

850 nm 高速垂直腔面发射激光器技术研究进展 (特邀)

佟海霞^{1,2}, 佟存柱¹, 王子焯^{1,2}, 陆寰宇^{1,2}, 汪丽杰¹, 田思聪¹, 王立军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. 中国科学院大学 材料科学与光电研究中心, 北京 100049)

摘要: 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有低成本、低阈值、高速率和低功耗等优点, 在短距离光互连中有着重要的应用。随着大数据、超级计算机技术的发展, 短距离光互连性能需求越来越高, 从而对高速调制的 850 nm VCSEL 技术提出了更高要求。从带宽限制机理、调制新方法两方面详细回顾了高速 850 nm VCSEL 技术最新进展, 对技术发展趋势进行了总结与展望。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 高速; 脉冲幅度调制

中图分类号: TN248.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201077

Advances in the technology of 850 nm high-speed vertical cavity surface emitting lasers (*Invited*)

Tong Haixia^{1,2}, Tong Cunzhu¹, Wang Ziyue^{1,2}, Lu Huanyu^{1,2}, Wang Lijie¹, Tian Sicong¹, Wang Lijun¹

- (1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) have important applications in the short-distance optical interconnection attributed to their advantages, such as low cost, low threshold current, high modulation bandwidth and low power consumption. With the development of big-data and supercomputer technology, the performance demand of short-distance optical interconnection is increasing quickly, which also proposes a challenge for high-speed 850 nm VCSEL. In this paper, the latest development of high-speed 850 nm VCSEL technology was reviewed from the aspects of bandwidth-limited factors and new modulation methods, and the growing trend of this technology is prospected and summarized.

Key words: VCSEL; high speed; PAM modulation

收稿日期: 2020-09-05; 修订日期: 2020-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB2201000)

作者简介: 佟海霞 (1995-), 女, 硕士生, 主要研究方向为高速面发射激光器。Email: 1270327351@qq.com

导师简介: 佟存柱 (1976-), 男, 博士生导师, 主要从事半导体激光器方面的研究。Email: tongcz@ciomp.ac.cn

0 引言

短距离光互连在大数据中心和超级计算机技术发展中具有重要的作用^[1]。垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 因为其具有低成本、低阈值、高速率和低功耗等优点, 成为了短距离光互连的核心光源, 主要波长为 850 nm。近年来该类激光器在新一代信息技术发展需求的牵引下, 发展迅速。单芯片直接调制 3 dB 带宽达到 30 GHz, 脉冲幅度调制 (PAM) 可达到 100 Gbps 速率, 在多通道、可插拔、100-400 Gbps 光模块中得到了广泛应用。然而, 面向未来更高带宽和速率的需求, 850 nm VCSEL 也面临着新的挑战。

文中从理论和进展出发, 讨论和总结了 850 nm VCSEL 带宽限制因素和速率提升方法, 并对未来技术发展进行展望。介绍了 VCSEL 的带宽限制因素, 从 VCSEL 的调制带宽和先进的编码调制技术入手, 对 850 nm VCSEL 近年来速率研究进展进行了总结, 最后对 850 nm VCSEL 技术发展趋势进行了展望。

1 高速 VCSEL 的带宽限制

如图 1 所示, VCSEL 是由上、下布拉格反射镜 (DBR)、有源区、电流限制层、上下电极组成, VCSEL DBR 反射镜间的有源区光学厚度为 $\lambda/2$ 的整数倍, 上下 DBR 镜通常为 P 型和 N 型掺杂, 光输出方向垂直于晶圆表面。为降低电容, 常用的是苯丙环丁烯 (BCB) 绝缘介质进行填平来制作共面电极^[2]。为了进行有效的注入电流控制, 常在有源区与 DBR 间制备氧化孔。

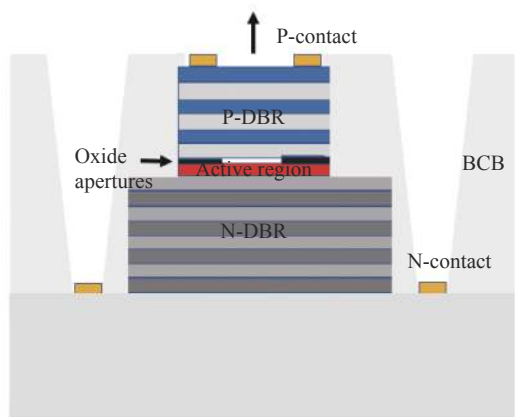


图 1 VCSEL 的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of VCSEL

1.1 VCSEL 本征带宽限制因素

VCSEL 的调制带宽限制主要来自于其内部本征带宽限制和外部寄生效应。VCSEL 的小信号调制可通过传递函数来表示:

$$H(f) = \frac{f_R^2}{f_R^2 - f^2 + jf\gamma} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)}, \quad (1)$$

公式 (1) 是由本征传递函数与电寄生效应引入的传递函数相乘得出的。其中 f_p 为寄生截止频率, f_R 为弛豫振荡频率, 理想激光器 f_R 的弛豫振荡频率可表示为注入载流子和生成的光子之间相互作用的动力学:

$$f_R = D \sqrt{I_0 - I_{th}}, \quad (2)$$

其中,

$$D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\Gamma v_g \eta_i \frac{\partial g}{\partial n}}{q V_p \chi} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中: $\frac{\partial g}{\partial n}$ 为量子阱的微分增益; $\chi = 1 + \tau_s / \tau_c$ 为传输系数, τ_s 为通过腔未掺杂部分进入有源区量子阱时间, τ_c 为有源区热传输发射时间; V_p 为光子占据的腔体积; Γ 为光限制因子; v_g 为光子的群速度; q 为电荷; I_{th} 为阈值电流。调制频率随电流变化的反应速率 (即: D 因子) 决定了理想激光器的调制速度, 由此可以通过增大 D 因子来增大调制速率。提高 D 因子的方法主要有: (1) 增大光限制因子; (2) 减小有源区体积; (3) 增加有源区微分增益。电流孔径的减小可减小有源区体积, 增大 D 因子。

$H(f)$ 本质上是一个二阶低通滤波器, 其阻尼谐振位于截止频率附近。在 f_R 之下强度调制一直都与电流调制一致, 在弛豫谐振处该响应得到增强。在谐振点之上, 该响应急剧降低。根据阻尼的大小, 该谐振的实际峰值频率 f_p 略低于 f_R 。 f_{3dB} 是电功率响应降低到其直流值一半时的频率, 在弱阻尼下该频率略高于 f_R 。可知通过增加光子密度或输出功率可以使 f_R 增加。该增加将一直持续到光子密度接近 $\frac{1}{\epsilon}$ 为止, 这时由于增益压缩, 微分增益略有减小。阻尼因子 γ 为:

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

其中,

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

γ_0 是由于自发辐射对激光模的贡献而引起的偏

移。最大的可实现带宽被弛豫振荡阻尼所限制,当 $f_p=0$, 且 $f_R = f_{3dB}$ 时, 阻尼最佳且带宽最大。该点由 K 因子决定, K 因子确定了激光器的本征调制带宽能力。减小 K 因子的方法主要有: (1) 增大有源区介质的微分增益, 可以通过使用 InGaAs 或 InGaAlAs 量子阱来代替 GaAs 量子阱实现; (2) 减小光子寿命 τ_p , 可用通过调整顶层相位来实现^[2-3]。

1.2 寄生电阻电容影响

寄生效应是限制 VCSEL 高速特性的另一个重要因素。寄生主要分为内部寄生与电极寄生两部分。

以典型的氧化限制型 VCSEL 为例, 其横截面示意图与寄生如图 2 所示。极板电容 C_p 表示从探头端到金属触点的信号与地之间的电容。 C_p 的值根据极板的布局和极板之间的材料不同, 从几十 fF 到几百 fF 不等。现在最常用的填平材料是聚酰亚胺和苯丙环丁烯 (BCB), 比使用二氧化硅填平所带来的极板电容要小很多。极板电阻 R_p 是极板损耗的原因。由于它在欧姆范围内, 通常相对较小, 在小信号模型中有时被忽略。极板电容 C_p 要尽力优化到最小, 而极板电阻 R_p 要做到最大, 这样能够有效阻止电流流经它们^[3]。镜面电阻 R_{mirr} 包括上下 DBR 的电阻。它包括了在偏置点处异质结的净微分阻抗。N-DBR 由于材料的损耗和电阻性低, 所以减小寄生电阻主要是针对 P-DBR, 可以通过 DBR 缓变层的各种带宽带隙工程方案来实现低电阻^[4-5], 对于氧化限制型 VCSEL, 也可以采用腔内接触的 (部分) 未掺杂半导体反射镜来实现^[6-7]。但腔内接触结构仍然存在很多问题, 例如电流注入的均匀性, 有源区附近的高掺杂接触层的光损耗和侧向电阻等。 R_{sheet} 表示 n-接触层中的薄层电阻, R_{cont} 表示所有接触的接触电阻。所有这些电阻中镜面电阻 R_{mirr} 占最大部分, 在小信号模型中, 可以组合成 $R_m = R_{mirr} + R_{sheet} + R_{cont}$ 。台面电容 C_{mesa} 是电流孔径下内部区域的串联氧化物电容。台面电容 C_{mesa} 取决于台面和孔径的直径以及氧化物和本征半导体层的厚度。电容 C_j 表示电流流过的孔径区域的二极管结电容。在正常的正向偏置条件下, C_j 通常由扩散电容控制, 它模拟了存储在固有的分离限制型异质结构中的少数载流子的调制。结果表明, 扩散电容不仅与载流子寿命有关, 而且与分离限制型异质结构的设计有关^[3]。

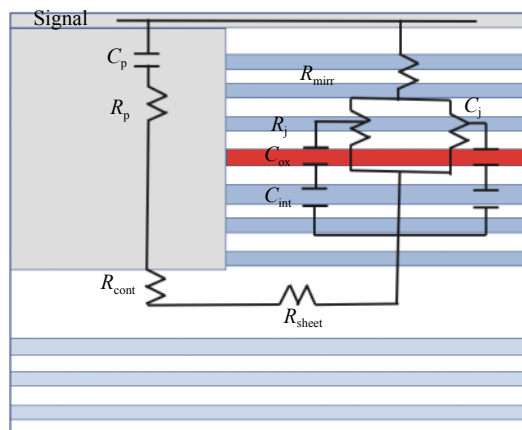


图 2 VCSEL 电阻电容模型示意图

Fig.2 Resistance and capacity model of VCSEL

2 850 nm VCSEL 调制研究进展

VCSEL 调制速率的提升, 一方面可以通过提高 VCSEL 的调制带宽来实现, 另一方面可以通过先进的编码调制技术来实现。VCSEL 调制带宽的提升可以从本征和寄生两方面入手, 本征上主要有提高微分增益、调节光子寿命、提高光限制因子这三方面。寄生上主要是降低电阻和电容。先进的调制编码技术包括多脉冲幅度调制、无载波幅度相位调制和离散多音调制^[8]。其中多脉冲幅度调制 (PAM) 是所有调制里复杂性和成本最低的。脉冲幅度调制的定义是: 把周期性脉冲序列看作正弦载波, 用模拟信号对它进行振幅调制。其通过二进制映射可以直接实现 $\log_2 N$ 倍的速率提升, 非常适合低成本的 VCSEL 多模光纤 (MMF) 光互连。

传统的调制方式为不归零 (NRZ) 调制, 即采用高、低两种信号电平来表示要传输的数字逻辑信号 (0, 1), 每个传输的符号可以传输 1 bit 的逻辑信息。因为只有两个幅度电平也被称为 NRZ。对于 PAM(N) 来说, N 代表符号中可能的信号电平数, 符号率 D 随之降低 $\log_2 N$ 倍, 若所需的数据速率为 R , 则 $D = R \log_2 N$ 。PAM4 调制采用 4 个信号电平 (11, 10, 00, 01) 来进行信号传输, 因此其每个传输的符号可以表示两个 bit 的逻辑信息, 即频谱效率为 $2 \text{ bit}/(\text{second} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。如图 3 所示。PAM8 采用 8 个不同的信号电平 (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111) 来进行信号传输。PAMN 虽然提高了频谱效率, 然而, 增加电平数量必然导致对信噪比的要求更加苛刻^[9-11]。

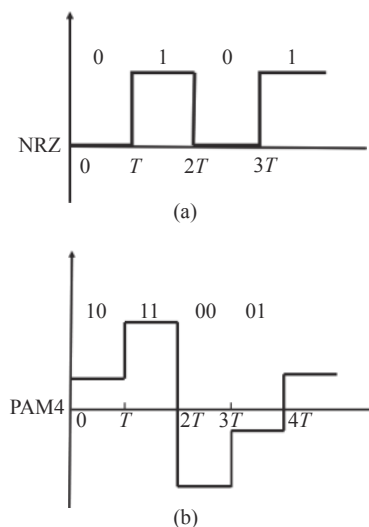


图 3 (a) NRZ 信号波形图, (b) PAM4 信号波形图

Fig.3 (a) NRZ signal waveform and (b) PAM4 signal waveform

2.1 850 nm VCSEL 的 NRZ 调制

对于 NRZ 调制, 从提高微分增益、调节光子寿命和降低寄生来分别阐述。

(1) 提高微分增益

提高微分增益主要依靠使用应变量子阱材料来实现。2002 年, T. Aggerstam^[12] 在量子阱中加入一定量的铟 (10% 或更少), 采用 InGaAs/AlGaAs 量子阱, 相对于 GaAs/AlGaAs 量子阱, 其微分增益增加了一倍, 12 μm 孔径的多模 850 nm VCSEL, 80 °C 下其调制速率为 10 Gbit/s。2009 年, Westbergh^[13] 采用应变 InGaAs/AlGaAs 量子阱和双氧化层, 氧化孔径为 9 μm, 室温下实现了 32 Gbit/s 无误码传输, 其阈值电流为 0.6 mA, 其斜率效率 0.8 W/A, 它对应的微分子效率约为 55%。2009 年, 柏林工业大学 (TUB)^[14] 在 VCSEL 中采用 InGaAlAs 有源区和优化掺杂, 氧化孔径为 9 μm 器件, 室温下实现了 39 Gbit/s 的无误码率传输。2010 年, 查尔姆斯理工大学 (CUT)^[15] 采用双层氧化限制层和 InGaAs 量子阱, 电流孔径直径为 7 μm 的 VCSEL, 室温下实现 40 Gbit/s 无误码传输, 其阈值电流为 0.4 mA。2012 年, CUT 的 Larrson 研究组^[16] 采用 In_{0.1}Ga_{0.9}As/Al_{0.37}Ga_{0.63}As 量子阱实现了室温下 3 dB 带宽为 28 GHz, 44 Gbit/s 的无误码率传输。2016 年, 伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校 (UIUC) 的 Feng 研究组^[17], 采用 In_{0.072}Ga_{0.928}As/Al_{0.37}Ga_{0.63}As 量子阱, 并通过 4 层低 Al 含量的氧化层减小寄生电容以及使用 AlAs 作为散热层, 实现了带宽为 28.2 GHz、速率为

50 Gbit/s 的无误码传输。

(2) 调节光子寿命

光子寿命的减小一般通过调节反向层厚度、缩短腔长来实现, 2012 年, CUT 的 Larrson 研究组^[16] 通过调整反向层厚度, 缩短腔长到半波长, 调节光子寿命, 改善了载流子输运并且提高了光限制因子, 其制备了 2~11 μm 的氧化孔。实现了室温下 3 dB 带宽为 28 GHz, 速率为 44 Gbit/s 的无误码率传输。2016 年, 采用 CUT 的 VCSEL 器件, IBM 与 Finsar 报道了一个 NRZ 调制 71 Gb/s 的传输速率^[18]。2015 年, CUT^[19] 通过将主氧化物孔放置在量子阱两侧光场的第一个节点处, 增大了光限制。通过 3.5 μm 电流孔径的 850 nm VCSEL 实现了室温下带宽高达 30 GHz, 50 Gbit/s 的传输速率。其阈值电流为 0.25 mA。2018 年, UIUC^[20] 通过采用 λ/2 短腔、五个量子阱和 4.7 μm 的氧化孔径, 实现了室温下 3 dB 带宽最高约为 25 GHz, 同时 25 °C 下可在 100 m OM4 光纤上传输 46 Gbit/s 的无误码传输。同年, 国立台湾大学的研究组^[21], 设计制备了 λ/2 短腔 850 nm VCSEL, 其氧化孔径为 3.3 μm, 阈值电流为 0.8 mA, 在不使用预加重、均衡和前向纠错的情况下, 室温下实现了 3 dB 带宽为 25 GHz 以及 50 Gbit/s 的无误码率传输。

(3) 降低寄生

由于器件越来越小, 串联电阻和寄生电容成为限制其高速性能的一个主要因素, 减小寄生电容电阻能够增加寄生截至频率。1997 年, Y.C.Chang^[7] 使用 GaAs/AlGaAs 量子阱实现了带宽超过 20 GHz 的 VCSEL。这个器件的高速是通过低寄生实现的, 其采用离子注入和 5 μm 厚的聚酰亚胺进行填平制作共面电极, 减小器件寄生电容。极板电容为 42 fF, 极板串联电阻为 28.3 Ω。2002 年, T. Aggerstam^[12] 通过离子注入顶层 DBR 方式来减小氧化层电容。2009 年, Westbergh^[13] 采用无掺杂衬底、双氧化物孔和带隙设计的 DBR 来降低寄生, 其串联电阻大约 90 Ω。氧化孔直径为 9 μm 的 850 nm VCSEL 在室温下实现了 32 Gbit/s 无误码传输。2010 年, CUT^[15] 采用双层氧化限制层与 InGaAs 量子阱, 电流孔径直径为 7 μm 的 850 nm VCSEL, 在室温下实现了 40 Gbit/s 无误码传输, 其阈值电流为 0.4 mA, 串联电阻 130 Ω。2012 年, CUT 的 Larrson 研究组^[16] 采用了 4 层低 Al 含量的 AlGaAs

氧化层减小寄生效应, 实现了室温下 3 dB 带宽为 28 GHz, 速率为 44 Gbit/s 的无误码率传输。2013 年, CUT^[22] 为了减小寄生电容, 在有源区上的 P 侧生长了两个主氧化层与四个二氧化层。使用 3 dB 带宽为 24 GHz 的 VCSEL 完成了 57 Gbit/s 的无误码传输。同年, NCU 的 Shi 研究组 hi 研究组^[23] 对 850 nm 氧化限制型 VCSEL 采用腐蚀氧化层, 降低寄生效应以及 Zn 扩散制作孔径减小谱宽和微分电阻, 实现了 41 Gbit/s 的传输速率, 其微分电阻为 100 Ω。2016 年, UIUC 研究组^[17] 在 850 nm VCSEL 中采用双氧化层和 4 层低 Al 含量的 AlGaAs 氧化层减小寄生效应, 在 n 型 DBR 中引入二元系 AlAs 层实现高效散热, 其差分电阻约 53 Ω。报道的 VCSEL 实现了 3 dB 带宽为 28.2 GHz 以及 50 Gbit/s 的无误码传输, 如图 4 所示。2018 年, 北京邮电大学 (BUPT)^[24] 通过对顶部 DBR 进行湿法刻蚀, 优化器件的阻尼, 设计制备了 850 nm VCSEL, 实现了小信号调制带宽为 16.37 GHz, 如图 5 所示。

在图 6 中显示了近年来 VCSEL 带宽的研究进展, 如图所示, 通过优化本征的方式已实现最大带宽为 30 GHz。通过减小寄生的方式已实现最大带宽为 28.2 GHz, 实际上很多时候两种方式同时使用的。

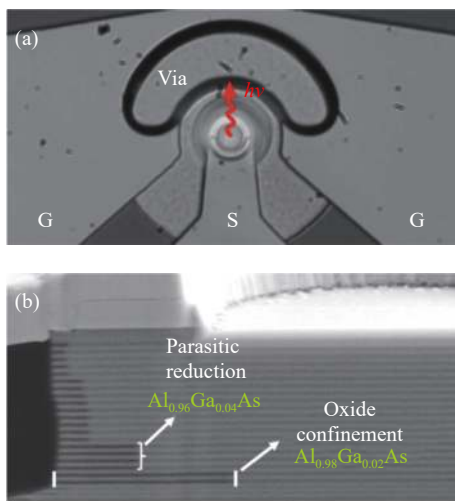


图 4 (a) VCSEL 器件的 GSG 顶视图, (b) VCSEL 横截面 SEM 图, 暗线是 p-DBR 中高铝氧化层^[17]

Fig.4 (a) Top view of the VCSEL device with ground-signal-ground (GSG), (b) SEM image of the cross section of VCSEL. The dark lines are the oxidized high Al-composition layers in the p-DBR stack^[17]

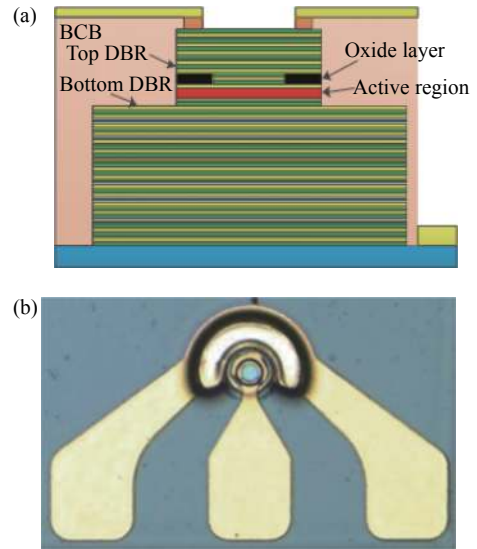


图 5 (a) 高速 VCSEL 的横截面示意图, (b) 已制备完成的 VCSEL 显微图像^[24]

Fig.5 Schematic diagram of cross-section of high speed VCSEL, (b) image of fabricated VCSEL^[24]

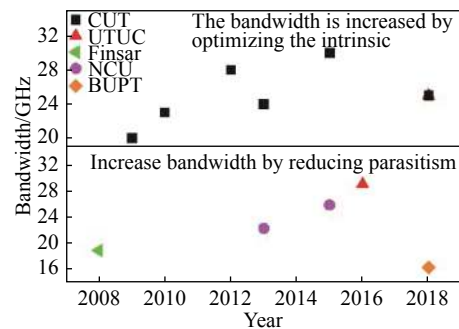


图 6 VCSEL 带宽进展

Fig.6 Progress of VCSEL bandwidth

2.2 850 nm VCSEL 的 PAM4 调制

单位符号承载的信息量翻倍意味着若要实现与 NRZ 同样的信号传输能力, PAM4 信号的符号速率只需要达到 NRZ 信号的一半即可, 这大大降低了链路的带宽需求。并且传输通道中的符号间干扰由于符号速率的下降对其造成的损耗大大减小。2011 年, CUT 的 Larsson 研究组^[25] 使用 12.5 Gbit/s 和 15 Gbit/s 的 850 nm VCSEL, 通过 PAM4 调制, 实现了在 200、300 m 的多模光纤上 25 Gbit/s 和 30 Gbit/s 的传输速率。接着分别于 2013 年、2015 年、2016 年实现了 60^[26], 70^[10], 94 Gbit/s^[27] 的链路速率, 速率的提高得益于电子手段的引入和光探测器的改进。2015 年, CUT^[28] 通过 PAM4 调制实现了 48.7 Gbit/s 的 850 nm

链路。2016 年,又实现了 60 Gbit/s 的链路速率^[29]。同年, OFS 公司^[30]采用多路复用技术,在接收误码率在 1×10^{-6} 的情况下,通过 PAM4 调制,实现 150 m 以上 51.5625 Gbit/s 的传输速率。华沙理工大学 (WUT)^[31]通过 PAM4 调制,在超过 100 m 多模光纤中成功实现了 108 Gbit/s 的传输。2017 年,佐治亚理工学院 (GT) 的 Lavrencik 小组^[32]运用 PAM4 调制以及脉冲整形,通过使用 30 GHz 的 VCSEL 器件以及传输器均衡、脉冲响应,在不使用前向纠错的情况下实现了 100 Gbit/s 的无误码传输。2018 年,中国国立台湾大学 (NTU)^[33],在预加重 PAM4 格式的波形后,通过单模 VCSEL 在背对背、长 100 m OM4 多模光纤下成功实现传输速率 64 Gbit/s 的数据流。2018 年,GT 的 J.Lavrencik 等人^[34]使用已经成熟的调制速率为 28 Gbit/s 的 850 nm VCSEL,在不使用前向纠错或接受均衡调制下,通过 PAM4 调制,在超过 100 m 的 OM5 链路中实现 84 Gbit/s 数据传输。2019 年, TUB 的 Urs Hecht 等人^[35],运用 PAM4 调制,通过使用 28 GHz 的 850 nm VCSEL 前向反馈均衡实现了 80 Gbit/s 无误码传输。2020 年,中国国立台湾大学^[36],使用氧化孔径为 5.5 μm 的 850 nm VCSEL,通过 PAM4 调制实现 100 米 OM5 多模光纤 80 Gbit/s 速率传输。

在图 7 中显示了近年来 VCSEL 的 PAM4 调制进展,由图可见, PAM4 调制速率最大已实现 108 Gbit/s,调制速率主要集中在 50~100 Gbit/s, PAM4 技术已经相对成熟,调制速率集中在这个范围内的一个因素是 VCSEL 的光功率限制。

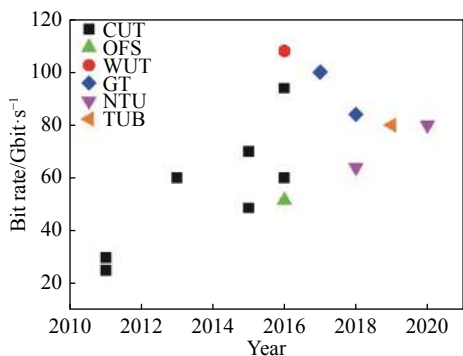


图 7 850 nm VCSEL PAM4 调制速率进展

Fig.7 Progress of PAM4 modulation speed of 850 nm VCSEL

总结来说, PAM4 相对于 NRZ 来说,实现了更高的调制速率,但代价也很明显,在相同比特率条件下,

PAM4 的灵敏度会比 NRZ 差 3.3 dB。这意味着相同条件下, PAM4 链路需要更多的光功率才能达到足够低的误码率^[37]。

2.3 850 nm VCSEL 的 PAM8 调制

近年来, PAM-8 调制的研究多了起来, 2013 年, CUT^[11]使用 850 nm VCSEL 通过 PAM8 调制和 OM4 多模光纤,在超过 100 m 的传输距离上实现了高达 35.2 Gbit/s 的数据速率传输,这是实验上首次实现 PAM8 调制。2017 年,苏黎世联邦理工学院 (ETH)^[38]通过 OM3 多模光纤在 25, 75, 125 m 距离分别实现了 108, 99, 90 Gbit/s 的传输速率。这些速率是通过使用 850 nm 多模 VCSEL 实现的。2019 年,上海交通大学 (SJTU)^[39]利用商品级的 850 nm VCSEL,在多模光纤链路上进行实验研究,通过 100 m 的 OM3 光纤传输,使用二元概率成形方式的 PAM8 调制实现了 75 Gbit/s 的传输速率。

在图 8 中显示了近年来 VCSEL 的 PAM8 调制进展,由图可见, PAM8 调制速率最大已实现 108 Gbit/s。PAM8 技术相对于 NRZ、PAM4 来说还有很多问题亟需解决。

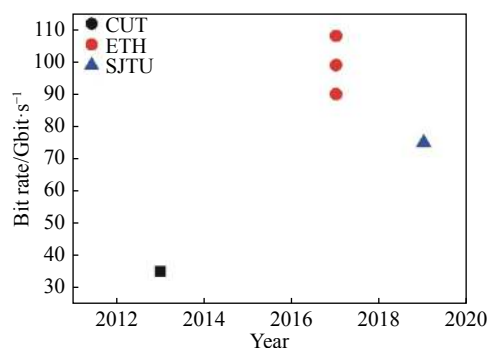


图 8 850 nm VCSEL PAM8 调制速率进展

Fig.8 Progress of PAM8 modulation speed of 850 nm VCSEL

总结来说,多脉冲幅度调制要实现同样的信号传输能力, PAM8 与 PAM4 相对 NRZ 来说,降低了链路对带宽的要求,并且传输通道中的符号间干扰由于符号速率的下降对其造成的损耗大大减小。但同时,它们的灵敏度会比 NRZ 调制的差,需要更多的光功率才能达到足够低的误码率。

3 结 论

文中主要从调制带宽和 PAM 技术这两方面讨论

了 VCSEL 高速的原理和进展。总之,提高 VCSEL 带宽的主要方法有调节光子寿命、减小有源区体积减小寄生。PAM 技术相对于其他调制技术具有简单、低成本的特点,是提高传输速率的有效手段。VCSEL 现今制造出的 NRZ 最大调制带宽为 30 GHz,所制备出的最大 PAM4、PAM8 调制速率分别为 94 Gbit/s、108 Gbit/s。未来,VCSEL 速率的进一步提高,在器件方面,依靠高速器件可靠性的提升来实现,在调制方面,依靠提出更先进的调制技术来实现。

参考文献:

- [1] Lv Zhaochen. The study of high speed 850nm VCSEL array[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018: 9-19. (in Chinese)
吕朝晨. 高速850 nm垂直腔面发射激光器阵列研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018: 9-19.
- [2] Yu-Chia Chang, Larry A Coldren, Yu-Chia Chang. Design and Performance of High-Speed VCSELs[M]//VCSELs. Berlin: Springer, 2013.
- [3] Philip Moser. Energy efficient oxide confined VCSELs for optical interconnects in data centers and supercomputers[D]. Berlin: Technical University of Berlin, 2015: 40-52.
- [4] Peters M G, Thibeault B J, Young D B, et al. Band-gap engineered digital alloy interfaces for lower resistance vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(25): 3411-3413.
- [5] Lear K L, Schneider R P. Uniparabolic mirror grading for vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 68(5): 605-607.
- [6] Thibeault B J, Bertilsson K, Hegblom E R, et al. High-speed characteristics of low-optical loss oxide-apertured vertical-cavity lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(1): 11-13.
- [7] Chang Y C, Wang C S, Johansson L A, et al. High-efficiency, high-speed VCSELs with deep oxidation layers [J]. *Electron Lett*, 2006, 42(22): 1281-1282.
- [8] Justin L, Siddharth V, Antony T V, et al. Scaling VCSEL-MMF links to 1 Tb/s using short wavelength division multiplexing [J]. *J Lightwave Technol*, 2018, 36(18): 4138-4145.
- [9] Sun L, Wang C, Du J, et al. Dyadic probabilistic shaping of PAM-4 and PAM-8 for cost-effective VCSEL-MMF optical interconnection [J]. *IEEE Photonics J*, 2019, 11(2): 1-11.
- [10] Szczerba K, Westbergh P, Karlsson M, et al. 70 Gbit/s 4-PAM and 56 Gbit/s 8-PAM using an 850 nm VCSEL [J]. *J Lightwave Technol*, 2015, 33(7): 1395-1401.
- [11] Szczerba K, Karlsson M, Andrekson P, et al. 35.2 Gbit/s 8-PAM transmission over 100 m of MMF using an 850 nm VCSEL[C]//European Conference & Exhibition on Optical Communication, 2013.
- [12] Thomas Aggerstam, Rickard M von Wuerttemberg, Christine Runnstrom, et al. Large aperture 850 nm oxide-confined VCSELs for 10 Gbit/s data communication[C]//Proc SPIE, 2002, 4649: 19-24.
- [13] Westbergh P, Gustavsson J S, Haglund A, et al. 32 Gbit/s multimode fibre transmission using high-speed, low current density 850 nm VCSEL [J]. *Electron Lett*, 2009, 45(7): 366-368.
- [14] Blokhin S A, Lott J A, Mutig A, et al. Oxide-confined 850 nm VCSELs operating at bit rates up to 40 Gbit/s [J]. *Electron Lett*, 2009, 45(10): 501-503.
- [15] Westbergh P, Gustavsson J S, Koegel B, et al. 40 Gbit/s error-free operation of oxide-confined 850 nm VCSEL [J]. *Electron Lett*, 2010, 46(14): 1014-1016.
- [16] Westbergh P, Safaisini R, Haglund E, et al. High-speed 850 nm VCSELs with 28 GHz modulation bandwidth operating error-free up to 44 Gbit/s [J]. *Electron Lett*, 2012, 48(18): 1145-1147.
- [17] Liu M, Wang C Y, Feng M, et al. 50 Gb/s error-free data transmission of 850 nm oxide-confined VCSELs[C]//Optical Fiber Communication Conference, 2016.
- [18] Kuchta D M, Rylyakov A V, Doany F E, et al. 70+Gb/s VCSEL-based multimode fiber links[C]//Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. IEEE, 2016.
- [19] 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]. *Electron Lett*, 2015, 51(14): 1096-1098.
- [20] Wang H, Qiu J, Yu X, et al. 85°C operation of 850 nm VCSELs deliver a 42 Gbit/s error-free data transmission for 100 meter MMF link[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). IEEE, 2018.
- [21] 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), 2018.
- [22] Westbergh P, Haglund E P, Haglund E, et al. High-speed 850 nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s [J]. *Electron Lett*, 2013, 49(16): 1021-1022.
- [23] Wun J M, Shi J W, Yan J C, et al. Oxide-relief and Zn-diffusion 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with extremely

- small power consumption and large bit rate-distance product for 40 Gbit/sec operations[C]//Optical Fiber Communication Conference & Exposition & the National Fiber Optic Engineers Conference. IEEE, 2013.
- [24] Hu S, He X, He Y, et al. Impact of damping on high speed 850 nm VCSEL performance [J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(11): 51-54.
- [25] Szczerba Krzysztof, Westbergh Petter, Karout Johnny, et al. 30 Gbit/s 4-PAM transmission over 200 m of MMF using an 850 nm VCSEL.[C]//European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2011.
- [26] Szczerba K, Westbergh P, Karlsson M, et al. 60 Gbits error-free 4-PAM operation with 850 nm VCSEL [J]. *Electron Lett*, 2013, 49(15): 953-955.
- [27] Szczerba K, Lengyel T, Karlsson M, et al. 94-Gbit/s 4-PAM using an 850 nm VCSEL, pre-emphasis, and receiver equalization [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2016, 22(28): 2519-2521.
- [28] Jose M Castro, Rick Pimpinella, Bulent Kose, et al. 48.7 Gbit/s 4-PAM transmission over 200 m of high bandwidth MMF using an 850 nm VCSEL [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27(17): 1799-1801.
- [29] Jose Manuel Castro, Rick Pimpinella, Bulent Kose, et al. Investigation of 60 Gbit/s 4-PAM using an 850 nm VCSEL and multimode Fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 2016, 33(16): 3825-3826.
- [30] Sun Y, Lingle R, Shubochkin R, et al. 51.56 Gbit/s SWDM PAM4 transmission over next generation wide band multimode optical fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference. IEEE, 2016.
- [31] Grzegorz Stepniak, Lukasz Chorchos, Mikel Agustin, et al. Up to 108 Gbit/s PAM 850 nm multi and single mode VCSEL transmission over 100 m of multi mode Fiber[C]//Ecoc, European Conference on Optical Communication. VDE, 2016.
- [32] Lavrencik J, Varughese S, Gustavsson J S, et al. 100 Gbit/s PAM-4 Transmission over 100 m OM4 and Wideband Fiber using 850 nm VCSELs[C]//Ecoc, European Conference on Optical Communication, 2016.
- [33] Hsuan-Yun K, Cheng-Ting T, Shan-Fong L, et al. Single-mode VCSEL for pre-emphasis PAM-4 transmission up to 64 Gbit/s over 100–300 m in OM4 MMF [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 666.
- [34] Justin L, Siddharth V, Antony T V, et al. Scaling VCSEL MMF Links to 1 Tb/s using short wavelength division multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2018, PP: 1-1.
- [35] Hecht U, Nikolay Ledentsov, Lukasz Chorchos, et al. 120 Gbit/s multi-mode fiber transmission realized with feed forward equalization using 28 GHz 850 nm VCSELs[C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). IET, 2019.
- [36] Cheng Yi Huang, Huai Yung Wang, Chun Yen Peng, et al. Multimode VCSEL enables 42 GBaud PAM-4 and 35 GBaud 16-QAM OFDM for 100 m OM5 MMF data link [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 36963-36973.
- [37] Yang Zhuokai, Tian Sicong, Larisch Gunter, et al. High-speed vertical-cavity surface-emitting laser based on PAM4 modulation [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 399-413. (in Chinese)
杨卓凯, 田思聪, Larish Gunter, 等. 基于PAM4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.
- [38] Gebrewold S A, Josten A, Baeuerle B, et al. PAM-8 108 Gbit/s transmission using an 850 nm multi-mode VCSEL[C]//Lasers & Electro-optics Europe & European Quantum Electronics Conference. IEEE, 2017.
- [39] Sun L, Wang C, Du J, et al. Dyadic probabilistic shaping of PAM-4 and PAM-8 for cost-effective VCSEL-MMF optical interconnection [J]. *IEEE Photon J*, 2019, 11(2): 1-11.