance of the superluminescent diodes directly affects the accuracy of the FOG. The higher the output power of the superluminescent diodes, the better the signal-to-noise ratio received by the gyroscope. InP/AlGaInAs have the advantage of high electron confinement efficiency. However, due to the problem of Al oxidation, they pose certain risks in terms of application reliability. In this paper, the InP/InGaAsP are used as gain materials, and the electron confinement efficiency of the quantum wells is improved by adopting the broad bandgap InGaAsP electron blocking layer in the epi-structure. Experimental results show that the electron blocking layer increases the maximum output power of the laser diode from 69 mW to 92 mW. Furthermore, by optimizing the material growth rate to improve the quality of both the active region and the strained electron blocking layer, it is observed that the reliability of the laser diode is significantly improved after aging for 1 000 h, with threshold and power variation falling within acceptable ranges. Finally, superluminescent diode (SLD) chips were fabricated, and the tested results showed that the electron blocking layer increased the saturated output power of SLD chips from 19 mW to 24 mW at room temperature. The saturated operating current of SLD also increased, with a spectral width of 80 nm and a center wavelength of 1 500 nm. Furthermore, after aging for 1 000 h, the threshold and power of SLD remained stable without performance degradation.

收稿日期: 2023-12-16; 修订日期: 2024-01-11

基金项目: 福建省科技计划(2021H4016); 泉州市科技计划(2021G13); 福建省雏鹰计划青年拔尖人才项目(2022173)

Supported by Science and Technology Plan Project of Fujian Province (2021H4016); Science and Technology Plan Project of Quanzhou City (2021G13); Chuying Young Talents Program Project of Fujian Province (2022173)

Key words: superluminescent diodes; InP/InGaAsP; electron blocking layer; growth rate of InP materials

1 引言

惯性导航技术具有高隐蔽性、强抗干扰性和信息连续性等优点,从而使装备惯导系统的飞机或武器既能保证自身生存,又具有参与攻击的能力;惯性导航系统作为战略装备发展不可或缺的部分,对于光纤陀螺(Fiber optic gyroscopes, FOG)的需求越来越高^[1-3]。光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应用于测量空间惯性转动率的新型传感器,光源是 FOG 中重要的光学器件。超辐射发光二极管(Superluminescent diode, SLD)具有输出功率高、光谱宽度宽、短时间相干性和长空间相干性等特点,是光纤陀螺的理想光源,光纤陀螺的精度受 SLD 光源性能影响很大。其中,SLD 输出功率的大小影响着 FOG 中光探测器的输出信噪比。目前,FOG 中使用的光电探测器主要是光电二极管(P-Intrinsic-N, PIN)或是 PIN 光电二极管和场效应晶体管(Field effect transistor, FET)前置放大器集成在一起的 PINFET 模块。对于 FOG 而言,系统的理论灵敏度受到散粒噪声的限制。如果只考虑散粒噪声,忽略其他噪声,则探测器的输出信噪比为 $\frac{S}{N} = \frac{P_{in}\eta}{2h\nu\Delta f}$, 其中 S/N 为输出信噪比, P_{in} 为入射到探测器上的光功率, η 为探测器的量子效率, Δf 为噪声带宽, h 为普朗克常数, ν 为入射光子频率。由此可知,越高的光源输出光功率越有利于提高

FOG 的信噪比。

1.5 μm 波长光纤陀螺具有零偏稳定性高和标度因数高的优点^[4-5],这使得 1.5 μm SLD 成为高精度陀螺仪的理想光源。目前,国内相关的研究报告主要集中在 1.3 μm 波段^[6-11], 1.5 μm 波段 SLD 整体系统性的研究和报道较少;与 1.3 μm 相比, 1.5 μm 由于光子能量更低、俄歇等非辐射复合更加明显,使得提高 1.5 μm 波段的出光功率变得困难。孙春明等采用 InP/AlGaInAs 增益材料体系实现了 1 550 nm SLD 最大出光功率超过了 30 mW^[12]。Sabitov 等实现了 AlGaInAs 应变补偿量子阱 SLD, 出光功率 5 mW, 谱宽 60 nm, 出光波长在 1.5~1.6 μm^[13]。Zang 等报道了采用 InGaAsP 作为增益量子阱,通过结合带增益区的多模干涉(Multimode interferometer, MMI)波导,实现了出光功率 115 mW、谱宽 50 nm 的 1.5 μm SLD^[14]。Song 等报道了采用 InGaAsP 制备的 SLD,在 13 °C 热沉控制下,出光功率达到 20 mW,谱宽 130 nm^[15]。

图 1 所示为两种材料的量子阱导带能带结构对比图。InP/AlGaInAs 作为增益材料具有更高的量子阱导带差,使得其具有更高的电子限制效率。然而,在应用中仍然存在如下问题:(1)采用脊型波导结构由于在横向上无载流子限制,在大电流下横向载流子扩散严重,出光模场不对称,发散角大;(2)采用掩埋异质结结构由于工艺过程增益区暴露于空气中,使得器件存在极大的可靠性问题。

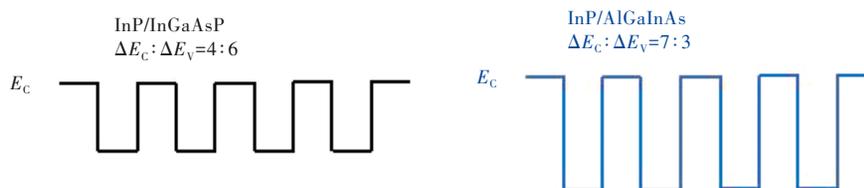


图1 InGaAsP 和 AlGaInAs 导带量子阱能带结构对比

Fig.1 E_c energy band of InGaAsP and AlGaInAs quantum wells

以 InP/InGaAsP 作为增益材料,由于量子阱导带能带差偏低,使得量子阱电子限制效率低。然而,InGaAsP 材料体系具有成熟稳定、不容易氧化、高可靠性等优点。尤其是采用掩埋异质结结构能在横向上进行光子和载流子的限制,从而提高载流子的横向限制效率,降低芯片发散角,具备芯片制备工艺和性能可灵活调控的优点。目前,国外已商业化应用的 SLD 大部分

采用 InGaAsP 材料的掩埋异质结结构或脊型波导结构。

本文采用 InP/InGaAsP 材料制备 SLD,实现了一种可靠性高、低成本的 SLD 制作方法。通过宽带隙电子阻挡层来提高量子阱的电子限制效率,从而提高芯片的出光功率;进一步通过优化增益区和波导结构的材料沉积速率,提高材料生长质量;最后制备了超辐射发光二极管芯片,并对其进

行性能测试和表征。研究结果对后续通过能带调控实现宽温度高功率 SLD 具有一定研究指导意义。

2 实 验

2.1 样品制备

本实验中用到的样品通过如下工艺过程制备得到。

(1) 材料外延生长:通过金属有机化学气相沉积 (Metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 在 N-InP 衬底上依次生长 N-InP 缓冲层、InGaAsP 下波导层、InGaAsP 应变补偿多量子阱 (光致发光波长在 1 550 nm 附近)、InGaAsP 上波导层、P-InP 间隔层、P-InGaAsP 腐蚀阻止层、P-InP 空间层、P-InGaAsP 过渡层、P-InGaAs 重掺杂欧姆接触层、P-InP 盖层,完成外延材料生长。

(2) 芯片制备:通过化学腐蚀去除外延片表面

P-InP 盖层,接着进行激光器脊型波导结构制备,芯片脊波导电接触开孔,P面金属沉积,N型衬底物理减薄,N面金属沉积,合金,解离成 bar 条,bar 条腔面镀膜,完成芯片的制备。试验中,为了进行对比测试、分析和优化样品性能,分别制备了 LD-A、LD-B 和 LD-C 三种激光器样品。其中,LD-A 采用上述外延结构;LD-B 在上述外延结构 InGaAsP 上波导层增加 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 宽带隙电子阻挡层 (Electrons blocking layer, EBL);进一步通过优化增益区和应变电子阻挡层的材料生长速率,提高生长材料质量,制备了 LD-C 样品。其中,LD-B 和 LD-C 材料外延结构一致,差异在于沉积速率有所差别,其芯片结构图和导带能带图如图 2 所示,其中 EBL 的主要作用是阻挡电子从增益区向 P 型区域的逃逸。最后,将试验优化的外延材料进行超辐射发光二极管芯片制备,并进行测试分析和表征。

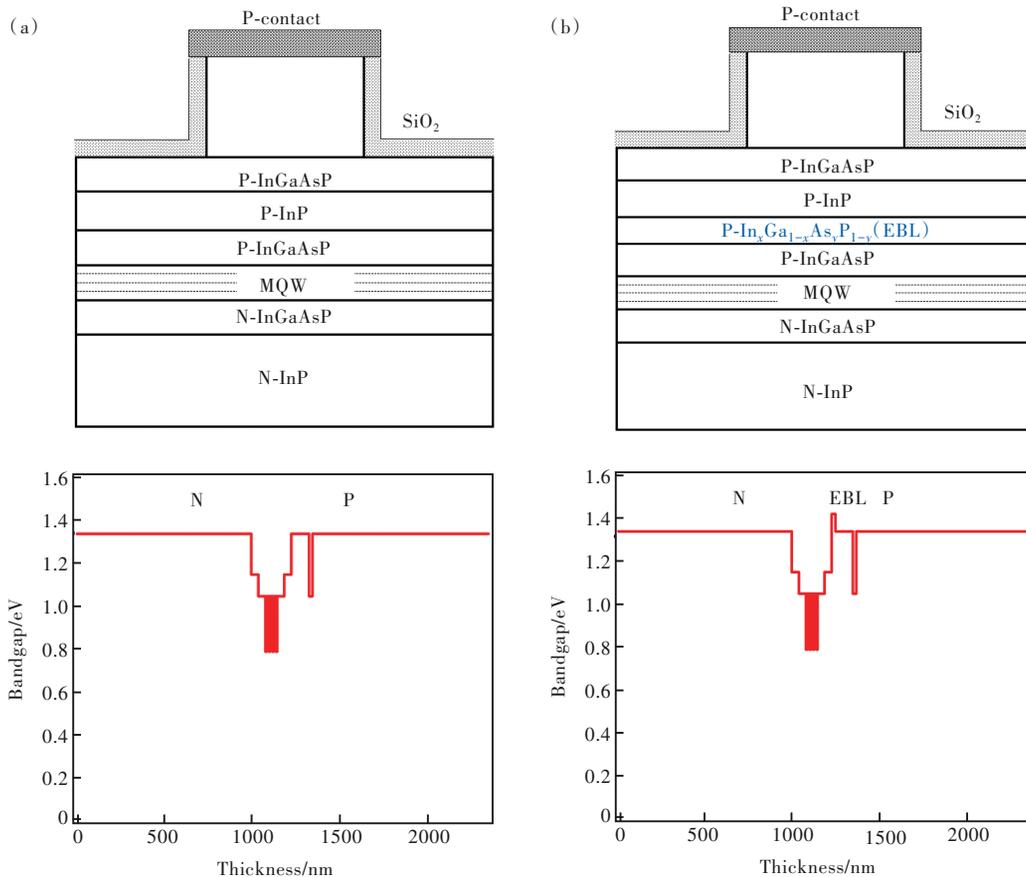


图 2 LD-A(a)、LD-B 及 LD-C(b) 芯片结构和导带能带图

Fig. 2 Schematic and E_c energy band of LD-A (a), LD-B and LD-C (b)

2.2 样品表征

将上述制备的试验样品共晶至图形化 AlN 热沉上,并打线,引出芯片正负极通电引线,形成

COC (Chip on carrier) 样品。试验过程中 COC 样品控温在室温下,并采用探针进行正负极通电和测试。

3 结果与讨论

LD-A、LD-B和LD-C激光器样品含有直脊型波导,沿腔长方向长度为2 000 μm 。图3为激光器芯片端面扫描电子显微镜(Scanning electron microscope,SEM)图及室温下COC样品的测试结果。结果显示,与LD-A相比,LD-B芯片800 mA电流下出光功率从69 mW提升至92 mW,说明能带上的电

子阻挡层提高了量子阱的电子限制效率从而有效提高了芯片出光功率。由于电子具有较小的有效质量,因此电子从量子阱的逃逸成为了激光器大电流或高温下性能降低的主要原因。如何提高电子的限制效率也一直是研究的重点^[16-18]。

此外,LD芯片阈值从54 mA增加至77 mA,可能与电子阻挡层对空穴进入量子阱的阻挡作用相关。

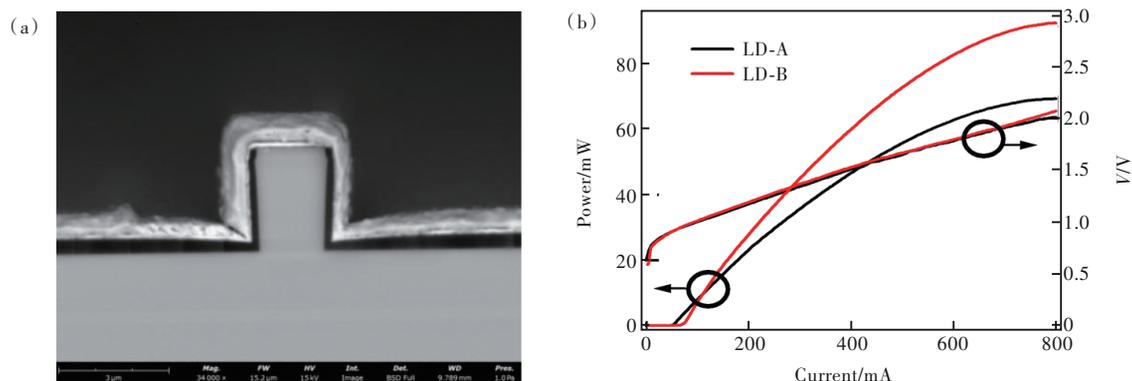


图3 (a)芯片端面波导结构SEM图;(b)LD-A和LD-B室温下的LIV(Power-current-voltage)测试结果
Fig. 3 (a)SEM diagram of laser ridge waveguide. (b)LIV results of LD-A and LD-B at room temperature

对LD-B样品进行寿命测试,以验证其长期可靠性。首先对LD-B进行COC样品封装;接着样品在100 $^{\circ}\text{C}$ /500 mA下进行快速老化,剔除早期失效样品;最后,合格COC样品在75 $^{\circ}\text{C}$ /350 mA下进行寿命老化试验。图4(a)所示为随机抽取15颗LD-B合格样品的1 000 h寿命老化结果,老化过程中在168,500,1 000 h时间点对COC样品进行光电参数测试, P_t 代表SLD出光功率。从图中可以看出,有一定比例的样品在老化过程中功率出现衰退趋势,老化至1 000 h时,出光功率衰

退比例超过10%;另外,在老化前期样品整体出光功率出现升高的趋势,主要是由于芯片尺寸大且存在一定的不平整度,在背面共晶过程中,较难做到背面完整地焊锡融合,而老化过程属于高温过程,高温老化过程对于改善芯片背面共晶融合、提高芯片散热能力与芯片出光功率具有一定的帮助作用。与InP/AlGaInAs激光器失效时大部分呈现出光功率快速降低的情况相比,实验中InP/InGaAsP激光器失效过程中出光功率呈现逐步退化。

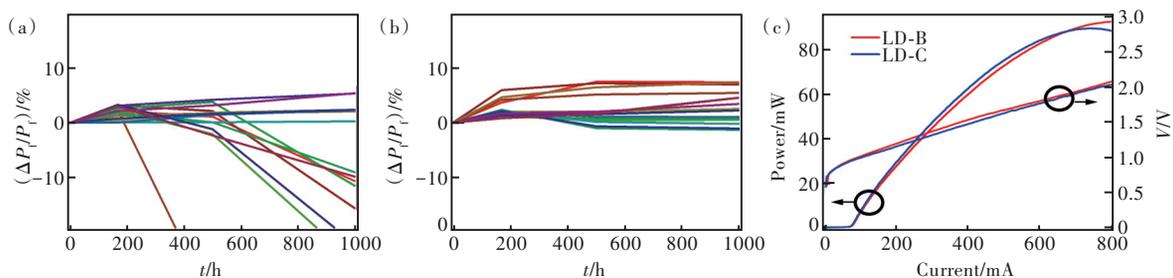


图4 LD-B(a)和LD-C(b)1 000 h老化出光功率变化结果;(c)LD-B和LD-C LIV测试结果

Fig. 4 Variation of output power of LD-B(a) and LD-C(b) during 1 000 h lifetest. (c)LIV results of LD-B and LD-C

激光器的老化过程中出光功率衰退主要来自于增益区退化、非辐射复合增加、内量子效率降低^[19-22];此外,在LD-B样品中宽带隙电子阻挡层也具有一定的应变和晶格失配。为了进一步改善增益区和应变电子阻挡层材料质量,我们采用优化

的生长速率进行芯片增益区、电子阻挡层材料生长;并制备相同外观尺寸的激光器样品LD-C,通过测试对比其性能变化差异。

图4(b)为制备的LD-C COC样品经过1 000 h寿命老化过程出光功率的变化,结果显示,与LD-B

相比,LD-C样品可靠性得到了明显改善,样品1 000 h寿命老化出光功率保持稳定,变化率在10%以内。对于发生缓慢退化的激光芯片,难以通过透射电镜(TEM)、SEM等手段进行退化原因分析。试验中对SLD可靠性的改善基于材料角度出发,在InP材料外延过程中材料质量可以通过光致发光来进行表征,材料质量越好光致发光越强。实验中对于材料质量通过调整材料生长速率关键参数进行调整,并通过材料的光致发光谱进行表征,从而达到优化材料质量的目的。材料质量的提高进一步降低了材料内部的应力和位错,从而提高了SLD长期工作的稳定性。

图4(c)为LD-B和LD-C样品LIV测试结果,可以看出这两种样品出光功率相近,加上不同工艺批次间引起的轻微差异,总体来看其出光功率之间无明显差别。

最后,我们对外延材料进行超辐射发光二极管的制备。制备工艺过程主要包括脊型波导腐蚀、钝化层生长、脊型波导顶部开孔、P型金属电极制备、N面物理减薄、N型金属电极制备、合金

形成欧姆接触;接着进行bar条解离,对SLD芯片出光端面采用多对的 Ta_2O_5 和 SiO_2 光学膜制备宽光谱的高透射膜,降低出光端面反射而产生的光谱波纹;对激光器背光端面采用 Al_2O_3/Si 膜层进行高反膜蒸镀,完成SLD芯片制备。SLD芯片沿腔长方向长度为2 000 μm ,直波导区域长度约占比一半,弯曲弧形波导出光端面的波导角度在 $5^\circ \sim 7^\circ$,并对芯片进行测试表征及寿命老化。

图5(a)、(b)分别为超辐射发光二极管芯片室温下的LIV和400 mA电流下的光谱测试结果。图中SLD-A和SLD-C外延结构分别与LD-A和LD-C相同,从测试结果可知,EBL使得室温下SLD芯片饱和出光功率从19 mW提升至24 mW,饱和工作电流也有所提升,芯片3 dB谱宽达到80 nm。图5(c)、(d)为SLD芯片COC样品经过1 000 h寿命老化后的阈值(I_{th})和出光功率(P_l)变化率结果,试验中在500 h和1 000 h时间点对样品进行光电参数测试。根据试验测试结果可知,经过1 000 h寿命老化后,超辐射发光二极管阈值变化率在5%以内,同时其出光功率变化率整体保持

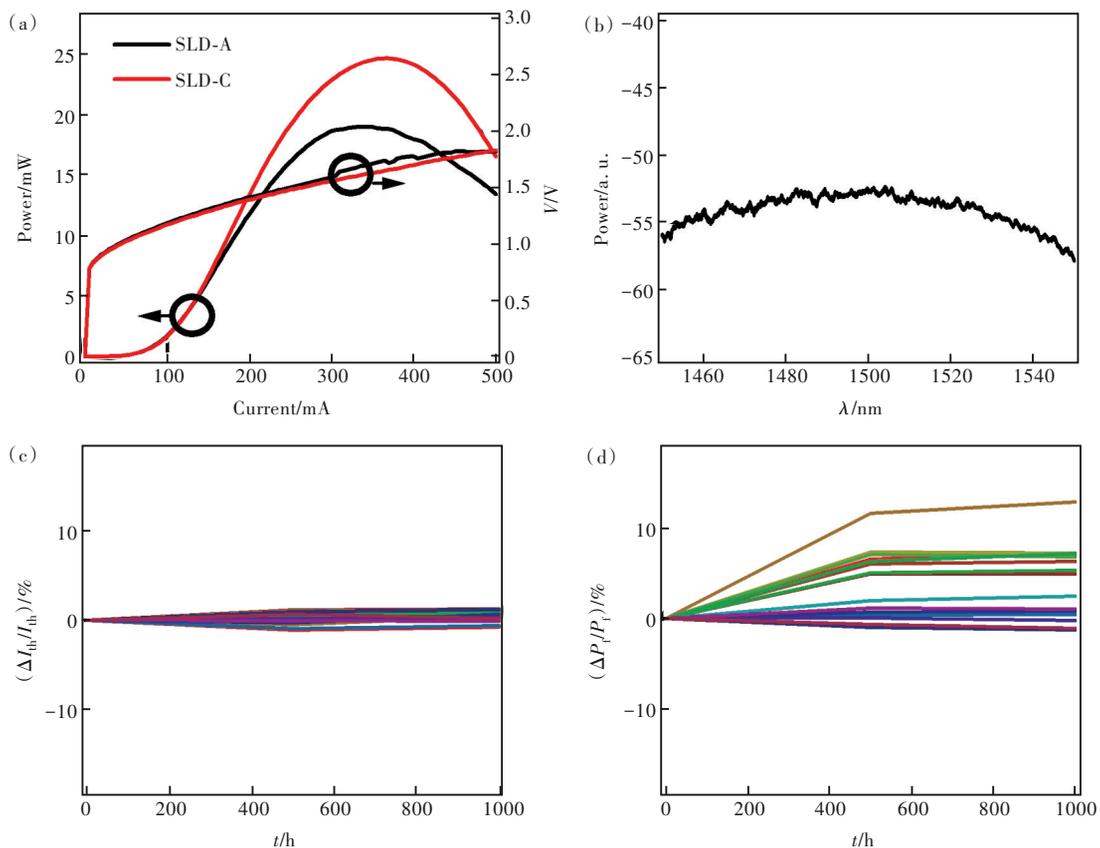


图5 室温下SLD芯片LIV(a)和光谱(b);1 000 h寿命老化样品阈值(c)和光功率变化(d)

Fig. 5 LIV (a) and spectrum (b) results of SLD at room temperature. The variation of threshold (c) and output power (d) of SLD during 1 000 h lifetest

稳定,整个老化过程中未出现性能衰退的样品。

4 结 论

本文实现了高功率 1.5 μm InP/InGaAsP 超辐射发光二极管的制备。首先,通过采用宽带隙 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 电子阻挡层,有效提高了量子阱的电子限制效率,使得制备的激光芯片室温下最大出光功率从 69 mW 提升至 92 mW,提升约 33%。接着,通过优化材料的生长速率进行外延结构增益区及电子阻挡层的生长,以提高相应结构材料的生长质量。测试结果表明,样品经过 1 000 h 寿命老化后,其出光功率保持稳定,变化率在 10%

合格范围内。最后,进行超辐射发光二极管制备,并进行测试表征。结果表明,EBL 使得室温下 SLD 芯片饱和出光功率从 19 mW 提升至 24 mW,饱和工作电流也有所提升,400 mA 电流下谱宽达到 80 nm,芯片出光中心波长在 1 500 nm 附近;COC 样品经过 1 000 h 寿命老化后,其阈值和光功率保持稳定,整个老化过程未出现性能退化的样品。

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.20230321>.

参 考 文 献:

- [1] 杨光. 超辐射发光二极管的偏振特性研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
YANG G. *Research on Polarization Characteristics of Superluminescent Diodes* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020. (in Chinese)
- [2] 王拓. 基于量子阱的超辐射发光管的研制及输出性能研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
WANG T. *Development and Characteristics of Superluminescent Diode Based on Quantum Well* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [3] 周帅, 许璠, 田坤, 等. 1 310 nm 大功率高偏振度量子阱超辐射发光二极管 [J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 483-487.
ZHOU S, XU J, TIAN K, *et al.* 1 310 nm quantum-well superluminescent diode with high power and high degree of polarization [J]. *Semicond. Optoelectron*, 2021, 42(4): 483-487. (in Chinese)
- [4] OZAKI N, CHILDS D T D, SARMA J, *et al.* Superluminescent diode with a broadband gain based on self-assembled InAs quantum dots and segmented contacts for an optical coherence tomography light source [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 119(8): 083107.
- [5] 孙春明. 1 550 nm 超辐射发光管结构设计及制作 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
SUN C M. *Structure Design and Fabrication of the 1 550 nm Superluminescent Diode* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] 陈丽芬. 1.3 μm 超辐射发光二极管的工艺、性能测试与光学膜的优化设计 [D]. 北京: 中国科学院, 2008.
CHEN L F. *Processing, Characteristic Testing and the Optimization Design of Optical Coatings for 1.3 μm Superluminescent Diode* [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 李吴皓, 王定理, 李中坤, 等. 大功率低偏振度超辐射发光二极管的研制 [J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 217-222.
LI W H, WANG D L, LI Z K, *et al.* Study of high power low polarization superluminescent diodes [J]. *Laser Infrared*, 2022, 52(2): 217-222. (in Chinese)
- [9] 游道明, 谭满清, 郭小峰, 等. 低纹波超辐射发光二极管的增透膜研制 [J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1303101.
YOU D M, TAN M Q, GUO X F, *et al.* Design and fabrication of antireflective film for weak ripple superluminescent diode [J]. *Chin. J. Lasers*, 2023, 50(13): 1303101. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] SABITOV D R, SVETOGOROV V N, RYABOSHTAN Y L, *et al.* Compact superluminescent AlGaInAs/InP strain-compensated quantum-well diodes for fibre-optic gyroscopes [J]. *Quantum Electron*, 2022, 52(6): 577-579.
- [14] ZANG Z G, MINATO T, NAVARETTI P, *et al.* High-power (>110 mW) superluminescent diodes by using active multi-mode interferometer [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, 22(10): 721-723.
- [15] SONG J H, CHO S H, HAN I K, *et al.* High-power broad-band superluminescent diode with low spectral modulation at 1.5 μm wavelength [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2000, 12(7): 783-785.
- [16] NING Z A, DONG H L, JIA Z G, *et al.* InP/InGaAs/AlGaAs quantum-well semiconductor laser with an InP based 1 550 nm n-GaAsSb single waveguide structure [J]. *AIP Adv.*, 2023, 13(7): 075109.
- [17] KE C, LI X, XI Y P, *et al.* Design optimization for 25 Gbit/s DML InGaAlAs/InGaAsP/InP SL-MQW laser diode incorporating temperature effect [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 403: 34-40.
- [18] ZHANG X L, DONG H L, ZHANG X, *et al.* Reduction of nonradiative recombination for high-power 808 nm laser diode adopting InGaAsP/InGaAsP/GaAsP active region [J]. *Opt. Commun.*, 2023, 537: 129461.
- [19] LIU W C, WANG H Z, WANG J B, *et al.* The improvement properties of InGaAs/InGaAsP multiple quantum wells using the GaAs insertion layer [J]. *Thin Solid Films*, 2022, 756: 139363.
- [20] HUANG J J S, JAN Y H, REN D W, *et al.* Defect diffusion model of InGaAs/InP semiconductor laser degradation [J]. *Appl. Phys. Res.*, 2016, 8(1): 149-157.
- [21] MARKO I P, SWEENEY S J. The influence of inhomogeneities and defects on novel quantum well and quantum dot based infrared-emitting semiconductor lasers [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2018, 33(11): 113002.
- [22] SALMAN E M T, JOBAYR M R, HASSUN H K. Confinement factor and carrier recombination of InGaAsP/InP quantum well lasers [J]. *J. Ovonic Res.*, 2022, 18(4): 617-625.



薛正群(1984-),男,福建莆田人,博士,助理研究员,2017年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事InP半导体激光器的设计开发和可靠性研究。

E-mail: xzhengq77@163.com