

基于NRZ调制的40 Gbit/s 无误码高速850 nm VCSEL设计与制备

佟海霞^{1,2}, 王延靖², 蒋宁³, 田思聪², 佟存柱^{2,3*}, 魏志鹏^{1*}, 王立军²

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 850 nm 的垂直腔面发射激光器(VCSEL)是短距离光互连的核心光源。随着对数据中心流量的需求增加, 实现不归零(NRZ)调制高速无误码传输是目前的研究热点。本文设计制备了基于 $\lambda/2$ 短腔和六层氧化限制层的高速850 nm VCSEL, 室温下最高-3 dB带宽达到23.8 GHz。NRZ调制50 Gbit/s(1 m)和40 Gbit/s(100 m)速率下获得清晰的眼图。在未使用预加重、均衡和前向纠错的条件下, 通过NRZ调制在1 m和100 m下无误码传输速率分别为40 Gbit/s和30 Gbit/s。

关键词: 850 nm VCSEL; NRZ调制; 高速; 器件制备

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Design and fabrication of 40 Gbit/s error-free high-speed 850 nm VCSEL using NRZ modulation

TONG Hai-Xia^{1,2}, WANG Yan-Jing², JIANG Ning³, TIAN Si-Cong², TONG Cun-Zhu^{2,3*},
WEI Zhi-Peng^{1*}, WANG Li-Jun²

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Jlight Semiconductor Technology Co., Ltd, Changchun 130033, China)

Abstract: 850 nm vertical cavity surface-emitting lasers are the core light source of the short-range optical interconnect. With the increasing demands for data center traffic, achieving NRZ modulated high speed error-free transmission is a hot current research topic. This paper designed and fabricated a high-speed 850 nm vertical cavity surface-emitting laser with six oxide limiting layers in a $\lambda/2$ short cavity. At the room temperature, the -3 dB bandwidth was up to 23.8 GHz. Clear eye diagrams were obtained under the test conditions of 50 Gbit/s (1 m) and 40 Gbit/s (100 m). Transmission tests showed that error-free transmission was achieved at transmission distances of 1 m and 100 m and transmission rates of 40 Gbit/s and 30 Gbit/s, respectively, by NRZ modulation without the use of pre-emphasis, equalization, and forward error correction.

Key words: 850 nm VCSEL, NRZ modulation, high speed, device fabrication

收稿日期: 2022-09-29, 修回日期: 2022-12-23

Received date: 2022-09-29, revised date: 2022-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB2201000); 王宽诚教育基金会(GJTD-2020-10)

Foundation items: National key research and development program of China (2018YFB2201000); K. C. Wong Education Foundation (GJTD-2020-10)

作者简介(Biography): 佟海霞(1995—), 女, 吉林省四平市人, 博士研究生, 主要研究领域为高速面发射激光器, E-mail: tonghaixia18@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn, weizp@cust.edu.cn

引言

随着云计算、5G通信及物联网的不断普及与应用,人们对数据中心流量的需求急剧增加,目前解决这个问题方法之一是寻求支持更大容量的短距离光互连技术^[1]。采用850 nm的垂直腔面发射激光器(VCSEL)作为光源,结合多模光纤传输与不归零(NRZ)调制是100 m级别的短距离光互连技术中的主要方案^[2-3]。在国际上,瑞典查尔姆斯理工大学团队于2014年报道了基于850 nm VCSEL经107 m光纤实现60 Gbit/s无误码传输^[4]。美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校团队在2016年制备了多层氧化层结构的高速850 nm VCSEL器件,实现了50 Gbit/s无误码传输^[5],并在2018年通过采用 $\lambda/2$ 短腔等设计,实现室温下25 GHz的高带宽850 nm VCSEL,在100 m光纤传输距离实现46 Gbit/s无误码传输^[6]。在国内,台湾国立大学2018年实现带宽为25 GHz的高速850 nm VCSEL,在NRZ调制下背靠背(BTB)无误码数据传输速率达到50 Gbit/s^[7]。北京工业大学2019年报道了850 nm VCSEL, NRZ调制在25 Gbit/s获得了清晰眼图^[8]。2021年,台湾大学实现带宽高达32.4 GHz^[9]的850 nm VCSEL,这也是目前基于电子-光子谐振下850 nm VCSEL直接调制的最高带宽纪录。目前国内企业已经量产NRZ调制25 Gbit/s VCSEL。综上,国内除台湾省外,高速850 nm VCSEL NRZ调制速率总体处于25 Gbit/s水平,如何实现国产化NRZ调制高速率传输的850 nm VCSEL芯片,还有很多努力需要做。

本文旨在研究高速VCSEL芯片速率提升方法,实现NRZ调制40 Gbit/s无误码的传输。本文研制了一种 $\lambda/2$ 短腔的六层氧化限制层结构的高速850 nm VCSEL芯片,介绍了无误码40 Gbit/s VCSEL的设计方案与制备流程,并对其静态输出特性与在NRZ调制下的动态传输特性进行了研究和分析,最后对本文的工作进行了总结。

1 850 nm VCSEL的设计与制备

本文设计的850 nm VCSEL的外延结构从上到下依次为P型接触层、P型布拉格反射镜(DBR)、有源区、N型DBR以及N型接触层。P型DBR中包含了14对 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 层和6层氧化层,氧化层包括2层 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 一级氧化层与4层 $\text{Al}_{0.96}\text{Ga}_{0.04}\text{As}$ 二级氧化层,4层二级氧化层主要用于降低寄生电容。腔长的光学厚度为 $\lambda/2$,有源区为5

个 $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ 量子阱。N型DBR包括25对 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 层和8对 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 层,其中AlAs层用来提高散热。在器件外延的整体设计中,我们优化了DBR的掺杂,降低了器件的DBR电阻。通过软件FDTD进行折射率与光场分布模拟,模拟结果如图1所示,模拟结果显示,在有源区光强最强,在DBR中迅速衰减。模拟结果与外延结构设计一致,验证了所设计外延结构的正确性。

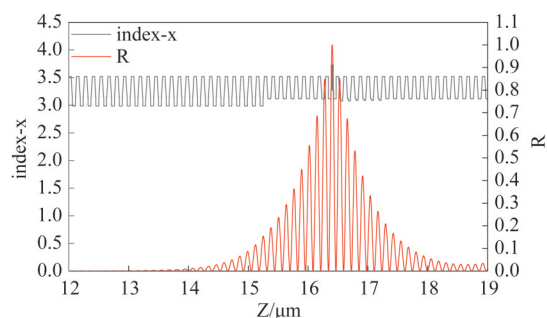


图1 设计的850 nm VCSEL腔内的折射率分布与光场强度
Fig. 1 Refractive index profile and simulated optical field intensity inside the designed 850 nm VCSEL cavity

本文采用典型VCSEL芯片制备工艺流程,首先通过金属有机化学气相沉积设备进行VCSEL外延生长,然后使用光刻胶将光学掩模版上的图案转移到生长好的外延片上,利用干法刻蚀工艺制备器件的上台面和下台面,制备的VCSEL的上台面直径为20 μm ,下台面直径为35 μm 。通过湿法氧化工艺形成直径为5 μm 的氧化孔,进行电场与光场的限制。图2(a)为所设计器件湿法氧化后的SEM图,其中暗线为氧化后形成的高铝掺杂层。然后分别在P型接触层与N型接触层上沉积Ti/Pt/Au和Au/Ge/Ni/Au,作为P型电极与N型电极,之后使用苯并环丁烯进行填平,最终通过金属剥离工艺形成共面电极,制备后的VCSEL顶视图如图2(b)所示。

2 结果和讨论

2.1 静态性能

本文首先测试了直径为5 μm 氧化孔的VCSEL器件,将VCSEL出射的光耦合进功率计探头进行 $L-I-V$ 测试,测试曲线图如图3(a)所示;同时通过光纤将激光导入光谱仪,测得不同电流下的光谱如图3(b)所示。由图3(a)可知5 μm 氧化孔径下器件的最大功率为6.05 mW,斜率效率约为0.36 W/A,微分电阻仅为61 Ω ,阈值电流为0.8 mA,其中小的微分电阻表明了本文器件的DBR掺杂及缓冲层设计的有

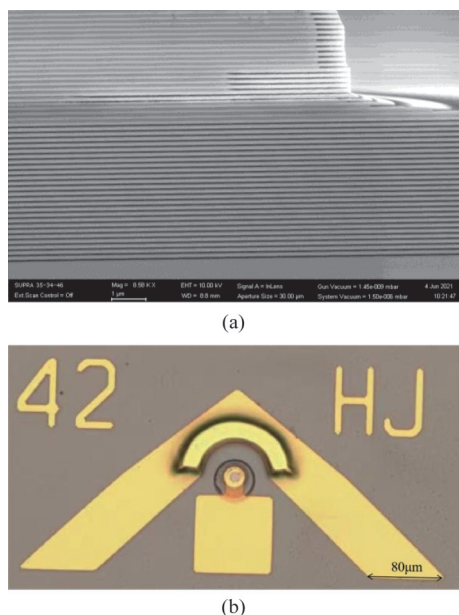


图2 (a) 湿法氧化后器件截面的SEM图像,暗线是氧化后的高铝层,(b) 制备的具有GSG探测电极的VCSEL顶视图
Fig. 2 (a) SEM image of the cross section of the device after wet oxidation, the dark lines are the oxidized high-Al-composition layers, (b) top-view of fabricated VCSEL with ground-signal-ground (GSG) probe pads

效性。由图3(b)可知在5 mA、10 mA与15 mA的电流下,器件均为多模。在5 mA电流下,输出波长为854 nm,且随着电流增大,器件的波长漂移系数为0.25 nm/mA。图3(b)也表明器件具有较多模式,总的谱宽达到约6 nm,这本质上不利于远距离传输。

2.2 动态性能

将VCSEL发射的激光通过光纤耦合导入到矢量网络分析仪进行小信号数据测试。室温下本文制备的850 nm VCSEL在不同电流下的小信号调制响应 S_{21} 曲线如图4(a)所示,可知器件在18 mA电流时实现了高达23.8 GHz的带宽。VCSEL弛豫振荡频率和-3 dB调制带宽与阈值以上电流的平方关系如图4(b)所示,图中虚线分别表示调制电流斜率因子(MCEF)和D因子^[10]。通过计算可知,MCEF=6.825 GHz/mA^{1/2},D=4.99 GHz/mA^{1/2},其中MCEF表征了VCSEL调制响应带宽随电流变化快慢的程度,D因子表征弛豫振荡频率随电流变化的快慢程度^[10],其关系可用下式表示:

$$D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma v_g}{qV} \times \frac{\partial g/\partial n}{\chi}}, \quad (1)$$

其中, Γ 是光限制因子, η_i 是注入效率, v_g 是光子群速度, V 为有源区体积。 $\partial g/\partial n$ 是微分增益, χ 为输运因

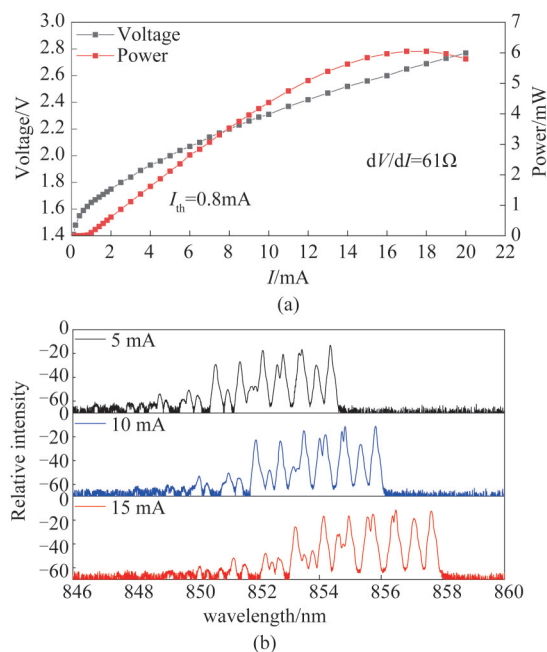


图3 (a) 5 μm氧化孔径VCSEL室温下L-I-V特性曲线,(b) 不同注入电流下VCSEL的光谱图

Fig. 3 (a) L-I-V curves of VCSEL with 5 μm oxide aperture at room temperature, (b) lasing spectra at different bias currents

子。由公式可知,D因子与光限制因子、有源区体积、注入效率有关。由公式(1)可知,进一步提高带宽可通过减小出光孔尺寸,即提高光限制因子以及提高注入效率的方式来实现。

2.3 40 Gbit/s NRZ 无误码传输

本文数据传输测试的方法为将偏置信号和调制信号通过高频探针加到VCSEL上,经多模光纤将VCSEL的光信号耦合到示波器得到眼图,眼图能够反映链路上传输的所有数字信号的整体特征。再将光信号与光纤连接,经光电探测器转换为电信号后由放大器放大,输入到误码仪中测量器件的误码率(BER),误码率指错误接收码元数目在传输码元总数中所占的比例^[11]。在GHz比特率的通信电路系统中,BER小于10⁻¹²为无误码。由于偏置电流远高于阈值,因此在给定电流下,不同阈值电流对眼睛的影响很小。我们在10 mA电流下,测试了长度为1 m和100 m的光纤处器件在不同传输速率和7阶、31阶伪随机二进制序列(PRBS)下的眼图和误码率。

采用PRBS7码和PRBS31码,经过1 m光纤传输后,器件在不同传输速率下的误码率如图5(a)左侧所示,在传输速率为50 Gbit/s下的眼图如图5(a)右侧所示,可知器件在40 Gbit/s的传输速率下

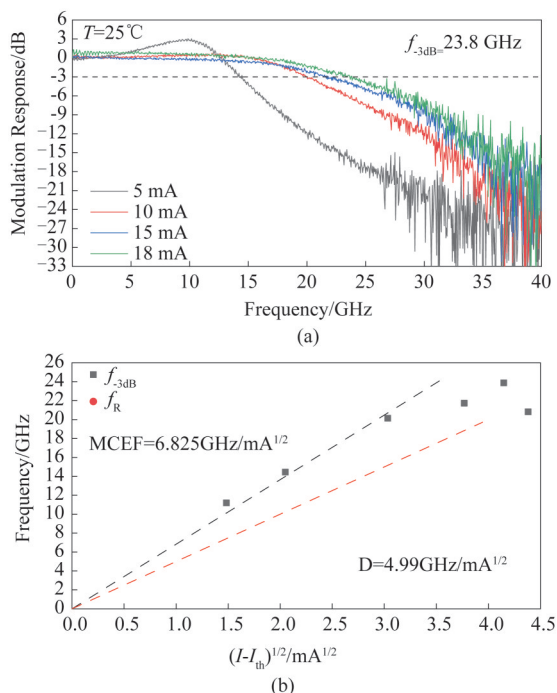


图4 (a) 室温下 850 nm VCSEL 在不同电流下的小信号调制响应 S_{21} 曲线, (b) VCSEL 弛豫振荡频率和 -3 dB 调制带宽与阈值以上电流的平方关系

Fig. 4 (a) Small signal modulation response S_{21} curve of 850 nm VCSEL at different current values at room temperature, (b) square relation of VCSEL relation oscillation frequency and -3 dB modulation bandwidth to current above threshold

均实现了无误码传输, 在 50 Gbit/s 的传输速率下器件的 BER 分别为 5.68×10^{-6} 和 1.22×10^{-4} 。经过 100 m 光纤传输后, 器件在不同传输速率下的误码率如图 5(b) 左侧所示, 在传输速率为 40 Gbit/s 下的眼图如图 5(b) 右侧所示, 可知器件在 30 Gbit/s 的传输速率下均实现了无误码传输, 在 40 Gbit/s 的传输速率下器件的 BER 分别为 1.04×10^{-2} 和 1.99×10^{-2} 。

在没有抖动的情况下, 浴盆曲线在 $BER=1 \times 10^{-12}$ 处表示眼睛张开的幅度大小。器件通过 NRZ 调制, 采用 PRBS7 码的浴盆曲线图进行测试。图 6(a) 为在 10 mA 电流下, 器件经 1 m 光纤传输, 在 40 Gbit/s 数据传输速率下的浴盆曲线图, 可知在 $BER=1 \times 10^{-12}$ 处可以看到眼睛张开幅度约为 0.46 UI。图 6(b) 为经 100 m 光纤传输后, 在 40 Gbit/s 数据传输速率下的浴盆曲线图, 可知在 $BER=1 \times 10^{-12}$ 处可以看到眼睛张开幅度为 0.18 UI。

测试结果表明, 在 40 Gbit/s 数据传输下实现了无误码传输, 在 50 Gbit/s 数据传输下, 得到了较清晰的眼图。但其 BER 较高, 主要原因可能是由于器件

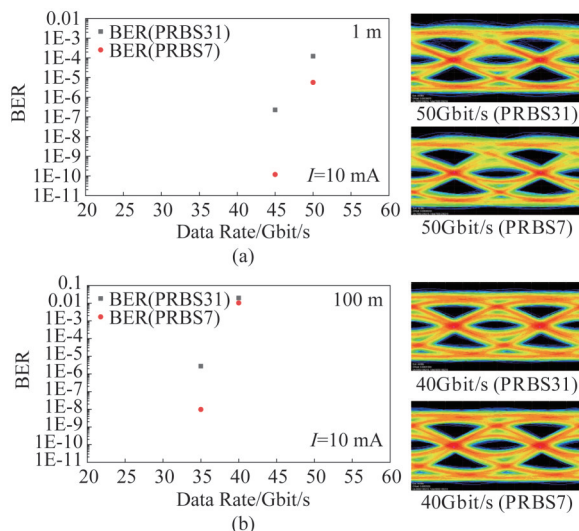


图5 (a) 经 1 m 光纤传输, 采用 PRBS7 码和 PRBS31 码测试器件的误码率, 右图: 50 Gbit/s 传输速率时采用 PRBS7 码和 PRBS31 码测试的光学眼图, (b) 经 100 m 光纤传输, 采用 PRBS7 码和 PRBS31 码测试器件的误码率, 右图: 40 Gbit/s 传输速率时采用 PRBS7 码和 PRBS31 码测试的光学眼图

Fig. 5 (a) The bit error rate tests of device in PRBS7 and PRBS31 codes at the transmission distance of 1 m fiber, the figure on the right: optical eye diagram in PRBS7 and PRBS31 codes at 50 Gbit/s, (b) the bit error rate tests of device in PRBS7 and PRBS31 codes at the transmission distance of 100 m fiber, the figure on the right: optical eye diagram in PRBS7 and PRBS31 codes at 40 Gbit/s

谱宽较宽以及带宽还不够高(如图 3)。大的谱宽会导致器件受光纤色散影响严重, 难以长距离无误码传输。通过减小氧化孔径和引入模式选择结构可以有效地降低 VCSEL 的谱宽^[12-13]。除此之外, 还可以进一步提高 -3 dB 带宽来实现更高的传输速率。根据公式(1), 带宽的提高需要增大 D 因子, 这需要增加微分增益和光限制因子 Γ 。

3 结论

针对目前 850 nm VCSEL 无法满足日益增长的数据流量需求的问题, 本文设计制备了一种 $\lambda/2$ 短腔的六层氧化限制层的高速 850 nm 垂直腔面发射激光器, 测试得到最大带宽为 23.8 GHz。通过 NRZ 调制的方法, 在未使用预加重、均衡和前向纠错的条件下, 在传输距离分别为 1 m 和 100 m, 传输速率分别为 40 Gbit/s 和 30 Gbit/s 时均能实现无误码传输。在光纤传输距离分别为 1 m 和 100 m, 传输速率为 40 Gbit/s 时, 分别实现了 0.46 UI 和 0.18 UI 的眼图张开幅度。

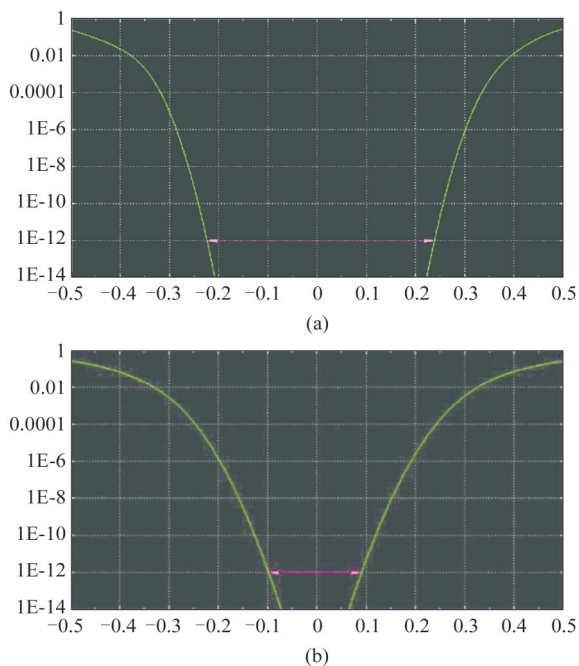


图6 器件通过NRZ调制,采用PRBS7码测试的浴盆曲线图,(a)经1 m光纤传输在40 Gbit/s数据传输速率下的浴盆曲线图,(b)经100 m光纤传输在40 Gbit/s数据传输速率下的浴盆曲线图

Fig. 6 Bath curves of the device tested by NRZ modulation using PRBS7 code, (a) bath curves at the transmission distance of 1 m fiber of 40 Gbit/s data transfer rate, (b) bath curves at the transmission distance of 100 m fiber of 40 Gbit/s data transfer rate

References

[1] Cisco Annual Internet Report (2018 - 2023) *White Paper*. 2020.
 [2] Tatum J A, Gazula D, Graham L A, *et al.* VCSEL-based interconnects for current and future data centers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(4): 727-732.
 [3] Mahgerefteh D, Thompson C, Cole C, *et al.* Techno-economic comparison of silicon photonics and multimode VCSELs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(2):

233-242.
 [4] Kuchta D M, Rylyakov A V, Schow C L, *et al.* 64Gb/s Transmission over 57m MMF using an NRZ Modulated 850nm VCSEL [C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2014:Th3C.2.
 [5] Liu M, Wang C Y, Feng M, *et al.* 50 Gb/s error-free data transmission of 850 nm oxide-confined VCSELs [C]//2016 Optical Fiber Communication Conference (OFC), Optical Society of America, 2016:TU3D.2
 [6] Wang H L, Qiu J, Yu X, *et al.* 85° C operation of 850 nm VCSELs deliver a 42 Gb/s error-free data transmission for 100 meter MMF link [C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2018: W11. 6.
 [7] Wu C H, Huang T Y, Qiu J, *et al.* 50 Gbit/s error-free data transmission using a NRZ-OOK modulated 850 nm VCSEL [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), IEEE, 2018: 1-3.
 [8] ZHOU Guang-Zheng, LAN Tian, LI Ying, *et al.* High Temperature-stable 25 Gbit/s 850 nm Vertical-cavity Surface-emitting Lasers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. (周广正, 兰天, 李颖, 等. 高温稳定 25 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器 [J]. *发光学报*), 2019, **40**(05): 630-634.
 [9] Yang Y C, Cheng H T, Wu C H. Ultra-fast and Highly Efficient 850-nm VCSELs for Next-gen PAM-4 Transceivers [C]//Asia Communications and Photonics Conference. Optical Society of America, 2021: W3D.4.
 [10] Liu En-Ke, Zhu Bing-Sheng, Luo Jin-Sheng. The Physics of Semiconductors [M]. Electronic Industry Press, 2019.(刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学) [M]. 电子工业出版社), 2019
 [11] Fan Chang-Xin. Lectures on Communication Principles [M]. Electronic Industry Press, 2019.(樊昌信. 通信原理教程) [M]. 电子工业出版社), 2019.
 [12] Shi J, Wei Z, Chi K, *et al.* Single-mode, high-speed, and high-power vertical-cavity surface-emitting lasers at 850 nm for short to medium reach (2 km) optical interconnects [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(24): 4037-4044.
 [13] Qiu J, Yu X, Feng M. 85° C operation of single-mode 850 nm VCSELs for high speed error-free transmission up to 1 km in OM4 fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2019: W3A. 4.