

长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展

田思聪 佟存柱 王立军 Bimberg Dieter

Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP

TIAN Si-cong, TONG Cun-zhu, WANG Li-jun, BIMBERG Dieter

引用本文:

田思聪, 佟存柱, 王立军, Bimberg Dieter. 长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2022, 15(5): 946–953. doi: 10.37188/CO.2022-0136

TIAN Si-cong, TONG Cun-zhu, WANG Li-jun, BIMBERG Dieter. Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 946-953. doi: 10.37188/CO.2022-0136

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0136>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用BCB平整技术的高速850 nm垂直面发射激光器

High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique

中国光学 (中英文) . 2018, 11(2): 190 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0190>

水平腔面发射半导体激光器研究进展

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

中国光学 (中英文) . 2017, 10(2): 194 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0194>

结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器

Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser

中国光学 (中英文) . 2019, 12(4): 810 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0810>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学 (中英文) . 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

金属等离子激元调控Fabry-Perot微腔谐振模式研究

Resonant mode of Fabry-Perot microcavity regulated by metal surface plasmons

中国光学 (中英文) . 2019, 12(3): 649 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0649>

空间激光通信最新进展与发展趋势

Latest developments and trends of space laser communication

中国光学 (中英文) . 2018, 11(6): 901 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0901>

文章编号 2097-1842(2022)05-0946-08

长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展

田思聪¹, 佟存柱^{2*}, 王立军^{2*}, Bimberg Dieter^{1,3*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, Bimberg 中德
绿色光子学研究中心, 吉林长春 130033;

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. 柏林工业大学, 固体物理研究所, 纳米光学中心, 德国柏林 D-10623)

摘要: 高速垂直腔面发射激光器(VCSEL)是高速光通信的主要光源之一, 受数据流量的迅速增长牵引, 高速 VCSEL 正向更大带宽、更高速率方向发展。长春光机所团队通过优化 VCSEL 外延设计和生长、器件设计和制备、以及性能表征技术, 在多个波长的高速 VCSEL 的调制带宽、传输速率、模式、功耗等性能方面取得了显著进展。实现高速单模 940 nm VCSEL 27.65 GHz 调制带宽和 53 Gbit/s 传输速率; 通过波分复用基于 850 nm、880 nm、910 nm 和 940 nm 高速 VCSEL 实现 200 Gbit/s 链路方案; 通过光子寿命优化, 实现高速 VCSEL 低至 100 fJ/bit 的超低能耗; 实现 1030 nm 高速 VCSEL 25 GHz 调制带宽; 实现 1550 nm 高速 VCSEL 37 Gbit/s 传输速率。研制的高速 VCSEL 在光通信等领域有重要应用前景。

关 键 词: 垂直腔面发射激光器; 高速调制; 单模; 低功耗; 波分复用; 长波长; 光通信

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: [10.37188/CO.2022-0136](https://doi.org/10.37188/CO.2022-0136)

收稿日期: 2022-06-18; 修訂日期: 2022-07-14

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFB2801000, No. 2018YFB2201000); 国家自然科学基金(No. 61774156, No. 62174159, No. 62061136010); 中国科学院青年创新促进会(No. 2018249); 中德科学中心合作交流项目(No. M0386); 吉林省国际合作项目(No. 20210402055GH)。

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB2801000, No. 2018YFB2201000); National Natural Science Foundation of China (No. 61774156, No. 62174159, No. 62061136010); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2018249); Sino-German Center for Research Promotion Joint Mobility Program of DFG and NSFC (No. M0386); International Cooperation Project of Jilin Province (No. 20210402055GH).

Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP

TIAN Si-cong¹, TONG Cun-zhu^{2*}, WANG Li-jun^{2*}, BIMBERG Dieter^{1,3*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics Research Center, Changchun 130033, 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. Institute of Solid State Physics, Center for Nano-Optics, Technical University of Berlin, Berlin D-10623, Germany)

* Corresponding author, E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn; wanglj@ciomp.ac.cn; bimberg@physik.tu-berlin.de

Abstract: High-speed vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is one of the main light sources for optical communication. Driven by the rapid growth of data traffic, the high-speed VCSEL is developing towards larger bandwidth and higher bit rate. By optimizing the epitaxy design and the growth of VCSELs, the design and the fabrication of VCSELs, and the high-frequency characterization techniques, much remarkable progress of high-speed VCSELs with different wavelengths have been achieved in modulation bandwidth, transmission rate, mode, power consumption in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP). The research progress of high-speed VCSELs includes: high-speed single-mode 940 nm VCSEL with 27.65 GHz modulation bandwidth and 53 Gbit/s transmission rate; 200 Gbit/s optical link based on 850 nm, 880 nm, 910 nm and 940 nm high-speed VCSELs via wavelength division multiplexing; ultra-low power consumption as low as 100 fJ/bit of high-speed VCSEL via optimization of photon lifetime; 1030 nm high-speed VCSEL with 25 GHz modulation bandwidth; 1550 nm high-speed VCSEL with 37 Gbit/s transmission rate. The developed high-speed VCSELs have important application prospects in optical communication.

Key words: vertical-cavity surface-emitting laser; high-speed modulation; single-mode; low-energy consumption; wavelength division multiplex; long-wavelength; optical communication

1 引言

随着流媒体、云计算、区块链等新兴消费和社交媒体的出现,互联网流量以每年约 60% 的速度大幅增长,远远超过思科(Cisco)公司预测^[1]。垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有阈值电流低、量子效率高、调制带宽高、能耗低等优点,基于 VCSEL 和多模光纤(MMF)是数据传输的重要组成部分。数据流量的迅速增长牵引 VCSEL 向更大带宽、更高速率、更低能耗方向发展^[2]。

在高速 VCSEL 调制带宽方面,查尔姆斯理工大学(CUT)、伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校(UIUC)、Finisar 等多个研究组都实现了 850 nm

VCSEL 近 30 GHz 的调制带宽^[3-5]。CHENG C L、HAGHIGHI N、SIMPANEN E 在 940 nm、980 nm 和 1060 nm 波长高速 VCSEL 研究方面,也分别实现了类似的指标^[6-8]。在高速 VCSEL 传输速率方面, KUCHTA D M 等人采用前馈均衡驱动实现不归零码(NRZ-OOK)调制下 71 Gb/s 数据传输^[9]。4 电平脉冲幅度调制(PAM4)可进一步提升传输速率^[10],并可通过均衡和前向纠错进一步提升传输速率至 200 Gbit/s^[11]。通过波分复用(WDM),可大大增加光链路的容量和传输速率^[12]。单模 VCSEL 可延长传输距离至 2000 m 以上^[13]。在能耗方面, MOSER P 实现了 56f J/bit @25 Gb/s 的超低能耗^[14]。

面向高速光通信需求,研究人员从高速 VC-

SEL 带宽限制机理和提升方法出发,通过优化 VCSEL 外延设计和生长、器件设计和制备以及性能表征技术,在多个波长高速 VCSEL 的调制带宽、传输速率、模式、功耗等性能方面取得了显著进展,可满足不同应用场景。本文接下来第二部分将介绍带宽限制因素和提升方法;第三部分介绍本课题组高速 VCSEL 的研究进展;第四部分进行总结。

2 高速 VCSEL 带宽限制因素

氧化限制型高速 VCSEL 截面示意图如图 1(彩图见期刊电子版)所示。其主要包括有源区, p- 和 n-布拉格反射镜(DBR), 单层或多层氧化孔, 苯丙环丁烯(BCB)填平材料, p-、n-电极和共面电极。有源区可为量子阱或量子点。DBR 由两种具有不同折射率、每层厚度为四分之一波长的材料交替生长组成; 氧化孔可通过湿法氧化高 Al 组分的氧化层制备。

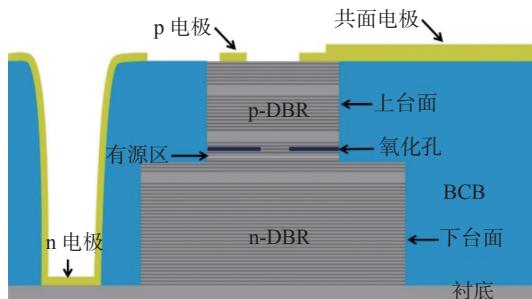


图 1 氧化限制型高速 VCSEL 截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cross-section of the oxidation-limited high-speed VCSEL

VCSEL 的频率响应可以用传输函数来表征,

$$H(f) = C \times \frac{f_r^2}{\left(f_r^2 - f^2 + i \frac{\gamma}{2\pi} f\right)} \times \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_p}} , \quad (1)$$

式(1)中 C 是常数, i 是虚数单位, f_r 是驰豫振荡频率, γ 是阻尼因子, f_p 是寄生截止频率。式(1)中第一部分表示本征响应, 第二部分表示寄生响应。为了提高调制带宽, 需要增大驰豫振荡频率, 减小阻尼因子和增大寄生截止频率。

驰豫振荡频率 f_r 是激光腔内载流子和光子之间的本征振荡频率, 可用式(2)表示:

$$f_r = D \sqrt{I - I_{th}} , \quad (2)$$

式(2)中 I_{th} 为阈值电流, D 因子用于表示驰豫振荡频率与电流变化的关系, 可表示为

$$D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma v_g}{q V_a} \cdot \frac{\partial g / \partial n}{\chi}} , \quad (3)$$

式(3)中, η_i 为内量子效率, Γ 为光学限制因子, v_g 为群速度, $\partial g / \partial n$ 是微分增益, V 为有源区体积, χ 为传输因子。由此可知, 为增大 D 因子(驰豫振荡频率), 需要加强光限制, 增大微分增益, 提高载流子传输速率和效率。

阻尼因子 γ 可表示为

$$\gamma = K f_r^2 + \gamma_0 , \quad (4)$$

式(4)中, γ_0 为阻尼补偿因子, K 因子表示如下

$$K = 4\pi^2 \left(\tau_p + \frac{\varepsilon \chi}{v_g \partial g / \partial n} \right) , \quad (5)$$

式(5)中, τ_p 为光子寿命, ε 为增益压缩因子。由式(5)可知, 可以通过光子寿命 τ_p 来调控阻尼 γ 。此外, 阻尼随电流的增加而增加, 阻尼限制的本征带宽为

$$f_{3dB, damping} = \frac{2\pi\sqrt{2}}{K} . \quad (6)$$

由于寄生效应和热效应的存在, VCSEL 实际测量的调制带宽通常远小于本征调制带宽。为提高寄生限制的带宽, 需要降低氧化层电容和串联电阻。此外, 随着电流增加, 量子效率降低, VCSEL 的温度升高, VCSEL 发射波长红移, 逐渐与 DBR 模式失配, 最终达到热限制的带宽。因此为提高热限制的带宽, 需要减少 VCSEL 自热, 这可通过降低串联电阻、降低自由载流子吸收、增加热导来实现。

根据以上讨论, 采用应变量子阱提高微分增益; 采用短腔长和小氧化孔提高光限制因子; 采用高热导 DBR 和优化器件设计改善热限制; 通过 DBR 调制掺杂降低串联电阻; 采用低介电常数绝缘材料降低电极电容; 通过多氧化层设计降低台面电容; 调控光子寿命合理减小阻尼, 提高了多个波长的高速 VCSEL 的调制带宽和传输速率。

3 高速 VCSEL 研究进展

3.1 高速单模 VCSEL

高速单模 VCSEL 相比于高速多模 VCSEL 具

有低色散的优点, 可提高光纤传输距离, 也更适合于 WDM^[15]。本课题组研制了不同氧化孔径的 940 nm VCSEL, 测试表征了 3 μm、6 μm 和 9 μm

氧化孔径 VCSEL 的功率-电流 (L-I)、电压-电流 (V-I)、光谱、小信号响应和传输速率, 结果如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。

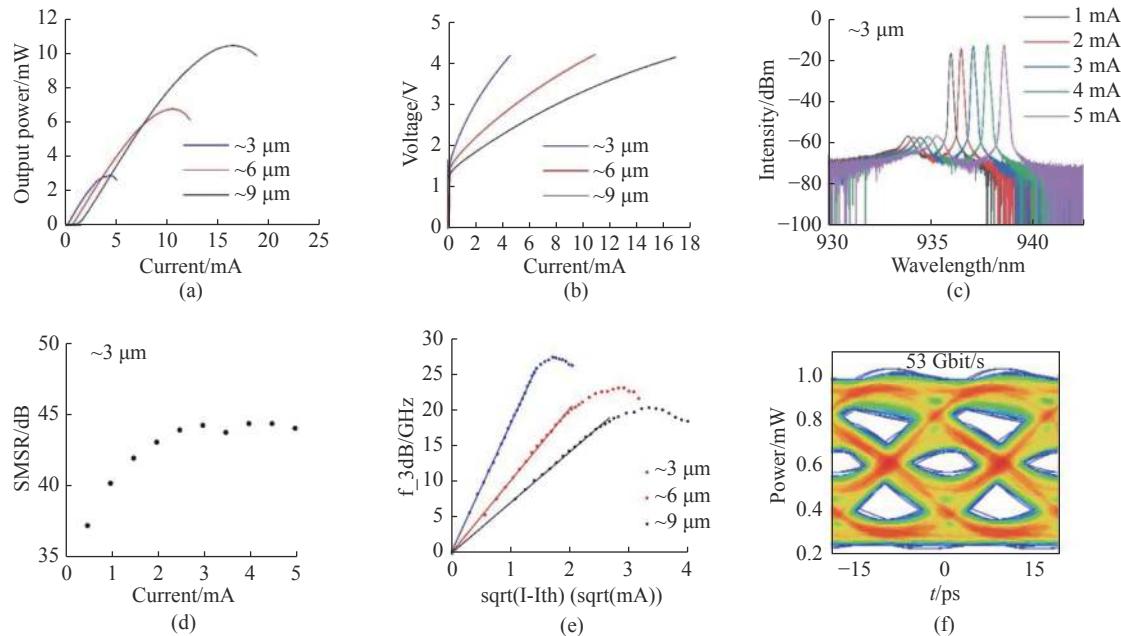


图 2 室温下 3 μm、6 μm 和 9 μm 氧化孔径的高速 940 nm VCSEL 测试结果。(a) L-I; (b) V-I; (c) 光谱; (d) 边模抑制比; (e) 3 dB 带宽; (f) 眼图^[16]

Fig. 2 The measurement results of the 940 nm VCSELs with 3 μm, 6 μm and 9 μm oxidation aperture at room temperature. (a) L-I; (b) V-I; (c) optical spectrum; (d) side-mode suppression ratio (SMSR); (e) the bandwidth of 3 dB; (f) the eye diagram^[16]

从图 2 可以看出, 随着 VCSEL 氧化孔径的增加, VCSEL 的阈值电流逐渐增大, 饱和功率逐渐增大, 激射模式逐渐增多, 调制带宽逐渐降低。其中, 氧化孔径为 3 μm 的 VCSEL 在整个工作电流下都呈现单模, 3dB 带宽为 27.65 GHz。最后, 选取 3 μm 氧化孔径 VCSEL, 在室温、3.5 mA 偏置电流和 1 V 调制电压下, 在 3 m 长 MMF 中实现基于 NRZ-OOK 调制 53 Gbit/s 的传输速率。

3.2 基于 WDM 的 200G/s 光链路

WDM 可以提升光链路的通信容量和传输速率。4 个波长 WDM 传输系统示意图如图 3(a) (彩图见期刊电子版) 所示。本课题组研制了 850 nm、880 nm、910 nm 和 940 nm 4 个波长的高速 VCSEL。4 个波长的高速 VCSEL 在 3 μm 氧化孔径下都呈现单模特性, 如图 3(b) (彩图见期刊电子版) 所示。以 850 nm 高速 VCSEL 为例, 单个高速 VCSEL 的传输速率可达 50 Gbit/s。因此, 通过 WDM, 可实现 200 Gbit/s 的数据传输, 满足 IEEE 802.3 bs 标准。

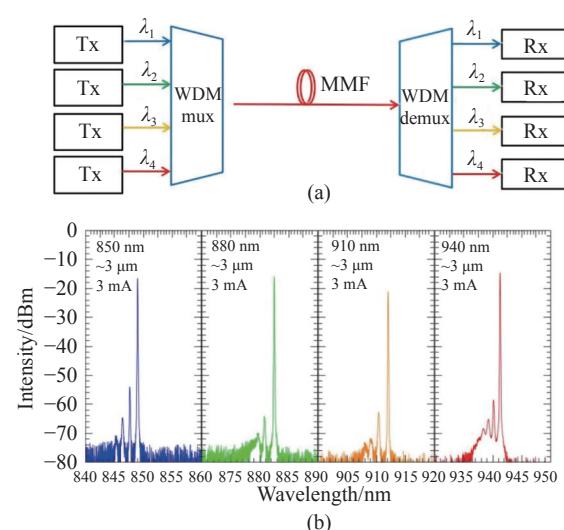


图 3 (a) 基于 4 个波长的 VCSEL 和多模光纤的 WDM 传输示意图^[2]; (b) 850 nm、880 nm、910 nm 和 940 nm 高速 VCSEL 光谱^[12]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the WDM system using four VCSELs and MMF^[2]; (b) the optical spectrum of the 850 nm, 880 nm, 910 nm and 940 nm VCSELs^[12]

相比于高阶调制(如 PAM 4), WDM 在提高光链路传输速率的同时,还有助于优化光链路能耗。WDM 不仅增加了传输链路的带宽,而且 VCSEL 的数量为优化目标比特率的能耗提供了新的自由度^[12]。

3.3 高速低功耗 VCSEL

虽然提高光链路的传输速率可以通过使用高阶的调制格式(如 PAM4)以及具有前向纠错和均衡的电驱动来实现,但是需要比较不同方案下的相同传输速率的能耗。通过刻蚀顶部 DBR^[17-18]或在顶部 DBR 的表面上沉积 SiN^[19],可以调控 VCSEL 的光子寿命和阻尼,提高 VCSEL 的输出功率和 3dB 带宽。此外,较小的氧化孔径 VCSEL 通常具有较大的 3dB 带宽和更高的能效。图 4 为高速 VCSEL 的能耗 EDR 与比特率 BR 的关系的实验结果,其中蓝线代表具有 7.1 ps 光子寿命的 VCSEL,红线代表具有 2.6 ps 光子寿命的 VCSEL。两条曲线有一个交点(横坐标对应坐标 44 Gbit/s)。通过交点的虚线将其分成两个区域。在虚线右侧区域(传输速率>44 Gbit/s),具有 2.6 ps 光子寿命的 VCSEL 能耗更低,在虚线左侧区域(传输速率<44 Gbit/s),具有 7.1 ps 光子寿命的 VCSEL 能耗更低。

因此,可通过光子寿命和比特率的优化降低光链路的能耗。例如,使用具有 2.6 ps 光子寿命的 VCSEL,50 Gbit/s 的 EDR 为 400 fJ/bit,200 Gbit/s 的光链路中 VCSEL 能耗为 1600 fJ /bit。而使用具有 7.1 ps 光子寿命的 VCSEL,25 Gbit/s 的 EDR 为 100 fJ /bit,200 Gbit/s 的光链路中 VCSEL 能耗为 800 fJ /bit。因此,对于相同的 200 Gbit/s 光链路,通过光子寿命和比特率优化,可降低光链路能耗 50% 以上^[20]。结合低功耗电驱动芯片,光模块能耗可低于 4pJ/bit^[21]。此外,在 25 Gbit/s 的工作条件下,较低的电流密度可减小热量并降低设备

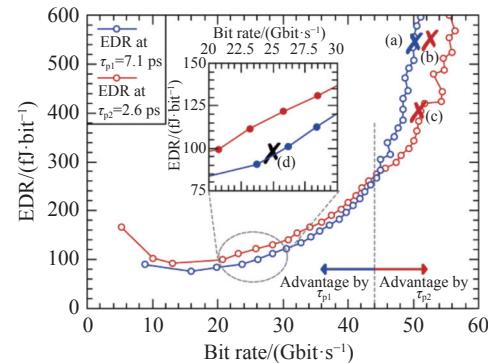


图 4 较长光子寿命(蓝线)和较短光子寿命(红线)的高速 VCSEL 的大信号调制的比特率 BR 和能耗 EDR 关系。通过实验计算的频谱效率约为 M=2.1^[20]

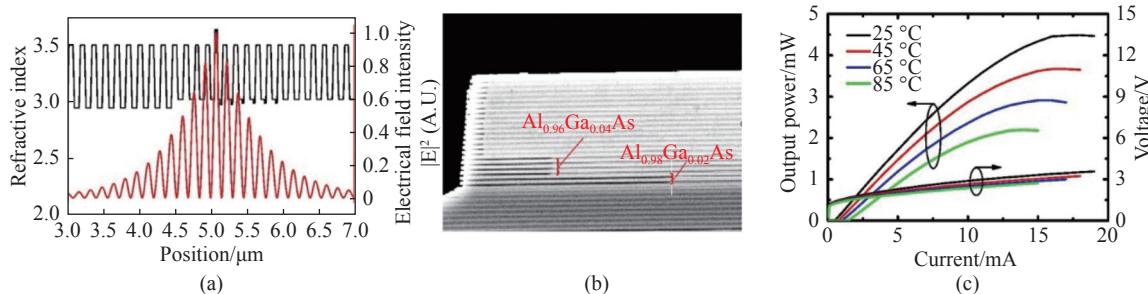
Fig. 4 EDR and BR values from large signal measurements, for a long photon lifetime (blue) and a short photon lifetime (red). The spectral efficiency of M=2.1 bit was found experimentally by the large signal measurement results^[20]

故障的风险。

3.4 高速 1030 nm VCSEL

相比于 850 nm 波长 VCSEL,1030 nm 波长 VCSEL 在光纤传输中的色散和衰减大大降低,有利于提高传输距离^[22]。此外,1030 nm VCSEL 可应用于 850–1060 nm 波段(间隔 30 nm)的 WDM,提高光纤链路的通信容量和传输速率。

我们采用应变 InGaAs/GaAsP 量子阱、λ/2 短光腔和 6 层氧化物孔设计,提高纵向光限制因子、降低寄生电容,提高 VCSEL 的 3dB 带宽。研制的高速 1030 nm VCSEL 模拟、测试表征结果如图 5 所示。其中,氧化孔径为 7 μm 的 VCSEL 室温条件下阈值电流为 0.53 mA,最高功率 4.5 mW。随着温度的升高,VCSEL 阈值电流增大,出光功率减小,波长红移。室温条件下 3 dB 带宽大于 25 GHz;高温 85 °C 条件下 3 dB 带宽大于 20 GHz。在频谱效率 M=2.1 的系统下可实现大于 50 Gbit/s 的数据传输。



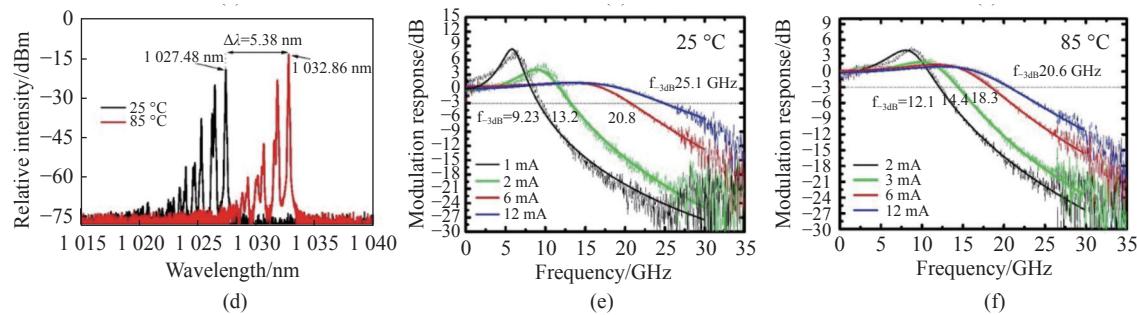


图 5 (a)设计的 VCSEL 折射率分布和驻波场分布;(b)氧化后的 VCSEL 截面 SEM;(c)1030 nm VCSEL L-I-V;(d)1030 nm VCSEL 光谱;(e)25 °C 条件下 1030 nm VCSEL 小信号响应;(f)85 °C 条件下 1030 nm VCSEL 小信号响应

Fig. 5 (a) Refractive index profile and the standing wave distribution of the designed VCSEL; (b) SEM image of the cross section of the VCSEL after the oxidation; (c) the L-I-V of the 1030 nm VCSEL; (d) the optical spectrum of the 1030 nm VCSEL; (e) the small signal response of the 1030 nm VCSEL at 25 °C; (f) the small signal response of the 1030 nm VCSEL at 85 °C

3.5 高速 1550 nm VCSEL

1550 nm VCSEL 在光纤中传输损耗小, 更适合于长距离光纤传输^[23]。目前, 1550 nm VCSEL 技术还不成熟:与长波长有源区相比配的高反射率和低电阻的 DBR 难以生长, 有效电流限制层难以制备、热问题显著。晶圆熔合(WF)技术为高性能 DBR 难以形成的问题提供了解决方案。在 InP 衬底上生长有源区, 在 GaAs 衬底上生长热性能好的 DBR, 然后通过晶圆熔合技术将它们结合在一起, 从而获得腔长较短、散热性能较好的 1550 nm VCSEL。此外, 掩埋隧道结(BTJ)结构可减少长波长 VCSEL 的热效应, 并实现对电流的限制。俄罗斯 ITMO 大学的 L.Karachinsky 团队通过晶圆融合和 BTJ 技术制备了 1550 nm VCSEL^[24]。

我们与 Karachinsky 团队合作, 在室温、6 mA 偏置电流和 1 V 调制电压条件下, 提高 1550 nm VCSEL 传输速率至 37 Gbit/s(3 m 单模光纤), 在误码率 BER=10⁻¹² 下眼宽 0.25UI(6.75 ps), 总抖动 75%(20.27 ps), 如图 6 所示。

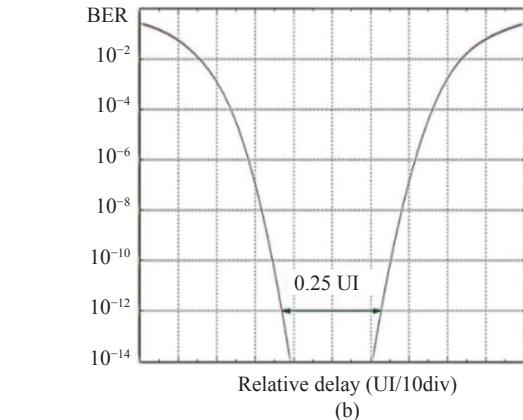
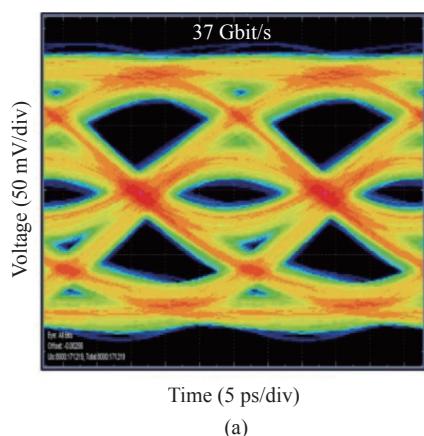


图 6 (a)高速 1550 nm VCSEL 传输眼图;(b)高速 1550 nm VCSEL 浴盆曲线。BTJ 为 6 μm。

Fig. 6 (a) The eye diagram of the 1550 nm VCSEL; (b) the bathtub curve of the 1550 nm VCSEL. BTJ is 6 μm.

4 结束语

通过优化 VCSEL 外延设计和生长、器件设计和制备、以及性能表征技术, 在多个波长的高速 VCSEL 的调制带宽、传输速率、模式、功耗等性能方面取得了显著进展。实现了高速单模 940 nm VCSEL 27.65 GHz 调制带宽和 53 Gbit/s 传输速率; 通过波分复用基于 850 nm、880 nm、910 nm 和 940 nm 高速 VCSEL 实现了 200 Gbit/s 链路方案; 通过光子寿命优化, 实现了高速 VCSEL 低至 100 fJ/bit 的超低能耗; 实现了 1030 nm 高速 VCSEL 25 GHz 调制带宽; 实现了 1550 nm 高速 VCSEL 37 Gbit/s 传输速率。研制的高速 VCSEL 在高速光通信等有重要应用前景。

致谢:感谢Gunter Larisch博士, Leonid Karachinsky教授、Ahamed Mansoor博士、王延靖博

士、佟海霞硕士、徐汉阳硕士、韩赛一硕士、潘绍驰硕士的相关工作。

参考文献:

- [1] Global Internet Growth and Trends (Source: Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022)[EB/OL]. <https://cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>.
- [2] TIAN S C, AHAMED M, LARISCH G, et al.. Novel energy-efficient designs of vertical-cavity surface emitting lasers for the next generations of photonic systems[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(SK): SK0801.
- [3] TATUM J A, LANDRY G D, GAZULA D, et al. . VCSEL-based optical transceivers for future data center applications[C]. *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition*, IEEE, 2018: 1-3.
- [4] FENG M, WU C H, HOLONYAK N. Oxide-confined VCSELs for high-speed optical interconnects[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54(3): 2400115.
- [5] HAGLUND E, WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, 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.
- [6] CHENG C L, LEDENTSOV N, KHAN Z, et al.. Ultrafast Zn-diffusion and oxide-relief 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers under high-temperature operation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(6): 1700507.
- [7] HAGHIGHI N, LARISCH G, ROSALES R, et al. . 35 GHz bandwidth with directly current modulated 980 nm oxide aperture single cavity VCSELs[C]. *2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference*, IEEE, 2018: 1-2.
- [8] SIMPANEN E, GUSTAVSSON J S, HAGLUND E, et al.. 1060 nm single-mode vertical-cavity surface-emitting laser operating at 50 Gbit/s data rate[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(13): 869-871.
- [9] 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.
- [10] 杨卓凯, 田思聪, LARISCH G, 等. 基于PAM4调制的高速垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(4): 399-413.
YANG ZH K, TIAN S C, LARISCH G, et al.. High-speed vertical-cavity surface-emitting lasers based on PAM4 modulation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 399-413. (in Chinese)
- [11] ZUO T J, ZHANG T T, ZHANG S, et al. . Single-lane 200-Gbps PAM-4 transmission for Datacenter Intra-Connections employing 850-nm VCSEL[C]. *2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications*, IEEE, 2020: 1-3.
- [12] LARISCH G, ROSALES R, BIMBERG D. Energy-efficient 50+ Gb/s VCSELs for 200+ Gb/s optical interconnects[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(6): 1701105.
- [13] STEPNIAK G, LEWANDOWSKI A, KROPP J R, et al.. 54 Gbit/s OOK transmission using single-mode VCSEL up to 2.2 km MMF[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(8): 633-635.
- [14] MOSER P, LOTT J A, WOLF P, et al.. 56 fJ dissipated energy per bit of oxide-confined 850 nm VCSELs operating at 25 Gbit/s[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(20): 1292-1294.
- [15] 刘安金. 单模直调垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701005.
LIU A J. Progress in single-mode and directly modulated vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701005. (in Chinese)
- [16] 徐汉阳, 田思聪, 韩赛一, 等. 53 Gbit/s高速单模940 nm垂直腔面发射激光器[J]. *发光学报*, 2022, 43(7): 1114-1120.
XU H Y, TIAN S C, HAN S Y, et al.. 53 Gbit/s high speed single mode 940 nm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(7): 1114-1120. (in Chinese)
- [17] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, KÖGEL B, et al.. Impact of photon lifetime on high-speed VCSEL performance[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(6): 1603-1613.
- [18] HU SH, HE X Y, HE Y, et al.. Impact of damping on high speed 850 nm VCSEL performance[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(11): 114006.
- [19] LARISCH G, MOSER P, LOTT J A, et al.. Impact of photon lifetime on the temperature stability of 50 Gb/s 980 nm VCSELs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2327-2330.

- [20] LARISCH G, TIAN S C, BIMBERG D. Optimization of VCSEL photon lifetime for minimum energy consumption at varying bit rates[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 18931-18937.
- [21] KUCHTA D M. High-speed low-power short-reach optical interconnects for high-performance computing and servers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9010: 901007.
- [22] LI M J. Novel optical fibers for data center applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9772: 977205.
- [23] 韩赛一, 田思聪, 徐汉阳, 等. 高速1 550 nm垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(5): 736-744.
HAN S Y, TIAN S C, XU H Y, et al.. Research progress of high-speed 1 550 nm vertical cavity surface emitting laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(5): 736-744. (in Chinese)
- [24] BABICHEV A V, KARACHINSKY L Y, NOVIKOV I I, et al.. 6-mW single-mode high-speed 1550-nm wafer-fused VCSELs for DWDM application[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(6): 2400808.

作者简介:

田思聪(1984—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事高速垂直腔面发射激光器的研究。E-mail:
tiansicong@ciomp.ac.cn



佟存柱(1976—),男,吉林伊通人,发光学及应用国家重点实验室常务副主任,研究员,博士生导师,主要从事高亮度半导体激光器、面发射激光器和碟片激光器的研究工作。E-mail: tongcz
@ciomp.ac.cn



王立军(1946—),男,吉林舒兰人,中国科学院院士,研究员,博士生导师,主要从事激光技术等领域的基础及应用研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn



Bimberg Dieter(1942—),男,德国籍,德国科学院院士、美国工程院院士、美国发明家学会院士、俄罗斯科学院院士,Bimberg 中德绿色光子学研究中心主任,柏林工业大学教授,博士研究生导师,主要从事量子点激光器、高速垂直腔面发射激光器、高亮度半导体激光器的研究。E-mail: bimberg@physik.tu-berlin.de