

文章编号: 1000-7032(2022)05-0736-09

高速 1 550 nm 垂直腔面发射激光器研究进展

韩赛一^{1,2}, 田思聪^{1*}, 徐汉阳^{1,2}, 潘绍驰^{1,2}, MANSOOR Ahamed^{1,2},
佟存柱³, 王立军³, BIMBERG Dieter^{1,4}, 李 充⁵

(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. 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;

4. 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;

5. 空军装备部驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130033)

摘要: 垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有生产成本低、调制速率高等优点,在光通信领域占有重要地位。随着数据需求量的飞速增长,在长距离信息传输中,具有低损耗的 1 550 nm 波长的 VCSEL 引起了研究人员的兴趣。本文首先介绍了 1 550 nm VCSEL 的结构,然后讨论了其带宽限制因素以及相应的改进方法,接着从 NRZ(不归零)调制和 PAM4(四电平脉冲幅度)调制两方面对近年来高速 1 550 nm VCSEL 的研究进展进行了综述,最后展望了高速 1 550 nm VCSEL 在未来光通信领域的发展和应用。

关键词: 1 550 nm; 高速垂直腔面发射激光器(VCSEL); 不归零调制(NRZ); 四电平脉冲幅度调制(PAM4)

中图分类号: TN248.4; TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.37188/CJL.20220048

Research Progress of High-speed 1 550 nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser

HAN Sai-yi^{1,2}, TIAN Si-cong^{1*}, XU Han-yang^{1,2}, PAN Shao-chi^{1,2}, MANSOOR Ahamed^{1,2},
TONG Cun-zhu³, WANG Li-jun³, BIMBERG Dieter^{1,4}, LI Chong⁵

(1. Bimberg Sino-German Green Photonics Research Center, 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. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Center for Nano-Optics, Institute of Solid State Physics, Technical University of Berlin, Berlin D-10623, Germany;

5. Military Representative Office in Changchun of the Air Force Equipment Department, Changchun 130033, China)

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

Abstract: Vertical cavity surface emitting laser(VCSEL) has the advantages of low production cost and high modulation rate, and plays an important role in the field of optical communication. With the rapid growth of data demand, the 1 550 nm wavelength VCSEL with low loss has aroused the interest of researchers in long-distance information transmission. In this paper, the structure of 1 550 nm VCSEL is introduced firstly, the bandwidth limitation factors and corresponding improvement

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-02-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2201000, 2021YFB2801000); 国家自然科学基金(61774156, 62174159, 62061136010); 中国科学院青年创新促进会(2018249); 中德科学中心合作交流项目 M0386; 吉林省国际合作项目(20210402055GH)资助
Supported by National Key R&D Program of China(2018YFB2201000, 2021YFB2801000); National Natural Science Foundation of China(61774156, 62174159, 62061136010); CAS Youth Innovation Promotion Association(2018249); Sino-German Center for Research Promotion(Joint Mobility Program of DFG and NSFC M0386); International Cooperation Project of Jilin Province(20210402055GH)

methods are then discussed, and then the research progress of high-speed 1 550 nm VCSEL in recent years is reviewed from the aspects of NRZ(Non-zero) modulation and PAM4(Four-level pulse amplitude) modulation. Finally the development and application of high-speed 1 550 nm VCSEL in the field of optical communication in the future are prospected.

Key words: 1 550 nm; high-speed vertical cavity surface emitting laser(VCSEL); non-return to zero modulation(NRZ); four-level pulse amplitude modulation(PAM4)

1 引言

随着5G时代的到来,高速数据通信、大数据量和低功耗绿色通信成为通信领域的目标。为满足互联网、高清电视、云计算、工业、机构以及家庭的固定和移动终端对宽带需求的不断增长,光互连在高速数据传输领域得到广泛的应用。作为光通信系统的光源需要有以下特性:足够的输出功率、好的温度稳定性、与光纤的耦合效率高、调制特性好、可靠性高、寿命长、尺寸紧凑质量小等。而垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于腔长很短而具有高调制速率,且VCSEL输出的光斑为圆形光斑因而与光纤的耦合特性很好。此外,VCSEL还具有能耗低、生产成本低等优点,非常适合作为光通信领域的光源。目前,基于GaAs基材料的短波850 nm VCSEL的制备技术已经很成熟,传输速率超过100 Gb/s的850 nm VCSEL器件相继被报道^[1-2],850 nm VCSEL也已经成为数据中心内部短距离光模块的核心光芯片。但在基于短波长如850 nm VCSEL的光通信系统中,信息的传输距离被模态色散限制在数百米^[3]。与之相比,符合光纤低损耗窗口的长波长VCSEL能实现长距离的信息传输。目前常用的长波长波段为具有低色散特性但损耗较高的1 310 nm波段和具有低损耗特性但色散较大的1 550 nm波段,为了解决模态色散的限制,目前长距离光通信系统已转向单模光源与单模光纤的组合。在相同的光纤长度下,1 550 nm VCSEL在光纤上的传输损耗约为850 nm VCSEL在光纤上传输损耗的1/10左右,因此更加适合长距离传输,本文也主要论述高速1 550 nm波段VCSEL的相关研究进展。目前1 550 nm VCSEL的制备工艺仍不完善,基于InP基的具有高折射率和高热导率的分布式布拉格反射镜(DBR)难以制备、长波长VCSEL的热问题较为显著以及1 550 nm VCSEL的有效电流限制结

构很难形成^[4]。因此在长距离数据传输中,量子阱(QW)激光器和分布反馈(DFB)激光器仍是主要的光源。但随着研究不断增多,1 550 nm VCSEL的高速性能进一步优化。此外,先进的调制方式如PAM4调制,以及各种电子技术如均衡、前向纠错(FEC)、预加重等被应用于数据传输过程中,进一步提高了VCSEL的传输速率。

本文首先介绍了1 550 nm VCSEL的器件结构以及一些器件的改进方法,接着从传递函数出发讨论了VCSEL的带宽限制因素以及相应的解决方法,然后综述了近年来在改善器件结构和应用PAM4调制格式以及相应的电子技术来提高1 550 nm VCSEL传输速率方面的研究进展,最后对高速1 550 nm VCSEL未来的发展趋势进行了展望。

2 高速1 550 nm VCSEL器件结构

VCSEL通常由上、下DBR和有源区构成。DBR一般由两种折射率差较大的材料组成,为了在 μm 量级的VCSEL腔内实现激射,DBR的反射率一般大于99%。VCSEL常用量子阱结构作为有源区,可以很有效地将载流子和光子限制在有源区中,减少泄露。不同于完善的850 nm VCSEL制备工艺,目前1 550 nm VCSEL的研究多在于器件结构的优化,主要是高折射率、高热导率的DBR的制备、热问题的解决以及有效的电流限制结构的形成。

1 550 nm VCSEL对应的DBR材料为四元系材料,InGaAsP/InP、AlGaInAs/InP等四元系材料的折射率差很小,因此需要更多的DBR对才能实现超高的反射率,这增大了VCSEL的有效尺寸。而折射率差大、反射性能好的AlGaAsSb/AlAsSb DBR外延难度大,难以制备。此外,四元系材料的导热性能很差,更多的DBR对使得VCSEL的热问题更加严重。虽然介质材料仅用几对DBR

就可实现高折射率,但介质材料不能导电,因此需要配上更加复杂的工艺。为解决这一难题,晶圆熔合(Wafer-fusion, WF)技术得到了广泛的应用^[5]。在 InP 衬底上生长有源区,在 GaAs 衬底上生长热性能好的 DBR,如 GaAs/AlGaAs 材料的 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 1 550 nm VCSEL。

相对于电子来说,空穴的相对质量大,迁移率低,因此 p 区材料的串联电阻必然会大于 n 区材料的电阻,从而产生更多热量。为解决这一难题,掩埋隧道结(BTJ)得到了应用。BTJ 结构可以选择性刻蚀孔径外的高掺杂 n++ 和 p++ 型层,然后在二次外延生长时用轻掺杂 n 型材料覆盖剩余的 p 型层来实现^[6],这一方法很大程度上减小了 p 区的热效应。此外,通过晶圆熔合技术制备的 1 550 nm VCSEL 具有散热性能优异的 DBR,对解决器件的热问题也有帮助。

为限制注入的电流,VCSEL 常采用各种电流限制结构,如氧化限制型、离子注入型、掩埋异质结型等结构,其中氧化限制型结构是 VCSEL 最常用的电流限制结构。选择高 Al 含量的材料,通过氧化工艺形成低折射率的绝缘氧化物区域^[7],从而可以实现对光和电的限制。但对于 1 550 nm VCSEL 来说,InP 衬底上含 Al 材料的氧化温度比较高、氧化速率比较低以及氧化选择性比较差,因而采用氧化限制型结构难以实现好的电流限制作用^[4]。而二次外延 BTJ 结构可以在 BTJ 区域外形成一个阻塞的 pn 结层,而在 BTJ 区域内,由于隧道效应,p++ + n++ 结具有较低的电阻^[6]。因此电流被限制在重掺杂区,从而实现对电流的限制,但需要对 BTJ 采用光刻、刻蚀形成电流限制孔径图形,再二次外延生长完成整个 VCSEL 结构,工艺较为复杂。有研究组采用侧向腐蚀隧道结的方法来限制电流,虽然工艺上容易实现,但存在一定的不确定因素^[7]。目前,通过 BTJ 结构来进行侧向限制是制备 1 550 nm VCSEL 时最常用的方法。

制备 1 550 nm VCSEL 通常采用以下两种方法:一种方法是通过晶圆熔合技术将 GaAs 基 DBR 和 InP 基有源区结合起来,通过这种方法可以在大的 BTJ 孔径下制备单模且散热性能良好的短腔 1 550 nm VCSEL。Blokhin 等通过这种方法

制备了 BTJ 孔径为 8 μm 的单模 1 550 nm VCSEL,且具有 6 mW 的高输出功率^[8]。另一种方法是直接在 InP 衬底上生长 VCSEL 结构,包括有源区和 DBR,随后形成 BTJ 结构。相比于第一种方法,这种方法制备的 1 550 nm VCSEL 可以达到更高的带宽和传输速率,但只有在 BTJ 孔径小于 5 μm 时才能实现单模且输出功率较小,在 2 mW 左右。Spiga 等采用这种方法设计出了带宽达到 21 GHz 的 1.5 μm VCSEL,但输出功率为 2.2 mW^[9]。因此,两种方法各有优缺点。图 1 为带有 BTJ 结构的高速 1 550 nm VCSEL^[10]。

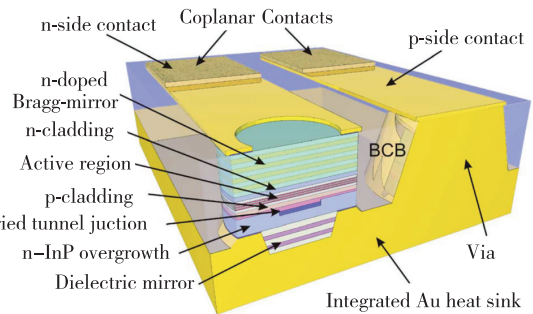


图 1 InP 基 BTJ 结构的 1 550 nm 高速 VCSEL 结构图^[10]
Fig. 1 Structure diagram of 1 550 nm high-speed VCSEL for InP-based BTJ structure^[10]

3 高速 VCSEL 带宽限制因素

要制备具有高调制带宽的高速 VCSEL,首先要了解限制 VCSEL 调制带宽的因素。VCSEL 的小信号调制特性的理论基础为传递函数,公式(1)为常用的 VCSEL 传递函数表达式:

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

其中 f_R 是弛豫振荡频率, f_p 是寄生截止频率, γ 是阻尼因子, C 为常数。从公式(1)中可以看出,调制带宽的大小与 f_R , f_p 和 γ 这三个参数有关。要想增大调制带宽,需要增大 f_R 和 f_p , 减小 γ 。下面我们分析如何调整这三个参数的值。

3.1 阻尼限制

阻尼因子 γ 也称为内部限制因子,可表示为

$$\gamma = kf_R^2 + \gamma_0, \quad (2)$$

其中, γ_0 为阻尼补偿因子。 k 因子可用如下公式表示:

$$k = 4\pi^2 \left(\tau_p + \frac{\epsilon\chi}{v_g \partial g / \partial N} \right), \quad (3)$$

其中 τ_p 为光子寿命, ε 为增益压缩因子, χ 为传输因子, v_g 为群速度, $\partial g/\partial N$ 是微分增益。要减小阻尼因子 γ , 需要减小 k 因子, 而这可以通过刻蚀或氮化硅沉积调制顶部 DBR 减小光子寿命以及应用压缩应变量子阱增大微分增益等方法来实现。Blokhin 等通过沉积 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 改变顶部 DBR 的反射率来改变光子寿命, 经过测试, 1 550 nm VCSEL 的带宽从 9.2 GHz 增加到 11.5 GHz^[11]; Babichev 等通过顶部 DBR 的蚀刻增加了镜面损耗, 减少了光子寿命, 成功地将调制带宽从 7 GHz 增加到 9 GHz^[12]。但通过 γ 的表达式可以看出, 随着 γ 的减小, f_R 也会减小, 因此 γ 的值并非越小越好。应找到一个折中的值, 使得 VCSEL 的调制带宽达到最大。

3.2 热限制

弛豫振荡频率 f_R 是一个温度相关的参数, 也称为热限制。当 VCSEL 工作时会有热量产生, 使得有源区的温度升高, 随着注入电流的增大, 当温度过高时, 有源区会出现载流子泄露, 使得 f_R 减小。因此, 热限制是制约高速 VCSEL 带宽的一个重要因素。 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^[13], 可用下式表示:

$$f_R = D\sqrt{I_0 - I_{th}}, \quad (4)$$

其中

$$D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\Gamma v_g \eta_i}{qV} \frac{\partial g/\partial N}{\chi} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

其中 η_i 为内量子效率, Γ 为光学限制因子, I_{th} 为阈值电流, V 为有源区体积。 D 因子代表了弛豫振荡频率随电流变化的关系, 可通过增大 D 因子来增大弛豫振荡频率。从 D 因子的表达式中可以看出, 增大 D 因子的方法有: (1) 采用短腔或半波长腔来提高光学限制因子 Γ 。Müller 等使用介质 DBR 来缩短有效腔长, 并结合其他优化技术制备了带宽为 17 GHz 的 1 550 nm VCSEL^[14]; Spiga 等制备了一种腔长为 1.5λ 的 $1.5 \mu\text{m}$ 短腔 VCSEL, 调制带宽达到了 22 GHz, 也是当时长波长 VCSEL 的最大带宽^[15]。(2) 减小有源区体积 V , 但太小的有源区难以完全限制光子和载流子。(3) 增大微分增益, 一般通过多对应变量子阱来实现。Müller、Spiga 和 Karinou 等制备的器件中都采用了这一结构^[14-16]。目前在制备高速 VCSEL 时, 用

来增大微分增益的压缩应变量子阱已经成为基本结构之一。以上这些方法都在一定程度上缓解了 1 550 nm VCSEL 的热限制。

3.3 寄生限制

VCSEL 的寄生效应是影响器件调制带宽的另一个重要因素, 包括寄生电容和寄生电阻, 它们会影响注入电流进入有源区, 从而限制 VCSEL 的高速调制性能^[17]。一般将 VCSEL 的寄生效应产生的影响等效为一阶低通滤波器, 而 f_p 就是一阶低通滤波器的截止频率。要消除器件中的寄生效应需要尽可能地减小 VCSEL 器件中的电容和电阻, 如改变 DBR 的掺杂分布将吸收损耗降到最小来减小电阻^[18], 或通过缓变结降低异质结处的势垒尖峰和改善势垒形状从而减小电阻。苯并环丁烯 (BCB) 是一种新型的活性树脂, 具有低介电常数、高热导率和优异的电绝缘性能, 因此常用 BCB 平坦化技术来减小寄生电容。Kanakis 等将 VCSEL 完全封装在 BCB 中, 减少了寄生效应^[19]。对于氧化限制型 VCSEL, 研究发现薄氧化层引起的寄生电容大于厚氧化限制层引起的寄生电容, 此外采用多个氧化层的方法也可以降低电学寄生效应^[20]。而对于 BTJ 结构来说, 在制备 BTJ 结构进行二次生长时降低掺杂浓度, 可以减小高掺杂 p+n 区的寄生电容, 从而减小寄生效应的影响。Müller 等采用这种方法制备了调制带宽达到 17 GHz 的 1 550 nm VCSEL^[21]。

4 高速 1 550 nm VCSEL 研究进展

随着研究的发展, 1 550 nm 高速 VCSEL 的器件结构不断完善, 传输速率也在不断提升。但受制于热效应和寄生效应, 通过改善器件结构来提升 VCSEL 传输速率的方法有一定的上限。因此, 为了实现更高速率的传输, 在传输链路中使用更加先进、有效的调制格式来代替传统的调制格式将成为必然。

传统的 VCSEL 调制一般使用 NRZ 调制格式, 它采用高、低两种信号电平来表示所要传输的数字逻辑信号 0 和 1, 每个符号能够传输 1 bit 的逻辑信息, 具有简单易操作和可靠等特性。考虑到技术和设备的复杂性, 在不降低数据速率降低波特率的最简单且具有最低实现复杂性的方法是四脉冲幅度调制 (PAM4)^[22]。PAM4 信号采用 4 个不同的信号电平 (00)、(01)、(10)、(11) 来进

行信号传输,因此每个符号上能传输的信息增加为 2 bit。这代表着在与 NRZ 调制相同的符号率下,PAM4 调制在理论上可以提高一倍的传输速率,因此对链路的带宽需求大大降低。

PAM4 调制提高传输速率的同时会引起误码率(BER)劣化的问题^[23]。Karinou 等在实验中比较了在不同光纤长度下,对 1 550 nm VCSEL 分别进行传输速率为 10.9 Gbps 的 NRZ 调制和 10 Gbps 的 PAM4 调制时器件的性能,结果如图 2 所示^[24]。从图中可以看出,在相同功率和相同速率下使用 PAM4 调制时的误码率高于使用 NRZ 调制时的误码率。

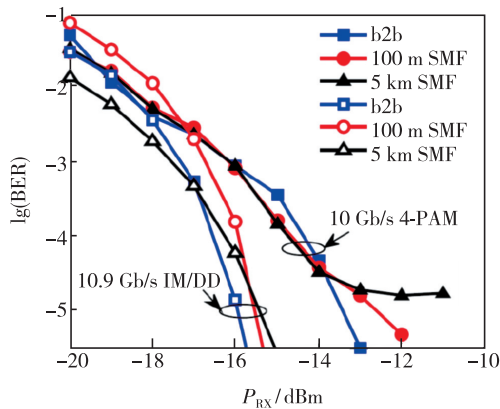


图 2 不同光纤长度下使用 PAM4 调制与 NRZ 调制时的 BER-P 曲线^[24]

Fig. 2 BER-P curve when using PAM4 modulation and NRZ modulation under different fiber lengths^[24]

为了解决这一问题,PAM4 链路之中常会使用均衡或前向纠错等电子技术。均衡技术常通过滤波器来实现,根据信号经过时的被衰减的情况,将信号的高频成分适当增强,信号的高、低频成分因此被“均衡”到同一个水平,从而减少码间干扰的影响。最常用的均衡技术为前反馈均衡(FFE),具有降低频率啁啾从而使频谱变窄的有益效果。前向纠错(FEC)是指信号在被送入传输信道之前预先按一定的算法进行编码处理,加入带有信号本身特征的冗码,在接收端按照相应算法对接收到的信号进行解码,从而找出在传输过程中产生的错误码并将其纠正的技术。由于增加了一些额外的冗码,前向纠错技术要付出一定的带宽代价,但可以获得很大的误码率改善^[25]。

除了均衡和前向纠错技术外,波分复用(WDM)也是光通信系统中常用的技术。WDM

技术在光纤通信中占有非常重要的地位。它能够在一根光纤上传输不同波长的多个光信号,从而使通信容量随着可重复使用的波长的数量呈指数级增长。根据信道间隔的不同,WDM 可分为粗波分复用(CWDM 信道间隔小于 50 nm)、密集波分复用(DWDM 信道间隔小于等于 1 000 GHz)、超密集波分复用(SDWDM 信道间隔小于等于 25 GHz)^[26]。

下面从 NRZ 调制和 PAM4 调制两方面对近年来高速 1 550 nm VCSEL 的研究进展进行综述。

4.1 基于 NRZ 调制的 1 550 nm VCSEL 传输速率

2010 年,Müller 等制备了具有 BTJ 结构的 1 550 nm 短腔 VCSEL。他们使用压缩应变量子阱提高微分增益,用电介质顶部 DBR 和混合底部 DBR 代替半导体 DBR 减短腔长和光子寿命提高弛豫振荡频率,并在二次生长时降低掺杂浓度,使高掺杂 p+n+ 区的寄生电容大大降低,减小寄生效应的影响,制备的 VCSEL 调制带宽达到了 17 GHz,并在 55 °C 下实现了 25 Gbps 的传输速率^[21]。2011 年,他们进一步优化器件,制备了微分量子效率高达 40%、热阻低至 1.6 K/mW 的 1 550 nm 高速 VCSEL,小信号调制带宽超过 17 GHz。室温下,在背对背(BTB)时的数据传输速率为 35 Gbps,在 4.2 km 的单模光纤上传输速率可达 25 Gbps^[14]。2015 年,Malacarne 等采用 BTJ 结构减少热的产生,使用介质 DBR 代替半导体 DBR 减短腔长,并优化外延结构、台面尺寸和键合衬垫等以最小化寄生电容,从而制备了调制带宽为 18 GHz 的 1 550 nm VCSEL。在 NRZ 调制下,在 1 km 的单模光纤上实现了高达 40 Gbps 数据速率下的无错误操作(误码率 < 10⁻⁹)^[27]。2016 年,Karinou 等采用 BTJ 结构并在二次生长时用 n 型材料代替 p 型材料成功制备了 1 550 nm VCSEL,器件的 3 dB 带宽达到了 18 GHz。在使用均衡技术的情况下,最终在 10 km 的单模光纤(SMF)上实现了 28 Gbps 的传输速率^[28]。同年,Kuchta 等使用 BTJ 结构、BCB 平坦化技术和介质 DBR 等优化了器件的电、热性能以及腔长,制备了一个 1 530 nm 的 VCSEL,器件的带宽达到了 18 GHz。在使用前反馈均衡(FFE)进行预补偿时,该 VCSEL 可以 BTB 情况下进行 56 Gbps 的速率传输并在 2 km 的 SMF 上实现 50 Gbps 的无误码传输。这是当时 1 550 nm 波段 VCSEL 所演示的

最高数据速率^[29]。2017 年, Spiga 等设计制备了一种腔长为 1.5λ 的 $1.5\ \mu\text{m}$ 短腔 VCSEL, 这是当时 InP 基 VCSEL 中最短的半导体腔。在室温下, 该 VCSEL 的小信号调制带宽超过 21 GHz, 通过 NRZ 调制在 BTB 条件下实现了速率高达 50 Gbps 的数据传输^[30]。同年, Babichev 等基于分子束外延 (MBE) 生长了高性能的 InP 基的有源区和热导性优异的 GaAs 基 DBR, 并通过晶圆熔合技术将它们熔合在一起制备了具有 $8\ \mu\text{m}$ BTJ 孔径的单模 1 550 nm VCSEL。通过顶部 DBR 的蚀刻增加了镜面损耗, 减小了光子寿命和阻尼, 并将调制带宽增加到 9 GHz, 在 NRZ 调制下实现了高达 30 Gbps 的传输速率^[31]。2019 年, Blokhin 等研究了输出光损耗对 WF-VCSEL 的影响, 通过减小光子寿命增加光损耗, 在室温下将 1 550 nm VCSEL 的带宽从 9.2 GHz 提高到了 11.5 GHz, 在 85 °C 的高温下器件带宽也能达到 8.5 GHz, 通过增加光损耗进一步提高了 1 550 nm WF-VCSEL 的带宽^[11]。本课题组与 Babichev 团队合作, 在 1 550 nm 高速 VCSEL 方面也开展了一些工作。我们通过继续优化晶圆熔合技术, 制备出了 BTJ 孔径为

$6\ \mu\text{m}$ 的 1 550 nm VCSEL, 测试结果表明该器件输出功率约为 3.4 mW, 带宽为 13 GHz。图 3 为在常温和 BTB 条件下测得的 1 550 nm VCSEL 的眼图, 可以看出该器件在 NRZ 调制下实现了高达 37 Gbps 的传输速率。在使用晶圆熔合技术制备的 1 550 nm VCSEL 中, 这一结果处于领先地位 (Under assessment)。

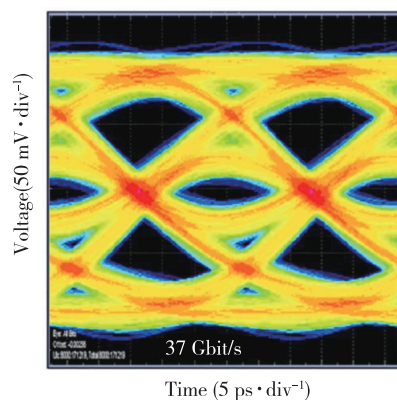


图 3 1 550 nm VCSEL 传输速率为 37 Gbit/s 时的 NRZ 眼图

Fig. 3 NRZ eye diagram at a 1 550 nm VCSEL transmission rate of 37 Gbit/s

表 1 NRZ 调制下高速 1 550 nm VCSEL 的发展

Tab. 1 Development of high-speed 1 550 nm VCSEL under NRZ modulation

年份	温度/°C	传输距离/km	带宽/GHz	传输速率/Gbps	参考文献
2010	25	BTB	17	25	[21]
2011	25	BTB	17	35	[14]
2011	25	4.2	17	25	[14]
2015	25	1	18	40	[27]
2016	25	2	18	56	[30]
2017	25	BTB	21	50	[29]
2017(WF)	20	BTB	9	30	[31]
2017(WF)	20	BTB	9	20(无误码)	[31]
2019(WF)	20	—	11.5	—	[11]
2019(WF)	85	—	8.5	—	[11]

4.2 基于 PAM4 调制的 1 550 nm VCSEL 传输速率

2013 年, Rodes 等制备出了带宽高达 20 GHz 的 1 530 nm VCSEL, 在 PAM4 调制以及 FEC 纠错下实现了 50 Gbps 的传输速率^[32]。2015 年, Xie 等使用 PAM4 调制技术对带宽为 17 GHz 的单模 1 550 nm VCSEL 进行调制, 并用 FEC 技术进行纠错实现了在 400 km 光纤上 50 Gbps (有效速率为

42 Gbps) 的传输速率。此外, 他们还通过波分复用技术, 使用一个 2×4 的 VCSEL 阵列, 实现了 400 Gbps (有效速率为 333 Gbps) 的传输速率, 为未来波分复用技术进一步应用于光通信领域实现更高传输速率提供了可能性^[33]。2015 年, Karinou 等对带宽为 18 GHz 的 1 530 nm VCSEL (BTJ 结构) 进行 PAM4 调制, 在 7% 硬判决前向纠错与均衡技术的综合运用下, 在 2 km 的光纤上实现了

56 Gbps 的传输速率。这是当时使用长波长 VCSEL(PAM4)实现的最大传输距离和每波长的最大数据速率^[34]。2016年,Eiselt等对基于BTJ设计的1525 nm VCSEL进行PAM4调制,器件的带宽为18 GHz,在使用简单的均衡技术进行均衡下,实现了在15 km的SSMF上56 Gbps和1 km的SSMF上84 Gbps的传输^[35]。2017年,该研究组优化器件结构,将VCSEL的调制带宽提升至20 GHz,通过使用不同的均衡方式,最终在1.6 km的SSMF上演示了84 Gbps的速率传输^[36]。2018年,Isoe等通过PAM4调制技术,将两个10 Gbps的OOK数据流差分调制到单个VCSEL上,因此产生20 Gbps的OOK信号聚合数据速率,在8 GHz带宽的VCSEL上实现在24.7 km范围内20 Gbps的无误差传输^[23]。同年,Isoe团队利用PAM4调制技术、密集波分复用(DWDM)和拉曼放大技术,实现了60 Gbps的数据传输速率。他们将3个10 G级别的VCSEL通道用20 Gbps的PAM4数据信号直接调制,然后这些通道通过DWDM技术以0.4 nm的间距汇聚到单个光纤链路上,总聚合数据速率达到60(3×20) Gbps。利用正向拉曼泵浦的8.6 dB平坦增益,实验实现了

表 2 PAM4 调制下高速 1 550 nm VCSEL 的发展

Tab. 2 Development of high-speed 1 550 nm VCSEL under PAM4 modulation

年份	温度/ ℃	传输距离/ km	带宽/ GHz	传输速率/ Gbps	参考文献
2013	25	BTB	20	50	[32]
2015	25	400	17	50	[33]
2015	25	2	18	56	[34]
2016	25	15	18	56	[35]
2016	25	1	18	84	[35]
2017	25	1.6	20	84	[36]
2018	25	24.7	8	20	[23]
2018	25	77.12	—	60	[37]
2019	25	0.5	20.6	80	[19]

参 考 文 献:

- [1] LAVRENCIK J, VARUGHESE S, LEDENTSOV N, *et al.* 168 Gbps PAM-4 multimode fiber transmission through 50 m using 28 GHz 850 nm multimode VCSELs [C]. *Optical Fiber Communication Conference 2020, San Diego, 2020*: W1D. 3.

77.12 km 的标准单模光纤传输。在当时,这是基于PAM4调制的VCSEL的传输速率达到60 Gbps报告的最长无错误光纤传输距离^[37]。2019年,Kanakis等基于双台面短腔设计制备出了单偏振、单模1.5 μm VCSEL。该器件通过BCB包裹双台面VCSEL减少寄生限制,结合介质DBR减短腔长以及优化BTJ外反偏结的掺杂浓度等方法,将调制带宽提高到了20.6 GHz。在500 m单模光纤上使用PAM4调制实现了80 Gbps的传输速率^[19]。

5 结 论

本文主要论述了NRZ调制和PAM4调制下高速1550 nm VCSEL的研究进展。不同于GaAs基的短波长VCSEL,InP基的长波长VCSEL具有更低的光损耗。为了更好地限制电流和减少热的产生,1550 nm VCSEL常采用BTJ结构。而晶圆熔合技术的应用解决了高折射率差、高热导率的长波长VCSEL的DBR难以制备的问题,然而通过这种技术制备出的器件的高速性能不如直接在InP基上生长的器件的高速性能好,但却具有更高的输出光功率。早期,研究人员通过优化器件结构来提高1550 nm高速VCSEL的带宽,并在NRZ调制下进行信息数据传输。但随着器件的带宽难以再明显提升,采用更为先进的PAM4调制成为提高VCSEL传输速率的必然选择。PAM4调制在相同的VCSEL带宽下,传输速率可以比NRZ调制下提高近一倍,大大降低了对带宽的需求。虽然目前1550 nm VCSEL制备工艺仍不成熟,但随着研究的进一步发展,通过改进器件结构和使用更加先进的调制格式,1550 nm高速VCSEL的带宽和传输速率将进一步提高。可以预见,面对数据需求量的爆炸性增长,1550 nm VCSEL将会在长距离光通信中起到重要作用。

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.20220048>.

- [2] ZUO T J,ZHANG T T,ZHANG S,*et al.* 850-nm VCSEL-based single-lane 200-Gbps PAM-4 transmission for datacenter intra-connections [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021,33(18):1042-1045.
- [3] NASU H,KISE T,NAGASHIMA K,*et al.* VCSEL-based parallel-optical modules for > 100 Gb/s applications [C]. 2014 *The European Conference on Optical Communication (ECOC), Cannes, France*, 2014;Tu.4.5.2-Tu.4.5.4.
- [4] 刘成. 长波长垂直腔面发射激光器器件工艺与光电特性研究 [D]. 上海:中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所), 2007.
LIU C. *Device Processing and Optoelectronic Characterizations of Long-wavelength Vertical-cavity Surface-emitting Laser* [D]. Shanghai:University of Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology), 2007. (in Chinese)
- [5] BABICHEV A V,KARACHINSKII L Y,NOVIKOV I I,*et al.* Vertical-cavity surface-emitting 1.55- μm lasers fabricated by fusion [J]. *Tech. Phys. Lett.*, 2018,44(1):24-27.
- [6] LEE S G,FORMAN C A,KEARNS J,*et al.* Demonstration of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with buried tunnel junction contacts [J]. *Opt. Express*, 2019,27(22):31621-31628.
- [7] 范鑫焯,白成林,张丙元,等. 垂直腔面发射激光器:原理、制备及测试技术 [M]. 北京:科学出版社, 2019.
FAN X Y,BAI C L,ZHANG B Y,*et al.* *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers:Principle, Fabrication and Testing Technology* [M]. Beijing:Science Press, 2019. (in Chinese)
- [8] BLOKHIN S A,BOBROV M A,BLOKHIN A A,*et al.* The effect of a saturable absorber in long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by wafer fusion technology [J]. *Tech. Phys. Lett.*, 2020,46(12):1257-1262.
- [9] SPIGA S,SCHOKE D,ANDREJEW A,*et al.* Enhancing the small-signal bandwidth of single-mode 1.5- μm VCSELs [C]. 2016 *IEEE Optical Interconnects Conference(OI), San Diego*, 2016:14-15.
- [10] HOFMANN W,MULLER M,BOHM G,*et al.* 1.55- μm VCSEL with enhanced modulation bandwidth and temperature range [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009,21(13):923-925.
- [11] BLOKHIN S A,BOBROV M A,BLOKHIN A A,*et al.* Influence of output optical losses on the dynamic characteristics of 1.55- μm wafer-fused vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Semiconductors*, 2019,53(8):1104-1109.
- [12] BABICHEV A V,KARACHINSKY L Y,NOVIKOV I I,*et al.* Continuous wave and modulation performance of 1550 nm band wafer-fused VCSELs with MBE-grown InP-based active region and GaAs-based DBRs [C]. *Proceedings of SPIE 10122,Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXI,San Francisco*, 2017:1012208-1-6.
- [13] 杨卓凯,田思聪,LARISCH 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.
YANG Z K,TIAN S C,LARISCH G,*et al.* High-speed vertical-cavity surface-emitting lasers based on PAM4 modulation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(4):399-413. (in Chinese)
- [14] MULLER M,HOFMANN W,GRUNDL T,*et al.* 1550-nm high-speed short-cavity VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011,17(5):1158-1166.
- [15] SPIGA S,SCHOKE D,ANDREJEW A,*et al.* Single-mode 1.5- μm VCSELs with 22-GHz small-signal bandwidth [C]. *Optical Fiber Communications Conference 2016,Anaheim*, 2016;Tu3D.4-1-3.
- [16] KARINO F,PRODANIUC C,STOJANOVIC N,*et al.* Experimental performance evaluation of equalization techniques for 56 Gb/s PAM-4 VCSEL-based optical interconnects [C]. 2015 *European Conference on Optical Communication,Valencia, Spain*, 2015:1-3.
- [17] 邢茹萍,马淑芳,单恒升,等. 高速 850/980 nm 垂直腔面发射激光器的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2021,40(4):290-296.
XING R P,MA S F,SHAN H S,*et al.* Research progress on high-speed 850/980 nm vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Mater. China*, 2021,40(4):290-296. (in Chinese)
- [18] AL-OMARI A N,ALIAS M S,ABABNEH A,*et al.* Improved performance of top-emitting oxide-confined polyimide-plannarized 980 nm VCSELs with copper-plated heat sinks [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012,45(50):505101-1-8.
- [19] KANAKIS G,ILIADIS N,SOENEN W,*et al.* High-speed VCSEL-based transceiver for 200 GbE short-reach intra-datacenter optical interconnects [J]. *Appl. Sci.*, 2019,9(12):2488-1-11.
- [20] 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.
- [21] MÜLLER M, HOFMANN W, HORN M, *et al.* Low-parasitics 1.55 μm VCSELs with modulation bandwidths beyond 17 GHz [C]. *CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications, San Jose, CA, USA*, 2010:1-2.
- [22] KARINO F, DENG L, LOPEZ R R, *et al.* Performance comparison of 850-nm and 1 550-nm VCSELs exploiting OOK, OFDM, and 4-PAM over SMF/MMF links for low-cost optical interconnects [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2013, 19(3):206-212.
- [23] ISOE G M, WASSIN S, ROTICH KIPNOO E K, *et al.* VCSEL-based differential modulation technique for high-speed gigabit passive optical networks [J]. *J. Modern Opt.*, 2019, 66(4):419-423.
- [24] KARINO F, RODES R, PRINCE K, *et al.* IM/DD vs. 4-PAM using a 1 550-nm VCSEL over short-range SMF/MMF links for optical interconnects [C]. *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Anaheim, CA, USA*, 2013:1-3.
- [25] 赵逸智. 高速光传输系统中的 FEC 技术及系统设计中的 OSNR 预算 [J]. *信息通信*, 2020(1):213-215.
ZHAO N Z. OSNR budget in FEC technology and system design in high-speed optical transport system [J]. *Inf. Commun.*, 2020(1):213-215. (in Chinese)
- [26] 孙太富. 阵列波导光栅波分复用器/解复用器的理论研究和优化设计 [D]. 南京:南京邮电大学, 2013.
SUN T F. *Analyses and Optimization of Arrayed Waveguide Grating Multiplexer/Demultiplexer* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
- [27] MALACARNE A, SORIANELLO V, DALY A, *et al.* High-speed long-wavelength VCSELs for energy-efficient 40 Gbps links up to 1 km without error correction [C]. *Optical Fiber Communication Conference 2015, Los Angeles, 2015:Tu2H. 1-1-3.*
- [28] KARINO F, STOJANOVIC N, DALY A, *et al.* 1.55- μm long-wavelength VCSEL-based optical interconnects for short-reach networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2016, 34(12):2897-2904.
- [29] KUCHTA D M, HUYNH T N, DOANY F E, *et al.* Error-free 56 Gb/s NRZ modulation of a 1 530-nm VCSEL link [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2016, 34(14):3275-3282.
- [30] SPIGA S, SOENEN W, ANDREJEV A, *et al.* Single-mode high-speed 1.5- μm VCSELs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2017, 35(4):727-733.
- [31] BABICHEV A V, KARACHINSKY L Y, NOVIKOV I I, *et al.* 6-mW single-mode high-speed 1 550-nm wafer-fused VCSELs for DWDM application [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2017, 53(6):2400808-1-8.
- [32] RODES R, MUELLER M, LI B M, *et al.* High-speed 1 550 nm VCSEL data transmission link employing 25 GBd 4-PAM modulation and hard decision forward error correction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2013, 31(4):689-695.
- [33] XIE C J, SPIGA S, DONG P, *et al.* 400-Gb/s PDM-4PAM WDM system using a monolithic 2×4 VCSEL array and coherent detection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2015, 33(3):670-677.
- [34] KARINO F, PRODANIUC C, STOJANOVIC N, *et al.* Directly PAM-4 modulated 1 530-nm VCSEL enabling 56 Gb/s/ λ data-center interconnects [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(17):1872-1875.
- [35] EISELT N, GRIESSER H, WEI J L, *et al.* Experimental demonstration of 56 Gbit/s PAM-4 over 15 km and 84 Gbit/s PAM-4 over 1 km SSMF at 1 525 nm using a 25 G VCSEL [C]. *42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf, Germany*, 2016:1-3.
- [36] EISELT N, GRIESSER H, WEI J L, *et al.* Experimental demonstration of 84 Gb/s PAM-4 over up to 1.6 km SSMF using a 20-GHz VCSEL at 1 525 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2017, 35(8):1342-1349.
- [37] ISOE G M, WASSIN S, LEITCH A W R, *et al.* 60 Gbps 4-PAM VCSEL-based Raman assisted hyper-scale data centre: in context of spectral efficiency and reach extension [J]. *Opt. Commun.*, 2018, 428:164-168.



韩赛一(1997 -),男,河南平顶山人,硕士研究生,2020年于吉林大学获得学士学位,主要从事垂直腔面发射激光器的研究。

E-mail: hansaiyi@163.com



田思聪(1984 -),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事高速VCSEL和光子晶体激光器的研究。

E-mail: tiansicong@ciomp.ac.cn