

高速 850/980 nm 垂直腔面发射激光器的研究进展

邢茹萍¹, 马淑芳¹, 单恒升¹, 刘青明¹,
侯艳艳¹, 黄佳瑶¹, 许并社^{1,2}

(1. 陕西科技大学前沿科学与技术转移研究院 材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710016)
(2. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有低损耗、光束质量好、光纤耦合效率高、调制速率高且易于与其他光电子器件集成等优势,在光互连、光存储、高速传输和通讯等领域得到了迅猛发展。随着大数据时代的到来,对建立高带宽、低损耗的高速光通讯网络提出了更高的要求。因此,近年来 VCSEL 在面向高速数据通讯中提高调制速率、降低能量损耗等方面得到了广泛的研究。首先介绍了用于短距离数据通讯中的近红外波段 850 和 980 nm VCSEL 器件的基本结构,然后从高速性能的影响因素出发对其进行合理的理论设计,综述了近年来 850 和 980 nm VCSEL 高速性能的研究进展,最后展望了 VCSEL 在未来数据通讯领域的发展趋势。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 光通讯; 高速调制; 数据通讯

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)04-0290-07

Research Progress on High-Speed 850/980 nm Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

XING Ruping¹, MA Shufang¹, SHAN Hengsheng¹, LIU Qingming¹,
HOU Yanyan¹, HUANG Jiayao¹, XU Bingshe^{1,2}

(1. Institute of Atomic and Molecular Science, Frontier Institute of Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710016, China)
(2. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of the Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) have the advantages of low loss, good beam quality, high fiber coupling efficiency, high modulation rate and easy integration with other optoelectronic devices. They have developed rapidly in the fields of optical interconnection, optical storage, high-speed transmission and data communication. With the advent of the big data era, higher requirements have been put forward for the establishment of high-speed optical communication networks with high bandwidth and low loss. Therefore, in recent years, VCSELs have been extensively studied in high-speed data communications to increase the modulation rate and reduce energy loss. Firstly, the basic structure of the 850/980 nm VCSEL devices in the near-infrared band used in short-distance data communications is introduced. And then a reasonable theoretical design is made from the factors affecting high-speed performance, the research progress of the high-speed performance of 850/980 nm VCSEL is introduced. Finally, the future development trend of VCSEL in the field of data communication is prospected.

Key words: vertical cavity surface emitting laser; optical communication; high speed modulation; data communication

收稿日期: 2019-07-29 修回日期: 2019-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0401803); 山西省重点研发计划项目(201703D111026); 国家自然科学基金面上项目(21972103)

第一作者: 邢茹萍, 女, 1994年生, 硕士研究生

通讯作者: 许并社, 男, 1955年生, 教授, 博士生导师,

Email: xubingshe@sust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201907025

1 前言

垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, 简称 VCSEL)是一种新型的半导体激光器,目前已成为光通讯、光互联、高速局域网、3D 传感等众多领域的理想光源^[1,2]。在高速远距离的数据传输中,一般采用量子阱激光器及光谱宽度较窄的分布反馈式激光器。

而对于中短距离的光纤数据网络,如超级计算机中心、光纤到户 (FTTH) 工程、芯片间互联等, VCSEL 发挥着更为重要的作用。相对于边发射激光器, VCSEL 具有较小的发散角、圆形的输出光斑、易于实现二维阵列集成、阈值低、稳定性好、调制速率高等优点^[3,4], 与并行光传输以及并行光互连等领域的数据传输需求完美对应, 以极大的优势应用于单通道和并行光互连网络, 成为了宽带以太网、高速数据通信网中关键的光电子器件。另外, 近年来 VCSEL 在输出功率、数据传输速度、光束质量、光电转换效率、稳定性等方面实现了巨大的突破, 同时在 3D 传感、激光打印、光探测与测距等光电子领域也开拓了新应用^[4,5]。

近年来, 随着宽带语音和视频数据的融合, 网络流量快速增长, 人类已经进入到光纤通信、移动通信和高速宽带信息网络的年代, 对网络传输速率与数据处理能力提出了更高的要求, 使得高速 VCSEL 逐渐成为高速光通讯与光互连网络的主要光源之一^[6,7]。因此, 深入研究影响 VCSEL 的高速调制特性, 提高传输速率和调制带宽迫在眉睫。850 nm 波段具有低传输损耗、高调制速率、生长技术成熟等特点, 在短距离数据通讯方面已展现出良好的应用前景。而作为光纤另一个低损耗窗口的 980 nm 波段, 其相比于 850 nm 波段具有更好的温度稳定性和低功率损耗。850 和 980 nm 两个近红外波段 VCSEL 作为短距离光传输的核心器件, 其高速性能决定了整个光传输和光互连的传输性能。因此, 近年来研究者从影响 VCSEL 的高速调制物理机制和影响高速性能的主要因素出发, 不断优化 VCSEL 的外延结构与工艺条件, 使 VCSEL 的高速特性得到了迅速提高。

本文首先介绍了 VCSEL 的器件结构, 然后从影响 VCSEL 高速性能的因素出发进行合理设计, 综述了近年来 850 和 980 nm 波段 VCSEL 在实现更高传输速率、高调制带宽性能方面的研究进展, 最后对 VCSEL 未来的发展前景做了展望。

2 VCSEL 的器件结构

VCSEL 器件是通过金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术或分子束外延 (MBE) 技术在 GaAs 衬底上沉积而成。其结构包括高反射率 (>99%) 的上下分布的布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)、有源区、氧化限制层、接触电极等, 如图 1 所示^[8]。有源区主要是量子阱 (QW) 或量子点 (QD) 结构, 位于垂直谐振腔谐振时驻波的中心腹点处, 以提供有效的光学放大。DBR 由光学厚度为激光波长的四分之一的两种高低折射率不同的材料交替生长而成。通过调节两种材料的折射率差

异及其层数和对数可使其反射率达到 99% 以上, 同时还可通过优化 DBR 的材料、对数和层数来降低内部热损耗和阈值电流密度, 最终提高器件性能。氧化限制层由高铝组分 GaAlAs 组成, 如 $\text{Ga}_{0.02}\text{Al}_{0.98}\text{As}$ 材料, 该层经湿法氧化后变成具有低折射率、高绝缘的 Al_2O_3 层, 从而实现横向电流和光场的限制作用。通过在顶部和底部制作金属接触层, 向有源区注入电流, 并在上下表面制成一个圆形出光口, 最终输出圆形的激光光斑。为获得高传输速率的 VCSEL 器件, 近年来研究人员主要从优化器件结构和提高工艺精度两方面来提高其高速调制特性。在优化器件结构方面, 研究者多采用应变量子阱结构、双氧化限制层结构、有源区采用 $\lambda/2$ 短腔长结构来增强 VCSEL 有源区中光子的横向与纵向限制, 使载流子及光子利用效率进一步提高, 最终提高传输性能。在提高器件工艺精度方面, 通常采用优化氧化孔径、干湿法刻蚀技术和苯并环丁烯 (BCB) 平坦化技术来提高其高速调制特性。

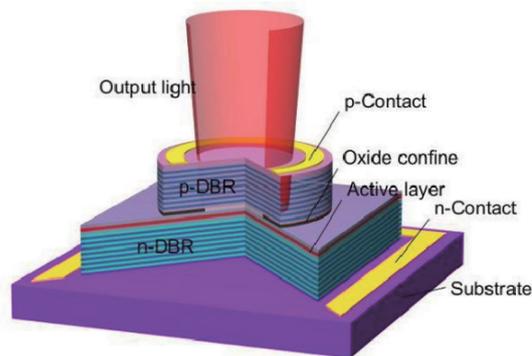


图 1 一种典型的 GaAs 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的结构示意图^[8]

Fig. 1 Structure diagram of a typical GaAs based vertical cavity surface emitting laser (VCSEL)^[8]

3 高速 VCSEL 的理论设计

850/980 nm VCSEL 是一种通过改变注入电流来对其光强进行直接调制的光电子器件。当外加恒定电流时, VCSEL 会伴随着内部弛豫振荡、电学寄生参数及其自热效应的产生, 而这 3 个特性的限制都会对 VCSEL 的高速调制性能产生重要影响。近年来, 研究人员主要从优化这些限制因素的角度出发, 来提高其高速传输特性。

3.1 弛豫振荡频率对 VCSEL 高速性能的影响

弛豫振荡频率是表征 VCSEL 高速特性的一个重要参数, 其大小是限制高速调制带宽的因素之一, 在不考虑阻尼和其他因素的情况下, 调制带宽随着弛豫振荡频率的增加而线性增加。弛豫振荡频率 f_r 是 VCSEL 中载流子

和光子之间的固有振荡频率, 可以表示如下:

$$2\pi f_r \cong \left[\frac{v_g a N_p}{\tau_p} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{v_g a \Gamma \eta_i}{q V_p} (I - I_{th}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, v_g 为群速度, a 为微分增益, N_p 为光子密度, τ_p 为光子寿命, Γ 为限制因子, η_i 为载流子注入有源区的效率, q 为电荷量, V_p 为有源区体积, I 为偏置电流, I_{th} 为阈值电流。由式(1)可知, 量子阱微分增益的提高可以增大弛豫振荡频率。然而弛豫振荡频率也受到温度和驱动电流的影响, 当 VCSEL 工作时, 随着驱动电流的增大, 弛豫振荡频率先增大到 $f_{r,max}$, 然后逐渐减小。这主要是因为当温度升高时, 量子阱中的载流子会获得更高的能量, 而获得高能量的载流子会越过势垒层发生泄漏, 导致微分增益降低, 最终使得弛豫振荡频率降低^[9-14]。弛豫振荡频率是影响氧化限制 VCSEL -3 dB 带宽的决定因素, 弛豫振荡频率越大, 氧化限制 VCSEL 的 -3 dB 带宽越大。因此, 可通过提高微分增益来获得更大的弛豫振荡频率, 从而提高 VCSEL 的高速性能。

理论表明, 由于 InGaAs/AlGaAs 量子阱相对于传统的 GaAs/AlGaAs 量子阱结构具有较大的微分增益, 同时 InGaAs/AlGaAs 结构的 VCSEL 能够在高驱动电流下工作, 从而获得更大的弛豫振荡频率, 最终提高调制带宽。2009 年, 瑞典 Chalmers University of Technology 的 Westbergh 等采用 InGaAs/AlGaAs 量子阱取代传统的 GaAs/AlGaAs 量子阱, 从而使有效增益和微分增益明显提高。当使用 InGaAs/AlGaAs 作为有源区时, VCSEL 的 -3 dB

带宽在 25 °C 时达到 20 GHz, 在 85 °C 时达到 15.2 GHz, 调制带宽明显提高^[15]。

3.2 寄生参数对 VCSEL 高速性能的影响

当 VCSEL 进行高速光电调制时, 需向有源区注入高速调制电流, 而电学寄生参数(包含寄生电阻和寄生电容)会阻止有源区高速调制电流的注入, 从而影响 VCSEL 的高速调制特性。因此, 电学寄生参数是限制高速调制特性的主要因素之一, 可通过传输函数 $H_p(f)$ 表示:

$$H_p(f) = B \times \frac{1}{1 + (f/f_p)} \quad (2)$$

式中, B 是比例常数, f 为调制频率, f_p 是寄生截止频率。寄生电阻是由 DBRs 的串联电阻、结电阻和氧化物孔径引起的电阻共同决定的, 寄生电容主要来自有源区处结电容、氧化限制层处电容和电极间电容。当 VCSEL 调制频率高于截止频率时, 寄生参数会被一阶低通滤波器阻止有源区注入高速调制电流, 导致调制带宽降低。因此, 寄生电容与寄生电阻的减小是一种提高 VCSEL 高速调制特性的有效方法。一般而言, 为了降低寄生电阻, 通常采用 DBRs 调制掺杂剖面, 将吸收损耗降至最低。此外, 由于寄生电容与氧化限制层的厚度成反比, 为了减小寄生电容, 有研究者提出采用多层氧化限制层来代替传统的单层氧化限制层^[16, 17]。图 2 显示了单层和双层氧化限制层 VCSEL 的模拟频率响应, 结果表明, 在采用双约束氧化层时, VCSEL 的寄生电容降低, 器件的 -3 dB 带宽从 17.1 提高到 21.1 GHz^[7]。

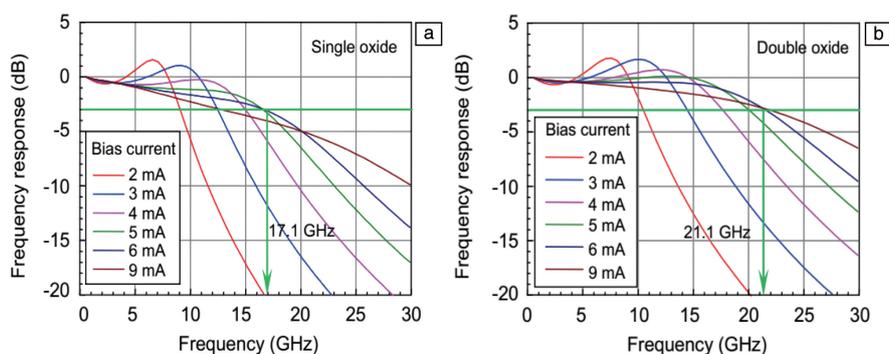


图 2 模拟单层 (a) 和双层氧化限制层 (b) 的 850 nm VCSEL 的频率响应图^[7]

Fig. 2 Simulated frequency responses of the 850 nm VCSEL with single layer (a) and double-confined oxide layers (b)^[7]

此外, 苯并环丁烯由于其低介电常数、高热导率、低介电损耗等特性, 近年来常被用于代替高介电常数的聚酰亚胺来减小电极间的寄生电容, 已逐渐成为一种应用于光通讯领域的新的性能电子材料。2013 年, Shi 等将苯并环丁烯和 Zn 扩散技术相结合, 有效地降低了寄生电容, 将单模 VCSEL 的 -3 dB 带宽提高 12 GHz^[18]。2016 年, Liu 等采用多层氧化限制层设计来增强 VCSEL

的频率响应、降低器件电容, 从而进一步降低寄生参数 RC。在不需要经过后期加工对光子寿命进行失谐(即盖层厚度降低了 p-DBR 的反射率, 从而降低光子寿命)的情况下, 即将 -3 dB 的调制带宽提高到 28.2 GHz^[19]。同年, Chalmers University of Technology 的 Haglund 等通过将多层氧化限制层和 BCB 平坦化技术结合来降低电容, 同时采用 $\lambda/2$ 腔来提高纵向限制因子, 该结构示意图如图

3 所示, 该优化结构减少了载流子的传输时间, 最终 3.5 μm 氧化孔径的 850 nm VCSEL 在 4.1 mA 低偏置电流下实现了 30 GHz 高调制响应带宽^[20]。

综上所述, 通过采用双氧化限制层、BCB 平坦化技术、Zn 扩散技术等方法都可有效降低 VCSEL 寄生参数、提高寄生截止频率, 是提高 VCSEL 高速调制性能的有效方法。

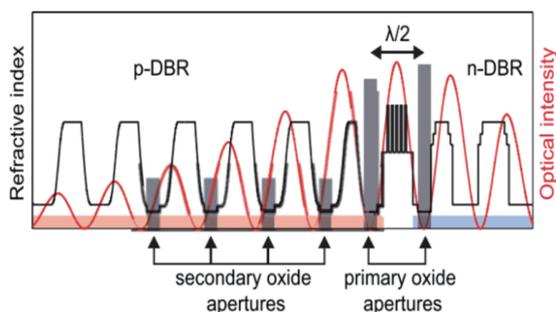


图3 VCSEL腔内的折射率分布和模拟光场强度^[20]

Fig. 3 Refractive index distribution and simulated light field intensity in the VCSEL cavity^[20]

3.3 自热效应对 VCSEL 高速性能的影响

激光器在持续工作过程中, 会不可避免地产生大量的热量。由于 VCSEL 自身的异质结势垒结构会导致串联电阻较高, 由注入电流引发的自热效应对调制速率的影响不可忽视, 因此自热效应也是限制 VCSEL 带宽的因素之一。通常在忽略寄生参数 RC 与阻尼对 VCSEL 调制带宽影响的情况下, 热效应诱导的最大调制带宽可表示为^[21]:

$$f_{-3\text{dB},\text{max}} = \sqrt{1 + \sqrt{2}} f_{r,\text{max}} \quad (3)$$

式中, $f_{-3\text{dB},\text{max}}$ 是 -3 dB 下的最大调制带宽, $f_{r,\text{max}}$ 是由热因素决定的最大弛豫振荡频率。为了减小 VCSEL 的自热效应, 需要减小 VCSEL 微分电阻以降低器件产热, 并采用高热导率材料来改善器件的热分布。2009 年, Westbergh 等使用 InGaAs 代替 GaAs 材料来减少微分电阻、降低器件产热, 从而减少了 VCSEL 的自热效应。结果表明, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 室温下采用 GaAs QWs 的 $f_{r,\text{max}}$ 为 16.5 GHz, 而 InGaAs QWs 的 $f_{r,\text{max}}$ 达到 20 GHz, VCSEL 最大调制带宽明显提高^[15]。

4 VCSEL 高速传输性能的研究进展

VCSEL 因其自身具有低阈值电流、可高频调制、单纵模输出、光束质量好、易于二维集成等优点, 在半导体激光器领域中占有非常重要的地位。而 850 和 980 nm 波段的器件始终代表着 VCSEL 半导体激光器研究的最高水平。近年来, 为推动 VCSEL 在数据通信中的应用, 各

国的研究者对 VCSEL 进行了大量深入的研究, 主要包括瑞典 Chalmers University of Technology、美国 UCSB、德国 Technische Universität Berlin 以及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京工业大学等, 通过研究者们广泛深入的研究, VCSEL 的器件性能、实用性及产业化都得到了显著提高, 在高速传输和高速调制特性方面有了巨大的突破。

4.1 850 nm 波段 VCSEL 的研究进展

850 nm VCSEL 的外延工艺成熟、成本较低, 已成为短距离光互联的标准光源。850 nm VCSEL 通常采用无应变的多量子阱作为有源区, 而近年来 850 nm VCSEL 的有源区多采用具有高增益的应变量子阱结构, 使其在高速调制方面的性能更加优异, 受到世界各个研究单位深入的研究。

1977 年, 垂直腔面发射激光器的概念由日本东京工业大学的伊贺教授首次提出, 随后该团队于 1979 年在低温 -177 $^{\circ}\text{C}$ 下实现了脉冲激射。自此, 国内外对 VCSEL 开始了深入的研究^[8]。

为了提高 VCSEL 的高速特性, 2008 年 Westbergh 等报道采用无应变 GaAs QWs 结构和 6 μm 大小的氧化孔径, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下达到 30 Gbps 的最高数据传输速率^[15]。与非应变的 GaAs QWs 相比, 由于 InGaAs QWs 具有更高的微分增益, 因此逐渐被用作当代高速 850 nm VCSEL 的有源区的 QWs^[22, 23]。2009 年瑞典 Chalmers University of Technology 研究人员利用具有应变的 InGaAs QWs 和双氧化限制层结构, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下实现了 32 Gbps 的无误码数据传输^[24]。应变量子阱结构与氧化限制技术的引入, 使得 850 nm VCSEL 的研究发生了质的飞跃。

随着大数据时代的到来, 对数据传输系统提出了更高的要求。近年来, 应用于光互联的 850 nm VCSEL 逐渐向高调制速率方向发展, 表 1 列举了近年来 850 nm VCSEL 的研究进展。2010 年, 中国台湾 National Central University 研究团队研究了不同深度 (1.2 和 0.6 μm) 的 Zn 扩散对横向模式的限制, 图 4 为两种不同 Zn 扩散深度的 VCSEL 器件横截面与顶部示意图。研究发现, 扩散深度的减小明显减弱了空间烧孔效应, 提高了光子密度。当扩散深度为 0.6 μm 、氧化孔径为 6 μm 时, 在 9 mA 注入电流下实现了大信号调制速率 32 Gb/s^[25]。同年, Westbergh 等研制的直接调制的 850 nm 氧化限制型 VCSEL 在背对背 (back-to-back) 模式下, 实现了 40 Gb/s 的无误码传输^[26]。

为提高 850 nm VCSEL 的高速调制特性, 研究人员通过优化外延结构及工艺, 使得高速调制特性进一步提升。2012 年, Westbergh 等通过在 n-DBR 中采用渐变结构以

及改善掺杂特性,从而获得了较小的电阻和光吸收,有效提高了调制带宽,最终氧化限制型 850 nm VCSEL 实现了 28 GHz 的高调制带宽和 44 Gb/s 的高数据传输速率^[27]。同年,IBM 和 Finisar 联合报道了基于直接调制 850 nm VCSEL 的光链路,其传输速率达到了 55 Gb/s^[28]。2013 年,Westbergh 等通过优化刻蚀深度,使得光子寿命稍大于小信号调制带宽时的寿命,实现了调制速率的大幅度提升。最终研制的 850 nm 氧化限制 VCSEL 在 back-to-back 模式下的室温调制速率达到了 57 Gb/s,实现了无误码传输,创下了当时单管 850 nm VCSEL 的历史新高,此研究使得短距离数据光互联在高速传输方面迈出了重要的一步^[29]。另外,2014 年 Tan 等在 850 nm VCSEL 中实现了 40 Gb/s 无误码高传输速率^[30]。2016 年,University of Illinois Urbana-Champaign 研究人员报道了一种新型高速 850 nm 氧化限制 VCSEL,实现了 50 Gbps 的无误码数据传输和 28.2 GHz 的高调制带宽^[31]。同年,Shi 等通过采用 Zn 扩散技术和表面氧化浮雕技术,使 850 nm VCSEL 在 1 km OM4 多模光纤中实现了 24~29 GHz 宽范围的调制带宽和 54 Gb/s 的无误码传输速率^[32]。

表 1 2010~2019 年高速 850 nm VCSEL 的发展

Table 1 Development of high speed 850 nm VCSEL from the year of 2010 to 2019

Research institute	Year	Modulation bandwidth	Rate	Temperature	Reference
CUT	2010	23 GHz	40 Gb/s	25 °C	[26]
IBM/Finisar	2012		55 Gb/s	25 °C	[28]
CUT	2013	24 GHz	57 Gb/s	25 °C	[29]
UIUC	2016	28.2 GHz	50 Gbps	25 °C	[31]
NTU	2018		64 Gbit/s	25 °C	[34]
NCU	2019		56 Gbit/s	85 °C	[35]
			25 Gbit/s	150 °C	

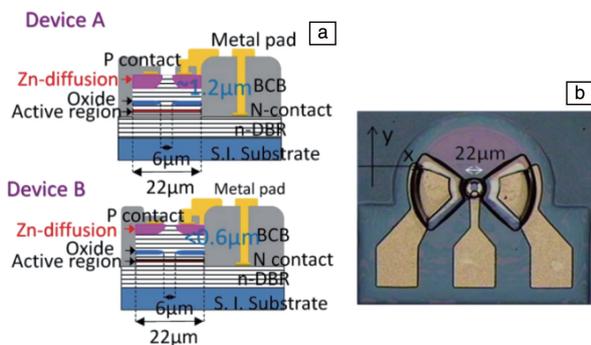


图 4 两种不同 Zn 扩散深度器件横截面(a)和顶面(b)示意图^[25]
Fig. 4 Schematic of the cross-sectional views (a) and top-view (b) of the two devices with different Zn diffusion depth^[25]

随着扩散技术的成熟,2017 年 Larsson 等对 850 nm VCSEL 的结构进行改进,在上 DBR 中采用先进的界面分级和调制掺杂,实现了 47 Gbit/s 的高调制速率 850 nm VCSEL^[33]。2018 年中国台湾 National Taiwan University 的 Kao 等在 OM4 多模光纤(MMF)中实现了单模 850 nm VCSEL 的 64 Gbit/s 高调制速率^[34]。2019 年 Ledentsov 等在有源区采用量子点结构,该结构相比于量子阱结构具有较高的微分增益和极高的温度稳定性,在高温 150 °C 时仍达到了 25 Gbit/s 的高调制速率,该量子点结构的引入为 VCSEL 的研制提供了一种新的思路^[35]。

综上,近年来研究人员围绕 VCSEL 的高速调制物理机制及影响其调制性能的因素,采用新结构设计、BCB 平坦化技术以及控制氧化孔径等方法,使 VCSEL 的高速调制性能逐渐提升,推动了 VCSEL 在光通讯领域的广泛应用。

4.2 980 nm 波段 VCSEL 的研究进展

980 nm VCSEL 对于数据通信也发挥着重要的作用,尤其是对于波分复用和自由空间光通信^[36]。与 850 nm 波长范围相比,980 nm VCSEL 在 OM3 和 OM4 MMF 中具有更高的温度稳定性、更低的色散和更低的传输损耗,表 2 列举了近年来 980 nm VCSEL 的研究进展。980 nm 波段 VCSEL 的有源区常采用 InGaAs/(Al)GaAs 应变量子阱结构或 InAs/GaAs 量子点结构来获得更大的微分增益和更低的透明载流子密度,有望实现更高的转换效率、更低的阈值电流、更高的调制带宽和更高的可靠性。

2007 年,美国 UCSB 大学的 Chang 等在 980 nm VCSEL 中采用多层氧化限制层和锥形氧化孔来降低寄生电容和光损耗,并在上 DBR 中优化了 p 掺杂剖面来降低损耗和电阻,结构的优化使其实现了 35 Gbps 无误码高数据传输速率^[37]。接着,该团队在不改变其静态低损耗性能的前提下,继续优化锥形氧化孔,提供额外的模式约束,并采用 BCB 平坦化技术、减小电极尺寸等措施有效降低寄生电容。2009 年,该团队研制的 980 nm VCSEL 在室温下实现了 35 Gbps 的无误码数据传输速率和大于 20 GHz 的调制带宽^[38]。2011 年,德国 TU Berlin 大学 Hofmann 等通过采用 $\lambda/2$ 腔长和调制掺杂的方法,使 980 nm VCSEL 在 25 °C 下实现了高达 44 Gbps 的无差错传输速率^[39]。

目前,德国 TU Berlin 大学在 980 nm VCSEL 的研究中一直处于世界领先地位,其研制的 980 nm VCSEL 的调制性能、功耗等指标均达到了国际领先水平。2014 年,TU Berlin 大学研制的 980 nm VCSEL 在 25 °C 实现了 42 Gbit/s 无误码传输速率和 -3 dB 小信号下 24.7 GHz 的调制带宽^[40]。2016 年,该团队又提出一个新的设计结

构, 在上下 DBR 中加入调制掺杂电流扩展层, 使器件串联电阻减小, 有效提高了高速调制性能, 使得该 980 nm VCSEL 在高温稳定性、高传输速率方面创下了新记录, 在 25 °C 下传输速率达到了 50 Gbit/s, -3 dB 小信号调制带宽为 26.6 GHz, 在 85 °C 高温下也达到了 46 Gbit/s 无误码数据传输^[41]。2017 年, TU Berlin 大学 Rosales 等报道了一种简化的外延层设计, 如图 5 所示, 该结构具有较小的有源区, 确保了光场模式和载流子的强约束, 同时在 $\lambda/2$ 光学腔中采用双氧化限制层、1.5~2.5 μm 的小氧化孔径, 增强了载流子与光子的横向与纵向限制, 提高了载流子与光子的利用效率, 最终在室温 25 °C 下实现 -3 dB 小信号调制带宽为 30 GHz, 在 85 °C 高温下实现 25 GHz 的高调制带宽^[42]。

表 2 2007~2019 年高速 980 nm VCSEL 的发展

Table 2 Development of high speed 980 nm VCSEL from the year of 2007 to 2019

Research institute	Year	Modulation bandwidth	Rate	Temperature	Reference
UCSB	2007	16.2 GHz	35 Gbps	25 °C	[37]
TU Berlin	2011		44 Gbps	25 °C	[39]
TU Berlin	2014	24.7 GHz	42 Gbit/s	25 °C	[40]
		23 GHz	38 Gbit/s	85 °C	
TU Berlin	2016	26.6 GHz	50 Gbit/s	25 °C	[41]
TU Berlin	2017	30 GHz		25 °C	[42]
		25 GHz		85 °C	
TU Berlin	2018	35 GHz		25 °C	[43]
TU Berlin	2019	>30 GHz		25 °C	[44]

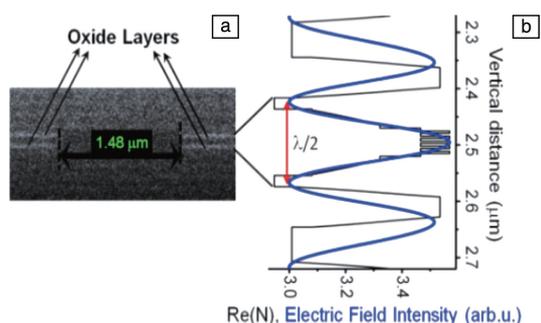


图 5 980 nm VCSEL 的截面 SEM 照片(a), $\lambda/2$ 厚光腔周围的双氧化层沿外延生长方向的一维模拟电场强度和真实折射率剖面图(b)^[42]

Fig. 5 Cross-sectional SEM image of a fabricated 980 nm VCSEL(a), one-dimensional simulated electric-field intensity and real refractive index profile in the vertical direction around the double oxide-layers surrounding the $\lambda/2$ thick optical cavity(b)^[42]

为了获得更高的传输速率, 2018 年, TU Berlin 大学的 Haghighi 等通过优化 DBR 掺杂模式和采用不同厚度的双氧化限制层结构, 研制出在氧化孔径为 3 μm 时 980 nm VCSEL 的调制带宽达到了创纪录的 35 GHz^[43]。2019 年, Hamad 等提出了一种新型的超高速单模和多模垂直腔面发射激光器小信号调制响应的综合模型, 在氧化孔径为 7 μm 时实现了大于 30 GHz 的调制带宽^[44]。

5 结语

与边发射激光器相比, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有众多独特的优势, 现已被广泛应用于光互联、光存储等众多领域。近年来随着大数据时代的到来, 对网络传输速率与数据处理能力提出了更高的要求, 使高速 VCSEL 逐渐成为高速光通讯与光互连网络的主要光源之一。因此, 深入研究高速 VCSEL 的物理机制及其高性能的影响因素成为了国内外关注的焦点。各种新型外延结构和工艺制备技术的不断优化, 使 VCSEL 的高速传输取得了突破性进展, 对数据中心的大容量光互连和超级计算机网络产生巨大的影响。然而面对未来更高数据传输速率的需求, 仍需进一步优化外延结构和工艺参数来实现 VCSEL 更高的调制性能。

近年来, VCSEL 在消费电子、5G 通讯、无人机以及物联网智能服务系统等方面也发挥着重要的作用。目前, VCSEL 已成为我们日常生活中各种传感器应用的基础, 受到学术界越来越多的关注, 可预见 VCSEL 在未来数据网络时代具有更大的应用前景与竞争力。

参考文献 References

- [1] IGA K. Japanese Journal of Applied Physics [J], 2018, 57(8S2): 08PA01.
- [2] KUCHTA D M, RYLYAKOV A V, DOANY F E, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters [J], 2015, 27(6): 577-580.
- [3] 朱永元. 中国材料进展 [J], 2010, 29(10): 30-39.
ZHU Y Y. Materials China [J], 2010, 29(10): 30-39.
- [4] HUGUES-SALAS E, GIDDINGS R P, JIN X Q, *et al.* Optics Express [J], 2011, 19(4): 2979-2988.
- [5] WANG Z F, NING Y Q, ZHANG Y, *et al.* Optics Express [J], 2010, 18(23): 23900-23905.
- [6] 王占国. 中国材料进展 [J], 2009, 28(1): 26-30.
WANG Z G. Materials China [J], 2009, 28(1): 26-30.
- [7] CHENG C H, SHEN C C, KAO H Y, *et al.* Opto-Electronic Advances [J], 2018, 1(3): 180005.
- [8] 钟础宇. 少模垂直腔面发射激光器及优化台面排布的面发射激光阵列的研究 [D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
ZHONG C Y. Study on Few-Mode Vertical-Cavity Surface-Emitting La-

- ser and VCSEL Array with Optimized Mesa Arrangement[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Science, 2018.
- [9] LI H, WOLF P, MOSER P, *et al.* SPIE Newsroom[J], 2014, 25, doi: 10.1117/2.1201411.005689.
- [10] MUTIG A, LOTT J A, BLOKHIN S A, *et al.* Applied Physics Letters [J], 2010, 97(15): 151101.
- [11] MUTIG A, LOTT J A, BLOKHIN S A, *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 2011, 17(6): 1568–1575.
- [12] WOLF P, MOSER P, LARISCH G, *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 2013, 19(4): 1701207–1701208.
- [13] LI H, WOLF P, MOSER P, *et al.* Electronics Letters[J], 2014, 50(2): 103–105.
- [14] BENNER A F, IGNATOWSKI M, KASH J A, *et al.* Ritter, Exploitation of Optical Interconnects in Future Server Architectures[J], 2005, 49(4/5): 755–775.
- [15] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, HAGLUND A, *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 2009, 15(3): 694–703.
- [16] CHANG Y H, KUO H C, LAI F I, *et al.* IEEE Proceedings-Optoelectronics[J], 2005, 152: 170–173.
- [17] OU Y, GUSTAVSSON J S, WESTBERGH P, *et al.* IEEE Photon Technology Letters[J], 2009, 21(24): 1840–1842.
- [18] SHI J W, WEI Z R, CHI K L, *et al.* Journal of Lightwave Technology [J], 2013, 31(24): 4037–4044.
- [19] LIU M, WANG C Y, FENG M, *et al.* Proceedings of Optical Fiber Communication Conference[C]. Optical Society of America, 2016.
- [20] HAGLUND E, WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, *et al.* Journal of Lightwave Technology[J], 2016, 34(2): 269–277.
- [21] MUTIG A. High Speed VCSELs for Optical Interconnects[M]. Berlin, Heidelberg: Physical processes in Lasers and VCSEL design Springer, 2011: 19–84.
- [22] JOHNSON R H. Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics[C]. Optical Society of America, 2008.
- [23] HEALY S B, O'REILLY E P, GUSTAVSSON J S, *et al.* IEEE Journal of Quantum Electronics[J], 2010, 46(4): 506–512.
- [24] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, HAGLUND A, *et al.* Electronics Letters[J], 2009, 45(7): 366–368.
- [25] SHI J W, WENG W C, KUO F M, *et al.* IEEE Photonics Journal[J], 2010, 2(6): 960–966.
- [26] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, KOGEL B, *et al.* Electronics Letters[J], 2010, 46(14): 1014–1016.
- [27] KUCHTA D M, RYLYAKOV A V, SCHOW C L, *et al.* Proceedings of Fiber-Optics & Photonics Conference[C]. IEEE Photonics Society, 2012.
- [28] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, KOGEL B, *et al.* Electronics Letters[J], 2012, 46(14): 1014–1016.
- [29] WESTBERGH P, HAGLUND E P, HAGLUND E, *et al.* Electronics Letters[J], 2013, 49(16): 1021–1023.
- [30] TAN F, WU M K, LIU M, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters [J], 2014, 26(3): 289–292.
- [31] MICHAEL L, WANG C Y, FENG M, *et al.* Proceedings of Optical Fiber Communication Conference [C]. Optical Society of America, 2016.
- [32] CHI K L, SHI Y X, CHEN X N, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2016, 28(12): 1367–1370.
- [33] LARSSON A, GUSTAVSSON J S, WESTBERGH P, *et al.* VCSEL Design and Integration for High-Capacity Optical Interconnects[C]// Proceedings of Optical Interconnects XVII. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10109: 101090M.
- [34] KAO H Y, TSAI C T, LEONG S F, *et al.* Photonics Research[J], 2018, 6(7): 666–673.
- [35] LEDENTSOV N, AGUSTIN M, SHCHUKIN V A, *et al.* Solid State Electronics[J], 2019, 155: 150–158.
- [36] NASU H. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics [J], 2010, 16(5): 1337–1346.
- [37] CHANG Y C, WANG C S, COLDREN L A. *et al.* Electronics Letters [J], 2007, 43(19): 1022–1023.
- [38] CHANG Y C, COLDREN L A. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 2009, 15(3): 704–715.
- [39] HOFMANN W, MOSER P, WOLF P, *et al.* Proceedings of Optical Fiber Communication Conference [C]. Optical Society of America, 2011.
- [40] LI H, WOLF P, MOSER P, *et al.* Electronics letters[J], 2014, 50(2): 103–105.
- [41] LARISCH G, MOSER P, LOTT J A, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2016, 28(21): 2327–2330.
- [42] ROSALES R, ZORN M, LOTT J A, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2017, 29(23): 2107–2110.
- [43] HAGHIGHI N, LARISCH G, ROSALES R, *et al.* 35 GHz Bandwidth with Directly Current Modulated 980 nm Oxide Aperture Single Cavity VCSELs[C]//2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC). IEEE, 2018: 1–2.
- [44] HAMAD W, SANAYEH M B, SIEPELMEYER T, *et al.* IEEE Photonics Journal[J], 2019, 56(1): 1–11.

(编辑 吴锐)