

文章编号: 1000-7032(2023)10-1811-05

80 Gb/s 高速 PAM4 调制 850 nm 垂直腔面发射激光器

王延靖¹, 佟存柱^{1,2*}, 栾晓倩², 蒋 宁², 佟海霞²,汪丽杰^{1,2}, 田思聪¹, 孟 博¹

(1. 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;

2. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130031)

摘要: 展示了高速直接调制 850 nm 氧化物限制垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的结果。优化设计应变 In-GaAs/AlGaAs 量子阱以实现高微分增益, 通过表面刻蚀来调节光子寿命实现响应平坦化。研制的氧化物孔径约 7 μm 的 VCSEL 具有平坦的频率响应, 3 dB 调制带宽为 24 GHz, 相对噪声强度值 -155 dB/Hz, 未采用任何预加重和均衡技术情况下 PAM4 调制数据传输速率达 80 Gb/s。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 高速; PAM4 调制

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230170

80 Gb/s High Speed PAM4 Modulated 850 nm Vertical-cavity Surface-emitting Laser

WANG Yanjing¹, TONG Cunzhu^{1,2*}, LUAN Xiaoqian², JIANG Ning², TONG Haixia²,WANG Lijie^{1,2}, TIAN Sicong¹, MENG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Jlight Semiconductor Technology Co., Ltd, Changchun 130031, China)

* Corresponding Author, E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn

Abstract: We present the results of a high-speed direct modulation 850 nm oxide confined vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), optimize the design of strain InGaAs/AlGaAs quantum wells to achieve high differential gain, and adjust the photon lifetime through surface etching to achieve response flattening. The developed VCSEL with an oxide aperture of about 7 μm has a flat frequency response, a 3 dB modulation bandwidth of 24 GHz, and a relative noise intensity value of -155 dB/Hz. Without any pre-emphasis and equalization technology, the PAM4 modulation data transmission rate can reach 80 Gb/s.

Key words: vertical-cavity surface-emitting laser; high-speed; PAM4 modulation

1 引 言

在过去的二十年中, 850 nm 氧化物限制多模垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在低成本、小体积、

低功耗等方面充分表现出了其在短距离多模光纤数据通信应用中的优势^[1-2]。其具备高可靠性和满足不断增长的数据速率需求的能力^[3]。更高数据速率需求的主要驱动因素是数据和存储中心以及

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-08-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2201000, 2021YFB2801000); 王宽城教育基金 (GJTD-2020-10); 高功率半导体激光国家重点实验室基金项目 (2022-CCLG-ZDSYS-005)

Supported by The National Key Research and Development Program of China (2018YFB2201000, 2021YFB2801000); The K. C. Wong Education Foundation (GJTD-2020-10); The Open Fund of State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers (2022-CCLG-ZDSYS-005)

超级计算。目前,市场仍由 100 GSR4 收发器占据主导地位,使用 4 个通道,每个通道 25 Gb/s。然而,200 G/400 G 模块自 2021 年以来不断增加,每通道 25~28 Gbaud 4 电平脉冲幅度调制(PAM4)的 VCSEL 已经在批量生产。

预计即将到来的 800 G 需求将于 2023 年开始逐步增加^[4]。随着业界技术发展,将支持每个光信道 100 Gb/s 的下一代光链路,许多公司正在采用先进的调制技术,如多电平调制格式 PAM4,这对 VCSEL 的性能提出了更高的要求,需要大带宽、平坦的频率响应、高线性、低相对强度噪声(RIN)和窄光谱宽度等^[5]。尤其是 53 GBaud 的 PAM4 信号,在相同的波特率和功率下比不归零(NRZ)信号对幅度噪声更敏感,需要重新评估噪声源,如 RIN、模式分割噪声(MPN)和模式噪声(MN)^[6-8]。最近,几个研究组报道了使用 PAM4 调制实现高达 100 Gb/s 数据传输速率的令人印象深刻的结果。2020 年,美国 Broadcom 公司通过优化弛豫振荡频率和 RIN,最终实现了 106 Gb/s 数据传输速率^[9-11]。2022 年,II-VI 公司通过平坦化调制响应曲线和低至 -150 dB/Hz 的 RIN,实现了 PAM4 调制 106 Gb/s 数据传输速率^[12]。2020 年,住友电工通过优化光限制因子和拓展调制带宽,实现 85 °C 时 106 Gb/s 数据传输速率^[13]。这些结果表明,开发能够在 53 GBaud(大于 100 Gb/s PAM4)下运行的 850 nm VCSEL 将使新一代企业的存储网络、数据中心的服务器到服务器和交换机到交换机连接以及高性能计算和机器学习应用网络成为可能。

本文介绍了高速氧化限制型 850 nm VCSEL 的研究。相对于本课题组之前的研究成果^[14-15],我们采用了一种综合的优化设计方案,重点是通过优化外延结构设计来实现更大的光限制因子和更高的微分增益,以实现带宽拓展。我们通过对顶层 DBR 进行优化设计以及部分刻蚀来调控光子寿命,在实现较为平坦调制响应的同时,获得了较小的 RIN。

2 设计与制备

2.1 设计

对于超高速 PAM4 调制,不仅需要具有高的 3 dB 带宽,而且需要平坦的频率响应。VCSEL 的小信号调制由以下传递函数表示^[16]:

$$H(f) = A \cdot \frac{1}{1 + j(f/f_p)} \cdot \frac{f_r^2}{f_r^2 - f^2 + j \cdot \gamma f / 2\pi}, \quad (1)$$

其中 f_r 表示弛豫振荡频率, f_p 表示寄生截止频率, γ 表示阻尼系数。弛豫振荡频率 f_r 表示为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{\eta_i \Gamma v_g}{qL_a} \cdot \frac{\partial g / \partial n}{\chi} (I - I_{th})} \right), \quad (2)$$

其中 η_i 是内部量子效率, Γ 是光学限制因子, v_g 是群速度, L_a 是量子阱的总厚度, $\partial g / \partial n$ 是微分增益, χ 是传输因子。阻尼系数 γ 表示为

$$\gamma = 4\pi^2 \left(\tau_p + \frac{\epsilon \chi}{v_g \partial g / \partial n} \right) \cdot f_r^2 + \gamma_0, \quad (3)$$

其中 τ_p 是光子寿命。

对于实现非常高的 f_{3dB} , 需要同时具有高的 f_r 和 f_p , 并且最佳的 γ 是必要的。我们通过降低接触焊盘和半导体层的电容来实现增加 f_p 。限制 VCSEL f_{3dB} 的另一重要因素是固有内在因素,也即需要提高 f_r , f_r 表达式如公式(2)所示。在这项工作中,我们优化了外延层设计,包括优化 InGaAs/AlGaAs 来提高微分增益($\partial g / \partial n$),设计更短的 $\lambda/2$ 腔来提高光限制因子(Γ)。虽然在 γ 很小时即可以达到最大的 f_{3dB} (弱阻尼),然而有研究表明高速 PAM4 调制需要更强的阻尼来获得平坦的频率响应^[13]。因此,我们通过改变光子寿命来平衡高 f_{3dB} 和足够的阻尼。

2.2 制备

采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长 850 nm VCSEL 外延材料。底部 DBR 主要由 Al_{0.12}GaAs/AlAs 交叠制成,以降低热阻抗。为了防止高铝组分被氧化,靠近有源区部分由 3 对 Al_{0.12}GaAs/Al_{0.9}GaAs 组成。顶部 DBR 均由 Al_{0.12}GaAs/Al_{0.9}GaAs 制成。DBR 具有渐变界面和调制掺杂,以实现低电阻和内部光学损耗。在有源区上方 p-DBR 中放置多个氧化物孔,用于载流子限制与降低寄生电容。两个湿法氧化后的 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 层用来限制横向光场和电流。4 个 Al_{0.96}Ga_{0.04}As 层用于减少氧化物孔径寄生电容。我们使用半波长($\lambda/2$)厚的腔来实现高的纵向光学限制。在有源区,我们使用了应变 InGaAs/AlGaAs 多量子阱,高掺杂 GaAs 被用作 P 接触层。为了实现光子寿命控制,我们通过优化顶部 DBR 层的数量和对 GaAs 接触层进行部分刻蚀来进行反射率的调控。对于器件制备,首先通过电感耦合等离子体(ICP)刻蚀方法制备了直径为 25 μm 的台面,并使用激光干涉仪

监测刻蚀深度。在干法蚀刻之后,将样品送至充满 H₂O 蒸气和 N₂ 载气的氧化炉,以横向氧化含高铝组分的 Al_{0.98}GaAs 和 Al_{0.96}GaAs 层。氧化物的侧视图扫描电子显微镜(SEM)图像层如图 1(c)所示。分别蒸镀并退火 p 型 Ti/Pt/Au 和 n 型 Ni/AuGe/Ni/Au 金属接触电极。最终使用苯并环丁烯(BCB)进行平坦化,以及地/信号(GS)共面电极蒸镀。图 1(a)所示为 VCSEL 器件示意图,图 1(b)显示了 VCSEL 显微镜图。

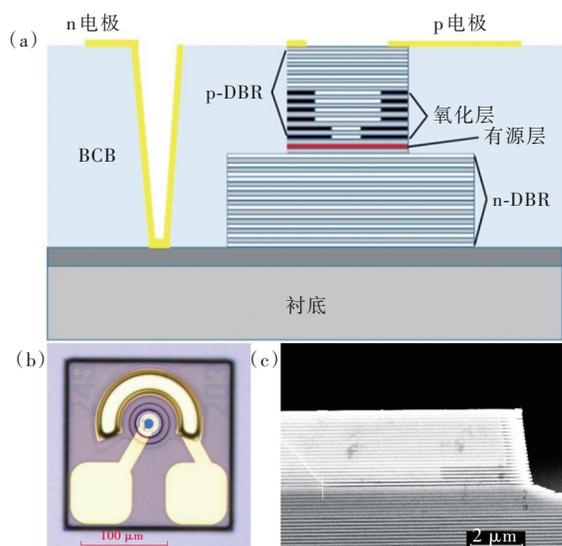


图 1 850 nm VCSEL。(a) 器件示意图;(b) 俯视显微镜图;(c) 截面 SEM 图。

Fig.1 850 nm VCSEL. (a) Device schematic diagram. (b) Overhead microscope view. (c) Cross section SEM image.

3 结果与讨论

图 2 显示了 VCSEL 的典型光输出功率-电流-电压(L-I-V)特性。具有阈值电流 0.69 mA,斜率效率 0.75 W/A,在 7 mA 时的电压为 2.6 V,光功率为 4.8 mW,微分电阻为 91 Ω。如图 3 所示,在 7 mA 下的光谱显示了 854.3 nm 的峰值波长,我们采用 RMS 来定义光谱宽度,其表示为^[17]:

$$\Delta\lambda_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum(\lambda_i - \lambda_0)^2 P_i}{\sum P_i}},$$

$$\lambda_0 = \frac{\sum \lambda_i P_i}{\sum P_i}, \quad (4)$$

其中 λ_0 为平均波长, P_i 和 λ_i 分别表示峰值至小于峰值 20 dB 的激光光谱范围内第 i 个模式的峰值功率和波长。测得均方根光谱宽度为 0.9 nm,大于数据传输 100 m 距离所需光谱宽度 ($<0.6 \text{ nm}$)^[10], 具有较大的谱宽是因为较大的氧

化孔径($\sim 7 \mu\text{m}$)导致的。这表明需要进一步提高 VCSEL 输出光谱性能,采用较小的氧化孔($\sim 3 \mu\text{m}$)、出光孔表面制备微结构以及多孔干涉等都是较为有效的方法。

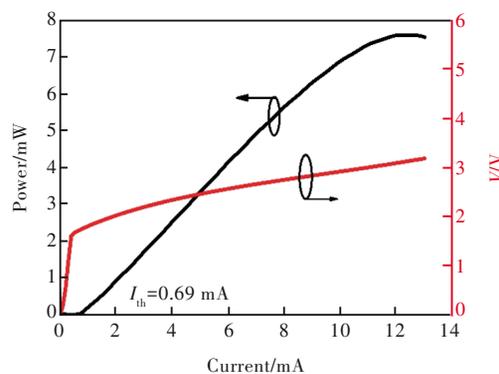


图 2 L-I-V 曲线

Fig.2 L-I-V curve

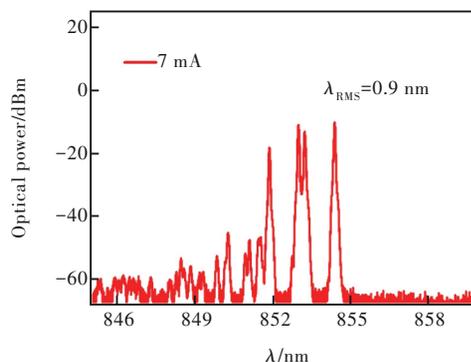


图 3 850 nm VCSEL 光谱

Fig.3 The optical spectrum of the 850 nm VCSEL

小信号测量使用 67 GHz Keysight 网络分析仪进行,频率响应如图 4 所示,显示出非常平坦的特性,3 dB 带宽为 24 GHz。如图 5 所示为测得的 RIN 谱,RIN 值约为 -155 dB/Hz。已有一些研究表明,实现 100 Gb/s 高速 VCSEL,相应的 RIN 值需要小于 -150 dB/Hz^[5]。因此我们研制的 VCSEL 具有

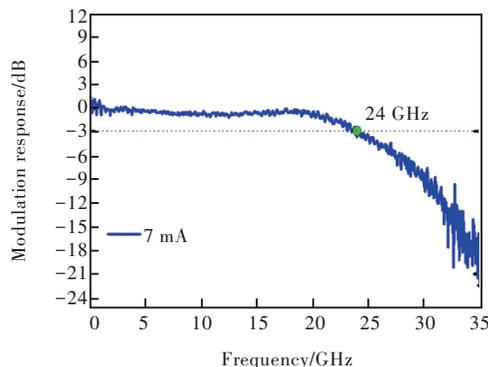


图 4 调制带宽曲线

Fig.4 Modulation bandwidth curve

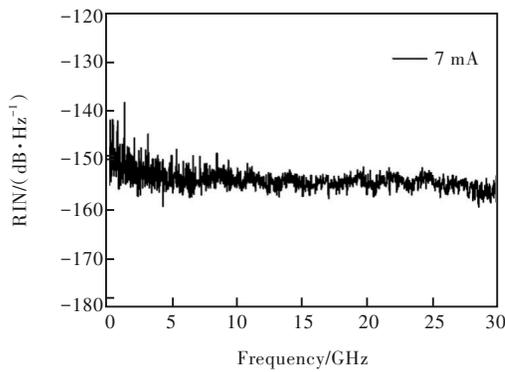


图 5 RIN 谱

Fig.5 RIN spectrum

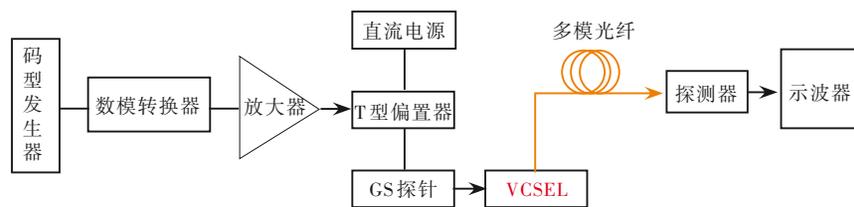


图 6 PAM4大信号调制测量实验装置

Fig.6 Experimental device for PAM4 large signal modulation measurement

图 7 显示了 VCSEL 在偏置电流为 7 mA 时, 50, 60, 80 Gbit/s PAM4 调制的 eye 图, 未采用任何预加重与均衡技术, 发射色散 eye 图闭合代价 (TDECQ) 值分别为 1.3, 2.3, 2.7 dB。所有条件下的消光比 (ER) 均大于 2.5 dB。虽然使用 53.125 GBd PAM4 的 MMF 链路的 TDECQ 要求尚

未定义, 但目前 26.5625 GBd PAM4 链路的上限目标值为小于 4.5 dB^[5]。所制备 VCSEL 在速率高达 80 Gb/s 时, TDECQ 值小于 4.5 dB, 这表明其具有良好的 TDECQ 值。然而, 这距离 100 Gb/s 的数据传输速率还有一定的差距, 需要进一步提高 VCSEL 高速性能, 以实现更高速率工作。

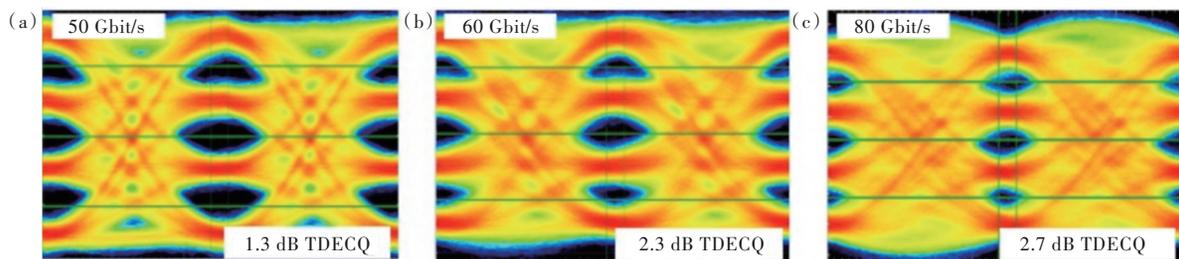


图 7 不同 PAM4 调制速率下的 eye 图。(a) 50 Gb/s; (b) 60 Gb/s; (c) 80 Gb/s。

Fig.7 Eye graph at different PAM4 modulation rates. (a) 50 Gb/s. (b) 60 Gb/s. (c) 80 Gb/s.

4 结 论

本文展示了一种可以不采用任何预加重和均衡技术实现 80 Gb/s 数据传输速率的 PAM4 调制 850 nm VCSEL。在 7 mA 偏置电流下, 对各项性能进行了测试, 阈值电流 0.69 mA, 功率 4.8 mW, RMS 为 0.9 nm, 3 dB 带宽 24 GHz, 且具有平坦的频率响应, RIN 值 -155 dB/Hz, TDECQ 值 2.7 dB。这些测试结果表明, 我们研制的 850 nm 高速 VCSEL 具有优良的性能, 虽然距离

下一代 100 Gb/s 高速 VCSEL 还有一定差距, 但是我们相信经过进一步的外延优化设计, 包括高微分增益量子阱设计和掺杂优化等, 将获得更高的调制带宽, 最终将实现 100 Gb/s 数据传输速率。因此, 所研制的 VCSEL 具有良好的应用潜力。

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.20230170>。

参 考 文 献:

- [1] KUCHTA D M. High capacity VCSEL-based links [C]. *Proceedings of 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles*, 2017.
- [2] FENG M, WU C H, HOLONYAK N. Oxide-confined VCSELs for high-speed optical interconnects [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2018, 54(3): 2400115.
- [3] TATUM J A, LANDRY G D, GAZULA D, *et al.* VCSEL-based optical transceivers for future data center applications [C]. *Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition, San Diego*, 2018.
- [4] ADAMS D. Mega data center optics report [R]. Lorton: LightCounting, 2021.
- [5] WANG J Y, MURTY M V R, FENG Z W, *et al.* 100 Gb/s PAM4 oxide VCSEL development progress at Broadcom [C]. *Proceedings of SPIE 11300, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIV, San Francisco*, 2020.
- [6] GIOVANE L M, WANG J Y, MURTY M V R, *et al.* Volume manufacturable high speed 850 nm VCSEL for 100 G ethernet and beyond [C]. *Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Anaheim*, 2016.
- [7] WANG J Y, RAMANA MURTY M V, WANG C, *et al.* 50 Gb/s PAM-4 oxide VCSEL development progress at broadcom [C]. *Proceedings of SPIE 10122, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXI, San Francisco*, 2017.
- [8] RAMANA MURTY M V, WANG J Y, CHENG A N, *et al.* VCSEL noise characterization for data rates beyond 25 Gb/s [C]. *Proceedings of SPIE 10552, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII, San Francisco*, 2018: 1055205.
- [9] GIOVANE L M, WANG J Y, RAMANA MURTY M V, *et al.* Development of next generation data communication VCSELs [C]. *Proceedings of the 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego*, 2020.
- [10] RAMANA MURTY M V, WANG J Y, HARREN A L, *et al.* Development and characterization of 100 Gb/s data communication VCSELs [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(16): 812-815.
- [11] WANG J Y, RAMANA MURTY M V, FENG Z W, *et al.* High speed 850 nm oxide VCSEL development for 100 Gb/s ethernet at Broadcom [C]. *Proceedings of SPIE 12020, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXVI, San Francisco*, 2022.
- [12] HOSER M, KAISER W, QUANDT D, *et al.* Highly reliable 106 Gb/s PAM-4 850 nm multi-mode VCSEL for 800 G ethernet applications [C]. *Proceedings of 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego*, 2022.
- [13] AOKI T, HIIRO H, TANAKA R, *et al.* Performance of PAM-4 VCSEL for short-reach 100 Gb/s per lane applications up to 85 °C [C]. *Proceedings of SPIE 12020, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXVI, San Francisco*, 2022.
- [14] 田思聪, 佟存柱, 王立军, 等. 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(中英文)*, 2022, 15(5): 946-953.
TIAN S C, TONG C Z, WANG L J, *et al.* Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP [J]. *Chin. Opt.*, 2022, 15(5): 946-953. (in Chinese)
- [15] 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]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1114-1120. (in Chinese)
- [16] WANG Y J, TONG H X, TONG C Z, *et al.* High-speed 1 030 nm anti-waveguide VCSELs with 25 GHz modulation bandwidth [J]. *IEEE Photonics J.*, 2023, 15(2): 1501005.
- [17] HAGLUND E, HAGLUND Å, GUSTAVSSON J S, *et al.* Reducing the spectral width of high speed oxide confined VCSELs using an integrated mode filter [C]. *Proceedings of SPIE 8276, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVI, San Francisco*, 2012: 82760L.



王延靖(1994-),男,甘肃景泰人,博士,助理研究员,2020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,主要从事垂直腔面发射激光器方面的研究。
E-mail: wangyanjing@ciomp. ac. cn



佟存柱(1976-),男,吉林伊通人,博士,研究员,博士生导师,2005年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体激光器方面的研究。
E-mail: tongcz@ciomp. ac. cn