

引用格式: ZHANG Jianwei, NING Yongqiang, ZHANG Xing, et al. Development and Future of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers Operated at High Temperatures (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2):0251201

张建伟, 宁永强, 张星, 等. 高温工作垂直腔面发射半导体激光器现状与未来(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(2):0251201

※封面论文※

高温工作垂直腔面发射半导体激光器 现状与未来(特邀)

张建伟, 宁永强, 张星, 周寅利, 陈超, 吴昊, 秦莉, 王立军

(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, 长春 130033)

摘 要: 垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)具有可调控的光斑形貌、易于二维集成、窄光谱宽度、尺寸小等独特优势, 尤其是 VCSEL 激光器高的波长温度稳定性与无腔面损伤特性, 在工作温度要求苛刻的高温环境下具有极为优秀的工作表现。介绍了 VCSEL 激光器的结构原理, 对 VCSEL 激光器在高温工作时激光腔模与增益的温度稳定特性进行了分析。对量子精密测量碱金属原子泵浦高温 VCSEL 激光器进行分析, 并对其国内外发展历程与进展现状进行了介绍; 分析数据中心能耗问题带来的高温高速 VCSEL 激光器需求, 并对 850 nm 与 980 nm 两个波段的高温高速 VCSEL 发展历程进行了介绍; 最后对高温工作 VCSEL 激光器未来的发展方向进行了总结展望。

关键词: 垂直腔面发射半导体激光器; 高温工作; 模式调控; 原子传感; 数据中心

中图分类号: O471.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225102.0251201

0 引言

自 1962 年世界上第一台半导体激光器问世以来^[1], 人类实现了在芯片化尺度输出激光光束的目标, 同时半导体激光器的功率、效率、寿命等核心指标随后得到快速提升^[2-4], 推动了人类社会信息化、工业化进程^[5-7], 并带动了其他科学技术的快速发展, 因此半导体激光技术被认为是二十世纪人类最伟大的发明之一。随着半导体激光技术的发展, 最初的边条形半导体激光器技术在集成度、模式与波长控制及高温工作性能等方面的不足限制了其应用领域的进一步扩展。日本东京工业大学的 IGA K 教授在 1977 年首次提出了垂直腔面发射半导体激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)的概念, 并在 1979 年首次实现了 77 K 温度下可脉冲工作的 VCSEL 激光器^[8-9]。VCSEL 激光器主要由上下的分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)、中心的发光区结构组成^[10]。DBR 反射镜为周期性的半导体材料对, 主要作用为提供高的反射率与导电^[11], 一般由与衬底晶格一致的半导体材料组成。发光区由多量子阱或量子点等增益材料组成^[12-13]。

VCSEL 激光器工作时, 需要横向的电流限制以保证发光区具有高的载流子密度水平, 因此, 需要在发光区附近做电流的横向注入限制。目前商业化的 VCSEL 激光器一般采用侧氧化工艺制备氧化电流注入孔^[14-15], 文献报道也有用质子注入^[16]或者隧穿结^[17]结构实现电流的横向限制。质子注入工艺多用于提高大口径 VCSEL 激光器的内部电流均匀性, 或者小口径器件的模式特性^[18]; 而隧穿结结构多用于 InP 基结构的较长波长 VCSEL 激光器(一般波长 $> 1.2 \mu\text{m}$), 这主要是因为 InP 材料体系不具备侧氧化所需的高氧化层材料结构^[19]。由于 VCSEL 激光器的出光结构采用直接外延制备的半导体材料 DBR 反射镜, 因此, 不存在表面缺陷引起的腔面损伤问题。VCSEL 激光器的出光结构与电流注入结构通常做成圆形对称台面结构, 因

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2018YFB2002401), 国家自然科学基金(Nos. 62090060, 61727822), 国家自然科学基金(Nos. 61874117, 11774343, 61804087), 吉林省科技发展计划(No. 20200401006GX)

第一作者: 张建伟(1985—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为单模高功率面发射激光器。Email: zjw1985@ciomp.ac.cn

通讯作者: 宁永强(1965—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为高功率半导体激光器及高温工作半导体激光器。Email: ningyq@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2022-02-10; **录用日期:** 2022-02-20

<http://www.photon.ac.cn>

此,输出激光光斑形貌为圆形对称形貌,这有利于提高与光纤的耦合效率。同时,VCSEL激光器的表面出射特性,使其可以非常容易实现二维集成,形成激光阵列^[20]。圆形对称结构的光波导可以形成更为理想的高斯光束形貌,因而对于VCSEL列阵来说,整个列阵的远场叠加仍然为高斯光束,且在不同轴向的发散角一致,可以在一定程度降低VCSEL激光器的光束处理要求。相比椭圆光斑的边发射激光器,VCSEL在对光斑均匀性要求较高的整机系统中更具应用优势。相比常规边发射激光器mm级别的增益区长度,VCSEL激光器的有源区体积可以做到微米尺度,因而其低功耗优势极为明显。例如,单个VCSEL发光点的横向尺寸可以做到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下,而VCSEL纵向的发光区长度仅有不到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。这种小尺寸VCSEL工作时所需的功耗仅有mW量级。

由于VCSEL激光器的上述技术优势,目前VCSEL已经在量子精密测量^[21]、数据中心^[22]、工业加工及3D成像^[23]等领域得到广泛应用,随着实际应用场景的不断拓展,部分应用领域对VCSEL激光器的高温工作能力也提出了越来越高的应用需求。本文首先介绍VCSEL激光器的温度特性,分析高温环境下VCSEL激光器的主要优势——波长稳定性与高温低功耗特点的理论原因;然后介绍量子精密测量、数据中心应用典型的高温VCSEL激光器的发展现状;最后对高温工作VCSEL激光器未来的发展方向及潜在应用领域做简要分析。

1 VCSEL激光器的温度特性

工作温度一直是影响半导体激光器性能的关键,由于半导体材料的增益特性具有温度敏感性,特别是高温下有源区的材料增益大幅衰减^[24]。对于边发射激光器来说,其输出功率水平由增益决定,因而高温下最直接的表现就是功率、效率衰减,并且阈值电流增加^[25]。由于效率的衰减,导致发光区内部热效应进一步增强;高温下半导体材料的热导率会进一步下降,有源区内部散热速度变慢,从而出现更为严重的内部自产热,最终导致载流子泄露、非辐射复合等效应进一步加重。因而高温环境下,高功率的边发射半导体激光器很难在无制冷条件下工作^[26]。

VCSEL激光器的基本结构如图1。VCSEL激光器的内部腔结构与边发射激光器有明显的不同之处,相比边发射激光器具有更为优越的高温工作能力,接下来从原理上对VCSEL激光器的工作波长、阈值电流这两项关键指标的温度特性进行分析。

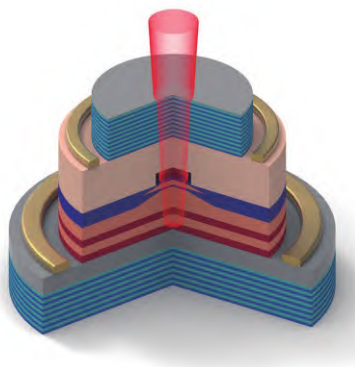


图1 VCSEL激光器三维结构示意图
Fig.1 The 3D schematic of VCSEL structure

1.1 腔模特性

激光器的工作波长由其腔内振荡结构决定,因而VCSEL激光器的工作波长由激光器两侧的DBR反射镜结构,以及中心的发光区材料层结构决定。DBR反射镜与中心的发光区结构共同组成了垂直于晶圆表面的谐振腔,VCSEL激光器的谐振腔振荡特性可以采用传输矩阵理论进行分析^[27]。VCSEL激光器两侧为多层周期性材料对组成的DBR反射镜,DBR反射镜对VCSEL激光器的出光性能有着重要影响,其反射率、反射中心波长的变化直接制约VCSEL的工作性能与出光波长。以AlGaAs材料体系的VCSEL激光器结构为例,整体VCSEL激光器结构在不同温度下的反射光谱如图2。

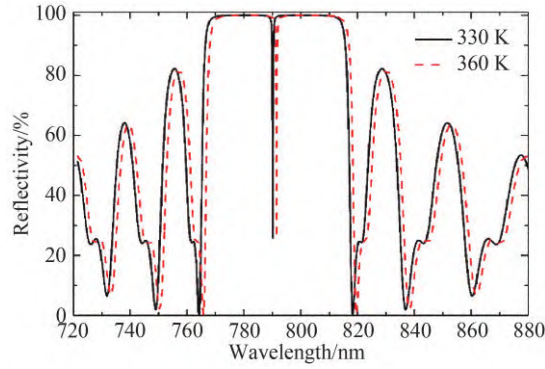


图2 20对GaAs/AlAs组成的DBR反射镜在不同温度下的反射谱
Fig.2 Reflective spectra of 22-pair DBR consisted of GaAs and AlAs materials

由图中可以看出,多层的DBR材料对形成了宽的反射谱;反射谱的中心波长位置出现明显的凹陷,称之为腔模位置,在该位置如果仅有DBR的话,则会是整个反射谱反射率最高处。随着工作温度的增加,DBR的反射谱整体向着长波方向漂移,同时腔模位置向着长波方向漂移,但是整个反射谱的形状与反射率几乎没有变化。DBR反射镜的反射率计算公式为

$$R = \frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2k} \cdot \left(\frac{n_H^2}{n_g}\right)}{1 + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2k} \cdot \left(\frac{n_H^2}{n_g}\right)} \quad (1)$$

式中, n_H 与 n_L 分别为高折射率层与地折射率层的材料折射率参数。 n_g 为衬底材料的折射率。可以看出,中心反射率的主要影响参数是组成DBR的材料层折射率。而对于VCSEL激光器最常使用的GaAs与AlAs材料,其折射率表达式为^[28]

$$\frac{dn_{\text{GaAs}}}{dT} = (2.67 \pm 0.07) \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\frac{dn_{\text{AlAs}}}{dT} = (1.43 \pm 0.07) \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} \quad (3)$$

可以看出,该材料体系的折射率随工作温度变化系数仅为 10^{-4} 量级,因而DBR反射率随工作温度的变化极小。由于折射率参数随工作温度增加而变大,因而DBR材料对的光学厚度将随着工作温度增加而增加,因此DBR反射镜的中心波长随着工作温度增加而呈现向长波长方向移动的红移现象。DBR反射镜的中心波长随温度的漂移速率大约为 $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,比常规的高功率边发射激光器的波长漂移速度($0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$)低一个数量级。在高温环境下对波长敏感的原于传感等探测测量应用中,VCSEL激光器具有很明显的应用优势。

1.2 模式增益特性

激光器的模式增益,是指激光器出光波长位置可以获取的材料增益。常规的边发射半导体激光器出光波长由量子阱的增益峰位置决定,其模式增益基本与发光区材料的增益变化趋势一致^[29]。因而高温条件下随着材料增益的衰减,边发射半导体激光器的阈值电流将随增益的衰减而增加,器件的激光功率、工作效率随增益衰减而快速下降。

对于VCSEL激光器,虽然发光区材料的增益在高温下仍然会出现衰减,然而整个器件的阈值、功率等特性却不一定会随之衰减,这是因为VCSEL激光器的出光波长是由DBR反射镜及发光区共同组成的振荡腔结构决定的^[30-31]。由于VCSEL激光器的出光波长随温度漂移较慢($0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$),而发光区的增益峰随温度漂移较快(约为 $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$),因此VCSEL激光器的增益水平可以通过增益谱与腔模的相对位置来进行调整。图3为典型的工作温度变化引起的VCSEL激光器增益谱与腔模相对位置变化情况。可以看出,VCSEL激光器发光区的增益水平随着工作温度的快速增加呈现快速下降趋势,这一点与普通边发射并无明显区别,然而腔模增益(红色曲线)却可以随工作温度增加,这是与边发射激光器最大的区别。因此,

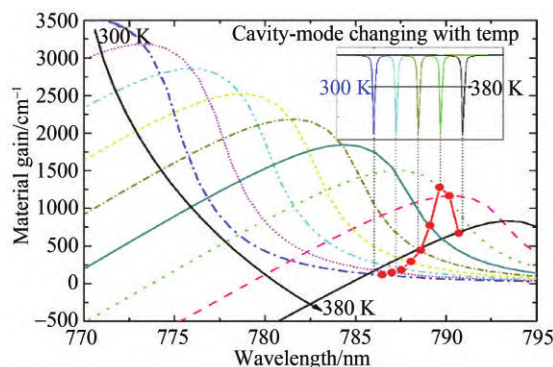


图3 增益峰—腔模失配型VCSEL激光器的增益谱与腔模随工作温度变化关系^[33]

Fig.3 The Gain spectra of active region and cavity mode changing with operation temperatures, and the red solid circle indicated the cavity-mode gain at different temperatures^[33]

VCSEL激光器在高温下并不会比边发射激光器获得更高的光增益,但是可以通过腔模设计实现对模式增益变化趋势的调控以抑制增益快速衰减的趋势,在高温下获得稳定的增益水平。

图3中,发光区量子阱的增益光谱随着工作温度的增加快速红移。随着工作温度由300 K增加到380 K,量子阱增益峰值由770 nm附近快速移动到794 nm左右,并且增益峰值由3 200 cm⁻¹快速衰减至仅有500 cm⁻¹,这说明半导体量子阱材料在高温下有着严重的增益衰减特性。然而在该工作温度变化范围内,VCSEL激光器的出光波长(腔模)漂移量却仅有5 nm左右,如图3中插图所示。

由于VCSEL激光器的出光波长相比增益波长的移动量很小,因而在实际结构设计时,常常利用该对比,来调整VCSEL激光器的增益峰位置,以抵消由于温度漂移带来的器件工作性能劣化^[32]。2015年,长春光机所的张建伟等报道了利用增益—腔模的失配效应实现高温下极低功耗的VCSEL激光器^[33]。通过设计室温下远短于腔模的增益峰位置,实现了更高工作温度下,VCSEL激光器将得到更高的增益水平,如图3中红色实心圆所表示的腔模增益变化情况,此方法称为VCSEL激光器的增益—腔模失配效应。

通过增益—腔模失配设计,可以实现VCSEL激光器在高温下的阈值电流特性与室温下类似。同时,VCSEL激光器的斜率效率、功率等参数也将高温下有着比较好的表现。VCSEL激光器的功耗水平、波长、功率、效率等关键参数在不同工作温度下发生很小的波动,这对VCSEL在量子精密测量等对功耗比较敏感的领域得到应用具有重要意义。

2 量子精密测量高温VCSEL技术

量子精密测量技术是采用原子的量子效应实现对基本物理量如时间、磁场和角速度的测量,目前已有的量子精密测量装置包括芯片原子钟^[34-35]、量子磁强计^[36-37]与量子陀螺仪^[38]。2000年左右,美国DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)连续支持了多期低功耗、小型量子精密测量装置技术,以实现芯片化的原子钟、磁强计与量子陀螺,随后欧洲、日本也持续布局相关技术。近年来,量子精密测量技术受到我国关注,国内单位在芯片原子钟、量子磁强计与量子陀螺技术领域也取得了较大进展^[39-41]。

典型的量子精密测量装置实物如图4。芯片原子钟核心在于采用VCSEL激光器实现原子气室内原子的工作状态发生变化,并通过外部信号提取,获取原子能级频率信息,最终实现计时功能。NIST开发的芯片级原子钟系统其核心物理尺寸仅有米粒大小^[35],整机结构的电热封装极为紧凑,颠覆了传统原子钟结构在人们心目中体积庞大、价格昂贵的印象,对于建设低成本、高精度的保密通信网络、无GPS自主导航等应用具有颠覆性意义。美国Geometric公司开发出极小尺寸的高灵敏度磁探头^[42],在生物医疗、新脑磁测量等领域具有广泛的应用前景。North Grumman公司开发出硬币大小的量子陀螺样机^[43],在姿态控制应用具有很好前景。

量子精密测量技术需要实现芯片级的尺寸,则必须采用低功耗、可贴片式集成的激光光源。同时,为保证原子气室内的原子有足够高的活性,整个物理核心部分需要加热至高温环境,由于激光光源距离原子气室非常近,因而核心的激光光源必须在高温下长期工作。2000年,美国NIST的KITCHING J等首次报道



图4 量子精密测量装置实物^[35,42-43]
Fig.4 The Quantum precision measurement devices^[35,42-43]

采用VCSEL激光器进行芯片级的相干布居俘获(Coherent Population Trapping,CPT)原子钟原理验证的结果,其结构如图5^[21](插图为工作原理图,中间部分为装配结构及其内部元器件实物),由此开启了采用VCSEL芯片开发量子精密测量装置的研究领域。

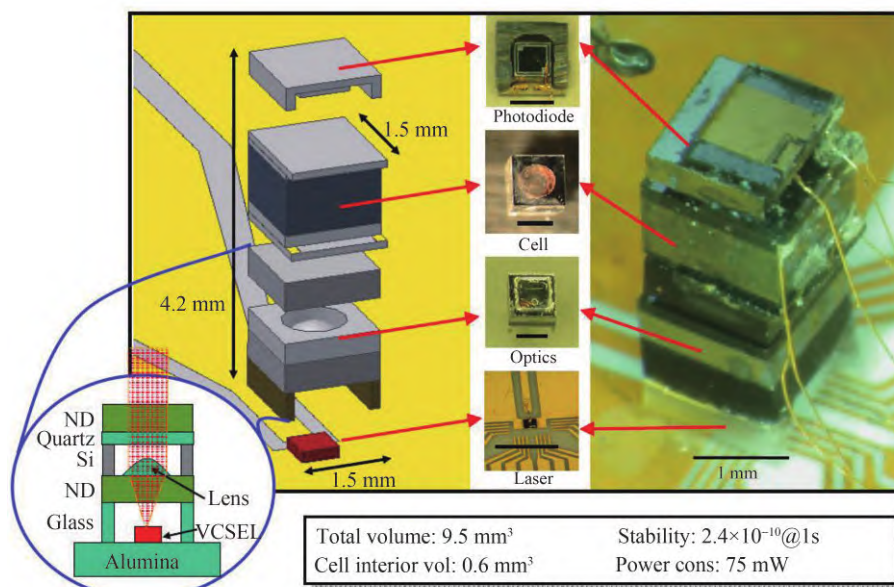


图5 芯片原子钟典型物理结构^[21]
Fig.5 The physical components of chip scale atomic clock^[21]

对于量子精密测量VCSEL激光器,高温工作只是其基本工作条件之一。VCSEL激光器必须在高温工作时满足诸多其他应用需求。量子精密测量采用的为Rb或者Cs原子的D1能级,因而所用的VCSEL激光器的激光波长必须严格对准原子吸收波长(794.6 nm或者894.6 nm附近,通常简称795 nm或者894 nm)。由于采用原子作为工作物质,VCSEL激光器的激光线宽必须足够窄,以保证原子吸收效率;VCSEL必须保持单模工作状态,以防止调制过程中有额外的原子吸收信号;激光器的偏振线性度要好,确保工作过程中无偏振跳转导致的功率或波长跳动等^[44]。虽然VCSEL器件高温工作出光波长很稳定,但是器件内部的内量子效率以及内部光学模式、光学偏振等特性均会恶化,严重影响器件的工作性能^[45-47]。自美国开展芯片级原子钟项目以来,国内外研究单位在量子精密测量专用高温VCSEL技术领域开展了全面的研究。

美国Sandia国家实验室是最早报道量子精密测量高温VCSEL激光器研究的单位。2006年,美国的Sandia国家实验室、Symmetricom公司和Charles Stark Draper Laboratory面向Cs原子钟应用需求,联合报道了894 nm波段VCSEL激光器研究结果^[48]。VCSEL激光器工作温度在80℃左右,阈值电流为0.3 mA,最大出光功率为2.4 mW。从其报道的器件性能结果来推断,VCSEL激光器应是采用了常规结构,但是制备了直径小于5 μm的氧化限制孔径,通过降低横向波导尺寸过滤掉了高阶的横向模式,实现了VCSEL激光器的基横模工作。由于VCSEL激光器出光面的圆形对称结构,可以推断此时VCSEL容易出现偏振跳转。因

此在下一步研究中, Sandia 国家实验室的年度会议上提出了带有表面光栅的 VCSEL 激光器方案^[49]。由于光栅结构的重要特点是其反射及透射特性对激光的偏振方向非常敏感, 因而通过表面光栅可以实现对 VCSEL 出射激光的偏振选择。VCSEL 在 85 °C 下驱动电流为 5 mA 时仍能保持单偏振工作, 偏振抑制达到 15 dB 左右, 初步实现了控制偏振的目标。Sandia 实验室在 2010 年以后专注于开发用于冷原子泵浦的 VCSEL 激光光源, 但是常规 VCSEL 结构的线宽水平在百 MHz 量级, 对于冷原子泵浦要求的 MHz 量级水平差了两个数量级。2011 年, 美国 Sandia 实验室论证了高单模功率以及窄线宽 VCSEL 激光器的可能性^[50]。2020 年, 通过采用在 VCSEL 内部引入多个不同的振荡腔, 各个振荡腔之间相互耦合, 产生类似光学滤波的效应, 可以将 VCSEL 激光器线宽压缩到 10 MHz 以下^[51], 器件结果如图 6。

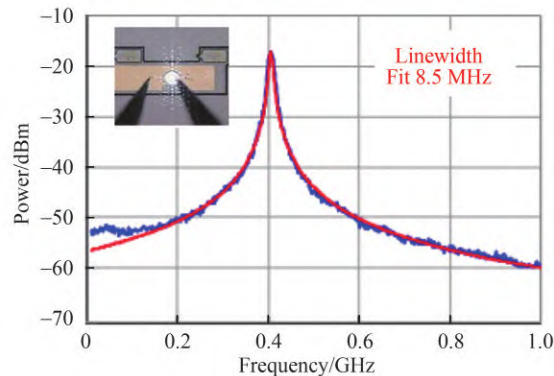


图 6 高温窄线宽外腔 VCSEL 激光器及线宽测试结果^[52]

Fig.6 The external-cavity VCSEL operated under high temperatures and its linewidth^[52]

德国 ULM 大学几乎与 Sandia 实验室同步开展量子精密测量高温 VCSEL 激光器研究。2008 年德国 ULM 大学的 WAHL D 团队在其光电子学院的年度报告会上提出了适用于芯片原子钟的高温 VCSEL 方案, 并详细论述了高温工作 894 nm VCSEL 的制作方法^[53]。该团队制备了带有较小氧化孔径的 VCSEL 器件, 由于未使用模式限制及偏振限制, VCSEL 在高温及大电流工作时的模式特性不够理想。2010 年至 2012 年, 该团队采用与 Sandia 类似的表面集成光栅技术(图 7), 实现了单模单偏振 894 nm 波段 VCSEL 激光器^[54-56]。值得注意的是, 该团队发明了一种反相浮雕光栅结构, 其特点在于表面光栅层的相位结构对腔内振荡光产生反相效果, 增加了内部振荡光的光损耗效应。光栅分布区的刻蚀深度恰好抵消反相效应, 因而这种反相浮雕光栅除了可以控制偏振, 还可以降低基模的腔内损耗, 实现 VCSEL 单基横模工作。在 80 °C 下器件的阈值电流为 0.8 mA, 最大出光功率 1.3 mW, 注入电流为 3.8 mA 时器件偏振抑制比 27 dB, 边模抑制比大于 20 dB。2013 年, ULM 大学与瑞士时间与频率实验室等单位一起报道了其 VCSEL 激光器在芯片原子钟系统中的应用测试结果, 证实 ULM 大学光栅集成 VCSEL 激光器的线宽仅有 23 MHz^[57-58]。这或许是因为表面光栅结构良好的偏振及模式过滤效果降低了 VCSEL 内部的相位噪声及强度噪声。

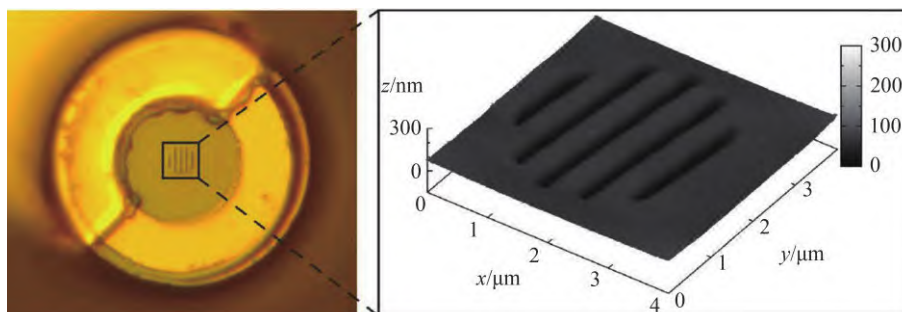


图 7 ULM 大学报道的表面集成光栅高温单模单偏振 VCSEL 结构^[56]

Fig.7 The VCSEL integrated with grating structure, which is used to control the mode and polarization of VCSEL, reported by ULM university^[56]

俄罗斯 Rzhannov 半导体物理研究中心在 2009 年也报道了用于量子精密测量的高温单模 795 nm VCSEL^[59], VCSEL 阈值电流为 150 μA , 工作在 900 μA 时该激光器的 SMSR 大于 30 dB, 出光功率为 219 μW 。从报道结果来看, 该器件的氧化孔直径可能仅有 3 μm 左右, 由于发光孔尺寸过小, 因而激光器的出光功率很低, 只有 0.2 mW, 并且随着工作温度的增加, 激光功率快速下降。在 2010 年, Rzhannov 半导体物理研究中心继续报道了 795 nm VCSEL 激光器研究结果^[60], 该报道实现了较大直径氧化孔尺寸下 VCSEL 的单模输出, 将 VCSEL 激光器的单模功率提高到 0.35 mW。值得一提的是, 该报道详细论述了氧化孔尺寸对发光波长的调制效应, 对于精准设计激光器的出光波长具有很好的参考价值。

2018 年, IOFFE 实验室报道了单模窄线宽 VCSEL 激光器的研究结果, 通过调控 DBR 反射镜的镜面损失, 实现了线宽 70 MHz 的单模 VCSEL; 通过创新性的介质 DBR 结构, 增加了对腔内光子的限制效应, 将 VCSEL 激光器的线宽压缩到 40 MHz^[61]。同年, IOFFE 实验室还报道了其在 895 nm 高功率单模 VCSEL 激光器领域的研究进展^[38]。该团队通过采用介质 DBR 反射镜增加腔内光子限制, 并制备了非对称的菱形电流注入孔, 由于引入了增益的非对称性, 因而 VCSEL 激光器的输出光场具有稳定的偏振方向(图 8)。采用上述方法, 该团队实现了 895 nm VCSEL 激光器单模功率超过 1 mW, 偏振抑制比超过 20 dB, 线宽 50 MHz, 工作温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 。

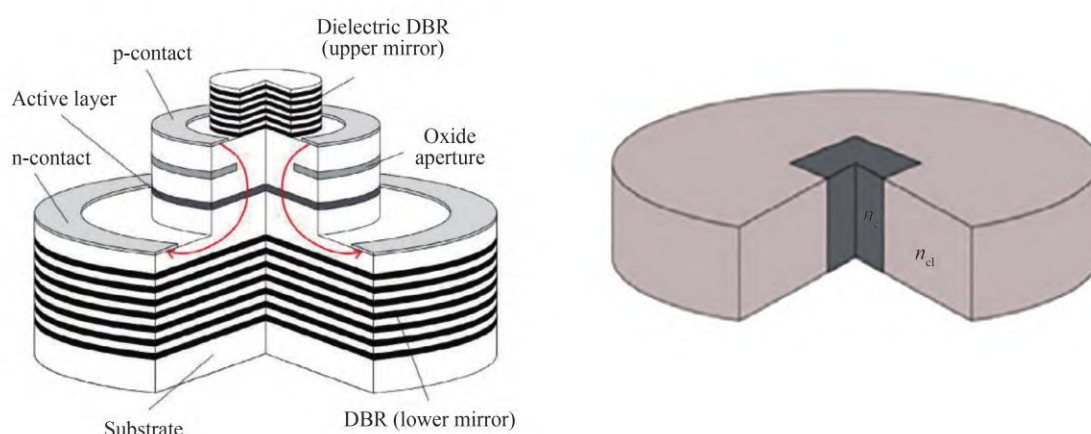


图 8 Ioffe 研究所报道的内腔接触式菱形氧化孔 VCSEL 结构^[38]

Fig.8 The inter-contact VCSEL structure reported by Ioffe institute and its diamond-shape oxide aperture^[38]

目前国际上用于芯片原子钟以及量子磁强计的 795 nm 及 894 nm VCSEL 芯片已经有商业化产品, 主要供应商为美国 Vixar^[62], 德国 Philips Photonics 公司^[63](目前已经被 Trumpf 公司收购)。标称功率水平在 0.2 mW 左右, 激光器的工作电流为 1 mA, 单模抑制比大于 20 dB, 偏振抑制比大于 15 dB。

我国在芯片原子钟等量子精密测量技术的布局相比美国相关规划晚了大约 5~10 年左右, 然而量子精密测量专用 VCSEL 光源技术布局时间却并未落后国外。这是因为中科院长春光机所的王立军院士、宁永强研究员早在美国 DARPA 布局芯片原子钟相关方向时就已经意识到其专用的高温 VCSEL 激光器技术将成为制约我国量子精密测量发展的关键技术。因此, 长春光机所几乎与国外 ULM 大学同步开展了相关研究, 目前已经取得了与国际水平相当的研究进展。中科院长春光机所 VCSEL 团队是我国国内量子精密测量高温 VCSEL 技术的领先团队。

2013 年, 中科院长春光机所 VCSEL 团队报道了 795 nm 高温 VCSEL 激光器的全面设计方法^[64], 预测了采用 3 μm 氧化孔的 VCSEL 可以实现芯片原子钟用 VCSEL 激光器的基本技术指标, 并从内部自产热效应、增益衰减等多方面论证了 VCSEL 激光器的性能指标, 为开展 VCSEL 器件制备奠定了基础。

2015 年, 中科院长春光机所 VCSEL 团队张建伟等提出了采用增益—腔模失配技术调控 VCSEL 激光器不同工作温度下的功耗参数, 实现了腔模增益在高温下的不敏感特点, 研发出基础技术指标接近国外水平的高温 894 nm VCSEL 激光器^[33], VCSEL 激光器的工作温度高达 110 $^{\circ}\text{C}$ 时的阈值电流也仅有 0.32 mA, 单模抑制比超过 25 dB。VCSEL 激光器的工作温度比 ULM 大学及 Sandia 实验室的报道高出近 30 $^{\circ}\text{C}$ 。

2016 年, 中科院长春光机所 VCSEL 团队张星、张建伟等与武汉物理与数学研究所的张奕等联合报道了

高温 894 nm VCSEL 激光器在芯片原子钟系统的实验验证效果^[39]。在该报道中,该团队 VCSEL 激光器实现了横向模式与偏振模式的同时控制,单模功率达到 0.3 mW,偏振比达到 17 dB,报道的器件指标已经与美国 Vixar 公司同类产品的技术指标处于同等水平。

此后,为进一步提高 VCSEL 激光器的模式、偏振特性,长春光机所 VCSEL 团队在量子精密测量专用高温工作 VCSEL 激光器的模式调控与偏振调控上开展了广泛研究。2017 年该团队报道了一种新型的表面集成光栅方案,实现了 80 °C 下偏振抑制比超过 30 dB 的 894 nm VCSEL 激光器^[65]。该方法的特点在于采用了更大周期的光栅结构,并提出了一种新的光栅制备工艺方法,通过二次紫外曝光的方式就可以实现光栅制备,实用化更高。

随后该团队又报道了采用表面椭圆浮雕结构对 894 nm VCSEL 激光器的模式与偏振同时控制的方法^[66],80 °C 下激光器单模抑制比超过 30 dB,偏振抑制比超过 16 dB,单模功率超过 0.55 mW。虽然椭圆表面浮雕结构已经在其他波段的 VCSEL 研究中得到应用,然而该团队提出的表面浮雕层采用的是表面介质膜结构。表面介质膜的折射率较低,因而其厚度相比半导体浮雕层更大,易于通过外部介质膜沉积方法制备;由于表面介质膜属于最后加工的材料层,避免了在工艺过程中对表面浮雕层的损伤,可以保证更好的模式与偏振控制效果,该结构示意图如图 9。

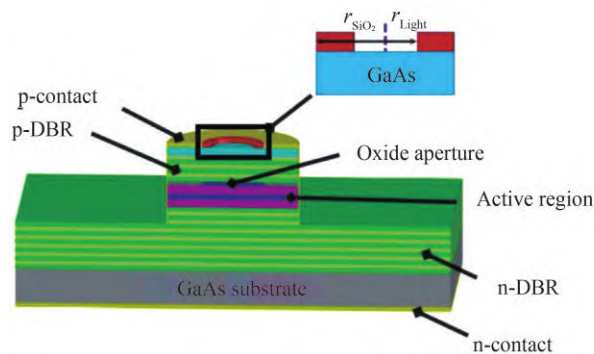


图 9 长春光机所报道的椭圆形浮雕结构示意图^[66]

Fig.9 The elliptical surface shallow integrated on the VCSEL surface, reported by CIOMP (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics)^[66]

2018~2021 年,中科院长春光机所 VCSEL 团队连续报道了制备具有菱形非对称氧化孔的 VCSEL 激光器方法,利用非对称的氧化炉气流条件制备了带有菱形氧化孔的 894 nm VCSEL 激光器^[67-68]。该报道所制备的氧化孔一个维度尺寸满足单模工作尺寸,因而 VCSEL 激光器可以保证单模工作;由于菱形氧化孔具有非对称增益特性,因此 VCSEL 激光器的偏振模式得到很好控制。该团队最终实现 894 nm VCSEL 激光器单模抑制比超过 25 dB,偏振抑制比超过 20 dB,单模功率达到 1.5 mW。

2022 年,中科院长春光机所 VCSEL 团队报道了 92 °C 工作温度下,单模功率超过 2 mW 的 894 nm VCSEL 激光器结果^[69]。该研究采用了 8 μm 直径的氧化孔径,并采用更小的表面反相浮雕结构(5 μm),实现了对 VCSEL 的高阶模式的有效抑制,同时基模得到了足够高的光学增益水平。器件结构如图 10。

值得注意的是,2018 年长春光机所团队依托原子钟 VCSEL 技术成立的长春中科光时空技术有限公司^[70],该公司已经推出专用于 Rb 及 Cs 泵浦的量子精密测量高温单模 795 nm/894 nm VCSEL 激光器产品,技术指标完全对标了美国 Vixar 公司产品,实现了国产自主量子精密测量高温 VCSEL 激光器的产品化。另外,长光时空公司的 795 nm VCSEL 产品功率指标达到 0.5 mW,单模功率指标已经超出国外 Vixar 及 Philips Photonics 公司可提供的产品功率水平(0.2 mW)。

近年来,国内其他单位如中科院半导体所、苏州纳米所等单位在量子精密测量专用高温 VCSEL 激光器领域也开展了相关研究,目前这些单位主要开展 VCSEL 的某项单项指标技术攻关,比如单模或偏振特性控制等相关研究。2017 年,苏州纳米所的董建荣等报道了 795 nm VCSEL 激光器研究结果,采用闭合式的台面结构^[71](图 11),实现了室温下 VCSEL 激光器的阈值电流 1.5 mA,最大功率达到 0.35 mW。该报道主要论证了两种不同台面结构对于实现 VCSEL 激光器单模特性的优劣。通过实验结果证明闭合台面结构更有

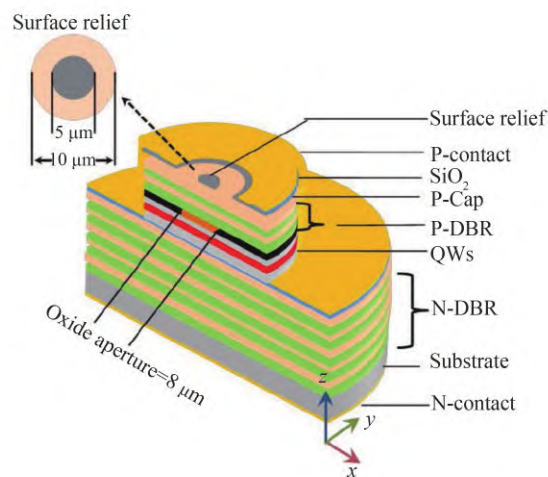


图 10 长春光机所报道的高单模功率结构示意图^[69]

Fig.10 The schematic diagram of VCSEL reported by CIOMP, emitting high single-mode power^[69]

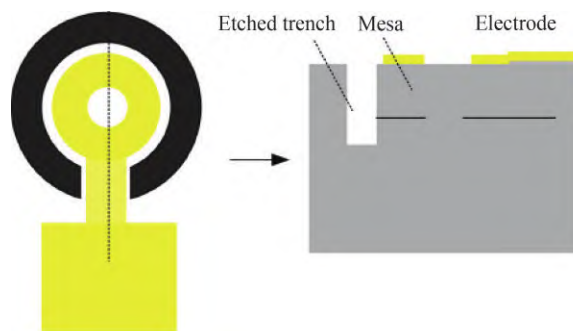


图 11 苏州纳米所报道的闭合台面结构示意图^[71]

Fig.11 The VCSEL mesa with closeisolation trench, reported by Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics^[71]

利于实现 VCSEL 的单模工作,但并未验证 795 nm VCSEL 的高温工作性能。

北京半导体所阚强团队在 2020 年报道了采用表面集成光栅结构实现 894 nm VCSEL 模式与偏振控制的方法^[72],该方法与 ULM 大学报道的结构类似。通过光栅参数对不同偏振光损失的影响,确定了合理的光栅参数,实现了室温下 894 nm VCSEL 激光器的最大单模抑制比 35 dB,此时激光功率在 0.1 mW 左右,工作电流在 4 mW 时的偏振比仍然可以达到 31 dB,然而激光器此时已经为多模工作状态,从功率曲线可以看出激光器的室温单模功率未超过 1 mW,该报道中室温下 VCSEL 的激光波长在 889.5 nm 附近,并未提及 VCSEL 的高温工作特性,但可以推测其激光波长很难达到 Cs 原子泵浦所需要的 894.6 nm。

同年,北京半导体所阚强团队报道了采用集成介质膜 DBR 结构的 894 nm VCSEL^[73],所报道的 VCSEL 激光器室温阈值电流为 0.3 mA,单模功率为 2.15 mW。虽然该文献称研制的 VCSEL 出光波长在 894 nm 附近,然而实际上该报道中 VCSEL 室温出光波长在 898 nm 以上,无法用于量子精密测量系统。

2022 年,北京半导体所阚强团队对表面集成介质膜 DBR 的 VCSEL 激光器结构(图 12)及选模原理进行了详细介绍,并采用这种方法制备了单模抑制比超过 30 dB 的 VCSEL^[74],该报道中,介质 DBR 与半导体 DBR 之间为带有刻蚀沟槽的折射率导引层,这种设计在常规器件的氧化孔位置与氧化层区域之间引入了新的折射率梯度,可以进一步增强对基模的选模效果,该报道的 VCSEL 波长在 910 nm 附近。

北京工业大学关宝璐团队也在相关领域开展了一些研究,近年来在采用 HCG 光栅控制 795 nm VCSEL 的线宽特性方面做了较为前沿的理论仿真工作^[75]。由于 HCG 光栅对 VCSEL 激光器的偏振具有很好的控制效果,并且 HCG 光栅引入的空气腔对增加腔内光子限制能力有很好的效果,经过调节 HCG 光栅的耦合层深度,理论预计可以将 VCSEL 激光器线宽压缩至 7 pm,为实现 VCSEL 激光器 kHz 量级光谱线宽输出奠定了理论基础。

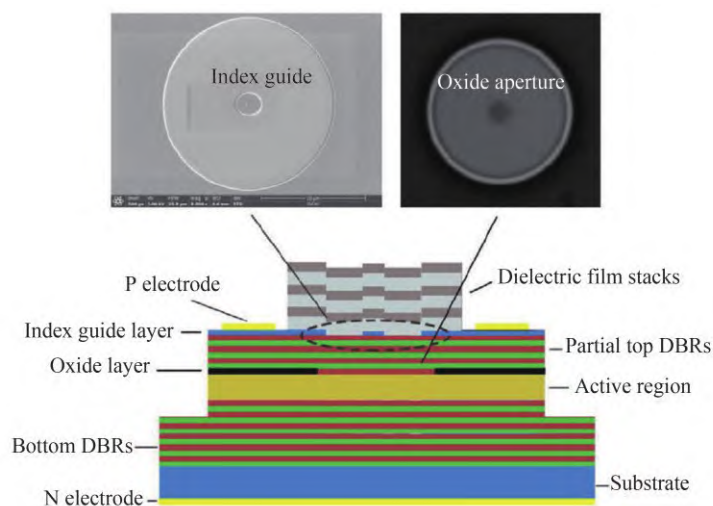


图 12 北京半导体所报道的介质膜 DBR 模式过滤结构示意图^[74]

Fig.12 The schematic structure of an oxide-confined VCSEL incorporating a built-in index guide, reported by Institute of Semiconductors^[74]

3 数据中心高速 VCSEL 技术发展

数据中心是人类信息化社会的象征,目前人类对信息通信的依赖程度远远超出想象,已经无法脱离数据中心^[76]。未来随着 5G 时代的到来,实现万物互联将会对数据中心的数据处理量带来数量级的提升,随之而来的是数据中心带来的巨大能耗需求^[77]。目前全球数据中心的电力消耗总量已经占据了全球电力使用量的百分之三,到 2025 年,全球数据中心使用的电力总量按现在的电力价格来估算的话,将会超过百亿美元,年均复合增长率将达到 6%,是一个极为恐怖的数据^[78]。而对于数据中心来说,其最大的耗电部分则是用于内部环境及通信模块制冷部分,这部分能耗占比高达 38%,如图 13 所示。目前的数据中心均建立在利于散热的区域,如 Google 的北极数据中心,阿里巴巴的千岛湖数据中心等。未来 5G 及 6G 技术带来的高速通信速率数量级的增长,将为数据中心带来不可估量的能耗,因而仅仅依靠采用改善散热环境来降低能耗的方法不可持续,提高数据中心内部元器件可耐受的高温工作温度不失为另一个良好的解决办法^[79]。

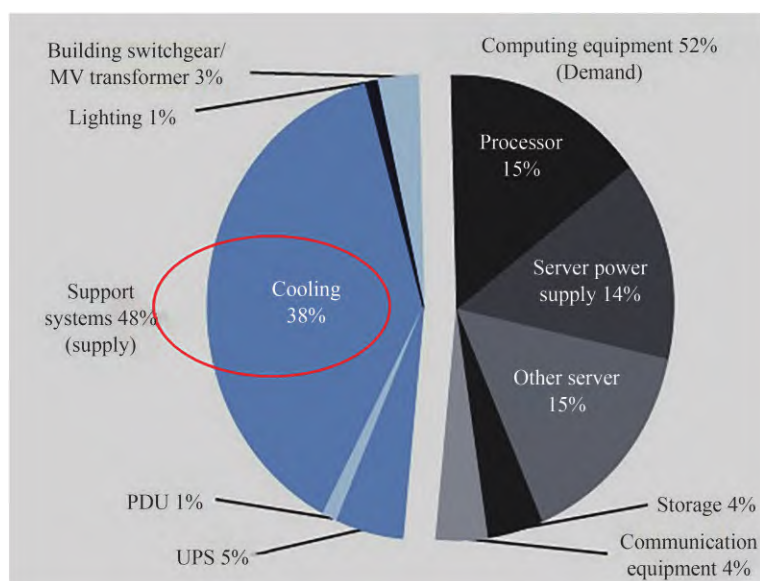


图 13 数据中心各项能耗占比

Fig.13 Proportion of energy consumption in data center

VCSEL 激光器是数据中心短距离光互联通信的核心光源^[80-81]。随着通信技术的快速发展,VCSEL 激光器的调制速率越来越快。单芯片的直调带宽已经从最初的 15 GHz 达到 30 GHz,翻了一倍;采用 PAM4 调制方式可以将最初的 25 Gbps 通信速率提升至 100 Gbps,通信速率提升了一个数量级。数据中心高速通信所用 VCSEL 激光器的波长主要是 850 nm,这是因为该波长在光纤中具有更低的材料色散。早期 850 nm 高速 VCSEL 激光器的研究报道多为常温下工作时的研究结果报道。近年来,980 nm VCSEL 激光器的高速特性及低功耗特性受到人们广泛关注,尤其是柏林工业大学,针对数据中心应用需求提出了“绿色光子学”概念,在高温高速低功耗 VCSEL 研究中做了大量研究工作。

表 1 高温高速 VCSEL 激光器发展情况
Table1 The research development of high-temperature and high-speed VCSELs

	Wavelength/nm	Bandwidth/GHz	Modulation speed/ Gbps	Operating temperature/°C	Year	Reference
TU Berlin	980	11	20	120	2008	[82]
TU Berlin	980		38	85	2011	[83]
TU Berlin	980	23	38	120	2011	[82]
Finisar	850	10	14	95	2012	[84]
Emcore	850	16	28	85	2013	[85]
CUT	850	21	40	85	2013	[86]
NCTU	850	22.4	34	85	2013	[87]
TU Berlin	980	23	46	85	2014	[88]
TU Berlin	980		38	85	2014	[89]
TU Berlin	980	18	35	85	2014	[90]
IBM/CUT	850	21	50	90	2015	[91]
NCU	850	20	41	85	2015	[92]
UIUC	850	24.5	50	85	2016	[93]
TU Berlin	980	24.5	50	85	2016	[94]
CUT	1 060	16	40	85	2017	[95]
VIS	850		25	150	2018	[96]
VIS	850		25	130	2018	[95]
VIS	850		25	180	2020	[97]

如表 1,早在 2008 年,德国柏林工业大学(TU Berlin)就已经报道了一种温度不敏感的 980 nm 单模高速 VCSEL。这种 VCSEL 无需调节就可以在 25 °C~120 °C 之间的 20 Gbit/s 大信号调制下稳定工作^[81]。2011 年德国柏林工业大学提出了一种用于光互连的高温度稳定性、高速 980 nm VCSEL(图 14),演示了 25 °C 时高达 44 Gb/s 的无误码传输性能,以及在 85 °C 时高达 38 Gb/s 的无误码传输性能^[82]。柏林工业大学实现高速性能的主要原因在于采用了更短的 VCSEL 有源区设计,降低了发光区光子寿命,同时还可以有效提高载流子注

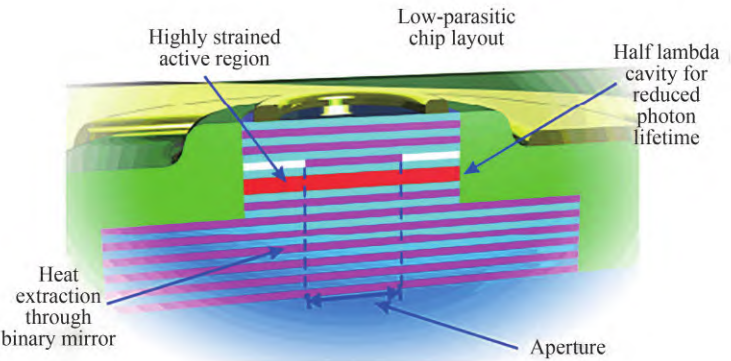


图 14 用于光互连的 980 nm 高速 VCSEL 的横截面示意^[82]
Fig.14 The schematic structure of high-speed 980 nm VCSEL used for the optical inter-connections^[82]

入速率;另外,980 nm VCSEL激光器采用了更高应变的量子阱结构,有利于提升量子阱的微分增益。

2012年,美国 Finisar 公司展示了用于 14 Gbps 应用的第二代 850 nm VCSEL^[83],主要报道内容在于公布了其验证 VCSEL 可靠性的方法及结果。在该文章中,Finisar 公司生产的 VCSEL 已经完成了超过 2 000 h 的耐用性评估,测试条件为 150 °C~85 °C,驱动电流为 9~15 mA。这种新的器件技术使 85 °C 模块(VCSEL 管芯温度 95 °C)具有较高的器件成品率,并且该器件已经集成到模块产品上市。此时,Finisar 公司仍在继续开发针对 28 Gbps 应用的第三代 850 nm VCSEL。

2013 年,Emcore 团队的 XIE C 等报道了加入住友电气 SEDU (Sumitomo Electric Device Innovations USA)后^[84],在 25 Gbps 及 28 Gbps VCSEL 芯片领域的研究进展。研发出了 85 °C 下带宽达到 16 GHz,调制速率 28 Gbps 的 VCSEL 芯片。该团队报道的 VCSEL 激光器不仅能够在调制速率高达 28 Gbps 下工作,而且能够在 200 m OM3 光纤链路上以这样的数据速率进行通信。VCSEL 在 25 °C 和 85 °C 之间的带宽差异或性能差距非常小,这主要得益于其稳定的内部增益结构与外部工艺均匀性,可以保证 VCSEL 激光器在不同温度下具有稳定的高速工作能力。

2013 年瑞典查尔姆斯理工大学(Chalmers University of Technology, CUT)采用与柏林工业大学类似的半波长有源腔^[85],并针对 DBR 的内部界面势垒引入了组分渐变与调制掺杂技术,大幅降低了 VCSEL 激光器的器件电阻,实现了 7 μm 氧化孔直径的 850 nm VCSEL 在 85 °C 温度工作时的调制带宽达到 21 GHz。通过采用高速光探测器,验证了 VCSEL 激光器室温下的无误码传输能力,可实现高达 47 Gb/s 的无误码数据传输(误码率 $<10^{-12}$),在 85 °C 下实现高达 40 Gb/s 的无错误数据传输。

同年,中国台湾交通大学 VCSEL 团队报道了采用 Zn 扩散工艺实现高速 VCSEL 激光器的方法^[86]。该团队对比了两种不同 Zn 扩散孔径和深度的 850 nm VCSEL 器件的高速性能以优化 Zn 扩散工艺参数(器件 A: Zn 扩散直径为 6 μm ,扩散深度约 1 μm ,器件 B Zn 扩散直径为 10 μm ,扩散深度约 1.5 μm ,具体结构如图 15)。采用优化的 Zn 扩散区和氧化限制孔尺寸,可以实现高达 34 Gbit/s 的数据传输速率,并获得了破纪录的能耗水平(140 fJ/bit)。使用 Zn 扩散技术可以对注入 VCSEL 激光器的电流做进一步限制,同时还避免了采用氧化层引入的额外电容。在该报道中分析由于 Zn 扩散区与氧化孔配合实现了均匀的电流注入,因而 VCSEL 的微分电阻也得以进一步降低,上述原因是实现本报道中 VCSEL 高传输速率的主要原因。

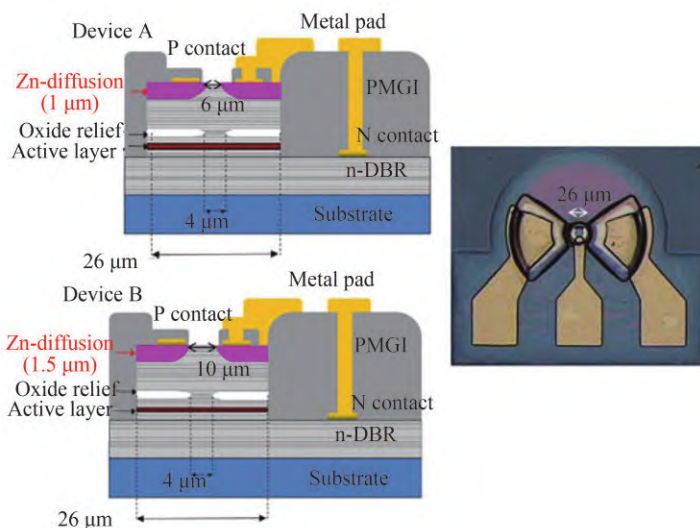


图 15 不同 Zn 扩散口径 VCSEL 横截面示意及俯视图^[86]

Fig.15 Schematic diagram and top view of VCSELs with different Zn diffusion diameters^[86]

2014 年德国柏林工业大学提出了一种高温高速的 980 nm 氧化限制型 VCSEL 结构^[87],通过采用多氧化层结构,降低了器件的结构电容,最终实现了 25 °C 下 50 Gbit/s 的无误码工作(最大调制带宽 24.7 GHz),以及 85 °C 下 46 Gbit/s 的无误码工作(最大调制带宽 23.0 GHz)。这种新型设计的 VCSEL 尤其适用于非常短距离(<2 m)的无线光互连。

同年,德国柏林工业大学报道了一种高效节能、温度稳定的直接调制 980 nm VCSEL^[88],工作温度高达 85 °C。在 85 °C 时,无误码传输速率达到 38 Gbit/s。文章介绍了如果要想实现 VCSEL 在短距离、极短距离和超短距离板间、芯片间和芯片内光学互连,则其温度稳定性、带宽和 VCSEL 密度至关重要。迄今为止,980 nm VCSEL 是所有 VCSEL 中在 85 °C 下最节能的。柏林工业大学证实了在高工作温度下同时实现高比特率、每传输比特消耗能量非常低是可行的。

2014 年,德国柏林工业大学制备了 3 μm, 3.5 μm, 4 μm 三种不同氧化孔直径的 980 nm VCSEL,并验证了其高温工作性能^[89]。在 85 °C 温度下,采用 5 m OM2 MMF 传输光信号,实现了 35 Gb/s 的无误码数据传输工作,热比特率(Heat-to-bit Rate Ratio, HBR)创下历史新低(139 fJ/bit)。文章详细研究了氧化物孔径相关的静态工作性能特性和在 85 °C 高温下的高速调制特性,证明 3~4 μm 的氧化层孔径尺寸是实现 VCSEL 高速、低热比特率的最优参数。

2015 年,美国 IBM 公司与 CUT 合作,报道了 850 nm VCSEL 激光器的高温工作特性^[90],通过高速 VCSEL 设计与集成驱动器和接收器电路相结合的方法(图 16),该方法可以有效抑制由于数据传输或模块封装带来的外部寄生效应,最终实现 VCSEL 调制速率达到了 50 Gb/s,工作温度最高可达 90 °C。在没有任何补偿的情况下,VCSEL 在 57 °C 工作时信号的误码率仍然小于 10^{-12} 。

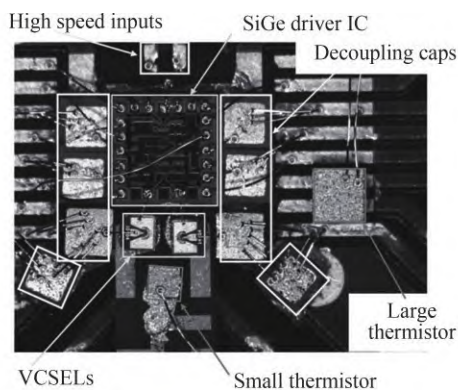


图 16 美国 IBM 与 CUT 报道的高速集成 VCSEL 模块实物^[90]

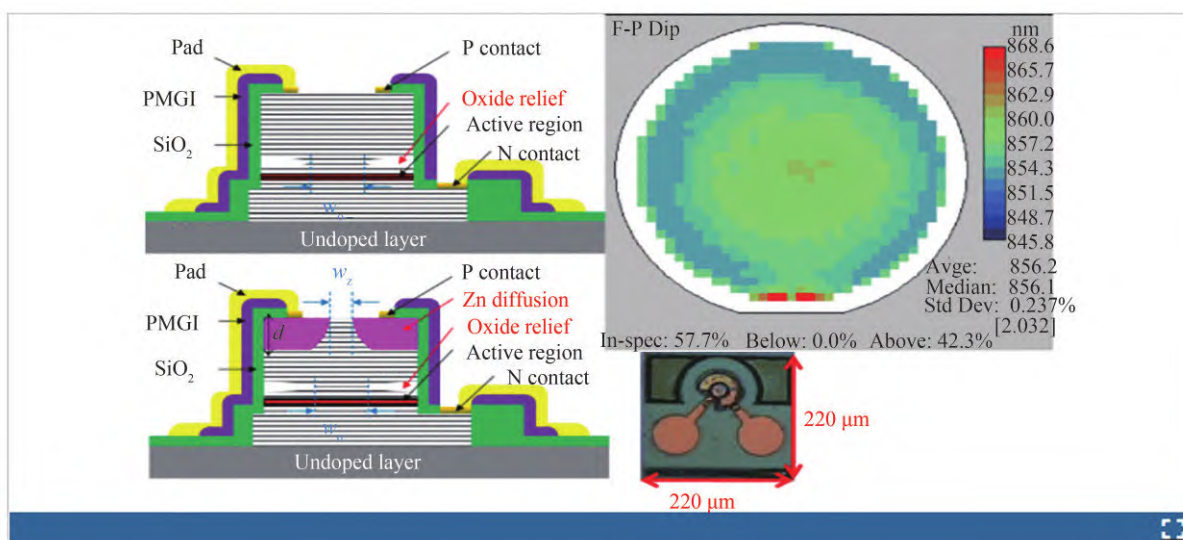
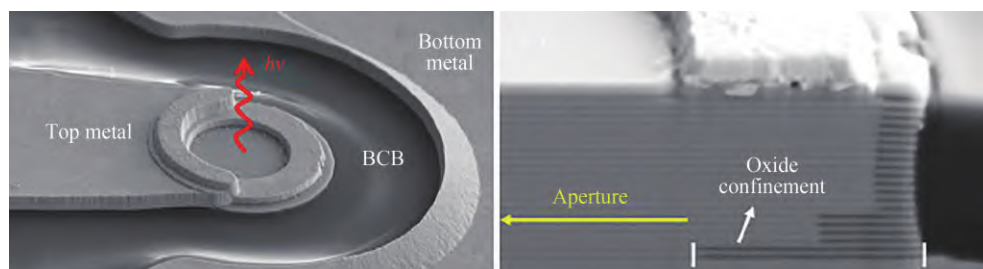
Fig.16 The integrated high-speed VCSEL module reported by IMB and CUT^[90]

2015 年,中国 KUCHTA D M 等报道了采用 Zn 扩散与大的增益峰-腔模失配相结合^[91],实现高温高速的结果。大的增益峰-腔模失配可以在一定程度上抑制由于温度增加造成的增益快速衰减趋势,通过增加增益峰-腔模失配到 20 nm,调制带宽增加到 27 GHz。Zn 扩散工艺可以将单模 VCSEL 激光器的工作面积大幅提升(图 17),从而降低了 VCSEL 的微分电阻。该研究在 85 °C 下实现了出色的高速传输性能,可以实现 41 G bit/s 的无误差传输和极低的驱动电流密度(8 kA/cm²)。

2016 年,美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校(University of Illinois at Urbana-Champaign, UIUC)报道了 5 个 In_{0.072}Ga_{0.928}As/Al_{0.37}Ga_{0.64}As 量子阱,以及氧化层分段组分结构(图 18)的 VCSEL 激光器^[92]。采用 5 个超薄量子阱可以有效提高量子阱增加微分增益,分段组成的多氧化层结构可以有效降低氧化绝缘层产生的外部寄生电容,采用该设计方法,在 85 °C 的条件下,实现 VCSEL 的无误码传输速度高达 50 Gbps。

2016 年,柏林工业大学报道了小信号调制带宽能达到 25GHz,且在 25~85 °C 的较宽温度范围内保持稳定输出的 980 nm VCSEL 激光器^[93],在 25~85 °C 温度范围下,在完全相同的驱动条件下,以 50 Gb/s 的速度实现了无误码的背靠背数据传输。

2017 年,瑞典查尔姆斯大学报道了一种高效 1 060 nm 波长的 GaAs 基氧化物限制垂直腔面发射激光器^[94]。该报道中,采用了应变补偿结构的发光区设计理念,提高了发光区的载流子限制能力及相应的内量子效率;同时将氧化层厚度降低至 20 nm,通过产生锥形结构的氧化层以降低载流子散射损耗;将氧化层位置放置于驻波波节位置以减小 VCSEL 内部的光学散射损耗,提高单模性。通过上述方法,制备了具有 4 μm 直径氧化孔的 VCSEL 激光器,该激光器具有大于 50 dB 的侧模抑制和 0.2 mA 的阈值电流,在 100 fJ/bit 的能耗下实现了 50 Gbit/s 的数据速率,创造了当时的记录指标。在工作温度达到 85 °C 时,VCSEL 仍然可以

图 17 Zn 扩散 VCSEL 结构示意图^[91]Fig.17 Schematic diagram of VCSELs with Zn diffusion^[91]图 18 高速集成 VCSEL 的 SEM 图像^[92]Fig.18 The SEM image of high-speed VCSELs^[92]

实现 40 Gbps 的调制速率。

2018 年, VIS 公司讨论了腔增益波长失谐对 VCSEL 的温度性能和光谱宽度的影响^[95]。通过氧化物限制使 850 nm 的 VCSEL 具有更高的温度稳定性, 150℃ 的散热器温度下传输速率能够在达到 25 Gbit/s, 而在 130℃ 下能达到 35 Gbit/s。

2018 年, VIS 公司的 AGUSTÍN M 等率先采用量子点结构作为有源区的增益介质, 由于量子点在高温下具有更为优越的增益水平, 该团队实现了 150℃ 时通信速率仍然超过 25 Gbps 的高速 VCSEL^[96]。2020 年, LEDENTSOV N 等采用相同的量子点发光层结构, 通过优化增益峰与腔模相对位置, 缓解高温下 VCSEL 内部模式增益的衰减速度, 实现了 850 nm VCSEL 激光器在 180℃ 时数据传输速率超过 25 Gbps^[96-97]。

综合上述高速 VCSEL 发展现状及趋势可以看出, 在研究早期, 面向数据中心的最高工作温度应用要求, 对 85℃ 左右的高速 VCSEL 激光器调制速率进行了研究报道, 随着数据中心能耗问题日渐突出, 高速 VCSEL 研究领先单位如柏林工业大学等提出了“绿色光子学”概念, 而 980 nm 波段在该领域有着明显优势。围绕该优势, 柏林工业大学开展了一系列高温条件下稳定调制的 VCSEL 激光器研究, 后续 VIS 公司采用量子点发光区结构, 实现了 VCSEL 的高温工作时非常优异的工作性能。

4 总结与展望

VCSEL 激光器在体积、功耗、光束质量等特性上具有无可比拟的独特优势, 在其诞生四十余年间, 不断推动着传感、通信等领域关键核心系统向着低功耗与小型化方向发展。量子精密测量技术是未来顶尖的精密传感技术, 数据中心是人类信息化发展的基础, 两者均对 VCSEL 激光器的高温工作能力提出了迫切需求。

由于 VCSEL 激光器发光区两侧 DBR 结构带来的严重的内部热效应,高温下 VCSEL 的功耗、线宽、模式与偏振稳定性、调制速率等关键性能均受到极大挑战。我国中科院长春光机所在国内量子精密测技术尚未开展布局时,提前布局其专用高温 VCSEL 激光器技术,与国外 VCSEL 领先研究机构同步开展了相关技术研究。长春光机所开展了一系列创新性结构,实现了高温 VCSEL 激光器的功耗控制;研究 VCSEL 表面集成微纳结构与内部创新结构,实现量子精密测量 VCSEL 激光器必须具备的模式与偏振特性控制:1)提出调控增益光谱与振荡腔腔模位置,有效抑制了高温下 VCSEL 的功耗增加问题;2)开发出新型的 VCSEL 激光器的表面反相介质膜浮雕结构,实现了对激光器内部模式的稳定选取;3)采用表面大周期光栅结构,实现对 VCSEL 激光器内部模式与偏振的同时控制,简化了 VCSEL 激光器表面集成光栅工艺;4)开发出菱形氧化孔 VCSEL 激光器的制备工艺,实现对 VCSEL 偏振与模式的同时调控。

尤其是目前长春光机所原子钟专用 VCSEL 激光器技术已经完成成果转化,成立中科长光时空光电技术有限公司,正致力于解决国内量子精密测量 VCSEL 芯片产业化中存在的重复性、一致性等关键问题,未来将持续支撑我国相关领域发展。

量子精密测量技术中的核磁共振陀螺系统对高温 VCSEL 激光器指标有更高需求,要求高温 795 nm/894 nm VCSEL 激光器的单模功率达到 mW 量级,线宽水平达到 MHz 量级,现阶段国内外 795 nm/894 nm VCSEL 激光器的研究报道结果均不能满足核磁共振陀螺应用需求,长春光机所依托前期优势,面向核磁共振陀螺应用要求,已经开发出高温单模功率 2 mW 的 894 nm VCSEL 激光器,未来将进一步窄化 VCSEL 激光线宽,扩展波长范围,以支撑国内量子陀螺技术发展。随着后端应用场景对量子精密测量技术精度的不断提升,基于冷原子泵浦的量子精密测量装置将会是下一步的发展方向,这对 VCSEL 激光器工作时的线宽水平要求有着数量级的提升,采用表面微纳结构或者外腔结构压缩 VCSEL 激光器线宽水平将会是未来的重要研究领域。

高温高速性能是目前高速 VCSEL 的主要研究方向。在现有 VCSEL 结构基础上,采用常规的量子阱发光区已经可以将高速 VCSEL 的工作温度提升到 150 °C,采用量子点发光区甚至可以将高速 VCSEL 的工作温度提升到 180 °C,高温下更高速率的 VCSEL 激光器则需要在量子点材料结构上取得突破。另外,采用表面微纳结构代替现有的 DBR 可以有效降低传统 DBR 的电阻特性,可以在现有结构上进一步提升调制速率。

传感与通信技术的进步对信息社会发展影响深远。作为这两大领域的核心元器件,新的高温工作 VCSEL 激光器技术无疑具有重要研究意义;消费电子 3D 传感、自动驾驶激光雷达等广阔市场未来将带动高温高功率 VCSEL 激光列阵技术的发展,为高温 VCSEL 激光器带来巨大的市场价值。

参考文献

- [1] HALL R N, FENNER G N, KINGSLEY G D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions[J]. Physical Review Letter, 1962, 9(9): 366-369.
- [2] ALFEROV Z I, ANDREEV M, GARBUZOV D Z, et al. Investigation of the influence of the AlAs-GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous emission at room temperature[J]. Soviet Physics-Semiconductors, 1970, 4(9): 1573-1575.
- [3] PAOLETTI R, CODATO S, CORIASSO C, et al. 350 W high-brightness multi-emitter semiconductor laser module emitting at 976 nm[C]. High-Power Diode Laser Technology XIX, International Society for Optics and Photonics, 2021.
- [4] BONI A, ARSLAN S, ERBERT G, et al. Epitaxial design progress for high power, efficiency and brightness in 970 nm broad area lasers[C]. High-Power Diode Laser Technology XIX, International Society for Optics and Photonics, 2021.
- [5] LEEY H, TELL B, BROWN-GOEBELERK F, et al. Deep-red continuous wave top-surface-emitting vertical cavity AlGaAs super lattice lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(2): 108-109.
- [6] ISHIGE Y, HASHIMOTO H, HAYAMIZU N, et al. Blue laser-assisted kW-class CW NIR fiber laser system for high quality copper welding[C]. High-Power Diode Laser Technology XIX, International Society for Optics and Photonics, 2021.
- [7] MCMANAMON P F, BANKS P S, BECK J D, et al. Comparison of flash lidar detector options[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031223.
- [8] SODA H, IGA K, KITAHARA C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329.
- [9] IGA K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: invention and innovation [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S2): 08PA01.

- [10] IGA K. Surface-emitting laser—its birth and generation of new optoelectronics field[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1201–1215.
- [11] ZHANG Jiye, ZHANG Jianwei, ZHANG Zhuo, et al. High-power vertical external-cavity surface-emitting laser emitting switchable wavelengths[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32612.
- [12] LEE Y, JEWELL J, SCHERER A, et al. Room temperature continuous wave vertical cavity surface emitting laser single quantum well micro laser diode[J]. Electronics Letters, 1989, 25(20): 1377–1378.
- [13] LOTTJ A, LEDENTSOVN N, USTINOVV M, et al. InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3 μm [J]. Electronics Letters, 2000, 36(16): 1384–1385.
- [14] OH T H, SHCHEKIN O B, DEPPE D G. Single-mode operation in an anti guided vertical-cavity surface-emitting laser using a low-temperature grown AlGaAs dielectric aperture[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(8): 1064–1066.
- [15] OH T H, HUFFAKER D L, DEPPE D G. Comparison of vertical-cavity surface-emitting lasers with half-wave cavity spacers confined by single-or double-oxide apertures[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(7): 875–877.
- [16] HIGUCHI A, NAITO H, TORII K, et al. High power density vertical-cavity surface-emitting lasers with ion implanted isolated current aperture[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4206–4212.
- [17] BOEHM G, ORTSIEFER M, SHAU R, et al. InP-based VCSEL technology covering the wavelength range from 1.3 to 2.0 μm [J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 251(1–4): 748–753.
- [18] NAITO H, MIYAMOTO M, AOKI Y, et al. Development of a high-power vertical-cavity surface-emitting laser array with ion-implanted current apertures[C]. SPIE, 2013.
- [19] MULLER M, HOFMANN W, BOHM G, et al. Short-cavity long-wavelength VCSELs with modulation bandwidths in excess of 15 GHz[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(21): 1615–1617.
- [20] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, et al. High-power vertical-cavity surface-emitting arrays[C]. SPIE, 2008.
- [21] KITCHING J, KNAPPE S, VUKICEVIC M, et al. A microwave frequency reference based on VCSEL-driven dark line resonances in Cs vapor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6): 1313–1317.
- [22] VEZ D, EITEL S, HUNZIKER S G, et al. 10-Gbit/s VCSELs for datacom: Devices and applications[C]. SPIE, 2003.
- [23] PRUIJMBOM A, APETZ R, CONRAD S, et al. Vertical-cavity surface emitting laser-diodes arrays expanding the range of high-power laser systems and applications[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(3): 032005.
- [24] YADAV R, ALVI P A. Temperature dependence of material gain of InGaAsP/InP nano-heterostructure [C]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2014, 1591(1): 1419–1421.
- [25] LADUGIN M A, MARMALYUK A A. Effect of (Al) GaAs/AlGaAs quantum confinement region parameters on the threshold current density of laser diodes[J]. Quantum Electronics, 2019, 49(6): 529.
- [26] WENZEL H, CRUMP P, PIETRZAK A, et al. The analysis of factors limiting the maximum output power of broad-area laser diodes[J]. Optical and quantum electronics, 2009, 41(9): 645–652.
- [27] BABIC D I, CORZINE S W. Analytic expressions for the reflection delay, penetration depth, and absorptance of quarter-wave dielectric mirrors[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(2): 514–524.
- [28] FAIST J, REINHART F K. Phase modulation in GaAs/AlGaAs double heterostructures. I. Theory [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 67(11): 6998–7005.
- [29] KAUL T, ERBERT G, MAAßDORF A, et al. Suppressed power saturation due to optimized optical confinement in 9xx nm high-power diode lasers that use extreme double asymmetric vertical designs [J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(3): 035005.
- [30] BAE J W, SHTENGEL G, KUKSENKOV D, et al. Threshold carrier density in vertical cavity surface emitting lasers[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(16): 2031–2033.
- [31] CHOQUETTE K D, SCHNEIDER R P, LEAR K L, et al. Gain-dependent polarization properties of vertical-cavity lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, 1(2): 661–666.
- [32] BLOKHIN S A, BOBROV M A, MALEEVEV N A, et al. Impact of a large negative gain-to-cavity wavelength detuning on the performance of InGaAlAs oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [C]. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [33] ZHANG Jianwei, ZHANG Xing, ZHU Hongbo, et al. High-temperature operating 894.6 nm-VCSELs with extremely low threshold for Cs-based chip scale atomic clocks[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14763–14773.
- [34] CYR N, TETU M, BRETON M. All-optical microwave frequency standard: a proposal[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 640–649.
- [35] KITCHING J, KNAPPE S, LIEW L, et al. Micro fabricated atomic clocks[C]. 18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2005, MEMS 2005, IEEE, 2005: 1–7.
- [36] SCHWINDT P D D, KNAPPE S, SHAH V, et al. Chip-scale atomic magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(26): 6409–6411.

- [37] SERKLAND D K, GEIB K M, PEAKE G M, et al. VCSELs for atomic sensors[C]. SPIE, 2007.
- [38] MALEEV N A, BLOKHIN S A, BOBROV M A, et al. Laser source for a compact nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. Gyroscopy and Navigation, 2018, 9(3): 177-182.
- [39] ZHANG Xing, ZHANG Yi, ZHANG Jianwei, et al. Application of 894 nm high temperature vertical cavity surface emitting laser and its chip-scale cesium atomic clock system[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 134204
张星, 张奕, 张建伟, 等. 894 nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用[J]. 物理学报. 2016, 65(13): 134204
- [40] DU Runchang, YANG lin, ZHAO Haiqing. The current situation and development of chip atomic clocks[J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(2): 34-38.
杜润昌, 杨林, 赵海清. 芯片原子钟的现状与发展[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(2): 34-38.
- [41] WU Zhinan, ZHAO Zhengqin, WEN Zhongpin, et al. Research progress of high-sensitivity miniature optical atomic magnetometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230002.
吴梓楠, 赵正钦, 温钟平, 等. 高灵敏度微型光学原子磁力仪研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230002.
- [42] PROUTYM. Advances in atomic magnetometers[C]. Military Sensing Symposium, Battle field Acoustic and Magnetic Sensors, Laurel, MD, 2009.
- [43] WALKER T G, LARSEN M S. Spin-exchange pumped NMR gyros[J]. Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2016, 65: 373.
- [44] AL-SAMANEH A. VCSELs for atomic clock demonstrators[C]. Annual Report 2013, Institute of Opto Electronis, Ulm University, 2013.
- [45] CHUI P C, YU S F. Second harmonic distortion in vertical cavity surface emitting lasers with lateral loss effect[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 546 - 552.
- [46] YU S F. Dynamic behavior of vertical cavity surface emitting lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(7): 1168.
- [47] CHANG-HASNAIN C J, HARBISON J P, HASNAIN G, et al. Dynamic, polarization, and transverse mode characteristics of vertical cavity surface emitting lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(6): 1402.
- [48] SERKLAND D K, PEAKE G M, GEIB K M, et al. VCSELs for atomic clocks[C]. SPIE, 2006.
- [49] KEELER G A, GEIB K M, SERKLAND D K, et al. VCSEL polarization control for chip-scale atomic clocks[C]. Sandia Annual Report SAND2007-0069 Unlimited Release Printed January 2007, 2007.
- [50] SERKLAND D K, MORIN T J, GRINE A J, et al. All-semiconductor coupled-cavity VCSELs for narrow linewidth [C]. 2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC), IEEE, 2018: 1-2.
- [51] SERKLAND D K, MORIN T J, SO H M, et al. Narrow-linewidth VCSELs based on multi-mirror cavities (Conference resenation)[C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIV, International Society for Optics and Photonics, 2020, 11300: 1130008.
- [52] SERKLAND D K, KEELER G A, GEIB K M, et al. Narrow linewidth VCSELs for high-resolution spectroscopy[C]. SPIE, 2009.
- [53] WAHL D, SETZ D, AL-SAMANEH A. Development of VCSELs for atomic clock applications[J]. Annual Report, 2008: 49-54.
- [54] AL-SAMANEH A, RENZ S, STRODL A, et al. Polarization-stable single-mode VCSELs for Cs-based MEMS atomic clock applications [C]. Semiconductor Lasers and Laser Dynamics IV, International Society for Optics and Photonics, 2010, 7720: 772006.
- [55] AL-SAMANEH A, SANAYEH M B, RENZ S, et al. Polarization control and dynamic properties of VCSELs for MEMS atomic clock applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1049-1051.
- [56] AL-SAMANEH A, SANAYEH MBOU, MIAH M J, et al. Polarization-stable vertical-cavity surface-emitting lasers with inverted grating relief for use in microscale atomic clocks[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(17): 171104.
- [57] GRUET F, AL-SAMANEH A, KROEMER É, et al. Metrological characterization of custom-designed 894.6 nm VCSELs for miniature atomic clocks[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5781-5792.
- [58] MIAH M J, AL-SAMANEH A, KERN A, et al. Fabrication and characterization of low-threshold polarization-stable VCSELs for Cs-based miniaturized atomic clocks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1701410.
- [59] DEREBEZOV I A, HAISLER V A, BAKAROV A K, et al. Single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers for atomic clocks[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2009, 45(4): 361-366.
- [60] DEREBEZOV I A, HAISLER V A, BAKAROV A K, et al. Single-mode vertical-cavity surface emitting lasers for 87Rb-based chip-scale atomic clock[J]. Semiconductors, 2010, 44(11): 1422-1426.
- [61] BLOKHIN S A, BOBROV M A, KUZ'MENKOV A G, et al. The influence of cavity design on the linewidth of near-IR single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Technical Physics Letters, 2018, 44(1): 28-31.

- [62] 895S-0000-x002 [EB/OL]. [2022-02-10]. <http://vixarinc.com/products/vcse1-die>.
- [63] Single-mode VCSEL [EB/OL]. [2022-02-10]. https://www.trumpf.com/en_INT/.
- [64] ZHANG Jian, NING Yongqiang, ZENG Yugang, et al. Design and analysis of high-temperature operating 795 nm VCSELs for chip-scale atomic clocks[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 045802.
- [65] XIANG Lei, ZHANG Xing, ZHANG Jianwei, et al. Stable single-mode operation of 894.6 nm VCSEL at high temperatures for Cs atomic sensing[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(7): 074209.
- [66] XIANG Lei, ZHANG Xing, ZHANG Jianwei, et al. VCSEL mode and polarization control by an elliptic dielectric mode filter[J]. Applied Optics, 2018, 57(28): 8467-8471.
- [67] ZHANG Jiye, ZHANG Jianwei, ZHANG Xing, et al. Polarization-controlled and single-transverse-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with eye-shaped oxide aperture[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(12): 120309.
- [68] HANG Jiye, ZHANG Jianwei, ZHANG Xing, et al. Asymmetric oxide apertures of vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by unsymmetrical wet oxidation and its polarization control[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106948.
- [69] LI Xue, ZHOU Yinli, ZHANG Xing, et al. High-power single-mode 894 nm VCSELs operating at high temperature ($> 2 \text{ mW@ } 365 \text{ K}$)[J]. Applied Physics B, 2022, 128(1): 1-6.
- [70] Single-mode VCSEL [EB/OL]. [2022-02-10]. <http://www.acephoton.com/products?category=2>.
- [71] SUN Y R, DONG J R, ZHAO Y M, et al. The fabrication and lasing characteristics of oxide-confined 795 nm VCSELs with close and open isolation trenches[J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(11): 1-11.
- [72] LI Ming, WANG Qiuhua, QIU Pingping, et al. 894nm high orthogonal polarization suppression ratio vertical cavity surface emitting laser[C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIV, International Society for Optics and Photonics, 2020, 11300: 113000W.
- [73] QIU Pingping, WU Bo, LI Ming, et al. Low threshold current single mode 894 nm VCSELs with SiO₂/Si₃N₄ dielectric DBRs[C]. 2020 IEEE Photonics Conference (IPC), 2020.
- [74] QIU Pingping, WU Bo, FU Pan, et al. Realization of single-transverse-mode VCSELs incorporating a built-in index guide[J]. Optics Communications, 2022, 504: 127450.
- [75] ZHANG Fuling, FU Lishan, HU Peili, et al. Ultra-narrow linewidth characteristics of a 795 nm sub-wavelength grating coupling chamber vertical cavity surface emitting lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(22): 113-119.
张福领, 付丽珊, 胡丕丽, 等. 795 nm 亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性[J]. 物理学报, 2021, 70(22): 113-119.
- [76] STEVENS O. The history of datacom/DB[J]. IEEE Annals of the History of Computing, 2009, 31(4): 87-91.
- [77] NOTO HARDJONO B D, SCHMIDT R R, CANFIELD S M. Seismic considerations for datacom equipment[C]. Winter Meeting of the American-Society-of-Heating-Refrigerating-and-Air-Conditioning-Engineers (ASHRAE) 2006, 112: 632.
- [78] DAYARATHNA M, WEN Y, FAN R. Data center energy consumption modeling: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(1): 732-794.
- [79] LIN CK, BOURD P, ZHU J, et al. High temperature continuous-wave operation of 1.3-1.55 μm vcsels with inp/air-gap dbrs[C]. IEEE 18th International Semiconductor Laser Conference, 2002.
- [80] NISHIYAMA N, MIZUTANI A, HATORI N, et al. Single-transverse mode and stable-polarization operation under high-speed modulation of InGaAs-GaAs vertical-cavity surface-emitting laser grown on GaAs (311) B substrate[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(12): 1676-1678.
- [81] HARRIS J S, O'SULLIVAN T, SARMIENTO T, et al. Emerging applications for vertical cavity surface emitting lasers[J]. Semiconductor Science and Technology, 2010, 26(1): 014010.
- [82] MUTIG A, FIOL G, MOSER P, et al. 120 C 20 Gbit/s operation of 980 nm single mode VCSEL[C]. 2008 IEEE 21st International Semiconductor Laser Conference, IEEE, 2008.
- [83] HOFMANN W, MOSER P, WOLF P, et al. 44 Gb/s VCSEL for optical interconnects[C]. National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, 2011.
- [84] GRAHAM L A, CHEN H, GAZULA D, et al. The next generation of high speed VCSELs at Finisar[C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVI, International Society for Optics and Photonics, 2012, 8276: 827602.
- [85] XIE C, LIN N, HUANG S, et al. The next generation high data rate vcsel development at sedu[C]. SPIE, 2013.
- [86] WESTBERGH P, SAFAISINI R, HAGLUND E, et al. High-speed oxide confined 850-nm VCSELs operating error-free at 40 Gb/s up to 85 °C[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(8): 768-771.
- [87] 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 Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 19(2): 790208.
- [88] 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].

- Electronics Letters, 2014, 50(19): 1369-1371.
- [89] LI H, WOLF P, MOSER P, et al. Energy-efficient and temperature-stable oxide-confined 980 nm VCSELs operating error-free at 38 Gbit/s at 85 °C [J]. Electronics Letters, 2014, 50(2): 103-105.
 - [90] LI H, WOLF P, MOSER P, et al. Temperature-stable 980-nm VCSELs for 35-Gb/s operation at 85 °C with 139-fJ/bit dissipated heat[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(23): 2349-2352.
 - [91] 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]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(4): 802-810.
 - [92] 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 Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 470-479.
 - [93] LIU M, WANG C Y, FENG M, et al. 850 nm oxide-confined vcsels with 50 gb/s error-free transmission operating up to 85 °C[C]. in Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America, 2016.
 - [94] LARISCH G, MOSER P, LOTT J A, et al. Impact of photon lifetime on the temperature stability of 50 Gb/s 980 nm VCSELs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2327-2330.
 - [95] SIMPANEN E, GUSTAVSSON J S, HAGLUND E, et al. 1060 nm single-mode vertical-cavity surface-emitting laser operating at 50 Gbit/s data rate[J]. Electronics Letters, 2017, 53(13): 869-871.
 - [96] AGUSTÍN M, KROPP J R, SHCHUKIN V A, et al. Temperature stable oxide-confined 850-nm VCSELs operating at bit rates up to 25 Gbit/s at 150 °C [C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII, 2018.
 - [97] LEDENTSOV N, CHORCHOS L, MAKAROV O, et al. Quantum-dot oxide-confined 850-nm VCSELs with extreme temperature stability operating at 25 Gbit/s up to 180 °C[C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIV, International Society for Optics and Photonics, 2020.

Development and Future of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers Operated at High Temperatures (Invited)

ZHANG Jianwei, NING Yongqiang, ZHANG Xing, ZHOU Yinli, CHEN Chao, WU Hao,
QIN Li, WANG Lijun

*(State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

Abstract: The Vertical Cavity Surface Emitting Semiconductor Laser (VCSEL) has the unique advantages of circular symmetrical spot morphology, two-dimensional integration, narrow spectral width and small size et al. In particular, the wavelength of VCSEL laser is hardly changed with temperatures ($0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$), also the output window of VCSEL has no Catastrophic Optical Mirror Damage (COMD), and thus the VCSEL can behave excellent performance in the high temperature environment with strict working temperature requirements. This paper mainly introduces the structure and operation principle of VCSEL, and the temperature stability characteristics of laser cavity mode and gain is analyzed when the VCSEL works at high temperatures. The alkali metal atom used in the precise quantum measurement can be pumped by high-temperature operating VCSELs. And the development of VCSELs for this application is introduced and reviewed. By adjusting the position of gain spectrum and the cavity mode of oscillation cavity, the increase of power consumption of VCSEL at high temperatures can be effectively suppressed. Through the integrated surface mode filter, the stable selection of the internal mode of VCSEL can be realized. The internal mode and polarization of VCSEL laser can be controlled at the same time by using the surface grating structure. The above reports have realized good performance of VCSEL at high temperatures. In the future, using nanostructure or external cavity to compress the linewidth level of VCSEL laser will be an important research field.

The demand for high-temperature and high-speed VCSEL laser is also reviewed. And this VCSEL is mainly used in the datacenter, which is the basic for the 4G and 5G communications. As the huge energy consumption in datacenter becomes a serious problem. High-temperature operating VCSELs may relieve this problem. High-temperature and high-speed performance are the main research directions of VCSELs used in the datacenter. Based on the common VCSEL structure, the working temperature of high-speed

VCSEL can be increased to 150 °C by using conventional quantum well. The operating temperature of high-speed VCSEL can even be increased to 180 °C by using quantum dot active regions. VCSEL lasers with higher rate at high temperature need to make a breakthrough in the structure of quantum dot materials. In addition, using surface nanostructure instead of the existing DBR can effectively reduce the resistance of the traditional VCSEL, and further improve the modulation rate of VCSEL at high temperatures.

Key words: Vertical cavity surface emitting lasers; High-temperature operation; Mode control; Atomic sensors; Datacenter

OCIS Codes: 140.5960; 160.6000; 230.5590

Foundation item: State Key Development Program for Basic Research of China (No.2018YFB2002401), Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Nos. 62090060, 61727822), National Natural Science Foundation of China (Nos. 61874117, 11774343, 61804087), Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan, China (No.20200401006GX)