

文章编号: 1000-7032(2020)12-1443-17

垂直腔面发射激光器研究进展

张继业^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 张建伟¹, 宁永强^{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 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要: 垂直腔面发射激光器 (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 是 40 多年前被发明的, 具有很多独特的优势, 例如尺寸小、功耗低、效率高、寿命长、圆形光束以及二维面阵集成等。近年来, VCSEL 市场发展迅速, 在 5G 通信、光信息存储、3D 传感、激光雷达、材料加工以及激光显示等领域被广泛应用。针对不同的应用需求, VCSEL 的功率、速率、能效、高温性能以及波长的多样性等性能都有了长足的进步。本文首先介绍了 VCSEL 的研究历程和优点特性; 综述了 VCSEL 在高功率、高速、高温下工作等方面的研究进展和应用现状; 最后对 VCSEL 的最新应用做了介绍, 展望了 VCSEL 的市场。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 高功率; 高速; 高温

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200339

Research Progress of Vertical-cavity Surface-emitting Laser

ZHANG Ji-ye^{1,2}, LI Xue^{1,2}, ZHANG Jian-wei¹, NING Yong-qiang^{1*}, WANG Li-jun^{1*}

(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)

* Corresponding Authors, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn; liwang2013ys@163.com

Abstract: The vertical-cavity surface emitting laser (VCSEL) was invented 40 years ago, where a lot of unique features can be expected, such as small footprint, low power consumption, high efficiency, long lifetime, circular beam and two-dimensional arrangement and so on. In recent years, the market of VCSELs has been growing up rapidly, and VCSELs are now key devices in the fields of 5G communication, optical information storage, 3D sensing, material processing, light detection and ranging (LiDAR), and laser display. For different application requirements, VCSEL has great achievements in the area of power, efficiency, speed and wavelength. In this paper, firstly, the research history and advantages of VCSEL are introduced; then, the research progress and application status of VCSEL at high power, high speed and high temperature are reviewed; lastly, the latest application of VCSEL is introduced, and the market of VCSEL is prospected.

Key words: vertical-cavity surface emitting laser (VCSEL); high power; high speed; high temperature

收稿日期: 2020-11-06; 修订日期: 2020-11-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2002401); 国家自然科学基金(61874117,11674314,61434005,11774343,61727822,61991433); 中科院先导科技专项(XDB43030302); 装发共用技术(41414060103); 吉林省科技发展计划重点项目(20190302042GX); 济南市科技计划(2019GXRC041); 广东省重点领域研发计划(2020B090922003); 中国科学院 STS 创新创业指导项目(KFJ-STC-SCYD-318) 资助

Supported by National Key Research and Development Program of China(2018YFB2002401); National Natural Science Foundation of China(61874117,11674314,61434005,11774343,61727822,61991433); Pilot Project of Chinese Academy of Sciences(XDB43030302); Equipment Preresearch(41414060103); Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan(20190302042GX); Jinan Science and Technology Plan(2019GXRC041); Key Research and Development Project of Guangdong Province(2020B090922003); STS Innovation and Entrepreneurship Guidance Project of Chinese Academy of Sciences(KFJ-STC-SCYD-318)

1 引 言

半导体激光器是信息化社会最具有代表性的关键光电子器件之一,已经在许多领域得到广泛的应用。研究人员在边发射激光器(Edge emitting laser, EEL)的研制过程中遇到了阵列制备工艺复杂、器件测试困难以及输出模式和波长难以控制等问题。因此,在 1977 年,日本东京工业大学教授 K Iga 提出了一种 VCSEL 的概念^[1],并在 1979 年采用 GaInAsP 材料体系在 77 K 温度下首次实现脉冲输出^[2]。如图 1 所示^[1],VCSEL 是一种在与半导体外延片垂直方向上形成光学谐振腔、发出的激光束与衬底表面垂直的半导体激光器结构。

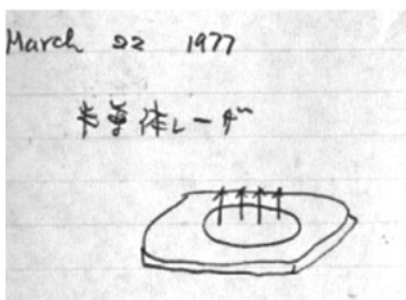


图 1 1977 年 VCSEL 构想草图^[1]

Fig. 1 A sketch of the VCSEL idea in 1977^[1]

在这样的面发射半导体激光器结构中,光的输出端和器件底端都需要反射镜,而反射镜的高反射率对降低阈值电流密度起着非常巨大的作用。因此,人们针对高反射率的反射镜进行了各种研究,例如介质膜分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg reflectors, DBR)、半导体 DBR、复合反射镜以及金属膜反射镜等^[3]。GaAs 材料体系的 VCSEL 从 1983 年开始研究,到 1986 年实现低阈值的微腔操作^[4],这期间采用两种不同类型的膜以四分之一波长的厚度交替生长而成的 DBR 能够实现光强反射,反射率达到了 99% 以上。到了 1988 年,VCSELs 器件采用多层 SiO₂/TiO₂ 介质膜 DBR,首次实现了 850 nm 的室温连续激光^[5]。然而,虽然数对介质膜 DBR 即可实现高反射率,但是这种结构不导电且散热性差。为了改进这一状况,1986 年首次实现了 AlGaAs/GaAs DBR 的 VCSEL 器件^[6]。由于 p 型 AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 具有较高的势垒电阻,因此该器件只在 n 侧使用半导体 DBR,而另一侧反射镜采用 Au/SiO₂ 镜面

组成。为了改进半导体 DBR 的势垒电阻问题,许多研究机构进行了报道^[6-9]。其中代表性的器件是采用高浓度 Zn 掺杂的 AlAs 层制备 p 型 DBR^[7]。此外,为了避免 DBR 的高势垒电阻问题,VCSEL 器件采用光泵浦方式工作^[8],或者减少一侧 DBR 的层数和一个外部输出耦合镜相结合^[9],实现连续输出。而量子阱(Quantum wells, QWs)和量子点(Quantum dots, QDs)结构应用于 VCSEL 的有源区域时,进一步提高了 VCSEL 输出性能^[1]。随后,VCSEL 器件的深入研究展现了其本身所具有的独特优势,实现了高功率输出^[10-11]、高调制速率^[12-13]以及高温稳定^[14]等性能。

与传统的 EEL 结构不同,VCSEL 结构是由上下 DBR、QWs、氧化孔径和上下金属电极组成。其有源区位于 n 型掺杂的 DBR 和 p 型掺杂的 DBR 之间。这种结构具有很多独特的优势。

(1) 光束质量: VCSEL 的出射光是从一个圆形对称的台面中出射,输出小发散角的圆型对称光斑,通过简单的光束整形系统,就可以实现低成本高效率的耦合;

(2) 阈值低: 由于 VCSEL 有源区的体积小,容易实现低阈值激射,甚至可以达到 μA 量级;

(3) 无镜面损伤: VCSEL 的反射镜是外延生长的两个 DBR,不存在激光腔面光学损伤问题;

(4) 稳定性和可靠性: 组成 VCSEL 的半导体材料折射率随温度变化很小,导致器件的激射波长温漂小,具有非常宽的工作温度范围;

(5) 单纵模输出: VCSEL 的谐振腔长度很短,即 μm 量级,纵模间距较大,只在单纵模下输出,可以得到较大的弛豫振荡频率;

(6) 大尺度二维阵列: VCSEL 的出光方向垂直于基底,易于实现高密度二维阵列集成的大功率输出且低成本制造的晶圆测试。

随着 VCSEL 的大口径以及二维阵列的开发,VCSEL 的输出功率有了显著的提高。针对高功率半导体激光器在激光泵浦、医疗、军事以及材料加工等应用领域的需求日益增长,高功率 VCSEL 成为很重要的一个研究方向。而且近年来,VCSEL 在消费市场的应用越来越广泛,包括激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)、距离传感、自动对焦、3D 传感、虹膜识别、空气和水质检测以及虚拟现实(Virtual reality, VR)/增强现实(Augmented reality, AR)/混合现实(Mixed reality,

MR) 等等, 针对高功率 VCSEL 的需求也越来越大。同时, 由于先进驾驶系统(Advanced driving assistance systems, ADAS)、云计算、物联网技术与 5G 通信技术应用愈发成熟, 信息的快速爆炸产生了对数据带宽大幅增长的需求。而 VCSEL 具有较大的弛豫振荡频率, 可以实现高调制带宽, 因此在光互连和光数据网络的应用中占据主导地位。而能应用于光互联、3D 传感、车载雷达、原子钟等领域, 是由于 VCSEL 的关键特性: 稳定的高温性能和对温度变化不敏感。为满足这些应用需求, 高温稳定工作、可靠性高的 VCSEL 近年来越来越受到关注。

随着新应用的出现, VCSEL 技术有了显著的改进, VCSEL 的性能优化得到各方研究人员的重视。本文主要集中探讨 VCSEL 器件在高功率、高速及高温下工作的研究进展以及应用前景。

2 高功率 VCSEL

2.1 高功率 VCSEL 研究进展

在 VCSEL 发展之初, 主要在降低阈值、扩大输出波长范围和高速调制等方面进行研究, 直到 1996 年才对提高 VCSEL 输出功率方面展开了研究。高功率 VCSEL 器件最早是由德国乌尔姆(Ulm) 大学开始研制, 分别制备了顶发射和底发射的 980 nm VCSELs 单管器件, 室温下连续输出功率分别达到 180 mW 和 350 mW^[15]。随后, 美国加州大学伯克利分校制备了 940 nm VCSELs 单管器件, 连续输出功率达到 2 W, 脉冲输出功率达到 5 W^[16]。2001 年, 德国 Ulm 大学报道了 320 μm 口径的 VCSEL 单管器件, 980 nm 波长的输出功率为 0.89 W, 二维阵列器件达到 1.55 W^[17]。2005 年, 中科院长春光机所制作的 500 μm 口径 VCSEL 单管器件实现了室温连续输出, 达到了 1.95 W^[18]。同年, 美国普林斯顿光电公司(Princeton Optronics) 采用金刚石散热片在直径 350 μm 器件上实现了连续输出达到 3 W^[19]。为了提高功率, VCSEL 阵列器件的开发成为人们关注的焦点, 其中 Princeton Optronics 公司是目前最先进的, 代表了高功率 VCSEL 的最高水平。2008 年, 该公司在 5 mm \times 5 mm 的 VCSEL 阵列器件上实现了功率为 45 W 的输出, 如图 2 所示^[20]。随后, 该公司设计了单元更加紧凑的 VCSEL 阵列, 在热沉温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 下, 连续输出功率

达到 231 W, 脉冲输出达到数千瓦, 实现了国际最高水平^[21]。

在国内, 中科院长春光机所于 2011 年实现了 980 nm VCSEL 单管脉冲输出达到 92 W^[22], 4 \times 4 VCSEL 阵列脉冲输出达到 123 W^[23]。2014 年, 中科院长春光机所采用 4 个高功率 VCSEL 单管串联连接形成阵列, 将脉冲输出功率提高到 210 W^[24]。

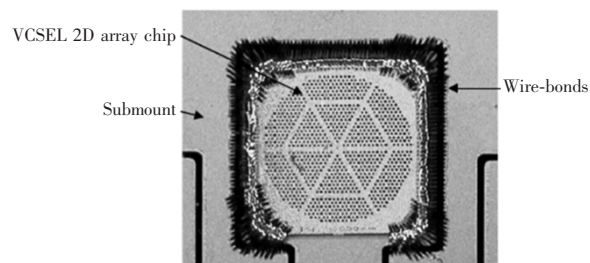


图 2 980 nm 高功率 VCSEL 阵列^[20]

Fig. 2 Schematic diagram of 980 nm high power VCSEL array^[20]

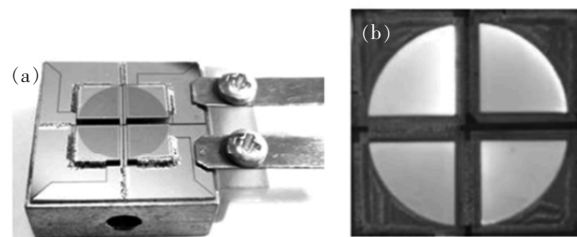


图 3 (a) 4 个串联 808 nm 的 VCSEL 二维阵列; (b) 模块俯视图照片^[30]。

Fig. 3 (a) Image of four 2D VCSEL arrays connected in series. (b) Top-view photograph of the module^[30].

808 nm 波长的 VCSEL 首次由英国威尔士卡迪夫大学在 1999 年提出^[23], 但是由于 GaAs 材料体系对 808 nm 波长有强烈的吸收, 因此 808 nm 波长的高功率 VCSEL 器件在早期一直未得到实现。直到 2009 年, 美国 Princeton Optronics 公司将 VCSEL 芯片衬底完全去除并焊接在金刚石热沉上, 在 3 mm \times 3 mm 芯片上集成了 3 000 个发光单元形成 VCSEL 阵列, 连续输出功率超过 58 W^[25]。为了提高功率, 该公司制作出尺寸为 5 mm \times 5 mm 的 VCSEL 面阵, 连续输出功率超过 120 W^[26]。之后, 该公司集成了多个该 VCSEL 面阵列实现连续输出功率超过 650 W^[27]。2011 年, 该公司使用 12 块 2.7 mm \times 2.7 mm 的 VCSEL 阵列实现了 500 W 的准连续输出^[28], 随后, 又将该模块的输出功率提高到 1.2 kW^[29]。2012 年,

该公司设计了 VCSEL 圆形阵列, 峰值输出功率为 810 W, 如图 3 所示^[30]。2017 年, 该公司又研制了峰值功率高达 2.3 kW 的 VCSEL 阵列^[31]。

然而, 国内对于 808 nm VCSEL 研究仅限于小尺寸 VCSEL 阵列器件的研制。2011 年, 中科院长春光机所制备了 2×2 单管发光直径 70 μm 的 808 nm VCSEL 列阵, 连续输出功率仅为 115 mW^[32]。2014 年, 中科院长春光机所对 VCSEL 的 DBR 的材料进行了优化设计, 采用非闭合环结构制备 2×2 VCSEL 列阵, 实现了脉冲输出功率为 30 W^[33]。

最初对 1 060 nm VCSEL 的研究主要集中在低功耗通信器件上。而 1 060 nm 波长的高功率 VCSEL 的开发也取得了不错的成果。2007 年, 美国 Princeton Optronics 公司研制出高温工作下的 1 064 nm VCSEL 阵列模块, 连续输出功率达到 40 W。2014 年, 该公司将 6 个高性能 VCSEL 阵列组成模块, 实现输出 300 W 的功率^[34]。

VCSEL 器件通过增加出光窗口的孔径和二维集成阵列的密度, 实现了输出功率在几百毫瓦到几千瓦之间的裕度。然而, 高功率 VCSEL 单管或阵列器件均为多横模输出, 导致输出光束的光束质量很差。因此, 如何实现高功率单横模激励是目前研究的一个热点。具有大出光窗口孔径的 VCSEL 器件虽然能够保证高功率的输出, 但这种大孔径窗口结构的注入电流分布不均匀, 导致输出模式很差。通过优化 p 面金属电极来改变注入电流的分布, 能够改变输出光的模式。2011 年, 长春理工大学通过在 p 面金属电极上采用分布式环形电极, 制备了 300 μm 口径的顶发射 808 nm VCSEL 单管器件, 连续输出功率达到 300 mW, 远场发散角半角宽度小于 13° , 如图 4 所示^[35]。2012 年, 中科院长春光机所采用三维有限元方法分析了电极结构对有源区内电流密度分布的影响, 优化 p 面金属电极, 使注入电流均匀地分布。该机构制备的 980 nm VCSEL 单管器件在室温下连续输出功率达到 1.46 W, 发散角为 5.4° , 而 8×8 VCSEL 阵列输出光束的发散角为 10.2° , 连续输出功率达到了 1.95 W^[36]。

另一种改善光束质量的方法是在 VCSEL 器件刻蚀微结构。2009 年, 中科院长春光机所在 980 nm VCSEL 器件的衬底上制备了直径为 300 μm 的微透镜, 连续输出功率超过了 180 mW, 远

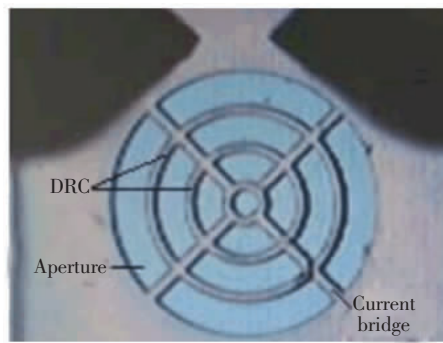


图 4 分布式环形电极示意图^[35]

Fig. 4 Schematic diagram of distributed ring contact^[35]

场发散角半角宽度分别为 7.8° 和 8.4° , 如图 5 所示^[37]。同年, 该机构又制备了 6×6 微透镜集成的 980 nm VCSEL 列阵, 最高输出功率达到 1.17 W, 远场发散角约为 6° ^[38]。2012 年, 该机构在 VCSEL 表面制备金属光栅, 实现输出功率为 860 mW, 远场光束发散度被抑制到 12° , 如图 6 所示^[39]。2014 年, 日本滨松光子学 K. K. 中央研究室通过在有源区沉积光子晶体结构制备了 940 nm VCSEL 单管器件, 实现了超过 1 W 的连续输

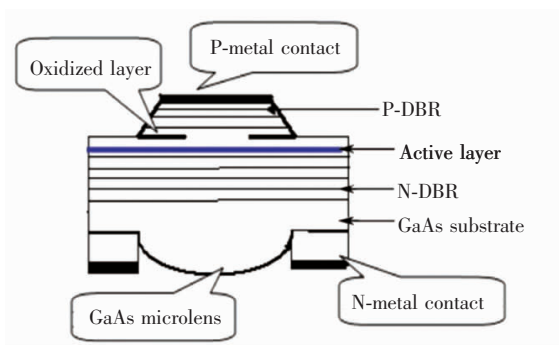


图 5 微透镜集成底发射垂直腔面发射激光器结构示意图^[37]

Fig. 5 Schematic diagram of microlens-integrated bottom-emitting VCSEL^[37]

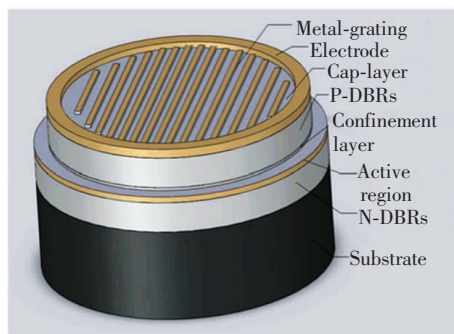


图 6 金属光栅 VCSEL 示意图^[39]

Fig. 6 Schematic of metal-grating VCSEL^[39]

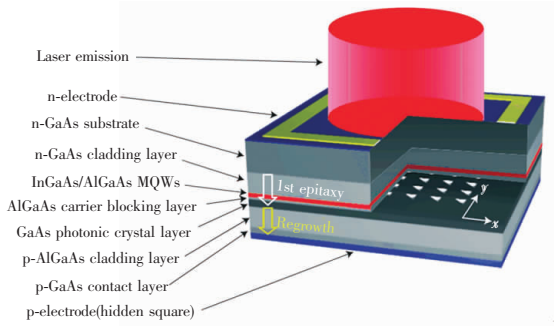


图 7 光子晶体 VCSEL 示意图^[40]

Fig. 7 Schematic of the photonic-crystal VCSEL structure^[40]

出,而光束质量接近 1^[40],这是里程碑式的进步。

为了解决高功率 VCSEL 光束质量差的问题,研究者又提出了垂直外腔面发射激光器。根据泵浦方式的不同,可分为光泵浦垂直外腔面发射激光器(Optically-pumped vertical external cavity surface emitting laser, OP-VECSEL)和电泵浦垂直外腔面发射激光器(Electrically-pumped vertical external cavity surface emitting laser, EP-VECSEL)。2003 年,美国诺瓦卢公司研制了 980 nm 的 EP-VECSEL,实现了 0.5 W 基模($M^2 \approx 1.0 \sim 1.2$)和 1 W 的多模($M^2 \approx 10 \sim 20$)输出,如图 8 所示^[41]。2009 年,美国 Princeton Optronics 公司研制出了 980 nm 的 EP-VECSEL 阵列,包含 475 个发光单元,基模连续和脉冲输出功率分别达到 42 W 和 155 W^[42]。

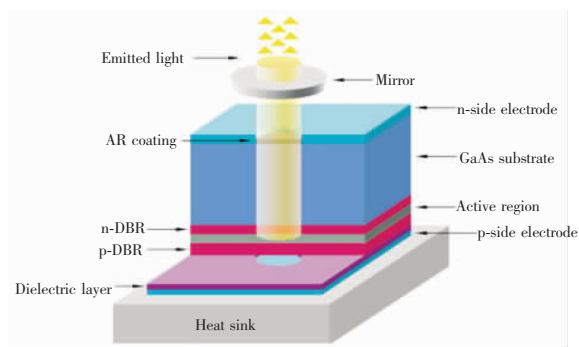


图 8 诺瓦卢公司研制的 980 nm EP-VECSEL 结构简图^[41]

Fig. 8 Structure diagram of 980 nm EP-VECSEL developed by Novalux Company^[41]

对于 OP-VECSEL 而言,其制备技术已经比较成熟。研究人员对其散热结构和泵浦方式进行了改进,有效地提高了 OP-VECSEL 的输出功率。2003 年,德国 Osram 半导体公司将 OP-VECSEL 芯片在衬底去除后和金刚石散热片相结合,实现

了最大功率达到 8 W 的 1 000 nm 波长输出, $M^2 < 1.8$ ^[43]。2006 年,三星尖端技术研究所设计出底端泵浦的 1 060 nm OP-VECSEL,模输出功率可达到 7 W ($M^2 < 1.5$),最大输出功率为 9.1 W,如图 9 所示^[44]。2008 年,瑞士苏黎世联邦理工学院 RUDIN 等获得 960 nm 波长的 20 W 的基模输出,光束质量 $M^2 \approx 1.1$ ^[45]。2012 年,德国菲利普马尔堡大学联合报道了工作温度 3 °C 下,OP-VECSEL 激光波长为 1 028 nm,单横模连续输出功率达到 106 W^[46]。2016 年,德国菲利普马尔堡大学采用两个增益芯片结构的 OP-VECSEL 器件实现了激光双波长为 1.01 μm 和 1.02 μm ,连续输出功率超过 600 W^[47]。2019 年,中科院长春光机所研制了 980 nm OP-VECSEL,单横模连续输出功率达到 10 W^[48]。

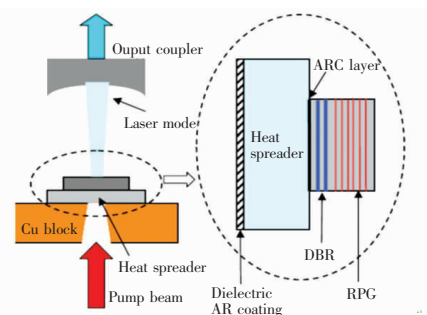


图 9 底端泵浦的 OP-VECSEL 及芯片结构示意图^[44]

Fig. 9 Schematic of the end-pumped VCSEL and chip structure^[44]

2.2 应用前景

高功率 VCSEL 在保留前面所叙述的固有优点的基础上,能够实现更高的输出功率,使其在多个领域有望取代传统的高功率 EEL。由于 VCSEL 的特殊结构,使其在光纤耦合方面具有天然的优势^[49]。因此,980 nm 和 808 nm VCSEL 能够成为掺铒光纤放大器和 Nd: YAG、Nd: YVO₄ 固体激光器的新型泵浦光源^[50-51]。同时,VCSEL 的激光波长最大只有几个纳米的线宽,使色彩数量比发光二极管(Light-emitting diode, LED)的色彩标准增加了 30%~40%,提高了光调制的效率,并且其成本低、效率高、寿命长。这些优点使 VCSEL 在腔内或腔外倍频后产生三基色激光,可以作为激光显示的光源,如图 10 所示^[41]。目前,激光电视已经在市场上广受好评。

近红外照明(808~1 064 nm)用于摄像机系统的监视和检查,它可以拍摄高速和困难条件下

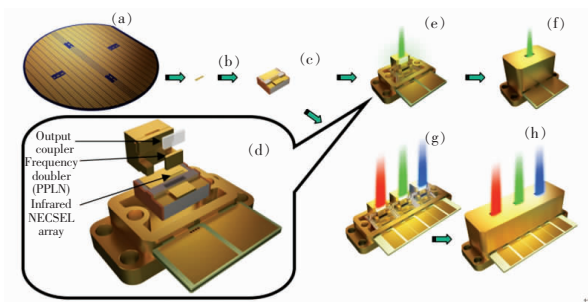


图 10 激光显示用三基色 EP-VECSEL 面阵光源^[41]

Fig. 10 EP-VECSEL array light source with three primary colors for laser display^[41]

的物体图片,如图 11 所示^[52]。由于 VCSEL 的光束整形高效且简单,避免了 LED 宽发射模式所需的复杂光学系统,使得 VCSEL 阵列成为一个良好的辐射源。此外,VCSEL 阵列的亮度比最亮的 LED 高出 10 ~ 100 倍,可在数百米的距离进行聚焦照明。该应用中最重要优势可能是对特定区域进行非常均匀的照明,宽高比可以根据相机的需要进行调整。虽然不同的波长都可以用于红外照明,但通常会在响应性、眼睛安全、成本和效率等方面进行权衡。例如,808 nm 光源为 CCD 相机提供了最佳的响应率,但对于高功率光源来说,它对眼睛不安全,不能用于隐蔽的应用。976 nm 光源可用于基于 Si 或 InGaAs 的探测器,虽然具有较低的响应率,但可降低对眼睛的损伤,并可用于隐蔽应用。在 1 064 nm 区域,基于 InGaAs 的相机的响应率要好得多。它被认为是一种隐秘的波长,可以降低对眼睛的损伤。

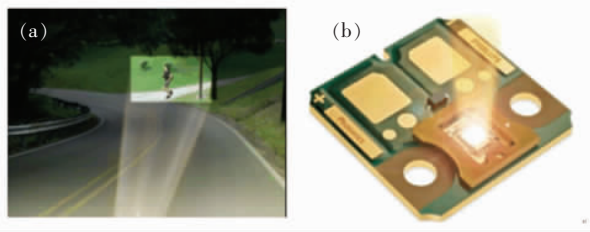


图 11 (a) 经过光整形的统一照明图案,可识别道路上的行人;(b) 照明用大功率 VCSEL 阵列^[52]。

Fig. 11 (a) Uniform illumination pattern with adapted shape allowing recognizing a person on the road. (b) High power VCSEL array for illumination^[52].

高功率 VCSEL 系统不仅仅是一种新型的激光光源,它们有可能重新定义工业热处理工艺。这种紧凑而坚固的系统可以很容易地集成到制造

设备中,或者集成在生产线上,取代了长度超过 1 m 的熔炉。VCSEL 加热系统的定向激光辐射将高红外功率光束集中到一个明确的目标区域,无需复杂的光束整形系统或扫描单元。目标上的每一点都由许多单独的 VCSELs 辐射,以促进其均匀性和坚固性。VCSEL 加热模块的功率密度足以使塑料材料高速熔化。相关的工业工艺的例子是塑料零件的成型,以及通过塑料焊接或热熔胶将零件连接起来。而 VCSEL 加热系统也可用于物体表面、油漆、涂料和薄膜的干燥和固化过程。作为工业加热工艺的进一步研究领域,VCSEL 技术对钢件的局部热处理正是当下研究的热点。特别是针对加热轮廓的精确空间和时间控制是有利的,例如在工件的尖锐边缘,很难用传统技术进行处理。

3 高速 VCSEL

随着计算机性能和互联网流量数据爆炸性增长,采用常规的电气互联已经不再适合。光互连 (Optical interconnect, OI) 技术具有更高的带宽、更低的能耗以及更小的尺寸等优点,因此已广泛应用于数据中心和超级计算机^[53]。1996 年,美国霍尼韦尔公司首次将基于 VCSEL 的短距离 OI 技术应用于数据通信^[54-55]。现今,VCSEL 已经成为短距离 OI 技术的主要激光光源以及开发其他 OI 系统的关键组件。因此,许多研究机构对高速 VCSEL 产生了极大的兴趣,并进行了深入研究。

目前,基于使用标准 OM3、OM4 或新 OM5 多模光纤 (MMF) 的系统,850 nm 波长是短距离数据通信的主流。850 nm 高速 VCSEL 外延工艺较为成熟,传播损耗低(2 ~ 3 dB/km),作为短距离 OI 系统中的重要器件已经开始批量生产。2008 年,美国菲尼萨公司 (Finisar) 制备了常规的 850 nm VCSEL,有源区采用非应变 GaAs QW, AlGaAs 作为势垒层,氧化口径为 6 μm ,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,实现了 30 Gbps 的调制速率,调制带宽达到了 19 GHz^[56]。与 GaAs QW 相比,压应变 InGaAs QW 具有更大的微分增益,可以用于高速 VCSEL。2009 年,瑞典查尔莫斯科技大学 (CUT) 使用 InGaAs 量子阱和双氧化层技术实现了 20 GHz 调制带宽、32 Gbps 的调制速率^[57]。2012 年,CUT 在室温下实现了 28 GHz 调制带宽、44 Gbps 调制速率^[58]。随后,该机构又研究了光子寿命和信号传输速率之间的关系,通过优化光子寿命进一步

提高了 VCSEL 性能, 报道了氧化口径 $8\ \mu\text{m}$ 的器件在 $25\ ^\circ\text{C}$ 下, 实现了 $57\ \text{Gbps}$ 的无误码传输和 $24\ \text{GHz}$ 的带宽^[59]。2015 年, CUT 与美国国际商业机器公司 (IBM) 合作, 引入均衡功能, 将驱动电路、退耦电容和 VCSEL 集成化, 在室温下将无误码数据传输速率提高到 $71\ \text{Gbps}$, 在 $90\ ^\circ\text{C}$ 环境中传输速率达到 $50\ \text{Gbps}$, 如图 12 所示^[60]。

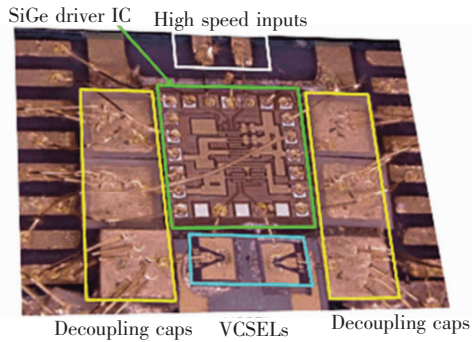


图 12 集成驱动 IC、VCSELs、解耦电容和电路板的图片^[60]。

Fig. 12 Image of transmitter showing driver IC, VCSELs, decoupling capacitors and printed circuit board traces^[60] .

与此同时, 其他研究机构也针对 $850\ \text{nm}$ 波长的高速 VCSEL 器件进行了研究。2009 年, 德国柏林工业大学 (TUB) 报道了氧化口径为 $9\ \mu\text{m}$ 的器件, 可以实现在室温工作条件下 $40\ \text{Gbps}$ 无差错数据传输^[61]。美国 IBM 和 Finisar 公司在 2012 年共同报道了 $55\ \text{Gbps}$ 直接调制的光互联技术^[62], 之后又将调制速率提高到 $56.1\ \text{Gbps}$ ^[63]。2013 年, 中国台湾中央大学报道了 $4\ \mu\text{m}$ 氧化口径的 VCSEL, 在 $85\ ^\circ\text{C}$ 工作温度下, 调制带宽为 $22.4\ \text{GHz}$, 调制速率达到 $34\ \text{Gbps}$, 如图 13 所示^[64]。该研究机构在 2015 年使用氧化物浮雕结构来减少寄生效应和 Zn 掺杂的扩散, 从而将光学孔径限制在较窄的光谱宽度并减小差分电阻, 在 $25\ ^\circ\text{C}$ 下得到了 $41\ \text{Gbps}$ 的传输速率^[65]。2016 年, 伊利诺伊大学香槟分校报道了高速 $850\ \text{nm}$ VCSEL, 展现了 $50\ \text{Gbps}$ 无误码传输和 $28.2\ \text{GHz}$ 的 $3\ \text{dB}$ 调制带宽^[66]。该器件采用双氧化物层结构来减小寄生效应, 在 n 型 DBR 中引入二元材料 AlAs 层来降低热效应, 显著地提高了 VCSEL 的调制带宽。

$980\ \text{nm}$ VCSEL 在数据通信领域尤为重要, 尤其是对于波分复用 (Wavelength division multiplexing, WDM) 和自由空间光通信方面^[67]。 $980\ \text{nm}$

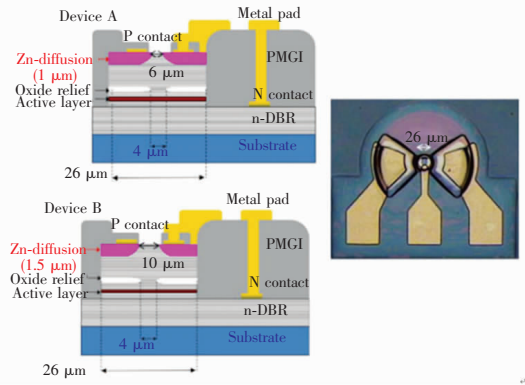


图 13 (a) VCSEL 器件的概念剖面图; (b) 被演示器件的俯视图^[64]。

Fig. 13 (a) Conceptual cross-sectional view of VCSEL devices A and B. (b) Top view of the demonstrated device^[64] .

高速 VCSEL 通常采用应变 InGaAs/GaAs QWs 作为有源区。与 $850\ \text{nm}$ VCSEL 相比, $980\ \text{nm}$ VCSEL 通常具有更深的 QW, 即有 In 组分可以抑制非平衡载流子的逸出并因此提高温度稳定性。在 $980\ \text{nm}$ 发射的 InGaAs QW 具有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、更高的调制带宽、更低的阈值电流和更高的可靠性。由于较小的能带带隙, $980\ \text{nm}$ VCSEL 的工作电压较低, 这对于低压互补金属氧化物半导体驱动器是很重要的。另外, 由于 GaAs 衬底在 $980\ \text{nm}$ 处的透明性, 所以 $980\ \text{nm}$ VCSEL 可以设计为底部发射结构。2007 年, 加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校制备了氧化口径为 $3\ \mu\text{m}$ 的 $980\ \text{nm}$ VCSEL, 在 $4.4\ \text{mA}$ 电流下实现了 $35\ \text{Gbps}$ 的无误码传输, 工作温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 。该器件在 DBR 中采用了锥型氧化孔来减少光损耗, 利用多层氧化层以降低电容, 并且在 n-DBR 中优化了 p 掺杂分布来降低电阻, 从而产生大于 $20\ \text{GHz}$ 时最大为 $3\ \text{dB}$ 的调制带宽^[68]。2011 年, 德国 TUB 通过缩短腔长到半波长和调整 DBR 中的掺杂等方法, 在室温下实现了 $44\ \text{Gbps}$ 的无误码传输^[69-70]。2014 年, 该机构制备了 $\lambda/2$ 厚的光腔 $980\ \text{nm}$ VCSEL, 实现了 $23.9\ \text{GHz}$ 的 $3\ \text{dB}$ 调制带宽, 并在室温下以 $50\ \text{Gbps}$ 的速率实现了无误码传输^[71]。2017 年, 德国 TUB 报告了简单的 VCSEL, 该 VCSEL 采用简化的外延层设计, 没有复杂的氧化层结构, 在光腔的 n-DBR 和 p-DBR 侧都有一个半波长腔和单层氧化层, 用于限制光场和载流子, 实现了具有

31 ~ 34 GHz 的 3 dB 小信号调制带宽^[72-73]。2018 年,德国 TUB 报道了 3 μm 小口径 980 nm VCSEL,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 工作条件下,创造了 35.5 GHz 的带宽新记录^[74]。

对于 1 100 nm 波长的 VCSEL 而言,它们的能带隙甚至更小,因此其工作电压比 980 nm VCSEL 的低。但是与以较短波长发射的 VCSEL 相比,1 100 nm VCSEL 通常具有较高的自由载流子损耗,目前对这个波段的报道较少。2006 年,日本电气公司(NEC)制备了氧化物限制 VCSEL,在室温下实现了无误码的 25 Gbps 调制速率和高达 20 GHz 的 3 dB 调制带宽^[75]。随后,该公司继续对 1 100 nm 高速 VCSEL 进行研究,通过使用掩埋隧道结,在室温下使用 24 GHz 3 dB 调制带宽的 VCSEL 完成了 30 Gbps 和 40 Gbps 无误码传输的报道^[76-77]。

高速 VCSEL 有 3 个主要的带宽限制因素:寄生电容限制、阻尼限制和热效应限制。为了获得高调制带宽,则需要降低这 3 种限制因素。针对寄生效应,应尽可能地降低 VCSEL 器件的电阻和电容来实现,采用的方法有:优化 DBR 中的导带和价带界面以及掺杂分布^[65,68]、在信号焊盘下面使用低介电常数的厚聚绝缘材料作为支撑物^[64]、引入多个深氧化层以及质子注入技术^[57,66]。为了降低阻尼限制,高速 VCSEL 的优化方法有两种:使用应变 QW^[68] 以及采用半波长腔和小氧化物孔径^[69-74]。而热效应则通过降低 VCSEL 的串联电阻^[65,68]、采用高导热率的 DBR^[66]、采用镀铜散热片^[14]等方法来缓解。

近几年报道的研究显示调制带宽基本在 30 GHz 左右,通过优化后可以接近 35 GHz,这被认为是常规氧化物限制 VCSEL 的极限^[78]。传统的短距离光互联技术是将 VCSEL 和 MMF 通过不归零调制方案(Non-return-to-zero, NRZ)直接调制检测,适用于 25 Gbps 光纤链路。但是随着数据流量的增长,需要开发出更高的调制速率链路,并且调制速率的提升依赖于调制方式和电子驱动设备的技术进步。想要提高调制速率,需要引入各种新的技术,包括数字信号处理(Digital signal processing, DSP)、WDM、前向纠错(Forward error correction, FEC)、脉冲整形等,还需要引入新的调制方式,例如四电平脉冲幅度调制(Four-level pulse amplitude modulation, PAM4)、无载波幅度相位调

制(Carrierless amplitude/phase modulation, CAP)、离散多音频调制(Discrete multi-tone modulation, DMT)等。今后高速 VCSEL 的研究展开还需要向长波长方向延伸,例如 1 310 nm 波段和 1 550 nm 波段的光收发系统,这两个波段的光纤损耗远小于 850 nm 处的损耗,可以将通信距离延伸至 20 km 以上。但是,在该工作波段 VCSEL 芯片外延生长有较大难度,因此对于长波波段高速 VCSEL 还没有广泛应用于光互联。

4 高温工作 VCSEL

随着 VCSEL 应用的市场需求日益多样化,许多应用领域需要 VCSEL 器件在高温环境下工作。这就需要 VCSEL 具有稳定的高温性能,尤其是在芯片级原子钟(Chip scale atomic clock, CSAC)上的应用。CSAC 均采用 VCSEL 作为光源器件,需要 VCSEL 产生激光的阈值电流低,可以在芯片物理系统的高温环境(80 ~ 90 $^{\circ}\text{C}$)下稳定工作^[79]。早在 2000 年,美国海军实验室及国家标准和科技学会就报道了运用 VCSEL 制作的原子钟,如图 14 所示^[80]。

为了进一步开发 CSAC,各个研究机构针对高温稳定的 VCSEL 器件进行了积极的研究。2003 年,德国 Ulm 大学通过在 VCSEL 表面刻蚀椭圆状的浮雕,制备出了能在 85 $^{\circ}\text{C}$ 高温环境下工作的单模单偏振的 VCSEL 器件^[81]。随后,德国 Ulm 大学利用表面倒光栅浮雕制作了 850 nm VCSEL,其在 90 $^{\circ}\text{C}$ 高温下的边模抑制比(Side-mode suppression ratio, SMSR) 大于 30 dB,正交偏振比

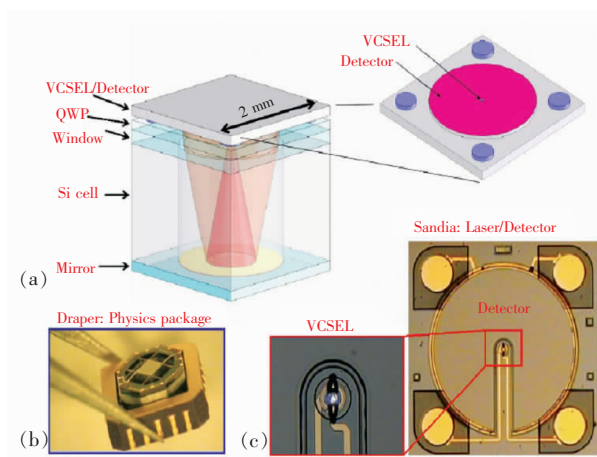


图 14 美国 NIST 报道的 CSAC 基本结构示意图^[80]

Fig. 14 Basic structure diagram of CSAC reported by NIST^[80]

(Orthogonal polarization suppression ratio, OPSR) 大于 20 dB, 且其出光功率大于 1 mW^[82]。2006 年, 美国桑迪亚 (Sandia) 国家实验室、迅腾公司和查尔斯·斯塔克·德拉普尔实验室联合通过刻蚀表面光栅, 研制出了在 1 mA 的注入电流下实现 SMSR > 35 dB 的高性能 VCSEL, 其高温下的输出功率超过 1 mW^[83]。隔年, 美国 Sandia 国家实验室改进了 850 nm VCSEL 的表面光栅, 控制偏振特性使其 OPSR > 15 dB, 且在 85 °C 高温下仍能保持单偏振工作^[84]。2008 年, 德国 Ulm 大学提出了适用于 Cs 原子钟的 895 nm VCSEL 器件, 在 80 °C 下 SMSR 接近 30 dB, OPSR 接近 40 dB^[85]。2013 年, 瑞士纳沙泰尔大学研制了用于原子相干布居俘获原理 (Coherent population trapping, CPT) 的微型 Cs 原子钟的 894.6 nm VCSEL^[86]。2015 年, 美国 Princeton Optonics 公司开发了 3 种适用于原子钟的单频 VCSEL, 激光波长分别为 780, 795, 850 nm, 单频输出功率达到 100 mW^[87]。2019 年, 英国 CST 公司研制了专门为基于 CPT 的原子钟定制的 892 nm VCSEL, SMSR 超过 30 dB, OPSR 超过 15 dB, 甚至在 70 °C 的高温下仍然表现出优越的性能^[88]。

而国内致力于芯片级原子钟研究的机构较少。2009 年, 中北大学和清华大学联合设计了基于 CPT 原子钟的 780 nm VCSEL, 在 75 °C 高温下最大输出功率接近 0.5 mW^[89]。2013 年, 中科院长春光机所研制了 Rb 原子钟专用的 795 nm VCSEL, 75 μm 口径的器件在 85 °C 下, 最大输出功率为 1.8 mW^[79]。2015 年, 中科院长春光机所又研制了 Cs 原子钟专用的 895 nm VCSEL, 在 110 °C 工作环境下, SMSR 大于 25 dB, 阈值电流仅为 0.32 mA, 输出功率超过 1 mW^[90]。2018 年, 中科院长春光机所采用浅表面光栅实现了一种偏振稳定的单模 894 nm VCSEL, OPSR 达到 30 dB, 甚至在温度高达 80 °C 时输出性能也很优越^[91]。2020 年, 北京工业大学研制了 Cs 原子钟专用的 895 nm VCSEL, 输出功率达到 0.86 mW, SMSR 大于 20 dB^[92]。

另一方面, 随着自动驾驶、移动互联网、云计算和物联网的不断发展, 所需传输数据量与日俱增, 这导致了能够支持更大容量的短距离 OI 技术得到迅猛发展。由于空气中巨大的传播损耗和色散, 运用在 OI 系统上的高速 VCSEL 必须尽可能

放置在集成电路 (Integrated circuit, IC) 上。然而, IC 在高速运行过程中产生的热量会导致 VCSEL 器件的工作环境温度升高, 从而影响其高速运行性能^[93]。

为了保持 VCSEL 在高温环境下的高速性能, 各个研究机构展开了研究。2005 年, 美国 E2O 公司采用 AlGaInAs 材料体系, 研制出工作温度 85 °C 下 1.3 μm 波段连续波输出为 0.6 mW 的 VCSEL。该器件在温度高达 119 °C 下仍能单模连续输出, 高速调制数据率高达 10 Gbps^[94]。2007 年, 瑞典皇家理工学院研制出采用表面浮雕高应变 InGaAs 量子阱的 1.28 μm VCSEL, 在 25 °C 时调制带宽为 8 GHz, 单模功率为 1.2 mW; 85 °C 时调制带宽为 6 GHz, 单模功率为 0.6 mW^[95]。2010 年, 日本 NEC 公司采用应变补偿的 InGaAs/GaAsP QWs 制备了 1.1 μm VCSEL, 在 100 °C 高温下, 实现了 25 Gbps 无误码连续数据传输^[96]。2014 年, 德国 TUB 制备了 980 nm VCSEL, 在 25 ~ 85 °C 下, 实现了 38 Gbps 无误码数据传输^[97]。2015 年, 美国沃森研究中心报道了一种能够在 30 ~ 90 °C 下 NRZ 调制的传输速率达到 50 Gbps 的 850 nm VCSEL^[98]。2015 年, 中国台湾 NCU 采用波长失谐技术与表面浮雕相结合, 提高了温度稳定性^[65]。该器件在 85 °C 的工作温度下调制速率为 40 Gbps, 最大调制带宽达到 27 GHz。随后, 该机构又展示了一种不对称的 VCSEL 腔结构, 在 85 °C 的工作温度下, 仍能展示优越的速度和输出功率性能^[93]。2017 年, 德国 TUB 调整 VCSEL 的镜面反射率, 在 25 ~ 75 °C 的宽温度范围内, 实现了 50 Gbps 无误码的连续数据传输^[99]。2019 年, 德国 VI 有限公司报道了单模 850 nm VCSELs 在无信号处理的情况下, 实现了 60 Gbps 无误码的数据传输^[100]。同年, 北京工业大学采用高热导率的 AlAs 材料优化 n 型 DBR 反射镜, 制作了氧化限制顶发射 VCSEL, 在 0 ~ 70 °C 的温度下仍能满足 25 Gbps 工作要求^[101]。

稳定的高温性能和对温度变化的不敏感是 VCSEL 器件在高温环境下工作的关键因素。CSAC 和 OI 系统所应用的光源是高温工作 VCSEL 器件最具有代表性的应用方向。一般情况下, VCSEL 的性能在高温下会严重退化, 导致阈值电流增大, 斜率效率降低, 并且谐振载流子光子相互作用的本征阻尼也会影响 VCSEL 的调制速

度。而增益-腔模失配型的 VCSEL 器件结构设计是针对高温环境采取的主要手段。新材料和新技术的引入将进一步提高 VCSEL 器件在高温环境下的输出性能。

5 最新 VCSEL 应用

自 1990 年以来,伴随着 VCSEL 器件性能的不断提高,VCSEL 已经得到了市场的广泛认可,其应用领域也呈爆炸式增长。到 2010 年,VCSEL 的应用领域从数据通信开始,接着是传感器、打印机和电脑鼠标。此后,虽然数据通信和传感的市场规模稳步增长,并有望进一步上升,占领 VCSEL 及其相关市场的主体;但是,VCSEL 在新的应用领域却有着更广泛的应用,如红外照明、泵浦光源和工业加热。近年来,VCSEL 在 3D 传感、LiDAR、VR/AR 技术等领域得到了应用和发展,并且已经拓展到物联网的各个领域,如图 15 所示^[102]。



图 15 VCSEL 的应用^[102]

Fig. 15 Application of VCSEL^[102]

近几年,消费者对用于照明和传感的 VCSELs 的兴趣日益浓厚,尤其是用于 3D 传感和 3D 图像捕捉。对于这些应用,通常感兴趣的波长范围是 830 ~ 950 nm,功率级别从几毫瓦到数百瓦不等。上述应用都是基于飞行时间(Time-of-flight, ToF)和连续/准连续结构光相结合的深度传感系统。而这些应用所采用的 VCSELs 光源具有较窄的频谱及对低温的依赖,使得使用更窄的滤波器成为可能,因此具有更好的信噪比性能。

自 iPhone X 脸部辨识启动 3D 传感应用后,市场对 3D 传感产生了巨大的兴趣。目前,智能手机的 3D 传感解决方案包括结构光和 ToF 法,采用 VCSEL 阵列光源在脸部投射数万个红外光

的光点,经过红外摄像头再接收从脸部反射回来的红外光线,以创建 3D 人脸模型。2017 年上市智能手机 iPhone X 采用超过 500 像素的 VCSEL,其峰值功率为 3 W^[103]。2018 年,德国欧司朗公司在脸部识别领域开发了尺寸仅为 1.9 mm × 2.2 mm × 0.85 mm 的 940 nm VCSEL 阵列,输出功率达到 300 mW,照明角度为 65° × 78°^[104]。面部识别是当今 3D 传感的主要应用,但不是唯一的应用。

3D 传感技术在汽车领域也变得越来越重要,无论是在车外还是车内。在户外,正在研究的 LiDAR 就是一种固态的 3D 激光扫描系统,用于自动驾驶汽车探测车辆周围的物体并绘制它们的距离。尤其是基于 ToF 深度传感的 Flash LiDAR,在汽车领域将成为未来的发展趋势。Flash LiDAR 系统结合了一个探测器阵列,其每个像素都测量视场部分的返回时间,以便提供距离信息。用于该应用的 VCSEL 阵列必须支持具有窄脉冲宽度和极低占空比的脉冲操作,其峰值功率需要达到数十瓦甚至数百瓦,以确保足够大的安全探测距离,同时确保眼睛安全。2016 年,美国 Trilumina 公司研制了用于车载 LiDAR 的 905 nm 高功率 VCSEL 阵列,峰值功率达到 80 W^[105]。2018 年,中科院长春光机所开发了 910 nm 高功率 VCSEL 阵列,峰值功率达到 100 W^[106]。2020 年,Trilumina 公司进一步开发了高功率 VCSEL 产品,包括 100 W 准连续输出照明器应用于短到中程的车载 LiDAR 和 600 W 闪光照明器应用于长程的车载 LiDAR^[107]。

另外,对于应用其他领域的 LiDAR 的 ToF 传感器件,如发射器、接收器和驱动器,仍需要简化结构、降低成本和减小尺寸,并提高其输出功率和灵敏度。2018 年,日本京都大学研制了双晶格光子晶体 VCSEL 单管器件,实现了小于 0.3° 的对称窄发散角光束,峰值功率达到 10 W^[108]。2020 年,美国弗吉尼亚大学和韩国先进纳米制造中心联合研制了集成 GaN 基高电子迁移率晶体管和基于 GaAs 基 940 nm VCSEL 的异质集成器件,具备了高分辨率 3D 真实世界成像的潜力^[109]。2020 年,中国瑞识科技专为应用于小型移动设备的 LiDAR 研制的 VCSEL 阵列,实现了 1 ns 脉冲驱动下,超过 100 W 的峰值功率,功率转换效率达到 54%^[110]。

此外,近红外“智能照明系统”在提高成像传感器的性能和效用方面越来越受欢迎。该系统是底反射的 VCSEL 器件与集成的微透镜进行结合,不仅提供最佳的照明模式,而且可根据该系统的反馈信息,主动跟踪成像系统感兴趣的区域或对象,如图 16 所示^[105]。整体的照明模式是通过将激光阵列细分为若干子阵列来实现的。每个子阵列都有一个微透镜组合,而这些子阵列的偏移量计算为从子阵列中的 VCSEL 器件提供的照明场。每个子阵列将通过安装子独立寻址系统,来控制其开关,并且输出强度由系统处理器控制。每个子阵列都是照明成像系统整体视场的一部分。子阵列可以组合起来照明系统视场的较大部分,包括在需要时打开所有子阵列,或者从大视场中对感兴趣区域进行初始识别。采用“智能照明系统”的 3D 摄像头将是 VCSEL 下一个有吸引力的应用。从 2019 年开始,汽车上的 3D 摄像头系统将成为车舱内驾驶员监控系统。2020 年,美国 Trilumina 公司在 3D 摄像头方面开发了直接封装到电路板上的 VCSEL 器件,连续输出达到 3 W 和 4 W^[107]。同时,该公司又研制了 8 W 准连续输出的 VCSEL 阵列模块,可应用于汽车内部监控、手势识别、ADAS^[108]。

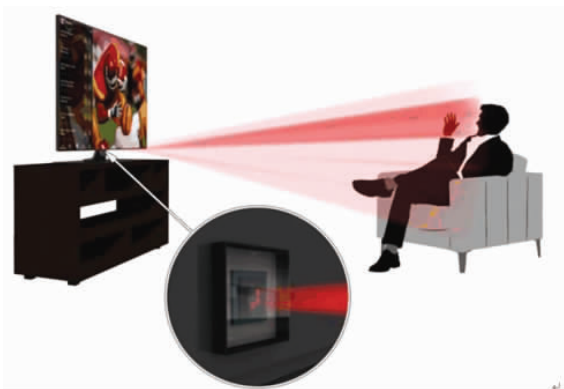


图 16 智能照明概念的例子^[105]

Fig. 16 Example of the “Smart illumination” concept^[105]

2019 年,全球 VCSEL 市场价值为 16.67634 亿美元^[111]。预计将从 2020 年的十亿美元增长到 2025 年的二十多亿美元,年复合增长率为 23.7%^[112]。由于 VCSEL 在新应用领域的需求不断增长,市场有望实现实质性的增长。消费电子产品、汽车和数据通信领域的最新技术的进步,将

推动 VCSEL 市场的增长,以满足对先进产品不断增长的需求。

在预测期内,多模式输出的 VCSEL(高速、高功率)预计将占据 VCSEL 的大部分市场份额。由于许多公司,如中国电信、美国 Apple、欧洲的 Interxion 等,在其数据中心的全球扩张上进行了大量投资,用于短距离的高速率数据传输的高速 VCSEL 的需求预计将在预测期间以显著速度增长。同样,消费电子产品中 3D 传感的集成和激光雷达系统中高功率 VCSEL 的使用预计将在预测期内推动 VCSEL 的市场。

6 结 论

本文首先回顾了 VCSEL 的研究历程和性能优势。随后针对 VCSEL 在功率、高速、高温稳定的性能方面展开介绍。高功率 VCSEL 的输出性能在保持良好的光束质量的同时,功率水平在几百毫瓦到几千瓦之间,裕度达到了 4 个数量级,在红外照明、泵浦光源、工业加热、LiDAR 以及 3D 传感等应用领域的市场规模稳步增长。对于高速 VCSEL 的研究,其改进依然集中于提高带宽,实现了调制带宽接近 35 GHz、传输速率超过 50 Gbps。基于先进的调制格式(如 PAM4、CAP、DMT 等)和先进的信号处理技术(如 DSP、WDM、FFC、脉冲整形等)实现了基于 VCSEL 的光链路更高的调制速率。在高温环境下工作,稳定的高温性能是一个重要的关键特性,这需要从 VCSEL 芯片表面刻蚀微结构及增益失谐设计等方面进行优化。针对 CSAC 光源,VCSEL 已经实现单频输出功率达到 100 mW。而在 OI 技术上的应用,VCSEL 在高温下仍能完成 60 Gbps 无误码数据传输。并且新结构、新材料和新技术的引入进一步地提高了 VCSEL 的输出性能,从而拓展了 VCSEL 的应用领域。

VCSEL 及其阵列开辟了一个并行的微光学世界,并为新型光电子系统的工业化做出了贡献。本文介绍的应用领域都是 VCSEL 未来发展的潜在方向。VCSELs 具有生产效率高、可靠性高、功耗低、体积小等优点,是目前应用范围较广的光源。从数据通讯到智能传感,VCSEL 的应用市场日益多样化,其正在成为支持当前和未来信息社会不可或缺的关键组件。

参 考 文 献:

- [1] IGA K. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008,47(1R): 1-10.
- [2] SODA H, IGA K I, KITAHARA C, *et al.*. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979,18(12): 2329-2330.
- [3] 伊贺健一, 小山二三夫. 面发射激光器基础与应用 [M]. 郑军, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
IGA K, KOYAMA F. *Basic and Application of Surface Emitting Lasers* [M]. ZHENG J, trans. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [4] IGA K, KINOSHITA S, KOYAMA F. Microcavity GaAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th} = 6$ mA [J]. *Electron. Lett.*, 1987,23(3): 134-136.
- [5] KOYAMA F, KINOSHITA S, IGA K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989,55(3): 221-222.
- [6] KOYAMA F, UENOHARA H, SAKAGUCHI T, *et al.*. GaAlAs/GaAs MOCVD growth for surface emitting laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1987,26(7R): 1077-1081.
- [7] MIZUTANI A, HATORI N, NISHIYAMA N, *et al.*. MOCVD grown InGaAs/GaAs vertical cavity surface emitting laser on GaAs [J]. *Electron. Lett.*, 1997,33(22): 1877-1878.
- [8] MCDANIEL D L, MCINERNEY J G, RAJA M Y A, *et al.*. Vertical cavity surface-emitting semiconductor laser with CW injection laser pumping [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1990,2(3): 156-158.
- [9] HADLEY M A, WILSON G C, LAU K Y, *et al.*. High single-transverse-mode output from external-cavity surface-emitting laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993,63(12): 1607-1609.
- [10] OKUR S, SCHELLER M A, SEURIN J F, *et al.*. High-power VCSEL arrays with customized beam divergence for 3D-sensing applications [C]. *Proceedings of SPIE 10938, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXIII*, San Francisco, 2019: 109380F.
- [11] EBELING K J, MICHALZIK R. VCSEL technology for imaging and sensor systems applications [C]. *Proceedings of The 2017 22nd Microoptics Conference, Tokyo, Japan*, 2017.
- [12] LING W A, LYUBOMIRSKY I, RODES R, *et al.*. Single-channel 50 G and 100 G discrete multitone transmission with 25 G VCSEL technology [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2015,33(4): 761-767.
- [13] ISOE G M, WASSIN S, GIBBON T B. Multicast-enabled high-speed VCSEL technology for flexible data center networks [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2018,14(6): 438-441.
- [14] LEDENTSOVJR N, AGUSTIN M, SHCHUKIN V A, *et al.*. Quantum dot 850 nm VCSELs with extreme high temperature stability operating at bit rates up to 25 Gbit/s at 150 °C [J]. *Solid-State Electron.*, 2019,155: 150-158.
- [15] GRABHERR M, MILLER M, JAGER R, *et al.*. High-power VCSELs: single devices and densely packed 2-D-arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999,5(3): 495-502.
- [16] FRANCIS D, CHEN H L, YUEN W, *et al.*. Monolithic 2D-VCSEL array with >2 W CW and >5 W pulsed output power [J]. *Electron. Lett.*, 1998,34(22): 2132-2133.
- [17] MILLER M, GRABHERR M, KING R, *et al.*. Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001,7(2): 210-216.
- [18] LI T, NING Y Q, SUN Y F, *et al.*. High-power InGaAs VCSEL's single devices and 2-D arrays [J]. *J. Lumin.*, 2007, 122-123: 571-573.
- [19] D'ASARO L A, SEURIN J F, WYNN J D. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal [J]. *Photonics Spectra*, 2005,39(2): 62-66.
- [20] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.*. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [C]. *Proceedings of SPIE Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XII*, San Jose, CA, USA, 2008: 690808-1-14.
- [21] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting arrays [C]. *Proceedings of SPIE 6876, High-power Diode Laser Technology and Applications VI*, San Jose, CA, USA, 2008: 68760D.
- [22] ZHANG L S, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. High-power bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting lasers under

- continuous-wave, quasi-continuous-wave, and pulsed operation [J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, 4(5): 052102-1-3.
- [23] 刘迪, 宁永强, 张金龙, 等. 高功率 InGaAs/GaAsP 应变量子阱垂直腔面发射激光器阵列 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2147-2153.
LIU D, NING Y Q, ZHANG J L, *et al.*. High-power InGaAs/GaAsP strained quantum well vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2147-2153. (in Chinese)
- [24] ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, *et al.*. High-peak-power vertical-cavity surface-emitting laser quasi-array realized using optimized large-aperture single emitters [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(7): 070303.
- [25] SUMMERS H D, PRESTON J M, KEMP A J, *et al.*. Microchip laser with vertical-cavity surface-emitting laser diode pump [C]. *Proceeding of Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-optics. Post-conference Edition. CLEO'99. Conference on Lasers and Electro-optics, Baltimore, MD, USA*, 1999: 517-518.
- [26] SEURIN J F, XU G Y, KHALFIN V, *et al.*. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [C]. *Proceeding of SPIE 7229, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XIII, San Jose, CA, USA*, 2009: 722903-1-11.
- [27] SEURIN J F, XU G Y, GUO B M, *et al.*. Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications [C]. *Proceedings of SPIE 7952, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XV, San Francisco, CA, USA*, 2011: 79520G-1-10.
- [28] VAN LEEUWEN R, XIONG Y H, WATKINS L S, *et al.*. High power 808 nm VCSEL arrays for pumping of compact pulsed high energy Nd: YAG lasers operating at 946 nm and 1 064 nm for blue and UV light generation [C]. *Proceedings of SPIE 7912, Solid State Lasers XX: Technology and Devices, San Francisco, CA, USA*, 2011: 79120Z-1-7.
- [29] VAN LEEUWEN R, ZHAO P, CHEN T, *et al.*. High power high repetition rate VCSEL array side-pumped pulsed blue laser [C]. *Proceedings of SPIE 8599, Solid State Lasers XXII: Technology and Devices, San Francisco, CA, USA*, 2013: 85991I-1-6.
- [30] VAN LEEUWEN R, XIONG Y H, SEURIN J F, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for diode pumped solid-state lasers [C]. *Proceedings of SPIE 8381, Laser Technology for Defense and Security VIII, Baltimore, Maryland, USA*, 2012: 83810I-1-7.
- [31] ZHOU D L, SEURIN J F, XU G Y, *et al.*. Progress on high-power 808 nm VCSELs and applications [C]. *Proceedings of SPIE 10122, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXI, San Francisco, CA, USA*, 2017: 1012206.
- [32] 张艳. 808-nm 垂直腔面发射激光器的结构设计与研制 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011: 71-72.
ZHANG Y. *Structural Design and Fabrication of 808-nm Vertical-cavity Surface-emitting Laser* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 71-72. (in Chinese)
- [33] 张金胜. 高功率半导体激光器结构研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 89-92.
ZHANG J S. *Investigations on The High Power Semiconductor Laser Structure* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 89-92. (in Chinese)
- [34] ZHOU D L, SEURIN J F, XU G Y, *et al.*. Progress on vertical-cavity surface-emitting laser arrays for infrared illumination applications [C]. *Proceedings of SPIE 9001, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XVIII, San Francisco, CA, USA*, 2014: 172-176.
- [35] HAO Y Q, LUO Y, FENG Y, *et al.*. Large aperture vertical cavity surface emitting laser with distributed-ring contact [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(7): 1034-1037.
- [36] ZHANG X, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. 980-nm high-power low-divergence VCSELs achieved by optimization of current density distribution [J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 2012, 48(1): 42-48.
- [37] 王贞福, 宁永强, 张岩, 等. 微透镜集成大功率垂直腔面发射激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 1963-1967.
WANG Z F, NING Y Q, ZHANG Y, *et al.*. High-power and microlens-integrated vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2009, 36(8): 1963-1967. (in Chinese)
- [38] WANG Z F, NING Y Q, ZHANG Y, *et al.*. High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(23): 23900-23905.
- [39] ZHANG X W, NING Y Q, QIN L, *et al.*. The design and analysis of sub-wavelength metal-grating large-aperture VCSELs [J]. *Appl. Phys. B*, 2012, 109(1): 171-175.

- [40] HIROSE K, LIANG Y, KUROSAKA Y, *et al.*. Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2014, 8(5): 406-411.
- [41] MCINERNEY J G, MOORADIAN A, LEWIS A, *et al.*. High-power surface emitting semiconductor laser with extended vertical compound cavity [J]. *Electron. Lett.*, 2003, 39(6): 523-525.
- [42] VAN LEEUWEN R, SEURIN J F, XU G Y, *et al.*. High-power pulsed intra-cavity frequency doubled vertical extended cavity blue laser arrays [C]. *Proceeding of SPIE 7193, Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices, San Jose, CA, USA*, 2009: 71931D.
- [43] LUTGEN S, ALBRECHT T, BRICK P, *et al.*. 8-W high-efficiency continuous-wave semiconductor disk laser at 1 000 nm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(21): 3620-3622.
- [44] LEE J H, KIM J Y, LEE S M, *et al.*. 9.1-W high-efficient continuous-wave end-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2006, 18(20): 2117-2119.
- [45] RUDIN B, RUTZ A, HOFFMANN M, *et al.*. Highly efficient optically pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(22): 2719-2721.
- [46] HEINEN B, WANG T L, SPARENBERG M, *et al.*. 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Electron. Lett.*, 2012, 48(9): 516-517.
- [47] ZHANG F, GAAFAR M, MÖLLER C, *et al.*. Dual-wavelength emission from a serially connected two-chip VCSEL [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(8): 927-929.
- [48] 张继业, 张建伟, 曾玉刚, 等. 高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备 [J]. *物理学报*, 2020, 69(5): 054204-1-9.
ZHANG J Y, ZHANG J W, ZENG Y G, *et al.*. Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2020, 69(5): 054204-1-9. (in Chinese)
- [49] 史晶晶, 秦莉, 刘迪, 等. 大功率垂直腔面发射激光器列阵的串接结构 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2309-2313.
SHI J J, QIN L, LIU D, *et al.*. High-power vertical cavity surface emitting laser array in series structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2309-2313. (in Chinese)
- [50] 马莹, 王成, 缪同群. VCSEL 直接倍频蓝光固态激光器的研究 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 253-259.
MA Y, WANG C, MIAO T Q. Blue light laser by direct frequency doubling of VCSEL [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 253-259. (in Chinese)
- [51] 张星, 宁永强, 曾玉刚, 等. 980 nm 高功率垂直腔面发射激光列阵的单元结构优化 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2014-2022.
ZHANG X, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.*. Optimization of element structure in 980 nm high-power vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2014-2022. (in Chinese)
- [52] MOENCH H, CONRADS R, DEPPE C, *et al.*. High-power VCSEL systems and applications [J]. *Proceedings of SPIE 9348, High-power Diode Laser Technology and Applications XIII, San Francisco, USA*, 2015, 93480w.
- [53] WANG K, NIRMALATHAS A, LIM C, *et al.*. High-speed free-space based reconfigurable card-to-card optical interconnects with broadcast capability [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(13): 15395-15400.
- [54] TATUM J A. The evolution of 850 nm VCSELs from 10 Gb/s to 25 and 56 Gb/s [C]. *Proceedings of OFC 2014, San Francisco, CA, USA*, 2014: 1-3.
- [55] TAN M R T. Commercial applications of vertical cavity surface emitting lasers [C]. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO 2000). Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol. 39, San Francisco, CA, USA*, 2000: 201.
- [56] JOHNSON R H, KUCHTA D M. 30 Gb/s directly modulated 850 nm datacom VCSELs [C]. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics 2008, San Jose, CA, USA*, 2008: CPDB2.
- [57] 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.
- [58] 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.

- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] KUCHTA D M, RYLYAKOV A V, SCHOW C L, *et al.*. A 55 Gb/s directly modulated 850 nm VCSEL-based optical link [C]. *Proceedings of IEEE Photonics Conference 2012, Burlingame, CA, USA*, 2012: 1-2.
- [63] KUCHTA D M, SCHOW C L, RYLYAKOV A V, *et al.*. A 56.1 Gb/s NRZ modulated 850 nm VCSEL-based optical link [C]. *Proceedings of 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, CA, USA*, 2013: 1-3.
- [64] SHI J W, YAN J C, WUN J M, *et al.*. Oxide-relief and Zn-diffusion 850-nm vertical-cavity surface-emitting lasers with extremely low energy-to-data-rate ratios for 40 Gbit/s operations [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2013, 19(12): 7900208.
- [65] CHI K L, YEN J L, WUN J M, *et al.*. Strong wavelength detuning of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for high-speed (>40 Gbit/s) and low-energy consumption operation [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(6): 1701510.
- [66] LIU M, WANG C Y, FENG M, *et al.*. 50 Gb/s error-free data transmission of 850 nm oxide-confined VCSELs [C]. *Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA*, 2016: 1-3.
- [67] NASU H. Short-reach optical interconnects employing high-density parallel-optical modules [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, 16(5): 1337-1346.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] WOLF P, MOSER P, LARISCH G, *et al.*. High-speed and temperature-stable, oxide-confined 980-nm VCSELs for optical interconnects [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2013, 19(4): 1701207-1-7.
- [71] MOSER P, LOTT J A, WOLF P, *et al.*. Error-free 46 Gbit/s operation of oxide-confined 980 nm VCSELs at 85 °C [J]. *Electron. Lett.*, 2014, 50(19): 1369-1371.
- [72] ROSALES R, ZORN M, LOTT J A. 30-GHz bandwidth with directly current-modulated 980-nm oxide-aperture VCSELs [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(23): 2107-2110.
- [73] HAGHIGHI N, ROSALES R, LARISCH G, *et al.*. Simplicity VCSELs [C]. *Proceedings of SPIE 10552, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXIII, San Francisco, CA, USA*, 2018: 105520N.
- [74] 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.
- [75] SUZUKI N, HATAKEYAMA H, FUKATSU F, *et al.*. 25-Gbps operation of 1.1- μm -range InGaAs VCSELs for high-speed optical interconnections [C]. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2006, Anaheim, CA, USA*, 2006: OFA4-1-3.
- [76] YASHIKI K, SUZUKI N, FUKATSU K, *et al.*. 1.1- μm -range high-speed tunnel junction vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2007, 19(23): 1883-1885.
- [77] ANAN T, SUZUKI N, YASHIKI K, *et al.*. High-speed 1.1- μm -range InGaAs VCSELs [C]. *Proceedings of 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, CA, USA*, 2008: 1-3.
- [78] LARSSON A G, GUSTAVSSON J S, HAGLUND E, *et al.*. VCSEL modulation speed: status and prospects [C]. *Proceedings of SPIE 10938, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXIII, San Francisco, CA, USA*, 2019: 1093802.
- [79] 张建, 宁永强, 张建伟, 等. 微型铷原子钟专用 795 nm 垂直腔表面发射激光器 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 50-57.

- ZHANG J, NING Y Q, ZHANG J W, *et al.*. 795 nm VCSELs for 87Rb based miniaturized atomic clock [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 50-57. (in Chinese)
- [80] KITCHING J, KNAPPE S, VUKICEVIC N, *et al.*. A microwave frequency reference based on VCSEL-driven dark line resonances in Cs vapor [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2000, 49(6): 1313-1317.
- [81] DEBERNARDI P, UNOLD H J, MAEHNSS J, *et al.*. Single-mode, single-polarization VCSELs via elliptical surface etching: experiments and theory [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2003, 9(5): 1394-1405.
- [82] OSTERMANN J M, DEBERNARDI P, JALICS C, *et al.*. Polarization-stable oxide-confined VCSELs with enhanced single-mode output power via monolithically integrated inverted grating reliefs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, 11(5): 982-989.
- [83] KEELER G A, GEIB K M, SERKLAND D K, *et al.*. VCSEL polarization control for chip-scale atomic clocks [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2007.
- [84] WAHL D, SETZ D S, AL-SAMANEH A. Development of VCSELs for atomic clock applications: annual report of institute of optoelectronics, Ulm university [R]. Ulm: Institute of Optoelectronics, Ulm University, 2008: 49-54.
- [85] DEREBEZOV I A, HAISLER V A, BAKAROV A K, *et al.*. Single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers for atomic clocks [J]. *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, 2009, 45(4): 361-366.
- [86] GRUET F, AL-SAMANEH A, KROEMER E, *et al.*. Metrological characterization of custom-designed 894.6 nm VCSELs for miniature atomic clocks [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(5): 5781-5792.
- [87] WATKINS L S, GHOSH C, SEURIN J F, *et al.*. High power VCSEL devices for atomic clock applications [C]. *Proceedings of SPIE 9616, Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments IX, San Diego, CA, USA*, 2015: 96160J.
- [88] ZAOURIS D, KNAPP M, HAJI M, *et al.*. MacV: VCSELs for miniature atomic clocks [C]. *Proceedings of 2019 Joint Conference of The IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, Orlando, USA*, 2019: 1-2.
- [89] 赵军, 秦丽, 闫树斌, 等. 基于 CPT 原子钟的 VCSEL 激光器控制系统设计 [J]. *电子设计工程*, 2009, 17(8): 118-119.
- ZHAO J, QIN L, YAN S B, *et al.*. Design of VCSEL laser control system based on CPT atomic clock [J]. *Electron. Des. Eng.*, 2009, 17(8): 118-119. (in Chinese)
- [90] ZHANG J W, ZHANG X, ZHU H B, *et al.*. High-temperature operating 894.6 nm-VCSELs with extremely low threshold for Cs-based chip scale atomic clocks [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(11): 14763-14773.
- [91] LIU Y Y, ZHANG X, HUANG Y W, *et al.*. OPSR enhancement of high-temperature operating shallow-surface grating VCSELs [J]. *Appl. Opt.*, 2018, 57(16): 4486-4490.
- [92] PANG W, PAN G Z, WANG Q H, *et al.*. 894.6 nm VCSEL for Cs-based atomic clocks with triangular holey structure [C]. *Proceedings of The 2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering, Suzhou, China*, 2020: 573-575.
- [93] CHI K L, HSIEH D H, YEN J L, *et al.*. 850-nm VCSELs with p-type δ -doping in the active layers for improved high-speed and high-temperature performance [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2016, 52(11): 2400607.
- [94] CHENG J L, SHIEH C L, HUANG X D, *et al.*. Efficient CW lasing and high-speed modulation of 1.3- μ m AlGaInAs VCSELs with good high temperature lasing performance [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, 17(1): 7-9.
- [95] SODERBERG E, GUSTAVSSON J S, MODH P, *et al.*. High-temperature dynamics, high-speed modulation, and transmission experiments using 1.3- μ m InGaAs single-mode VCSELs [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2007, 25(9): 2791-2798.
- [96] HATAKEYAMA H, ANAN T, AKAGAWA T, *et al.*. Highly reliable high-speed 1.1- μ m-range VCSELs with InGaAs/GaAsP-MQWs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, 46(6): 890-897.
- [97] LI H, WOLF P, MOSER P, *et al.*. Impact of the quantum well gain-to-cavity etalon wavelength offset on the high temperature performance of high bit rate 980-nm VCSELs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2014, 50(8): 613-621.
- [98] KUCHTA D M, RYLYAKOV A V, SCHOW C L, *et al.*. A 50 Gb/s NRZ Modulated 850 nm VCSEL transmitter operating error free to 90 °C [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2015, 33(4): 802-810.
- [99] LARISCH G, MOSER P, LOTT J A, *et al.*. Large bandwidth, small current density, and temperature stable 980-nm VCSELs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2017, 53(6): 2400908.

- [100] LEDENTSOV N, CHORCHOS L, AGUSTIN M, *et al.*. 850 nm single-mode VCSEL for error-free 60 Gbit/s OOK operation and transmission through 800 m of multi-mode fiber [C]. *Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego, CA, USA*, 2019: 1-3.
- [101] 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)
- [102] 刘安全. 单模直调垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701005-1-16. LIU A J. Progress in single-mode and directly modulated vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(7): 0701005-1-16. (in Chinese)
- [103] IGA K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: invention and innovation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2018, 57(8S2): 08PA01-1-7.
- [104] Osram. Homogeneous illumination for facial recognition thanks to VCSEL technology from Osram [EB/OL]. (2018-09-13). <https://www.osram.com/os/press/press-releases/homogeneous-illumination-for-facial-recognition-thanks-to-vc-sel-technology-from-osram.jsp>.
- [105] WARREN M E, CARSON R F, JOSEPH J R, *et al.*. High-speed and scalable high-power VCSEL arrays and their applications [C]. *Proceedings of SPIE 9381, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XIX, San Francisco, CA, USA*, 2015: 93810C.
- [106] ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, *et al.*. 910 nm vertical-cavity surface-emitting laser arrays with 100 W output power level and low driving current [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2018, 57(10): 100302-1-5.
- [107] FANNING T R, MAYNARD J, HELMS C J, *et al.*. Performance, manufacturability, and qualification advances of high-power VCSEL arrays at Trilumina Corporation [C]. *Proceedings of SPIE 11300, Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XXIV, San Francisco, CA, USA*, 2020: 1130002.
- [108] YOSHIDA M, DE ZOYSA M, ISHIZAKI K, *et al.*. Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams [J]. *Nat. Mater.*, 2018, 18(2): 121-128.
- [109] PARK M, BAEK Y, DINARE M, *et al.*. Hetero-integration enables fast switching time-of-flight sensors for light detection and ranging of scientific reports [R]. Charlottesville: University of Virginia, 2020.
- [110] 粤讯. 瑞识科技发布行业领先 3D dToF VCSEL, 光功率提升 3 倍 [EB/OL]. (2020-04-08). <https://laser.ofweek.com/2020-04/ART-8110-2400-30435095.html>.
- [111] Azoth Analytics. Global VCSEL market: analysis by device type (single mode, multi-mode), application, end user, by region, by country(2020 edition): opportunities and forecast(2020-2025) [R]. Azoth Analytics, 2020.
- [112] Azoth Analytics. VCSEL market by type(single-mode, multimode), material(GaAs, InP, others), wavelength, application(sensing, data communication), industry(consumer electronics, automotive, data center, commercial & industrial), and geography-global forecast to 2025 [R]. Azoth Analytics, 2020.



张继业(1990-),男,辽宁丹东人,博士研究生,2013年于中国矿业大学获得学士学位,主要从事垂直外腔面发射激光器的研究。
E-mail: 846810633@qq.com



王立军(1946-),男,吉林舒兰人,研究员,中国科学院院士,博士研究生导师,1982年于吉林大学获得硕士学位,主要从事激光技术等领域的及应用研究。
E-mail: ljwang2013ys@163.com



宁永强(1965-),男,吉林长春人,博士,研究员,1999年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事大功率垂直腔面发射激光器的研究。
E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn