

文章编号: 1000-7032(2020)04-0399-15

## 基于 PAM4 调制的高速垂直腔面发射激光器研究进展

杨卓凯<sup>1,2</sup>, 田思聪<sup>1\*</sup>, LARISCH Gunter<sup>1\*</sup>, 贾晓卫<sup>1,3</sup>,  
佟存柱<sup>4</sup>, 王立军<sup>4</sup>, BIMBERG Dieter<sup>1,5</sup>

- (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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛科技大学 数理学院, 山东 青岛 266062;  
4. 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;  
5. 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:** 短距离光互联技术在云计算、5G 通信、物联网技术等方面有重要的商业应用价值。基于高速垂直腔面发射激光器 (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 与多模光纤组成链路、采用直接调制检测、并使用如四电平脉冲幅度调制 (Four-level pulse amplitude modulation, PAM4) 等的高阶调制模式是现阶段短距离光互联链路方案的首选。本文首先介绍了短距离光互联应用的研究现状; 第二部分介绍了 VCSEL 的发展、结构以及动态参数; 第三部分介绍了 PAM4 调制方法及伴随使用的各种电子技术 (均衡, 前向纠错, 脉冲整形); 第四部分介绍了提高单链路速率的波分复用 (Wavelength division multiplexing, WDM) 技术; 最后对以高速 VCSEL、多模光纤、直接调制检测、PAM4 调制以及波分复用技术的短距离光互联方案应用前景做了总结和展望。

**关键词:** 垂直腔面发射激光器; 高速调制; 四电平脉冲幅度调制 (PAM4); 波分复用

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20204104.0399

## High-speed Vertical-cavity Surface-emitting Lasers Based on PAM4 Modulation

YANG Zhuo-kai<sup>1,2</sup>, TIAN Si-cong<sup>1\*</sup>, LARISCH Gunter<sup>1\*</sup>,  
JIA Xiao-wei<sup>1,3</sup>, TONG Cun-zhu<sup>4</sup>, WANG Li-jun<sup>4</sup>, BIMBERG Dieter<sup>1,5</sup>

- (1. Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. School of Mathematics & Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266062, China;  
4. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
5. Center of Nanophotonics, Institute of Solid State Physics, Technische Universität Berlin, D-10623, Berlin, Germany)

\* Corresponding Authors, E-mail: tiansicong@ciomp.ac.cn; larisch@ciomp.ac.cn

**Abstract:** The short-reach optical interconnection technology has important commercial application value in many fields, such as cloud computing, 5G communication and internet of things technology. The system based on high-speed vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) and multi-mode fiber, using direct modulation detection and high-order intensity modulation mode such as four-level pulse amplitude modulation (PAM4) is proved to be an ideal solution for short-reach

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61774156); 国家重点研发计划(2018YFB2201000); 中国科学院青年创新促进会(2018249)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61774156); National Key R&D Program of China(2018YFB2201000); Youth Innovation Promotion Association of The Chinese Academy of Sciences(2018249)

optical interconnection. In this article, firstly, the research of short-reach optical interconnection is introduced; secondly, the development, structure and dynamic parameters of VCSELs are studied; thirdly, PAM4 modulation method and various electronic technologies (equalization, forward error correction and pulse shaping) are reviewed; fourthly, the wavelength division multiplexing (WDM) technology which can increase the rate of single link is mentioned; lastly, summary and outlook of the short-reach optical interconnection technology based on high-speed VCSEL, multimode fiber, direct modulation detection, PAM4 modulation and WDM are introduced.

**Key words:** vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL); high-speed modulation; four-level pulse amplitude modulation (PAM4); wavelength division multiplexing (WDM)

## 1 引 言

随着 4k/8k 高清晰度视频、云计算、物联网技术与 5G 通信技术的不断普及与愈发成熟,数据中心将会面临流量急剧增加的状况。目前解决这种态势的一种方法是寻求支持更大容量的短距离光互连技术<sup>[1]</sup>。

短距离光互连技术中比较常用的方案是基于垂直腔面发射激光器 (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 与多模光纤 (MMF), 并采用直接调制检测。这种方案在成本和效率方面皆具有优势<sup>[2-3]</sup>, 其缘由主要集中在 VCSEL 是一种节能高效的光源, 其面发射特性使其可用于大批量晶圆级的制造和测试, 节约器件及检测成本, 而 MMF 的使用则简化了集成和组装。

在 IEEE 802.3bm 标准中, 25 Gbps 的光学链路即可满足其关于核心数据速率的要求, 仅分别需要使用 2 个和 4 个光纤链路便可支持 50 Gbps 和 100 Gbps 数据传输速率。

但是, 随着数据流的爆炸式增长, IEEE P802.3bs 标准制定组设想的新的面向更高速通信服务的 400 GbE 解决方案中, 若继续沿用 25 Gbps 的光学链路, 则在每个方向上将需要 16 条光纤。过多的光纤数量会增加管理、器件以及占地成本, 因此需要寻找减少光纤数量的替代方案。优选的解决方案将继续保留 VCSEL、MMF 和直接调制检测方法, 以此为核心并在此之上开发满足 100 Gbps 速率的单 VCSEL/光纤链路。

由于器件带宽限制, 100 Gbps 单 VCSEL/光纤链路通过传统的不归零 (Non-return-to-zero, NRZ) 调制方案在不借助波分复用等技术下是无法达到的。现有的达到该要求的链路均在调制方

案上做了文章, 并积极地引入各种新的技术 (均衡 (Equalization), 数字信号处理 (Digital signal processing, DSP), 脉冲整形 (Pulse sharpening), 前向纠错 (Forward error correction, FEC), 波分复用等)。例如, 佐治亚理工学院的 Lavrencik 小组运用了四电平脉冲幅度调制 (Four-level pulse amplitude modulation, PAM4) 以及脉冲整形 (Pulse sharpening) 实现了 850 nm VCSEL 以 100 Gbps 速度在 100 m 链路的无误差传输实验<sup>[4]</sup>; 华为通过使用十三阶双二进制 PAM4 与均衡实现了 100 (300) m MMF 上的 155 (100) Gbit/s 传输<sup>[5]</sup>。离散多音 (Discrete multi-tone, DMT) 调制方面, 华为与 VI System GmbH 合作, 采取 DMT 与离线 DSP 实现了单模 VCSEL 以 112 Gb/s 速度在 300 m MMF 下的传输<sup>[6]</sup>, 误码率控制在  $3.8 \times 10^{-3}$  (前向纠错硬判决) 之内; 德国弗劳恩霍夫海因里希赫兹研究所 (Fraunhofer Heinrich Hertz Institute)、VI System GmbH 与柏林工业大学 (TUB) 应用 DMT 以及各种 DSP 在误码率为  $2.7 \times 10^{-2}$  (前向纠错软判决) 极限下分别于 10, 300, 550 m-OM4 MMF 链路中, 展示了 161, 152, 135 Gb/s 传输速度<sup>[7]</sup>。

由此可以看出新的调制方式以及各种新技术 (均衡, 前向纠错, 脉冲整形, 波分复用) 在更高数据要求的短距离光互连链路中将会扮演越来越重要的角色。本文主要集中探讨高速 VCSEL、PAM4 调制模式以及与之伴随的各种电子技术 (均衡、前向纠错、脉冲整形、波分复用)。首先回顾了高速 VCSEL 的发展历史, 并论述了其结构与动态参数表征; 其次介绍了 PAM4 调制模式以及均衡、前向纠错、脉冲整形等电子技术; 然后引入了目前与 VCSEL 以及 PAM4 组合使用的波分复用技术; 最后对以高速 VCSEL、

PAM4 以及相应技术组成的短距离光互连的发展前景进行了展望。

## 2 高速垂直腔面发射激光器

### 2.1 高速垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 发展历史

日本东京工业大学的 Iga 教授于 1977 年首次提出 VCSEL 构想,1978 年发表了最初的研究成果<sup>[8]</sup>,1979 年研制出了世界上首支 VCSEL 器件<sup>[9]</sup>,其激射波长为 1.3  $\mu\text{m}$ ,材料体系为 In-GaAsP/InP。但这时的 VCSEL 器件阈值电流还很高,这使得它需要在很苛刻的条件下才能工作。而后在 1988 年,Iga 等实现了世界上第一支能够在室温条件下连续工作的 VCSEL,同年贝尔实验室也相继报道了能在室温条件下连续工作的 VCSEL,自此 VCSEL 成为光电器件方面的研究热点。1996 年,霍尼韦尔公司首次实现了 VCSEL 器件的商业化。第一代 VCSEL 激光器是基于 GaAs-AlGaAs 材料制成的,其依靠质子注入来限制电流,发射波长接近 850 nm<sup>[8-9]</sup>,并以此进行了器件的标准化。因此,尽管后续光电器件市场经历了一系列的波折<sup>[10]</sup>,但 850 nm 光谱区的 VCSEL 直到今日依然占据着主导地位。

2001 年,IBM 报道了首支通过氧化限制层来限制电流的 850 nm VCSEL,比特率达到 20 Gbit/s,这种通过氧化限制层来减小 VCSEL 阈值电流的构型思路目前仍被各大厂商以及研究所沿用。2008 年,Finisar 成功制备了在室温下(25  $^{\circ}\text{C}$ )比特率高达 30 Gbit/s 的 GaAs 量子阱 VCSEL,其最大带宽达到了 19 GHz<sup>[11]</sup>。2009 年,瑞典的查尔莫斯科技大学(CUT)使用 InGaAs 量子阱和双氧化物层实现了 25  $^{\circ}\text{C}$  时 32 Gbps 的无差错数据传输<sup>[12]</sup>。同一年,柏林工业大学(TUB)报道了 25  $^{\circ}\text{C}$  工作条件下的 40 Gbps 无误差传输速率<sup>[13]</sup>。2012 年,CUT 展示了一款高速 VCSEL,在 25  $^{\circ}\text{C}$  时调制带宽为 28 GHz,实现了 44 Gbps 无差错传输<sup>[14]</sup>。CUT 紧接着于 2013 年发布了使用 24 GHz 3 dB 带宽的 VCSEL 完成 57 Gbps 无差错传输的报道<sup>[15]</sup>,以及 2015 年同国际商业机器公司(IBM)的合作,共同完成了 71 Gbps 速率的无差错传输,此时他们开始引入均衡功能<sup>[16]</sup>。

在这一时间阶段,整体 VCSEL 链路的传输速度呈现了飞速发展的态势,而这很大程度上理应

归功于 VCSEL 各项性能尤其是带宽的增强。截止到目前,CUT<sup>[17]</sup>、伊利诺伊州大学<sup>[18]</sup>和 Finisar<sup>[19]</sup>均已制备出调制带宽约为 30 GHz 的 850 nm 氧化限制 VCSEL。在其他波长方面,中国台湾中央大学(NCU)在 940 nm 处使用“氧化物释放”来进行横向光学和电流限制,以及使用 Zn 扩散来实现低电阻,从而制备了具有类似带宽的氧化限制 VCSEL<sup>[20]</sup>;柏林工业大学(TUB)在 980 nm 处制备出了 35 GHz 氧化物限制的 VCSEL<sup>[21]</sup>;CUT 和 HPE 合作在 1 060 nm 波长下制备出了具有 23 GHz 带宽的 VCSEL<sup>[22]</sup>。

但是 VCSEL 的带宽不可能一直持续增加下去,其受到热效应与寄生效应的限制,35 GHz 的调制带宽或多或少是常规氧化物限制的 VCSEL 的上限,再加之对单链路速率要求将会迎来从 25 Gbps 到 100 Gbps 的爆炸式增长,单纯的氧化限制 VCSEL 与传统调制方式的组合已经很难满足要求。因此在未来更高速的链路研究中,各种新的调制方式(PAM4,DMT)与均衡、前向纠错,以及脉冲整形的运用<sup>[4-7]</sup>、波分复用(WDM)的引入<sup>[23-24]</sup>将会越来越普遍。

### 2.2 VCSEL 结构

如图 1 所示,VCSEL 的基本结构本质上是垂直谐振器,其通过将增益区与两个高反射 DBR 组合而构成。增益区域主要由一组量子阱排列抑或是一沓量子点堆积而成,其能够提供有效的光学放大。DBR 反射镜由高折射率材料和低折射率材料交替层叠构成,每层的光学厚度是 1/4 波长,在谐振波长处拥有 0.99 或更大的功率反射率。电流经由顶部和底部的金属接触注入中心有源增益区域从而激发器件发光。

氧化限制型 VCSEL 会在材料生长中加入高

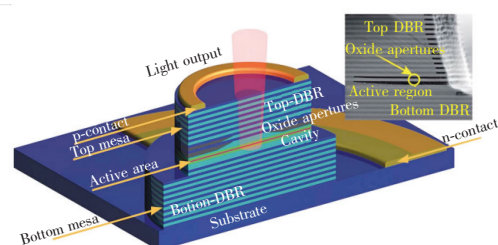


图 1 顶发射 VCSEL 的剖面示意图<sup>[25]</sup>。插图是高速 VCSEL 的扫描电子显微镜剖面图。

Fig. 1 Schematic diagram of a top-emitting VCSEL<sup>[25]</sup>. The inset picture is a scanning electron microscope image of a high-speed VCSEL cross section after cleaving.

Al 含量的 AlGaAs 层,通过不同 Al 含量的 AlGaAs 层氧化速率不同的原理来进行选择性氧化以形成氧化物孔,其能起到限制电流以及引导光场的作用。氧化物孔的使用可以有效地减少光学损耗,降低阈值电流,并提高 VCSEL 的功率转换效率。

通常顶部 DBR 反射镜的功率反射率被设置在 0.99 ~ 0.999 之间,输出光通过顶部耦合发射,此时底部 DBR 反射镜的功率反射率接近于 1.0。但某些情况,可以通过增加 DBR 周期的数量反过来将顶部 DBR 的功率反射率设置为接近 1.0,而将底部 DBR 的功率反射率设置为低于 0.999,从而可以让 VCSEL 经由底部发射出光。

### 2.3 VCSEL 动态参数

半导体激光器的本征动态行为可以通过速率方程模型<sup>[26]</sup>进行描述,单模速率方程可用于描述有源区内载流子和光子的产生与损耗:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV_a} - \frac{N}{\tau} - v_g g N_p, \quad (1)$$

$$\frac{dN_p}{dt} = \Gamma v_g g N_p + \Gamma \beta_{sp} R_{cp} - \frac{N_p}{\tau_p}, \quad (2)$$

其中,  $N(\text{cm}^{-3})$  是载流子密度,  $N_p(\text{cm}^{-3})$  是光子密度,  $\eta_i$  是注入效率,  $I(\text{mA})$  是注入电流,  $q$  是电子电荷,  $V_a(\text{cm}^3)$  是有源区体积,  $\tau(\text{s})$  是载流子寿命,  $\tau_p(\text{s})$  是光子寿命,  $v_g$  是激光模式的群速度,  $g$  是增益,  $\Gamma$  是光学限制因子,  $\beta_{sp}$  是自发射因子,  $R_{cp}$  是自发的重组率。

公式(1)用于描述有源区中的载流子密度,公式(2)用于描述腔中激光模式的光子密度。多模 VCSEL 的本征动态调制行为同样可用单模速率方程来进行理解和描述,其表现与单模 VCSEL 非常相似<sup>[27-29]</sup>。

图 2 给出了 VCSEL 与高频驱动源的小信号模型,包括电压源  $V_s$  和特征阻抗  $Z_0$ <sup>[30]</sup>。

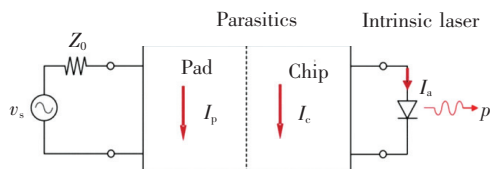


图 2 高频驱动电源驱动的 VCSEL 小信号模型<sup>[30]</sup>

Fig. 2 Small-signal model of a VCSEL with the high-frequency driving source<sup>[30]</sup>

VCSEL 的小信号调制可通过传递函数(公式(3))来表示,其本质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。式中有 3 个核心参数:弛豫共振频率  $f_R$ , 阻尼因子  $\gamma$  和寄生截止频率  $f_p$ , 下面将分别介绍。

$$H(f) = H_i(f) \cdot H_{par}(f) = \frac{f_R^2}{f_R^2 - f^2 + i \cdot f \cdot \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)} \cdot \frac{1}{1 + i \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)}, \quad (3)$$

小信号响应可以通过在 VCSEL 运行的偏置电流上再叠加小的正弦调制电流获得。本征调制传递函数  $H_i(f)$  定义为<sup>[31]</sup>:

$$H_i(f) = A \times \frac{f_R^2}{f_R^2 - f^2 + i \frac{f}{2\pi} \gamma}, \quad (4)$$

其中  $A$  是常数,  $f_R$  是弛豫共振频率,  $i$  是虚数单位,  $\gamma$  是阻尼因子。该传递函数可以近似理解为具有阻尼共振峰值的二阶低通滤波器<sup>[31]</sup>。

弛豫共振频率  $f_R$  是激光腔内载流子和光子之间的本征振荡频率,其通过激光腔中的受激发射相互作用,可近似表示为:

$$f_R = \frac{\omega_R}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma v_g}{q \cdot V_a} \cdot \frac{(\partial g / \partial N)}{\chi} (I - I_{th})}, \quad (5)$$

其中  $\eta_i$  是内部量子效率,  $\Gamma$  是光学限制因子,  $v_g$  是光子群速度,  $\partial g / \partial N$  是微分增益,  $I_{th}$  是阈值电流,  $V_a$  是有源区体积,  $\chi$  是传输因子。

由公式(5)可以看出弛豫共振频率随偏置电流的平方根增加,引入  $D$  因子<sup>[32]</sup> 表征弛豫共振频率对驱动电流的依赖性,其可表示为:

$$D = \frac{f_R}{\sqrt{(I - I_{th})}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma v_g}{q \cdot V_a} \cdot \frac{(\partial g / \partial N)}{\chi}} (\text{GHz} \cdot \text{mA}^{-1/2}), \quad (6)$$

由本征调制传递函数(公式(4))可以看出,除了弛豫共振频率  $f_R$  外,阻尼因子  $\gamma$  同样限制着激光二极管的可实现带宽,  $\gamma$  表征腔中的能量损失率,它的增加将会有效地降低共振峰强度并导致频率响应更趋于平坦。

阻尼因子  $\gamma$  随着弛豫共振频率的增加而增加,如下式所示:

$$\gamma = K f_R^2 + \gamma_0, \quad (7)$$

这里  $K$  因子可以表示为:



$$K = 4\pi^2 \left( \tau_p + \frac{\varepsilon\chi}{v_g \partial g / \partial N} \right), \quad (8)$$

其中  $\tau_p$  是光子寿命,  $\varepsilon$  是增益压缩因子,  $\chi$  是传输因子,  $v_g$  是光子群速度,  $\partial g / \partial N$  是微分增益。阻尼偏移  $\gamma_0$  与差分载流子寿命成反比。

由传递函数可以看出,除了本征调制响应外,电寄生效应同样限制了 VCSEL 的调制带宽。由电寄生效应引入的传递函数可以表示为:

$$H_p(f) = B \times \frac{1}{1 + i(f/f_p)}, \quad (9)$$

其中  $B$  是常数,  $i$  是虚数单位,  $f_p$  是寄生截止频率。

如前所述, VCSEL 的本征调制响应是二阶系统的响应,其有两个关键参数:弛豫共振频率  $f_R$  和阻尼  $\gamma$ , 它们都随电流增加而增加, 阻尼  $\gamma$  随电流增加地会更快一些。不仅如此, 电流增大引起的自发热效应同样会影响器件性能, 产生额外的损耗<sup>[33]</sup>, 所以获得高调制带宽 VCSEL 的条件即是使其弛豫共振频率随电流的增加而迅速增加, 以在热饱和之前达到足够高的调制带宽。为此我们希望设计的 VCSEL 器件  $D$  因子足够大, 且  $K$  因子足够小。增大  $D$  因子的方法通常有两种: 其一是使用应变 QW (量子阱)<sup>[34-36]</sup> 寻求高差分增益, 其二则是采用半波长腔和小氧化物孔径来构筑高限制因子<sup>[37-39]</sup>。减小  $K$  因子的方法则通常是通过刻蚀或碳化硅沉积等方法调整顶部 DBR 以减小光子寿命<sup>[40-41]</sup> 来实现。

除此之外, 热效应与寄生效应也是 VCSEL 设计理应考虑的目标。高速 VCSEL 的热效应能够通过减少 VCSEL 的串联电阻<sup>[42]</sup>、使用具有高导热率的 DBR<sup>[43-44]</sup>、采用镀铜散热片<sup>[44]</sup> 等方法来进行减轻。寄生效应的减少则是通过在 VCSEL 设计与制备中尽可能地降低电阻和电容来实现, 通常的方法有: 修改设计 DBR 中的导带和价带界面以及掺杂分布, 将吸收损耗保持在最小值<sup>[45]</sup>; 在信号焊盘下面使用低介电常数的厚聚绝缘材料如聚酰亚胺和苯并环丁烯 (BCB) 作为支撑物从而实现台面平坦化并减小焊盘电容<sup>[46-48]</sup>; 由于存储在氧化物层上的电荷是 VCSEL 电容的主要贡献者, 引入多个深氧化层以及质子注入技术也可用于降低台面电容<sup>[49-51]</sup>。

图3显示了高速(28 GHz 带宽)850 nm 氧化物限制 VCSEL 的调制响应分析<sup>[52]</sup>。由图3(b)可以看出其本征调制带宽是大于 60 GHz 的。但

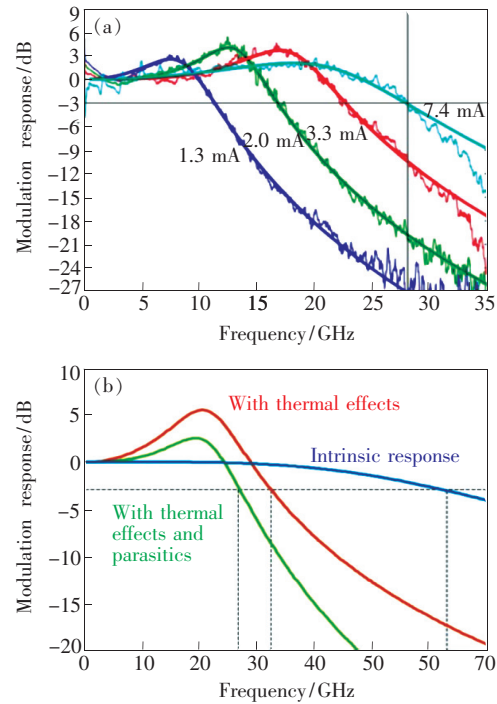


图3 (a) 高速 850 nm VCSEL<sup>[51-52]</sup> 在不同电流下测得的小信号调制响应; (b) 同一 VCSEL 的本征调制响应 (蓝色)、考虑热效应时的调制响应 (红色) 以及同时考虑热效应和寄生效应 (绿色) 时的调制响应。

Fig. 3 (a) Small-signal modulation response measured at high-speed 850 nm VCSEL at different currents<sup>[51-52]</sup>. (b) Intrinsic modulation response (blue) of the same VCSEL, the one considering thermal effects (red) and the one considering both thermal and parasitic effects (green).

若将热效应考虑进去, 调制带宽将骤然减小一半到略微高于 30 GHz, 如再把寄生效应也引入进去, 调制带宽则会减小到 30 GHz 以下。这说明了热效应和寄生效应的重要性, 同时也佐证了在热饱和之前达到高弛豫共振频率的必要性。此外, 由于高速 VCSEL 的工作环境温度通常接近 85 °C, 因此 VCSEL 器件在高温条件下保持性能的稳定同样关键<sup>[53-54]</sup>。

根据分析表明, 合理地降低电阻、电容和热阻, 可以达到接近 35 GHz 的调制带宽, 这或多或少被认为是常规氧化物限制的 VCSEL 的上限<sup>[55, 52]</sup>。

### 3 PAM4 调制

#### 3.1 PAM4 调制简介

传统的数字信号采用的调制方法中最常见的是 NRZ (Non-return-to-zero, 不归零) 调制方式, 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,具有很强的简单性与可靠性,但传输距离与传输速度目前均被器件带宽所限制。近年来,为了克服信道的带宽限制从而追求更高的传输速度,人们广泛应用先进的调制格式以及脉冲整形、均衡、前向纠错等电子技术,来降低电子或光学组件的波特率及带宽要求。电子调制器、解调器和激光驱动器电路的复杂性是短距离数据通信链路设计中的重要限制。较高的复杂度意味着较高的功耗,这在器件密集的数据中心是不希望看到的,而在不降低数据速率的情况下降低波特率的最简单且具有最低实现复杂性的方法是脉冲幅度调制(Pulse amplitude modulation, PAM)。对于 PAM( $N$ ) 而言,  $N$  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  $D = R/\log_2 N$ 。单从这个角度来看,貌似  $N$  值越大,链路频谱效率越高,最终速率也就越高。其实不然,随着脉冲电平数量的增加,信号

将对来自电路、光学设备和光学传输通道的损伤更加敏感,且整体链路的复杂度也会显著提高,而这些都会制约最终链路速率。与 PAM8 和 PAM16 相比,就系统性能和实现复杂性而言, PAM4 被广泛认为是一种更具吸引力的调制格式<sup>[56-57]</sup>。

如图 4 所示, PAM4 信号采用 4 个(11, 10, 00, 01)不同的信号电平来进行信号传输(而非 NRZ 的两个),因此其每个传输的符号可以表示 2 个 bit 的逻辑信息。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(Inter symbol interference, ISI)由于符号速率的下降对其造成的损耗大大减小。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(Bit error ratio, BER)。

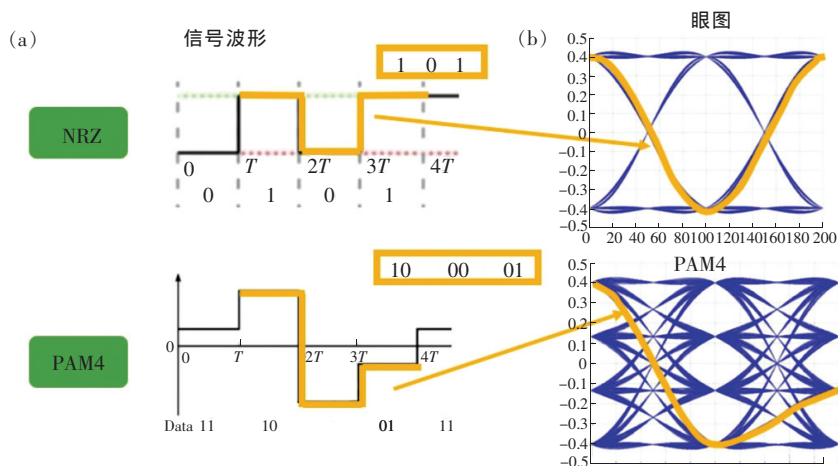


图 4 NRZ 与 PAM4 的信号波形及眼图,其中图(a)中黄线勾勒的信号波形与眼图(b)中的黄色勾勒的一条轨迹线相对应。

Fig. 4 Signal waveforms and eye diagrams of NRZ and PAM4, where the signal waveform outlined by the yellow line(a) corresponds to a trace line of eye diagram depicted by the yellow(b).

### 3.2 PAM4 链路中的电子技术

尽管 PAM4 由于高频谱效率具有在相同波特率(符号速率)条件下增加传输速度的优点,但其由于灵敏度降低存在误码率劣化的问题。为了实现无误差传输, PAM4 链路之中常会使用发射接收器均衡、前向纠错、脉冲整形等低限度低开销的电子技术。

#### 3.2.1 信道均衡

无线通信系统中,产生码间干扰的主要因

素有两个,一个是多径传输效应,另一个则是由于接收端的抽样时刻与发送间隔不能完全对准而产生的误差。无线通信系统模型如图 5 所示,均衡器就是在无线通信系统中插入的一种通过减少多径传输效应来削弱码间干扰的滤波器。

均衡前的信号  $x(t)$  可以由公式(10)来表示:

$$x(t) = s(t) * h(t) + n(t), \quad (10)$$

均衡后的信号  $y(t)$  可以表示为:

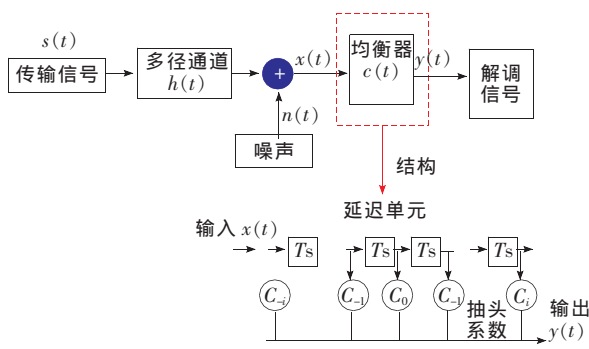


图5 无线通信系统模型

Fig.5 Model of wireless communication system

$$y(t) = x(t) * c(t) = [s(t) * h(t) + n(t)] * c(t) = s(t) * h(t) * c(t) + n(t) * c(t), \quad (11)$$

由于均衡器与横向滤波器结构类似,因此其冲激响应在时域以及频域可以分别表示为:

$$c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \delta(t - nT_s), \quad (12)$$

$$C(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-jnT_s\omega}, \quad (13)$$

$$C_n = \frac{T_s}{2\pi} \int_{-\pi/T_s}^{\pi/T_s} C(\omega) e^{jn\omega T_s} d\omega, \quad (14)$$

$T_s$  为延迟时间,  $C_n$  表示抽头系数。因为时域上的卷积可以转化为频域上的乘积,所以由公式(11)可以得到公式(15):

$$H'(\omega) = H(\omega)C(\omega), \quad (15)$$

又根据 Nyquist 第一准则,只有当  $H'(\omega)$  满足公式(16)时,码间干扰才能够被消除:

$$\sum_i H'(\omega + \frac{2\pi i}{T_s}) = T_s \quad |\omega| \leq \frac{\pi}{T_s}, \quad (16)$$

联立公式(15)和(16)可以得到公式(17):

$$\sum_i H'(\omega + \frac{2\pi i}{T_s}) = \sum_i H(\omega + \frac{2\pi i}{T_s})C(\omega + \frac{2\pi i}{T_s}) = T_s \quad |\omega| \leq \frac{\pi}{T_s}, \quad (17)$$

$C(\omega)$  是以  $2\pi/T_s$  为周期的周期函数,对公式(17)进行变化,可知  $C(\omega)$  在  $(-\pi/T_s, \pi/T_s)$  内满足下式的临界条件即可消除码间干扰:

$$C(\omega) = \frac{T_s}{\sum_i H(\omega + \frac{2\pi i}{T_s})} \quad |\omega| \leq \frac{\pi}{T_s}, \quad (18)$$

将公式(18)带入公式(14)得到抽头系数  $C_n$ :

$$C_n = \frac{T_s}{2\pi} \int_{-\pi/T_s}^{\pi/T_s} \frac{T_s}{\sum_i H(\omega + \frac{2\pi i}{T_s})} e^{jn\omega T_s} d\omega, \quad (19)$$

由公式(18)和(19)可知,若无线通信系统  $H(\omega)$  给定,则可唯一确定  $C(\omega)$ ,从而确定各抽头系数  $C_n (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。理论上当抽头数  $n$  趋近于无限时,横向滤波器更趋近于理想的码间干扰去除功效。然而现实中,抽头数目  $n$  不是可能无限多的,而当采用有限抽头数的横向滤波器时,则意味着码间干扰不会被完全消除。那么,此时的均衡效果就需要通过一些准则来进行判断,这里介绍两个判断的准则,最小峰值误差准则以及最小均方误差准则,其分别要求峰值误差  $D$  和均方误差  $\varepsilon^2$  最小,如公式(20)和(21)所示:

$$D = \frac{1}{y_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |y_k|, \quad (20)$$

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{y_0^2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_k^2. \quad (21)$$

如图6所示,根据这两个准则,依次衍生出了一些算法:以最小峰值误差为准则的迫零算法,以及以最小均方误差为准则的LMS自适应算法、卡尔曼算法以及维纳算法。

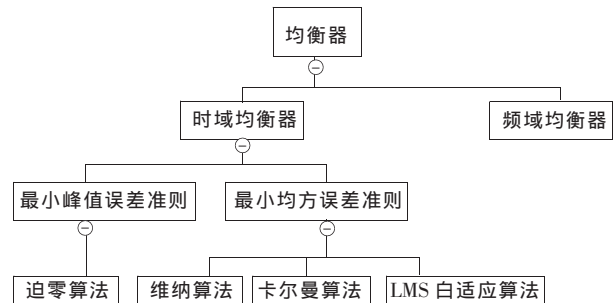


图6 均衡器相应算法

Fig.6 Equalizer algorithm

VCSEL的PAM4调制中比较常用的均衡是判决反馈均衡以及信道预均衡<sup>[58-59]</sup>。其中判决反馈均衡对于严重的符号间干扰有着较好的性能,常见的用法是使用LMS自适应算法算出抽头数然后进行使用;而信道预均衡则是指在发送端对信号提前进行均衡以减少多径传输效应。

### 3.2.2 前向纠错

高频谱效率的调制格式的引入为下一代光传输系统提供了带宽上的余值,但误码率的劣化使其若要在同等发光条件下达成无误差传输,使用FEC成为一条几乎必须的选项。

图 7 展示的是现代光通信系统信道模型,从这里可以看出 FEC 是现代光通信系统的重要组成部分之一。FEC 编码器通过在信源编码器的输出端向二进制信息序列以奇偶校验的形式添加

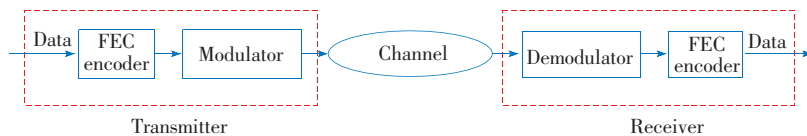


图 7 现代光通信系统信道模型

Fig. 7 Channel model of modern optical communication system

码率  $r_c$  定义为信息序列长度与总序列长度的比值:

$$r_c = \frac{k}{n}, \quad (22)$$

$k$  为 FEC 编码器所取信息序列的总长度,在此之上添加若干冗余比特作为校验位,总的传输码元序列长度达到  $n$ 。码率满足  $0 < r_c < 1$ ,对于采用特定码率进行编码的系统,通过将原始数据传输速率与码率  $r_c$  相乘,就可以得到真正可实现信息速率。不过实际应用中,通常用开销来表示 FEC 在传输速率上的代价,其定义为冗余序列长度与信息序列长度的比值:

$$OH = \frac{n - k}{k} = \frac{1}{r_c} - 1, \quad (23)$$

理论上来说,开销越大,FEC 的性能就越好,但是这个提升并不是线性的,开销增大所引入的性能提升随着开销的增大而变小<sup>[60]</sup>。开销常以百分比的形式表示,例如,当  $r_c = 10/11$  时,有 10% 的开销。

FEC 的编码有很多种,根据接收信号处理方式的不同,分为软判决 (Soft decision, SD) 编码与硬判决 (Hard decision, HD) 编码。如图 8 所示,硬判决编码情况下,在信息送入解码器前就会对其进行判决;而软判决编码则不同,其不会先进行判决,而是将接收到的用来描述每个符号可靠性的信息以  $LLR_s (s = 1, 2, 3, \dots)$  等形式发送到解码器,再进行判决。

软判决码中比较有代表性的有 LDPC 码、Polar 码和 Turbo 码;硬判决码中比较有代表性的则是 RS 码。PAM4 传输短距离光互联传输中比较常用的是 RS 码,例如: CUT 的 Szczerba 小组利用 RS(255, 239) 码依次实现了 70 Gbps 及 94 Gbps 的短距离光互联传输<sup>[58-59]</sup>;而 Castro 小组则是运

冗余,整体信息经过噪声信道传输后,FEC 解码器再利用这些冗余来充分恢复源信息。其整体行为的好处是可以以一小部分的频谱效率为代价来换取系统灵敏度上的巨大提高。

用 RS(528, 514) 依次实现了 48.7 Gbps 以及 60 Gbps 的 200 m 光链路传输<sup>[61-62]</sup>。

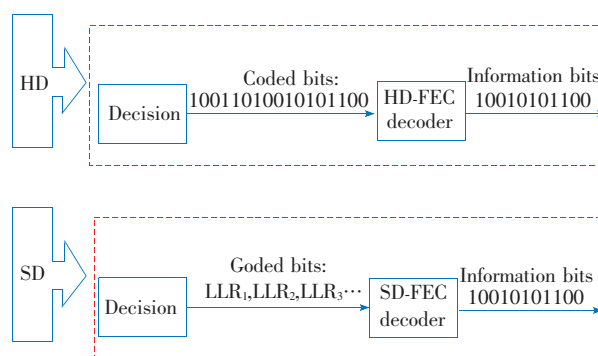


图 8 硬判决解码与软判决解码示意图

Fig. 8 Schematic diagram of hard decision and soft decision decoding

### 3.2.3 脉冲整形

在带宽受限的光通信系统中,脉冲整形技术被越来越广泛地应用,其可以最大限度地减少接收机的误码率。数字滤波器问世之前,脉冲整形采用模拟滤波器来实现。但是,模拟滤波器的响应会受元件值变化的影响,这种元件值的变化主要来源于温度变化和老化程度等因素。与之相比,数字滤波器的响应仅受滤波器系数影响,而这些系数不会随着温度和老化程度而变化<sup>[63]</sup>。因此,数字脉冲整形滤波器已成为许多数字数据传输系统的一部分,目前更是进一步地延伸到光通信领域。

数字传输中,最基本的信息单元是矩形脉冲。它具有确定的幅度  $A$  和确定的持续时间  $T$ 。图 9 分别给出了矩形脉冲的时域波形与频域谱线,其中  $A = 1, T = T_0, f = f_0 = 1/T_0$ ,脉冲的中心点在时间原点  $t = 0$  处。矩形脉冲因其时域波形为矩形而得名,其脉冲频谱可通过傅里叶变换来获得,频谱形状为  $\sin(x)/x$  响应,也被称为 sinc 响应。



sinc 响应有两个特点: 其一是只有当在  $f_0$  为整数倍的地方存在零点(频谱幅度为 0 处), 另一个则是随着频率的扩展, 各峰值逐渐降低以致接近零幅度。

图 9 展示的是最简单的 NRZ 编码方式, 即二进制 0 被编码为无脉冲( $A = 0$ ), 二进制 1 被编码为有脉冲( $A = \text{常数}$ , 此处为 1)。脉冲的峰值幅度与矩形脉冲的幅度成正比, 峰值幅度增加则矩形脉冲幅度增加, 但其并不会影响频谱形状, 故对零点的频率位置不会有影响。因此, 尽管各个脉冲的幅度互不相同, 更复杂的基于脉冲幅度变化的 PAM4 编码方案仍然生成类似于图 9 的频谱。

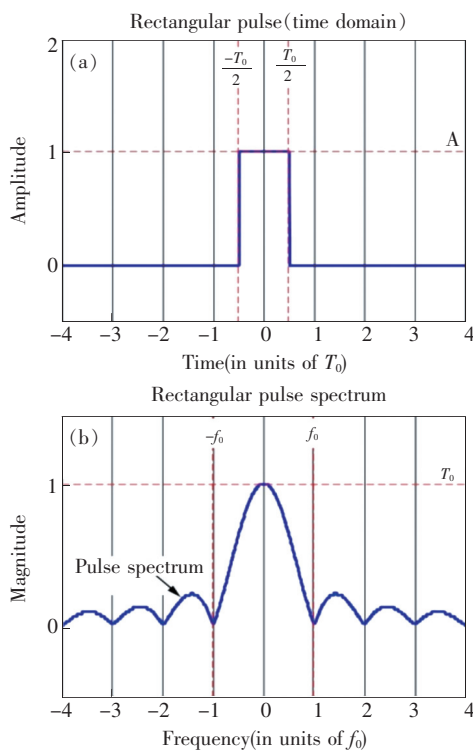


图 9 (a) 矩形脉冲时域波形 ( $T = T_0, A = 1$ ); (b) 矩形脉冲频域谱线 ( $f = f_0, A = 1$ )<sup>[63]</sup>。

Fig. 9 (a) Rectangular pulse time domain waveform ( $T = T_0, A = 1$ ). (b) Rectangular pulse frequency domain spectral line ( $f = f_0, A = 1$ )<sup>[63]</sup>.

图 9 所示的矩形脉冲频谱可以向外扩展延伸至无限大的频率上, 此时带宽为无限大, 而在现实数据传输应用中, 所传输的信号带宽是必须限制在一定范围内的。通常情况下我们会通过低通滤波器来限制矩形脉冲带宽, 脉冲形状经滤波后将会从纯粹的矩形变为无陡峭边沿的平滑轮廓线(如图 10 所示)。而这种对矩形数据脉冲进行滤波的操作常常被称为脉冲整形。

矩形脉冲经脉冲整形减少带宽变成平滑曲线后会带来阻尼振荡, 即出现类似于波纹状的图形, 被称为纹波。纹波会干扰其前后的脉冲, 因此若其重叠传输, 则在接收机处会导致错误的解码。但若滤波器选择的适当, 则不仅能够如期望的那样减少带宽, 而且还能保证时域波形不会干扰接收机的解码过程。著名的升余弦滤波器就是一种恰当的选择, 其频率响应由下列公式给出:

$$H(\omega) = \begin{cases} \tau, & 0 \leq \omega \leq c \\ \tau \left\{ \cos^2 \left[ \frac{\tau(\omega - c)}{4\alpha} \right] \right\}, & c \leq \omega \leq d \\ 0, & \omega > d \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $\omega$  为角频率(值与  $2\pi f$  相等),  $\tau$  为脉冲周期(等于图 9 中的  $T_0$ ),  $\alpha$  为滚降系数,  $c = \pi(1 - \alpha)/\tau$ ,  $d = \pi(1 + \alpha)/\tau$ 。

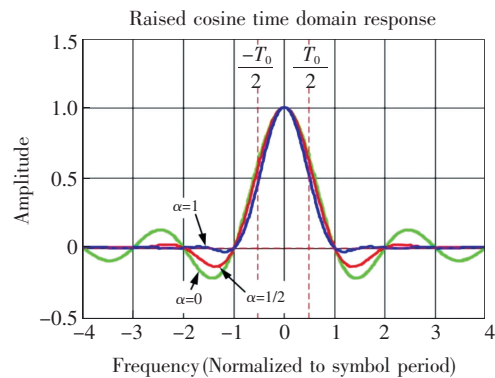


图 10 升余弦时域响应(升余弦系数  $\alpha$  分别为 0(绿色), 1/2(红色), 1(蓝色))<sup>[63]</sup>

Fig. 10 Raised cosine time-domain response (raised cosine coefficients  $\alpha$  is 0 (green), 1/2 (red), 1 (blue), respectively)<sup>[63]</sup>

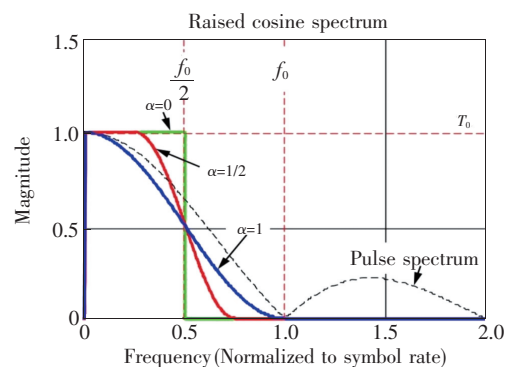


图 11 升余弦频谱(升余弦系数  $\alpha$  分别为 0(绿色), 1/2(红色), 1(蓝色))<sup>[63]</sup>

Fig. 11 Raised cosine spectrum (raised cosine coefficients  $\alpha$  is 0 (green), 1/2 (red), 1 (blue), respectively)<sup>[63]</sup>

图 10 显示的是升余弦的时域响应。从时域角度上来看,升余弦滤波器脉冲整形的结果可以让脉冲响应的零点恰好与相邻脉冲的中点重合,这时只需让接收机在每个脉冲间隔的中点做出判决,则相邻脉冲的纹波在该点恰好过零,纹波便不会干扰到判决过程。

图 11 显示的是升余弦的频谱,若从频域角度上来看,升余弦滤波器的响应特性可通过滚降系数进行调节,该系数由  $\alpha$  表示,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。当  $\alpha = 0$  时,频率响应如绿色曲线所示;当  $\alpha = 1$  时,频率响应如蓝色曲线所示;当  $\alpha$  值介于 0 和 1 之间时,频率响应如红色曲线所示(这里  $\alpha = 1/2$ )。黑色虚线为矩形脉冲的频谱,将绿、蓝、红线与之对比可以看出经历滤波器脉冲整形后,带宽均有大幅度的减小。

将图 10 和图 11 综合比较,可以看出,当  $\alpha$  从 0 增加到 1 时,频域里滤波器的带宽随之增大,但纹波的幅度却随之减小。由此可以得出结论,当  $\alpha = 0$  时,带宽的利用率最高,但代价是在时域上出现了最大幅度的纹波(相对于  $\alpha > 0$  的情况)。选择  $\alpha > 0$  会造成传输频谱带宽的利用率下降,但时域响应里的纹波幅度同样会随之减少很多,从而弥补了这种负面效应。

虽然理论上在每个脉冲中点进行采样可以使纹波为零,不会对相邻脉冲产生影响,取  $\alpha = 0$  以最大纹波幅度换来最小滤波后脉冲带宽貌似为最佳策略。但实际操作中,接收机往往不能恰好在脉冲中点进行采样,而又由于纹波只在相邻脉冲中点处为零,若接收机的采样点与脉冲间隔的中点不重合,纹波必然会影响接收机解码。脉冲带宽的减少意味着纹波变大,从而加剧了码间干扰,增加了接收机处出现错误判决(即误码)的可能性。因此,常常需要在频域

的带宽限制和时域的纹波衰减之间找到一个折衷点。

### 3.3 VCSEL 的 PAM4 调制链路案例

CUT 的 Szczerba 小组是将 PAM4 调制方法与 VCSEL 链路结合在一起的最早的小组之一,其在 2011 年便使用 20 GHz 的 850 nm VCSEL 实现了 30 Gbps 的 200 m PAM4 链路<sup>[64]</sup>,接着分别于 2013 年、2015 年、2016 年实现了 60<sup>[65]</sup>, 70<sup>[58]</sup>, 94 Gbps<sup>[59]</sup> 的链路速率大跨越,速率的大幅提高主要得益于光探测器的改进以及 FEC、均衡等电子手段的引入;但与此同时,传输距离也大幅下降。Castro 小组于 2015 年与 2016 年分别发表了 48.7 Gbps 与 60 Gbps 的 850 nm 链路,传输距离均能保持在 200 m<sup>[61-62]</sup>。佐治亚理工学院的 Lavrencik 小组于 2017 年发表了 100 Gbps 的 PAM4-VCSEL 链路,运用了带宽高达 30 GHz 的 VCSEL 器件以及传输器均衡、脉冲响应,在不使用 FEC 的情况下实现了无差错传输<sup>[4]</sup>。在除了 850 nm 的其他波长方面, Lavrencik 小组还实现了 880, 910, 940 nm<sup>[66]</sup> 及 1 060 nm<sup>[67]</sup> 的 100 Gbps VCSEL 链路。

## 4 波分复用

波分复用技术是现代光通信技术中常用的技术,其为链路带来了前所未有的带宽容量提升,同时还具有节省成本、高灵活性、高可靠性等优点。波分复用是一种将多种不同波长的光载波信号(携带各种信息)在发送端经光复用器(亦称合波器, Multiplexer, MUX)汇合在一起,并耦合到光线路的同一根光纤中进行传输,然后在接收端,经解复用器(亦称分波器, Demultiplexer, DEMUX)将各种波长的光载波分离,然后由光接收机作进一步处理以恢复原信号的技术<sup>[68]</sup>。其链路模型如图 12 所示。

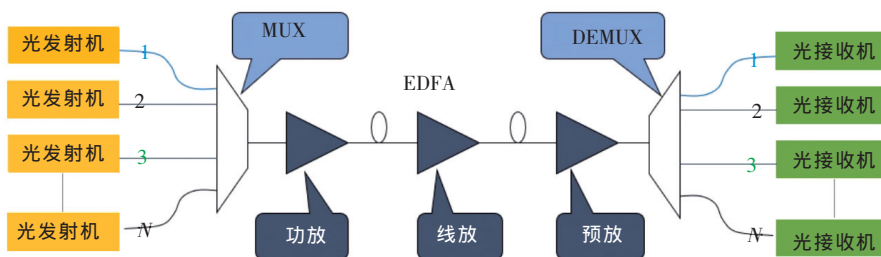


图 12 波分复用链路模型

Fig. 12 Model of WDM link

波分复用在本质上是光域上的频分复用(Frequency division multiplexing, FDM)技术,其充分利用多模光纤低损耗区的巨大带宽资源,将光纤的低损耗窗口划分成若干个信道进行传输,以此带来了前所未有的带宽容量提升,同时还不大增加成本,与 VCSEL、PAM4、IM/DD 共同构成了短距离光互联的优质解决方案。

WDM 整体链路被三个因素所限制,分别是损耗限制、色散限制以及非线性限制。

**损耗限制:**损耗限制是指由于光脉冲信号在光纤中传输会损耗能量,损失的能量与距离正相关,损失过多能量的信号会失真,从而限制了系统传输距离的现象。由光纤引起的损耗限制可以通过在链路中引入光放大器来进行应对,但是光放大器仅能对光信号进行简单放大,并不能再生信号,而且会引入放大自发噪声( Amplifier Spontaneous emission Noise, ASE), ASE 噪声的累积会导致光信噪比(Optical signal noise ratio, OSNR)下降,从而使得信号质量劣化。

**色散限制:**色散限制是指由于光脉冲信号中各种不同能量的分量因在光纤中的传输距离不同而引起脉冲展宽,从而限制了系统传输距离的现象。由于掺铒光纤放大器(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)的应用,光纤损耗不再成为通信系统的主要限制因素,而光纤色散代之成为现代通信系统面临的主要问题。除了采用窄线宽光源和低色散光纤来减小色散限制外,由于光纤色散本质上是一种线性过程,因此采用色散补偿思想,可以有效补偿色散导致的脉冲展宽。色散补偿措施主要包括预啁啾、色散补偿光纤、啁啾光纤光栅补偿等技术,其中色散补偿光纤技术是目前通信系统中使用的最为广泛的技术。

**非线性限制:**非线性限制是指由于非线性效应使得系统传输距离受限的现象,而非线性效应则是指由于色散导致光脉冲展宽,因此造成通道内相邻脉冲交叠,产生非线性作用的一种现象。非线性效应的两个主要效应分别为 IXPM(Intra-channel cross-phase modulation, 带内交叉相位调制)和 IFWM(Intra-channel four-wave mixing, 带内四波混频)。其中 IXPM 会诱导脉冲频移从而导致时间抖动, IFWM 则会导致幅度抖动以及 ghost 脉冲;在跟局部色散关系上两者亦有所不同,其中 IXPM 会随着局部色散的增大而减小,而 IFWM 则

会随着局部色散增大而增大。因此为了避免 IFWM 由于局部色散的增长而过大,在非线性系统中通常会引入色散管理技术(周期分段补偿、预补偿与欠补偿)。

按照通道间隔的不同, WDM 技术可分为 CWDM( Coarse wavelength division multiplexing, 稀疏/粗波分复用)与 DWDM( Dense wavelength division multiplexing, 密集波分复用)。其中 CWDM 的信道间隔为 20 nm, 使用的波长在 1 270 ~ 1 610 nm 之间;而 DWDM 的信道间隔为 0.2 ~ 1.2 nm, 频谱网格固定在 193.1 THz, 在第三窗口 C 波段光谱上最多可传输 80 个信道(波长),并且这 80 个信道可以同时以 1 550 nm 的波长传输。

短距离光互联中使用的 WDM 技术通常被称为短波分复用( Short wavelength division multiplexing, SWDM), 这是由于其使用的波长频段在较短的第一传输窗口附近( 850 nm)。850, 880, 910, 940 nm 构成的 SWDM4 是 IEEE 针对短距离光互联所制定的波分复用标准。

Finisar 的 Motaghianezam 团队于 2016 年分别用 SWDM2-PAM4( 850 nm, 880 nm) 及 SWDM4-PAM4( 850, 880, 910, 940 nm) 实现了 104 Gbps 和 180 Gbps 的链路传输<sup>[24, 69]</sup>。佐治亚理工学院的 Lavrencik 小组则通过 SWDM4-PAM4( 850 ~ 940 nm) 搭建了 400 Gps 的 PAM4 调制 VCSEL 链路, 然后设想通过将可用波长通道展宽到 1 060 nm, 展望新的 1 Tbps 链路<sup>[66-67]</sup>。

## 5 结 论

本文主要讨论了基于高速 VCSEL 与多模光纤、采用 PAM4 调制并使用直接检测方法的短距离光互联链路。首先回顾了 VCSEL 发展历程并介绍了其结构与动态参数指标,接着介绍了 PAM4 调制以及相应的电子技术-均衡、前向纠错、脉冲整形,最后叙述了广泛使用的波分复用技术。

这种链路方案的未来发展方向可分为 VCSEL 器件的进一步研发、WDM 扩展以及更复杂的 DSP 技术引入三个方面。其中 VCSEL 改进依然集中于提高带宽和降低电阻电容; WDM 展宽体现扩展波长范围和缩小波段间隔;而 DSP 技术方面则体现在引入更复杂的方案,以提高链路的复杂度与能耗为代价,将链路的频谱效率进一步提

高,从而增加整体链路速率。随着传输速度的进一步上升,PAM4 的频谱效率将会遇到瓶颈,此时则需要诸如 QAM64、PAM8 等具有更高频谱效率的调制技术。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Cisco. *Cisco Annual Internet Report* [ R ]. White Paper, 2020.
- [ 2 ] TATUM J A,GAZULA D,GRAHAM L A,*et al.*. VCSEL-based interconnects for current and future data centers [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 2015,33(4):727-732.
- [ 3 ] MAHGEREFTEH D,THOMPSON C,COLE C,*et al.*. Techno-economic comparison of silicon photonics and multimode VCSELs [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 2016,34(2):233-242.
- [ 4 ] LAVRENCIK J,VARUGHESE S,GUSTAVSSON J S,*et al.*. Error-free 100 Gbps PAM-4 transmission over 100 m wide-band fiber using 850 nm VCSELs [ C ]. *Proceedings of 2017 European Conference on Optical Communication, Gothenburg, Sweden*, 2017:1-3.
- [ 5 ] ZUO T J,ZHANG L,ZHOU J,*et al.*. Single lane 150-Gb/s,100-Gb/s and 70-Gb/s 4-PAM transmission over 100-m,300-m and 500-m MMF using 25-G class 850 nm VCSEL [ C ]. *Proceedings of 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf, Germany*, 2016:1-3.
- [ 6 ] WU B,ZHOU X,MA Y Y,*et al.*. Single-lane 112Gbps transmission over 300 m OM4 multimode fiber based on a single-transverse-mode 850 nm VCSEL [ C ]. *Proceedings of 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf, Germany*, 2016:1-3.
- [ 7 ] KOTTKE C,CASPAR C,JUNGNICKEL V,*et al.*. High speed 160 Gb/s DMT VCSEL transmission using pre-equalization [ C ]. *Proceedings of 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles, CA, USA*, 2017:1-3.
- [ 8 ] ORENSTEIN M,VON LEHMEN A C,CHANG-HASNAIN,C,*et al.*. Vertical-cavity surface-emitting InGaAs/GaAs lasers with planar lateral definition [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990,56(24):2384-2386.
- [ 9 ] TELL B,LEE Y H,BROWN-GOEBELER K F,*et al.*. High-power CW vertical-cavity top surface-emitting GaAs quantum well lasers [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990,57(18):1855-1857.
- [ 10 ] SZWEDA R. VCSELs resurgent [ J ]. *III V s Rev.*, 2004,17(8):28-31.
- [ 11 ] JOHNSON R H,KUCHTA D M. 30 Gb/s directly modulated 850 nm datacom VCSELs [ C ]. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California, United States*, 2008.
- [ 12 ] WESTBERGH P,GUSTAVSSON J S,HAGLUND Å,*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.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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):1021-1023.
- [ 16 ] 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 Technol. Lett.*, 2015,27(6):577-580.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] FENG M,WU C H,HOLONYAK N. Oxide-confined VCSELs for high-speed optical interconnects [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2018,54(3):2400115.
- [ 19 ] 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, CA, USA*, 2018:1-3.
- [ 20 ] CHI K L,XIE Z T,AGUSTIN M,*et al.*. Zn-diffusion/oxide-relief 940 nm VCSELs with excellent high-temperature performance for 50 Gbit/sec transmission [ C ]. *Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition, San Diego, CA, USA*, 2018:1-3.



- [21] HAGHIGHI N, LARISCH G, ROSALES R, *et al.*. 35 GHz bandwidth with directly current modulated 980 nm oxide aperture single cavity VCSELs [C]. *Proceedings of 2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference, Santa Fe, NM, USA*, 2018:1-2.
- [22] SIMPANEN E, GUSTAVSSON J S, HAGLUND E, *et al.*. 1 060 nm single-mode vertical-cavity surface-emitting laser operating at 50 Gbit/s data rate [J]. *Electron. Lett.*, 2017, 53(13):869-871.
- [23] ZHONG K P, CHEN W, SUI Q, *et al.*. Experimental demonstration of 500 Gbit/s short reach transmission employing PAM4 signal and direct detection with 25 Gbps device [C]. *Proceedings of 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles, CA*, 2015:1-3.
- [24] MOTAGHIANNEZAM S M R, LYUBOMIRSKY I, DAGHIGHIAN H, *et al.*. 180 Gbps PAM4 VCSEL transmission over 300 m wideband OM4 fibre [C]. *Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Anaheim, CA*, 2016:1-3.
- [25] LI H, WOLF P, MOSER P, *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting lasers for optical interconnects [J]. *SPIE Newsroom*, 2014, doi:10.1117/2.1201411.005689.
- [26] COLDREN L A, CORZINE S W, MAŠAŃOVIC M L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2012.
- [27] WESTBERGH P. *High Speed Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for Short Reach Communication* [D]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2011.
- [28] SATUBY Y, ORENSTEIN M. Mode-coupling effects on the small-signal modulation of multitransverse-mode vertical-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, 35(6):944-954.
- [29] ZEIL G, EBERS S, KROPP J R, *et al.*. Noise performance of multimode VCSELs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, 19(6):884-892.
- [30] LIU A J, WOLF P, LOTT J A, *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(2):121-136.
- [31] CHANG Y C. *Engineering Vertical-cavity Surface-emitting Lasers for High-speed Operation* [D]. Santa Barbara: University of California, 2008.
- [32] TAUBER D, WANG G, GEELS R S, *et al.*. Large and small signal dynamics of vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(4):325-327.
- [33] LARSSON A. Advances in VCSELs for communication and sensing [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, 17(6):1552-1567.
- [34] SUEMUNE I. Theoretical study of differential gain in strained quantum well structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, 27(5):1149-1159.
- [35] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, HAGLUND Å, *et al.*. High-speed, low-current-density 850 nm VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, 15(3):694-703.
- [36] HEALY S B, O'REILLY E P, GUSTAVSSON J S, *et al.*. Active region design for high-speed 850 nm VCSELs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, 46(4):506-512.
- [37] HOFMANN W, MOSER P, WOLF P, *et al.*. 44 Gb/s VCSEL for optical interconnects [C]. *Proceedings of 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, USA*, 2011:1-3.
- [38] MOSER P, WOLF P, MUTIG A, *et al.*. 85 °C error-free operation at 38 Gb/s of oxide-confined 980-nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(8):081103-1-3.
- [39] THEN H W, WU C H, FENG M, *et al.*. Microwave characterization of Purcell enhancement in a microcavity laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(13):131107-1-3.
- [40] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, KÖGEL B, *et al.*. Impact of photon lifetime on high-speed VCSEL performance [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, 17(6):1603-1613.
- [41] 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 Technol. Lett.*, 2016, 28(21):2327-2330.
- [42] ZHOU P, CHENG J, SCHAUS C F, *et al.*. Low series resistance high-efficiency GaAs/AlGaAs vertical-cavity surface-

- emitting lasers with continuously graded mirrors grown by MOCVD [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991,3(7):591-593.
- [43] AFROMOWITZ M A. Thermal conductivity of  $Ga_{1-x}Al_xAs$  alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973,44(3):1292-1294.
- [44] LASCOLA K M, YUEN W, CHANG-HASNAIN C J. Structural dependence of the thermal resistance of vertical cavity surface emitting lasers [C]. *Proceedings of 1997 Digest of The IEEE/LEOS Summer Topical Meeting: Vertical-cavity Lasers/Technologies for A Global Information Infrastructure/WDM Components Technology/Advanced Semiconductor Lasers and Application, Montreal, Que., Canada, 1997:79-80.*
- [45] AL-OMARI A N, ALIAS M S, ABABNEH A, *et al.*. Improved performance of top-emitting oxide-confined polyimide-planarized 980 nm VCSELs with copper-plated heat sinks [J]. *J. Phys. D:Appl. Phys.*, 2012,45(50):505101-1-8.
- [46] SCHUBERT E F, TU L W, ZYDZIK G J, *et al.*. Elimination of heterojunction band discontinuities by modulation doping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992,60(4):466-468.
- [47] AL-OMARI N, LEAR K L. Polyimide-planarized vertical-cavity surface-emitting lasers with 17.0 GHz bandwidth [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004,16(4):969-971.
- [48] 何晓颖,董建,胡帅,等. 采用 BCB 平整技术的高速 850 nm 垂直面发射激光器 [J]. *中国光学*, 2018,11(2):190-197.
- HE X Y, DONG J, HU S, *et al.*. High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique [J]. *Chin. Opt.*, 2018,11(2):190-197. (in English)
- [49] CHANG Y C, WANG C S, COLDREN L A. High-efficiency, high-speed VCSELs with 35 Gbit/s error-free operation [J]. *Electron. Lett.*, 2007,43(19):1022-1023.
- [50] AZUCHI M, JIKUTANI N, ARAI M, *et al.*. Multioxide layer vertical-cavity surface-emitting lasers with improved modulation bandwidth [C]. *Proceedings of The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Taipei, China, 2003.*
- [51] 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.
- [52] WESTBERGH P, SAFAISINI R, HAGLUND E, *et al.*. High-speed 850 nm VCSELs with 28 GHz modulation bandwidth for short reach communication [C]. *Proceedings of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVII, San Francisco, California, United States, 2013:86390X-1-6.*
- [53] 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(5):630-634.
- ZHOU G Z, LAN T, LI Y, *et al.*. High temperature-stable 25 Gbit/s 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(5):630-634. (in Chinese)
- [54] 李惠,贾晓卫,魏泽坤,等. 高速光通讯面发射激光器的热分析及优化 [J]. *发光学报*, 2017,38(11):1516-1522.
- LI H, JIA X W, WEI Z K, *et al.*. Thermal analysis and structure optimization of high-speed optical communication-VCSEL [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(11):1516-1522. (in Chinese)
- [55] LARSSON A, GUSTAVSSON J S, HAGLUND E, *et al.*. VCSEL modulation speed; status and prospects [C]. *Proceedings of Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXIII, San Francisco, California, United States, 2019.*
- [56] BROWN M, DUDEK M, HEALEY A, *et al.*. The state of IEEE 802.3bj 100 Gb/s backplane ethernet [C]. *DesignCon, Santa Clara, California, United States, 2014.*
- [57] IEEE P802.3bj 100 Gb/s backplane and copper cable task force materials [EB/OL]. (2014-07-19) [2019-12-03]. <http://www.ieee802.org/3/bj>.
- [58] SZCZERBA K, WESTBERGH P, KARLSSON M, *et al.*. 70 Gbps 4-PAM and 56 Gbps 8-PAM using an 850 nm VCSEL [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2015,33(7):1395-1401.
- [59] SZCZERBA K, LENGUEL T, KARLSSON M, *et al.*. 94 Gb/s 4-PAM using an 850 nm VCSEL, pre-emphasis, and receiver equalization [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016,28(22):2519-2521.
- [60] 张颖. 高速光通信系统中的概率成形编码调制技术的研究 [D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- ZHANG Y. *Research on Probabilistic Shaping Coded Modulation Technology in High-speed Optical Communication System* [D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [61] CASTRO J M, PIMPINELLA R, KOSE B, *et al.*. 48.7 Gb/s 4-PAM transmission over 200 m of high bandwidth MMF using an 850 nm VCSEL [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015,27(17):1799-1801.

- [62] CASTRO J M, PIMPINELLA R, KOSE B, *et al.*. Investigation of 60 Gb/s 4-PAM using an 850 nm VCSEL and multimode fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2016, 34(16):3825-3836.
- [63] GENTILE K. 数字脉冲整形滤波器基础知识 [EB/OL]. (2014-07-14) [2020-01-06]. <https://wenku.baidu.com/view/163f2548c5da50e2524d7fba.html>.  
GENTILE K. Basic knowledge of digital pulse shaping filter [EB/OL]. (2014-07-14) [2020-01-06]. <https://wenku.baidu.com/view/163f2548c5da50e2524d7fba.html>. (in Chinese)
- [64] SZCZERBA K, WESTBERGH P, GUSTAVSSON J, *et al.*. 30 Gbps 4-PAM transmission over 200 m of MMF using an 850 nm VCSEL [C]. *Proceedings of 2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Geneva*, 2011: 1-3.
- [65] 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.
- [66] LAVRENCIK J, VARUGHESE S, THOMAS V A, *et al.*. Scaling VCSEL-MMF links to 1 Tb/s using short wavelength division multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2018, 36(18):4138-4145.
- [67] LAVRENCIK J, SIMPANEN E, VARUGHESE S, *et al.*. Error-free 100 Gbps PAM-4 transmission over 100 m OM5 MMF using 1 060 nm VCSELs [C]. *Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego, CA, USA*, 2019:1-3.
- [68] 宗磊. DWDM 柔性测试技术的研究与应用 [D]. 上海:复旦大学, 2009.  
ZONG L. *Research and Application of DWDM Flexible Testing Technology* [D]. Shanghai:Fudan University, 2009. (in Chinese)
- [69] MOTAGHIANNEZAM S M R, KOCOT C. 104 Gbps PAM4 transmission over OM3 and OM4 fibers using 850 and 880 nm VCSELs [C]. *Proceedings of 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, CA*, 2016:1-2.



杨卓凯(1993-),男,湖北武汉人,硕士研究生,2017年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事垂直腔面发射激光器的研究。  
E-mail: yzkdxx@126.com



LARISCH Gunter(1974-),男,德国柏林人,博士,副研究员,2018年于柏林工业大学获得博士学位,主要从事垂直腔面发射激光器的研究。  
E-mail: larisch@ciomp.ac.cn



田思聪(1984-),男,吉林长春人,博士,副研究员,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事信息型半导体激光器的研究。  
E-mail: tiansicong@ciomp.ac.cn