

Research Progress of VCSEL

Yang Wang, Bifeng Cui, Tianxiao Fang

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing
Email: wangyang0106@emails.bjut.edu.cn

Received: May 20th, 2017; accepted: Jun. 3th, 2017; published: Jun. 8th, 2017

Abstract

This paper gives an introduction to the progress of VCSEL mainly including the VCSEL commercial products and performance optimization of research area in recent years based on overall review of recent research reports for the VCSEL and the commercial VCSEL products of major companies.

Keywords

VCSEL, High Power, Application, Array

垂直腔面发射激光器(VCSEL)的研究进展

王 阳, 崔碧峰, 房天啸

北京工业大学信息学部, 省部共建光电子技术教育部重点实验室, 北京
Email: wangyang0106@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2017年5月20日; 录用日期: 2017年6月3日; 发布日期: 2017年6月8日

摘 要

通过对近几年研究单位报道的VCSEL的研究成果以及目前各大公司的商用VCSEL产品进行分析总结, 重点介绍了VCSEL的商用产品以及研究领域其性能优化情况, 综述了近几年VCSEL的研究进展。

关键词

VCSEL, 大功率, 应用, 阵列

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1977 年, 日本东京工业大学的伊贺健一(Kenichi Iga)提出 VCSEL 的概念开始, VCSEL 各个方面的研究到现在均获得了长足的进展。VCSEL 的光学谐振腔与半导体芯片的衬底垂直, 能够实现芯片表面的激光发射, 有阈值电流低、稳定单波长工作、易高频调制、易二维集成、无腔面阈值损伤、动态单模工作、圆形对称光斑和光纤耦合效率高等优点。典型的 VCSEL 为顶发射结构。结构示意图如下图 1 所示。

VCSEL 从诞生起就作为新一代光存储和光通信应用的核心器件, 为互联网的需求和光学存储密度的不断提高提供了一条新途径。随着 VCSEL 的研究深入以及应用需求的拓展, VCSEL 不仅在手机、消费性电子等领域发挥越来越重要的作用, VCSEL 还可以用来进行人脸识别、3D 感测、手势侦测和 VR(虚拟现实)/AR(增强现实)/MR(混合现实)等。当然, VCSEL 将来也可以大量应用在物联网、5G 通信、RF 元件、ADAS(先进驾驶系统)等, 所以 VCSEL 未来应用和市场热度应该会受到更多的重视。

尤其是近期苹果公司宣布 iPhone8 即将采用 VCSEL 半导体激光器技术, VCSEL 更是引起广泛关注。业界认为 VCSEL 产品进入苹果产业链不仅是产业公司业务的重大突破, 更是以 VCSEL 技术为代表的半导体激光技术在消费领域的重大突破, VCSEL 激光器将进入 iPhone 产业链, 光器件也将从工业领域走向消费领域[1]。

为了满足市场对各种 VCSEL 产品的需求, 对其性能进行优化得到各方研究人员的重视。世界上各大公司也是重点把握住 VCSEL 市场, 及时地制备出各种满足市场需求的产品, 抢占先机。本文将从商用和实验室研究两大方面对 VCSEL 进行概括描述。

2. 商用 VCSEL

在当下这个 VCSEL 产品被广泛需求的时代, 世界上各家致力于 VCSEL 研究与制造的公司均推出了各有千秋的 VCSEL 产品。本节重点对 Princeton optronics, Vixar, II-VI, Finisar, Philips Photonics、华芯半导体科技有限公司这几家公司的最新产品进行介绍。

Princeton Optronics [2]: 该公司成立于 1993 年, 一直致力于高效率, 低功耗 VCSEL 器件及模块尖端技术的研发, 是一家主要从事 VCSEL 以及基于 VCSEL 的光学组件和模块的私营公司。

在深度摄像机应用方面, 公司开发了 830 nm、850 nm 和 945 nm 三种波长的 VCSEL 器件。其中波长为 830 nm 的 VCSEL 阵列连续输出功率为 20mW, 具有光谱宽度为 2.5 nm 和成像分辨率高的优点。波

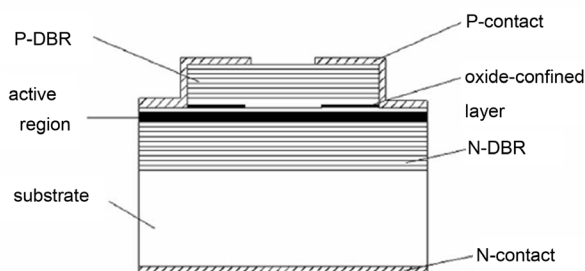


Figure 1. Schematic diagram of the top launch VCSEL

图 1. 顶发射 VCSEL 结构示意图

长为 850 nm 的 VCSEL 阵列连续输出功率为 1 W, 具有光谱宽度为 0.8 nm、波长输出稳定和可靠性高的优点。波长为 945 nm 的 VCSEL 阵列连续输出功率为 2 W, 具有光谱宽度小于 1 nm、波长输出稳定和可靠性高的优点。这三款器件在 3D 成像、照明、导航、安全和监控摄像机以及 VR 方面有着很好的应用。此外, 公司还开发了波长为 860 nm 和 940 nm 的 VCSEL 阵列, 输出功率分别为 2 W 和 6 W, 主要应用于 3D 成像。

在雷达应用领域, 公司开发了波长为 808 nm 的 1×8 VCSEL 阵列, 其准连续输出功率(在 200ns 脉冲宽度、1% 占空比的操作条件下)大于 300 mW, 具有光谱宽度小于 1 nm、波长输出稳定、可靠性高和能够在高达 80°C 的温度下工作的优点, 该产品主要应用在激光雷达、激光制导和无人驾驶汽车方面。

在红外照明应用领域, 公司开发了波长为 808 nm、850 nm、945 nm、975 nm 以及 1064 nm 的 VCSEL 器件。其中 808 nm 的 VCSEL 阵列最高准输出功率达 800 W, 光谱宽度为 3 nm。波长为 850 nm 的 VCSEL 阵列最高连续输出功率达 4 W, 具有光谱宽度小于 2 nm、可靠性高以及能在高温(80°C)下工作的优点。波长为 945 nm 的 VCSEL 阵列最高准连续输出功率达 8 W, 光谱宽度小于 1 nm。波长为 975 nm 的 VCSEL 阵列最高连续输出功率达 100 W, 具有光谱宽度小于 1 nm、可靠性高、低热阻($\sim 0.16^\circ\text{C}/\text{W}$)以及能在高温(80°C)下工作的优点。波长为 1064 nm 的 VCSEL 阵列最高连续输出功率达 40 W, 具有光谱宽度小于 2 nm、可靠性高以及能在高温(80°C)下工作的优点。这些器件均可应用于夜间和雾天的辅助驾驶、安全和监控摄像机, 有些还可应用于医疗以及固态激光泵等方面。

由于 VCSEL 在红外照明方面的应用广泛, 该公司还针对具体应用开发了多种照明器, 比如波长为 808 nm 和 976 nm 的二维 VCSEL 照明器件。针对短程监控应用, 开发了波长为 808 nm 和 976 nm 的紧凑型瓦级照明器模块, 全发散角约为 20° ($1/e^2$ 值全宽); 针对诸如爆炸或尘云的不利条件进行检测的军事应用, 开发了波长为 976 nm 的千瓦级照明器, 该照明器使用 9 个高功率 VCSEL 阵列制作, 其中每个阵列的连续输出功率都大于 1200 W; 针对大于 200 m 长距离范围的照明, 开发了波长为 808 nm 的 100 瓦级照明器。

在医疗应用领域, 开发了波长为 650 nm 的高功率(15 W)红色激光器件和阵列, 这些阵列具有功率转换效率大于 20%、光谱宽度约为 1 nm 和具有 18° 发散角(全角)的圆形光束的特点, 可以用于医疗和照明。除此之外还开发了两款波长为 688 nm 的 VCSEL 器件, 一款为连续输出功率为 1 mW 的单器件 VCSEL, 另一款为连续输出功率为 2 W 的 VCSEL 阵列。

在 2015 年该公司应用新技术开发了 780 nm, 795 nm 和 850 nm 三种波长的单频 VCSEL [3], 其输出功率大于 100 mW, 线宽小于 100 kHz, 这类 VCSEL 器件应用于原子钟。

Vixar [4]: 该公司成立于 2005 年, 在 VCSEL 技术研发与制造方面战绩颇丰, 为生物医学、工业、办公产品、汽车和消费品行业的传感器等应用制造波长在 650 nm 至 1000 nm 之间的 VCSEL。

在激光测量应用领域, 开发了波长为 670~690 nm 和 830~860 nm 的单模 VCSEL, 连续输出功率分别为 0.7 mW 和 1 mW, 线宽分别为小于 100 MHz 和约为 50 MHz。

在数据通信应用领域, 开发了两款 VCSEL, 一款是波长为 670~690 nm 的多模 VCSEL, 连续输出功率为 3.5 mW, 调制速度高达 10 Gb/s, 光谱宽度为 1 nm。另一款是波长为 765~780 nm 的 VCSEL, 连续输出功率为 3 mW, 调制速度高达 10 Gb/s, 光谱宽度为 1 nm。

在低光激光治疗应用领域, 开发了波长为 670~690 nm 的多模 VCSEL 以及高功率 VCSEL 阵列, 连续输出功率分别为 6 mW 和 300 mW, 光谱宽度为 1 nm。

在原子钟应用领域, 开发了波长为 790~800 nm 和 885~905 nm 的单模 VCSEL, 连续功率均为 0.1 mW, 线宽分别为小于 50 MHz 和约为 50 MHz。

在手势识别传感器、安全红外照明和 3D 扫描等应用领域,开发了波长为 830~860 nm 的多模 VCSEL 阵列,公布的 VCSEL 阵列输出功率有 10 mW, 750 mW, 2 W 和 10 W, 线宽约为 1 nm。

II-VI公司[5]: II-VI 激光企业有限公司是一家全球性的运营和创新公司,2016 年初收购了 Anadigics 公司,主要进行 VCSEL 的研发与生产,为业界提供领先的 VCSEL 激光解决方案。

在数据通信和光互连应用领域,开发了波长为 850 nm 的高速多模 VCSEL,光输出功率为 2.5 mW,数据传输速率高达 10Gb/s,满足了高速数据通信的严格要求。并且此类 VCSEL 器件能够在多横向模式或单纵向模式下工作,具有低发散角的圆形对称光束,使其能够很有效地耦合到 50/125 μm 和 62.5/125 μm 多模光纤中。除了单器件 VCSEL,还有两款波长为 850 nm 的高速多模 VCSEL 阵列,一款 VCSEL 阵列的光输出功率为 2.2 mW,数据传输速率为 14 Gb/s。另一款 VCSEL 阵列的光输出功率为 2.5 mW,数据传输速率为 20 Gb/s。

在感应应用领域,开发了波长为 850 nm 的低功率单模 VCSEL 器件,输出功率为 1 mW,具有稳定的偏振和对称的圆形高斯光束等特点。除此之外,还有两款波长为 850 nm 的高功率 VCSEL。一款是单器件 VCSEL,输出功率达到 10 mW,具有功耗低、可靠性高和圆形光束的特点。另一款是可扩展的二维 VCSEL 阵列,在 50 $^{\circ}\text{C}$ 温度下输出功率最高达到 900 mW,具有功率转换效率达到 35% 和可靠性高的优点,主要应用于手势识别。

还有波长为 795 nm 的单模 VCSEL 器件,最大输出功率为 1 mW,线宽小于 30 MHz,可应用于原子钟光学泵浦。

Finisar [6]: 该公司成立于 1987 年,近三十年来,他们提供突破性的光学技术和领先的产品,为电讯设备及服务商、光学显示、安全系统、医疗器械、环保设备、航空及防御体系提供光学组件、模块及子系统。

在数据通信领域,开发了波长为 850 nm 的 VCSEL,传输距离为 550 m,数据传输速率达 10 Gb/s,有小于 0.6 W 的低功率损耗,能够应用在高速以太网、光纤通道以及高速数据连接等方面。

在感应应用领域,开发了波长为 850 nm 的 VCSEL,在低电流(7~15 mA)驱动下能够提供高的输出功率(1.5 mW),频率大于 1 GHz。

在手势识别和 3D 相机应用领域,开发了波长为 860 nm 的二维 VCSEL 阵列,在室温下能够达到大于 500 mW 的连续输出功率,在窄脉冲(小于 10 ns)和低占空比注入(小于 1%)条件下,可以达到 10 W 的峰值功率。此阵列在脉冲工作条件下能够发射高斯形光束,并且上升和下降时间小于 1 ns。

Philips Photonics [7]: 该公司成立于 1891 年,是应用于数据通信、消费和工业的 VCSEL 技术、设计和制造的全球领先制造商。公司拥有非常全面的产品组合,从用于数据通信的高速 VCSEL 到用于安全、监控和夜视应用的红外照明模块,从用于感测应用的单模 VCSEL 到用于精确测量速度和距离的智能激光多普勒传感器。还有为工业加热和光泵浦应用提供红外辐射模块。

在数据通信应用领域,开发了高速 VCSEL,其中波长为 850 nm 的 VCSEL 器件有两款产品,一款输出功率为 1.5 mW,速度可高达 14 Gb/s,调制带宽为 3 DB。另一款输出功率为 2 mW,速度可达到 5 Gb/s,调制带宽为 3 DB。除此之外,公司还提供了很多数据通信 VCSEL 阵列,根据具体要求 VCSEL 可以具有单模或多模操作,最高达到 24 mW 的光输出功率。

在工业热处理的很多应用领域,公司提供了很好的解决方案,将数十瓦到数十千瓦的红外输出功率聚集到特定的目标区域,能量强度在传统的端面发射激光器和 LED 之间。该系统是基于高功率 VCSEL 阵列的模块组合,模块简单并且坚固,能够很容易地以紧凑方式集成到产品上,公司能够根据客户的特定需求给出量身定制的解决方案。比如应用红外功率系统制作了准连续输出功率为 500 W 的倒装发光泵

浦模块和连续输出功率为 100 W 的正装发光泵浦模块。

在红外照明应用领域,开发的 VCSEL 器件能够达到 6 W 的光功率输出,具有光谱宽度为 2 nm、可靠性高以及功率转换效率高等特点,主要波长有 808 nm、850 nm、940 nm 和 980 nm。该技术可以应用于监控、车牌识别和 3D 相机等。

在感应应用领域,开发了基于飞利浦激光多普勒技术的双眼激光传感器产品系列。这些双眼激光传感器可以被应用于消费者和专业产品的输入设备,例如 PC 外围设备,游戏应用和轨迹球设备。该公司开发的双眼激光传感器是第一个也是唯一完全集成、高精度、超快速和低功耗的 3D 动态感应导航传感器,并且符合 1 级人眼安全要求。

国内方面江苏华芯半导体科技有限公司[8]于 2017 年 3 月 2 日宣布,其自主开发的 30 G VCSEL 芯片已通过客户测试,并实现规模量产。该 VCSEL 芯片完全采用自主创新的专利技术,特别是独有的纳米层精确控制与补偿外延技术和芯片 BCB 平整制程,使得该芯片具备高频、高温、高湿以及复杂电磁环境工作的能力,可大大降低数据中心的耗电量。此款 850 nm 中心波长的 VCSEL 芯片的主要参数为:功率大于 3.5 mW@6 mA, RMS 谱宽小于 0.4 nm, 阈值电流 0.8~1.2 mA, 斜率效率 0.5~0.7 W/A。

对于商用 VCSEL 产品可以将其大体划分为三个阶段,第一阶段为在 VCSEL 发现之初,由于它的独特优势比如圆形对称光斑、阈值电流低、无腔面阈值损伤等,迅速引起了人们的广泛关注与研究热潮,也成功地在很多领域取代了边发射激光器以及 LED 的地位;第二阶段为发现了 VCSEL 易于二维集成的特性,由此使得 VCSEL 器件的输出功率得到了前所未有的提高,解决了例如远距离照明、医疗应用等很多领域的难题;第三个阶段为发现了 VCSEL 单器件的可调制性,使其迅速应用在了传感器等领域。希望在未来可以发现更多 VCSEL 到目前为止还未开发的新性能,使其更好地服务于我们的生活。

3. 研究领域 VCSEL

自 VCSEL 概念被提出以来,其各方面的研究受到了各个研究单位的垂青,尤其是如何优化其结构性能是一大研究热点,以下从不同优化 VCSEL 器件结构性能的方式来介绍近几年来 VCSEL 的研究现状。

VCSEL 器件中电流分布的优化。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对 VCSEL 研究成果匪浅, Jianwei Zhang 等人[9]在 2014 年报告了波长约为 980 nm 的高峰值功率 VCSEL 阵列,在报告中通过优化电流分布来提高大孔径 VCSEL 的外部量子效率,并且开发了具有 62 W 峰值功率的单器件 VCSEL 作为阵列的基本单元。阵列采用 4 个高功率 VCSEL 单管串联连接,尺寸为 2.2 mm × 2.2 mm,在 30 ns 和 5 kHz 脉冲条件下,当电流为 110 A 时,输出功率大于 210 W。

高世杰等人[10]在 2016 年通过优化波长为 980 nm 的 VCSEL 单元器件结构,有效抑制了宽面 VCSEL 结构中的非均匀电流分布,提高了单元器件的斜率效率,获得了直径为 400 μm,峰值输出功率为 62 W 的 VCSEL 单元器件。在此基础上,研制出由单元器件组合封装而成的 VCSEL “准阵列”子模块以及集成驱动电路的微型化 VCSEL 脉冲激光光源,该光源在脉冲驱动条件为 30 ns, 2 kHz, 105 A 条件下的峰值输出功率达到 226 W,光脉冲宽度 35 ns,中心波长 979.4 nm,斜率效率达到 2.15 W/A。

VCSEL 器件中 DBR 的优化。张金胜等人[11]在 2014 年为了实现波长为 808 nm VCSEL 的高功率输出,对 VCSEL 的 DBR 结构材料进行了优化设计,分析了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中 Al 组分对于折射率与吸收的影响,并最终确定了 DBR 的高、低折射率材料为 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, P 面 DBR 对数为 23 对, N 面 DBR 对数为 39.5 对。采用非闭环结构制备 2 × 2 VCSEL 阵列。通过波形分析法对 VCSEL 阵列的功率进行了测量:在脉冲宽度为 20 ns、重复频率为 100 Hz、注入电流为 110 A 的条件下,最大峰值功率为 30 W,在脉冲宽度为 60 ns、重复频率为 100 Hz、注入电流为 30 A 的条件下,最大功率为 9 W。

Holger Moench 等人[12]在 2014 年也对 DBR 进行了优化设计,使 808 nm 高功率 VCSEL 阵列的输出

功率和输出效率均得到了提高,研究表明 VCSEL 性能的优化,可以通过平衡 DBR 反射镜各层中的电光损耗来实现,因为反射镜必须满足矛盾的要求:一方面,它们应当具有良好的电导来达到低电阻,这就要求提高掺杂来。另一方面,由于反射镜位于激光器的光路中,所以它们应当具有最小的光吸收损耗,这就要求在反射镜中低掺杂。他们在电和光损耗的平衡之后选择 DBR 对数的最佳数量,N 面 DBR 对数为 41 对,P 面 DBR 对数为 20 对,测试结果表明优化后的 808 nm 正装发射 VCSEL 最大输出功率增加了 1.7 倍,最大电光效率已经从 30% 提高到 46%。

VCSEL 器件中量子阱增益及腔模位置等材料结构参数的优化。张星等人[13]在 2016 年报道了自行研制的波长为 894 nm 的 VCSEL 以及基于此类器件的芯片级铯原子钟系统的应用实验结果,他们根据芯片级铯原子钟对 VCSEL 在特定高温环境下产生 894.6 nm 线偏振激光的要求,对器件的量子阱增益及腔模位置等材料结构参数进行了优化,确定增益-腔模失谐量为-15 nm,使器件的基本性能在高温环境下保持稳定,研制的 VCSEL 器件指标为:20~90℃温度范围内阈值电流保持在 0.20~0.23 mA,0.5 mA 工作电流下输出功率大于 0.1 mW;85.6℃温度环境下激光波长 894.6 nm,偏振选择比 59.8:1;采用所研制的 VCSEL 与铯原子作用,获得了芯片级铯原子钟实施激光频率稳频的吸收谱线和实施微波频率稳频的相干布居囚禁谱线。

VCSEL 器件的新型结构。Mohammad Yazdanypoor 等人[14]在 2014 年提出了一种具有多氧化物层结构的新型 VCSEL,这种新型结构的 VCSEL 设计了 4 个氧化层并且氧化层的孔径大小和厚度均不相同,具有 12 mW 单模光输出功率和 0.7 mA 阈值电流,表明了该种结构可以实现更高的单模光输出功率。

X. Yang 等人[15] [16]在 2015 年报道了小尺寸单模无氧化层的 VCSEL,该结构实现高性能的关键是控制光刻和消除氧化层能够减小热阻、电阻以及内部应力,尤其是比常规 VCSEL 更加容易控制发光孔径的大小,其在单模输出时具有高的功率转换效率,测试结果表明,当发光孔径为 2 μm 时,能产生 8 mW 的单模功率,功率转换效率达到 46%,斜率效率大于 73%,阈值电流低至 300 μA 。当发光孔径为 1 μm 时,能产生大于 5 mW 的单模功率,功率转换效率达到 37%,斜率效率大于 79%,同时这种器件还具有低结温的优势。此类 VCSEL 器件可用于高速光互连和高功率阵列以及需要单模操作的传感器等一系列应用。

长春理工大学的冯源等人[17]在 2014 年设计并制备了一种波长为 980 nm 新型内腔接触式结构 VCSEL,这种新型结构的设计是从降低等效电阻方面进行考虑,把 P 面电极设计成内腔接触式结构,在出光孔径为 16 μm 时,同时制备传统结构和新型结构两种器件并对其进行测试,传统结构 VCSEL 的阈值电流为 11.5 mA,当注入电流为 34 mA 时,最大输出功率达到 7.3 mW;新结构器件的阈值电流为 9 mA,当注入电流为 35 mA 时,最大输出功率达到 10.2 mW;新结构的阈值电流降低了 21.7%,最大输出功率提高了 28%。结果表明,采用这种新型内腔接触式结构能够降低体电阻,提高输出功率,进而可改善 VCSEL 的光电性能。

VCSEL 器件其它方式的性能优化。Kai-Lun Chi 等人[18]在 2014 年对波长为 850 nm 的单模 VCSEL 阵列进行了研究,他们通过使用具有适当阵列间距的 Zn 扩散孔,已经同时实现了具有高连续功率 140 mW 和窄发散角 5°的圆形对称图案。

Yuta Aoki 等人[19]在 2014 年报道了质子注入型倒装高功率 VCSEL 阵列,该阵列集成了 635 个 VCSEL 单管,每个单管 VCSEL 在持续工作下的输出功率达到了 380 mW,这些 VCSEL 单管由质子注入限定并在 5 mm \times 5 mm 正方形中以 175 μm 间距的紧密排列,在准连续波的工作模式下该阵列实现了超过 200 W 的输出功率,这个结果说明质子注入在大功率 VCSEL 阵列制备上有很高的应用前景。

蔡丽娥等人[20]在 2016 年利用金属有机物气相沉积技术(MOCVD)在(0001)蓝宝石衬底上生长了 GaN

基 VCSEL 的多量子阱腔层结构, X 射线衍射测量显示该多量子阱具有良好周期结构和平整界面, 运用键合及激光剥离技术将该外延片制作成 VCSEL, 顶部和底部反射镜为极高反射率的介质膜 DBR。在室温、紫外脉冲激光的泵浦条件下, 观察到了 VCSEL 明显的激射现象, 峰值波长位于 447.7 nm, 半高宽为 0.11 nm, 自发辐射因子约为 6.0×10^{-2} , 阈值能量密度约为 8.8 mJ/cm^2 。

Hai-Han Lu 等人[21]在 2016 年提出了一种基于 56 Gb/s LiFi (Light Fidelity 可见光无线通信)传输技术, 该技术使用 VCSEL 发射源, 能够在 20 米的自由空间链路上实现低误码率的、清晰的 3 维视图, 这种创新性的技术在未来无线基础设施中将会发挥更大更重要的作用, 进而有效的提高传输速率以及自由空间的传输距离。

张岩等人[22]在 2017 年发表的文章中表明, 他们设计并制备了波长为 795 nm 的单模 VCSEL, 根据对 VCSEL 的光场和模式的分析和计算结果, 采用 MOCVD 技术生长了外延结构, 制备了不同有源区直径的氧化限制型 VCSEL 芯片并进行了测试。当有源区直径从 6 μm 减小到 3 μm 时, VCSEL 芯片的边模抑制比(SMSR)由 8.76 dB 增加到 34.05 dB, 阈值电流由 0.77 mA 减小到 0.35 mA。有源区直径为 6、5、4 和 3 μm 的 VCSEL 芯片的输出功率分别为 0.37、0.46、0.58 和 0.44 mW, 有源区直径为 4 μm 的 VCSEL 芯片的远场为圆形光束, 发散角为 15° , 85°C 时 3.5 μm 有源区直径的 VCSEL 芯片输出功率为 0.125 mW, 激射波长为 795.3 nm, 室温 3 dB 带宽大于 8 GHz, 满足了铷原子传感器对 VCSEL 单模光谱、输出功率及调制速率的要求。

4. 结论

随着市场对 VCSEL 的需要日益多样化, 国内外各大公司以及研究机构均是顺应潮流对其进行深入研究, 优化 VCSEL 性能以及提高输出功率。相信在不久的未来, VCSEL 将会有更好的发展, 为我们的生活提供更多的便利。

参考文献 (References)

- [1] <http://www.c-fol.net/m/>
- [2] <http://www.princetonoptronics.com/applications/>
- [3] Watkins, L., *et al.* (2015) High-Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers for Atomic Clock Applications. SPIE.
- [4] <http://vixarinc.com/products/standardproducts.html>
- [5] <http://www.laserenterprise.com/VCSELs/vcSEL.html>
- [6] <https://www.finisar.com/products/search-part-number-or-name?text=VCSEL>
- [7] <http://www.photonics.philips.com/application-areas>
- [8] <http://www.c-fol.net/m/news/view.php?id=20170302152339&from=singlemessage&isappinstalled=0>
- [9] Zhang, J., *et al.* (2014) High-Peak-Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Quasi-Array Realized Using Optimized Large-Aperture Single Emitters. *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, Article ID: 070303.
- [10] 高世杰, 等. 980nm 高功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 579-583.
- [11] 张金胜, 等. 高功率 808nm 垂直腔面发射激光器阵列[J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1099-1103.
- [12] Moench, H., *et al.* (2014) Optimized VCSELs for High Power Arrays. *Proceedings of SPIE*, **9001**, 90010F-1-90010F-8.
- [13] 张星, 等. 894nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铷原子钟系统的应用 [J]. 物理学报, 2016, 65(13): 134204-1-134204-7.
- [14] Yazdanyoor, M. and Emami, F. (2014) High Power Single Mode Multi-Oxide Layer VCSEL with Optimized Thicknesses and Aperture Sizes of Oxide Layers. *Journal of the Optical Society of Korea*, **18**, 167-173. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2014.18.2.167>
- [15] Yang, X., *et al.* (2015) Small-Sized Lithographic Single-Mode VCSELs with High Power Conversion Efficiency. *Proceedings of SPIE*, **9381**, 93810R-1-93810R-6.

- [16] Yang, X., *et al.* (2014) Oxide-Free Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Low Junction Temperature and High Drive Level. *Electronics Letters*, **50**, 1474-1475. <https://doi.org/10.1049/el.2014.2626>
- [17] 冯源, 等. 新型垂直腔面发射激光器的研制[J]. 半导体器件, 2014, 39(11): 831-835.
- [18] Chi, K.-L., *et al.* (2014) Single-Mode 850 nm VCSELs Array with High-Power, Single-Lobe Pattern, and Narrow Divergence Angle. CLEO,.
- [19] Aoki, Y., *et al.* (2014) 200-W Operation of an Ion-Implanted Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **50**, 510-514. <https://doi.org/10.1109/JQE.2014.2323055>
- [20] 蔡丽娥, 等. GaN 基蓝光 VCSEL 的制备及光学特性[J]. 发光学报, 2016, 37(4): 452-456.
- [21] Lu, H.-H., *et al.* (2017) A 56 Gb/s PAM4 VCSEL-Based LiFi Transmission with Two-Stage Injection-Locked Technique. *IEEE Photonics Journal*, **9**, Article No. 7900208.
- [22] 张岩, 等. 795nm 单模垂直腔面发射激光器[J]. 半导体器件, 2017, 42(1): 17-22.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org