

大功率垂直腔面发射激光器技术研究

宁永强

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 大功率垂直腔面发射激光与目前比较成熟的边发射激光相比在光束质量、二维面阵集成、高温工作等方面有很强的优势。2008 年以来国内外研究进展迅速,在激光输出功率、效率、波长的多样性以及应用探索等方面都有长足进步。从垂直腔面发射激光结构特征出发,对其优点特性、国外进展情况,在激光引信等需要窄脉冲工作场合的应用研究情况进行了介绍。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在国内最早开展大功率垂直腔面发射激光研究,单管连续输出功率达到 2.5 W,列阵脉冲输出功率超过百瓦。研究中为实现大功率脉冲工作和较好的光束质量,对材料结构设计、微透镜集成和一维线列阵远场叠加等方面开展了研究,对相关结果进行了介绍。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 激光引信; 高光束质量; 窄脉冲

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)06-1017-08

Development and application of high power VCSEL

Ning Yongqiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: There are many advantages in the aspects of beam quality, two-dimensional integration, high temperature operation for VCSEL in contrast to the edge emitting diode laser. Great achievements have been realized in the area of high power emission, efficiency, wavelength, and applications since 2008. In this paper, the advantages of VCSEL and the main advances including VCSEL laser fuse were summarized. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences reported the first VCSEL with an output power in the W regime. Periodic gain structure with InGaAs/GaAsP quantum wells was proposed to obtain high single-pass gain and high power emission. Small p-contact with a contrast of large lateral oxidation aperture was fabricated to improve the current distribution across the active region and the mode characteristics. Single VCSEL with an output power of 2.5 W in CW operation and array in the hundred W in pulsed operation were realized in the last few years. Material structure modification, micro-lens integration and non-uniform linear array were proposed to obtain high power and high beam quality operation.

Key words: VCSEL; laser fuse; high beam quality; short pulse

收稿日期:2010-10-08; 修订日期:2010-11-13

基金项目:国家自然科学基金(60706007, 10974012, 60876036, 11074247, 61006054)

作者简介:宁永强(1965-),男,研究员,博士,主要研究方向为大功率垂直腔面发射激光器。Email:ningyq@ciomp.ac.cn

0 引言

垂直腔面发射激光器(VCSELs)具有低阈值、动态单模工作、圆形对称光斑、与光纤耦合效率高等优点。自 1980 年日本东京工业大学的 K.Iga 教授提出了 VCSELs 的设想,便得到了广泛重视。与传统的边发射激光器的结构不同,VCSELs 是一种光学谐振腔垂直于半导体外延片,发出的激光束与衬底表面垂直的半导体激光器,是半导体激光器发展历程中的一个历史性的重大进程。要制作这种结构的激光器,需要解决 3 个重要问题:(1) 具有极小的谐振腔体积;(2) 高的光增益;(3) 反射镜具有极高的反射率(>95%)。

虽然当时使用的体材料还无法获得很高的光增益,制作如此高的反射镜也十分困难,但 K.Iga 等人于 1979 年报道了第一个采用 InGaAsP/InP 材料的 VCSELs^[1]。1989 年,K.Iga 等实现 860nm AlGaAs/GaAs VCSELs 的室温连续激励^[2]。

VCSELs 与传统的边发射激光器的结构不同,使其具有很多独特的优点。

(1) 波长稳定性: VCSELs 腔长短,纵模间距大,器件只能在一个单纵模下工作,可以得到较大的弛豫振荡频率,因此,调制带宽较宽。

(2) 器件的波长均匀性和光谱线宽: VCSELs 的光谱半高全宽(FWHM)通常小于 1 nm。相比之下,边发射激光器 FWHM 通常为 3~5 nm。

(3) 波长对温度的敏感性: VCSELs 激励波长随温度的漂移率只有 0.07 nm/K,只有边发射激光器的 1/5。

(4) 光束质量: VCSELs 发射出圆形光斑,与边发射激光的椭圆光束相比,大大降低了耦合/光束整形系统复杂性,增加了与光纤的耦合效率或泵浦效率。

得益于外延及半导体工艺技术的发展,原来主要用于数据通讯光互连等小功率应用领域的 VCSELs 器件的性能有了巨大的发展,输出功率有了很大的提高,使 VCSELs 成为了新的可以提供高功率输出的半导体激光器光源之一。随着激光泵浦、军事、医疗、材料制备等方面对高功率半导体激光器的需求日益增长,探索大功率垂直腔面发射激光器及二维列阵已成为激光领域非常重要的研究方向之一。

1 大功率垂直腔面发射激光研究发展

大功率垂直腔面发射研究是从德国 Ulm 大学 1999 年的报道开始的,波长为 980 nm 顶面出光和底面出光的 VCSELs 单管,室温下连续输出功率分别达到 180 mW 和 350 mW^[3]。随之在 2001 年又报道了直径 320 μm 的单管器件室温下连续工作最大输出功率达到 0.89 W,19 个单元组成的二维面阵连续工作最大输出功率为 1.55 W,功率密度达到了 1.25 kW/cm²^[3-4]。美国加州大学采用 1 000 个直径 45 μm 的列阵实现脉冲 5 W 的输出^[5]。美国 Novalux 公司 2003 年利用连续 1 W 输出的 980 nm 垂直腔面发射激光器通过腔内倍频获得了 42 mW 的蓝光高功率输出^[6]。2004 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所首次报道了室温连续输出功率超过 1 W 的大功率 VCSEL 的研究结果^[7-8]。2005 年美国 Princeton Optronics 公司报道了直径 350 μm 器件连续输出达到 3 W^[9]。

除电泵浦垂直腔面发射激光器外,美国 Sandia 国家实验室 2002 年报道采用光泵浦方式,研制出垂直腔面发射器件,实现 980 nm 波长输出,脉冲功率达到 4.4 W^[10]。该结构由于可以通过在扩展腔内插入非线性晶体实现高效腔内倍频而在高光束质量、大功率蓝绿激光有非常重要的应用价值。

2008 年以来,大功率垂直腔面发射激光器研究水平发展非常迅速。美国 Princeton Optronics 公司通过高密度集成和模块化集成,连续输出达到 230 W 和脉冲输出达到数千瓦的列阵器件,电光转化效率达到 48%,接近边发射激光器水平,工作温度范围 0~80 $^{\circ}\text{C}$,远比边发射激光器的 20~35 $^{\circ}\text{C}$ 宽,应用在激光测距和固体激光泵浦领域^[11],如图 1 所示。

美国 Novalux 公司和韩国三星公司在电泵浦扩展外腔面发射激光器方面取得了非常好的成绩,其器件结构分别如图 2 和图 3 所示。Novalux 公司用于激光显示的红、绿、蓝三基色激光器,器件输出功率分别达到 1.2 W、7 W 和 4 W。

而三星公司采用上述结构,得到 1070 nm 激光,经过 BBO 倍频产生 535 nm、输出功率超过 7 W 的线偏振绿光输出,光光转换效率达到 27%。此外,还得到了 4.9 W、920 nm 激光,经过 LBO 倍频产生 460 nm、输出功率超过 2 W 的蓝光输出,光光转换效率达到 10%。

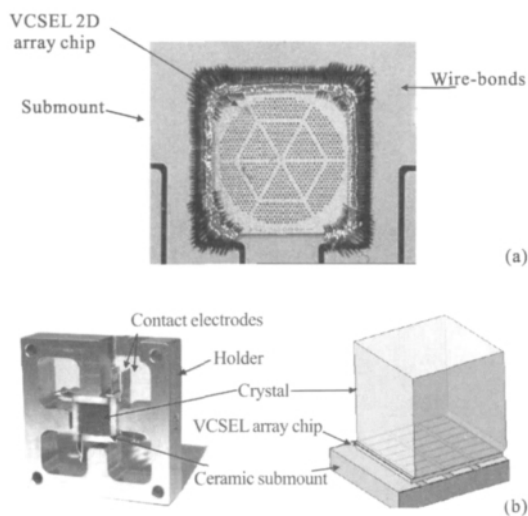


图1 芯片尺寸5 mm×5 mm集成数百个单元的高密度垂直腔面发射激光器阵列(a)和泵浦固体激光模块(b)

Fig.1 High densely integrated 2-D VCSEL array (a) and VCSEL-based active A-switch module (b)

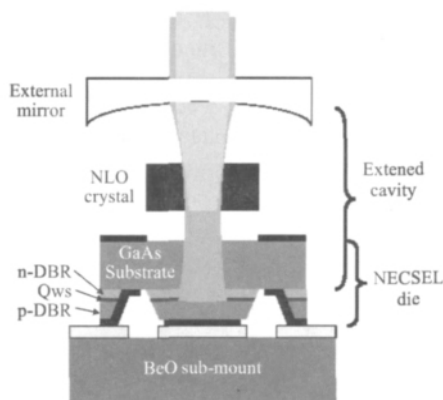


图2 美国 Novalux 公司电泵浦扩展腔面发射激光结构
Fig.2 Electrically pumped extended cavity surface emitting laser presented by Novalux

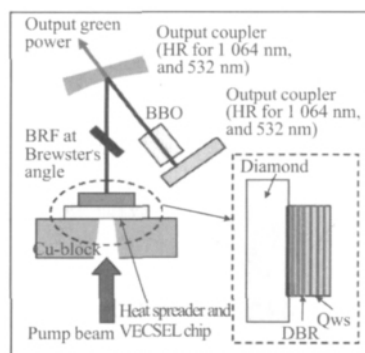


图3 韩国三星公司光泵浦面发射激光结构
Fig.3 Optically pumped surface emitting laser presented by Samsung

2 应用研究

大功率 VCSELs 主要可以应用在如下 4 个方面。

(1) 激光显示方面:激光显示技术被称为是第四代显示技术,具有色域广、寿命长、环保、节能等优点,是显示领域的重大发展方向。使用 VCSELs 倍频后产生红绿蓝三基色激光可以做为激光显示的光源,从手持式投影设备到高清晰影院系统需要激光器的输出功率从几百毫瓦至几十瓦不等,市场前景十分广阔。

(2) 光纤放大器和光纤激光器方面:VCSELs 极优越的光束质量使其成为光纤放大器和光纤激光器的理想泵源。光纤激光器是 21 世纪激光器的代表,在工业、医疗、通讯、军事等领域具有非常重要的应用。

(3) 激光检测、探测:在激光测距、激光引信、激光雷达及测量控制等军民品方面具有广泛的应用前景,如激光测距雷达用于汽车、飞行器等的防撞,机器人距离感应控制,大型机床对准,精密机械零件检测等。

(4) 信息技术方面:以 VCSELs 激光测距为基础,加上二维光学扫描机构后,可以对大视场范围进行扫描测距,实现对目标的三维测量。

作为应用于激光测距、激光引信等方面的窄脉冲大功率激光输出光源的有利竞争者,VCSEL 表现出了自身独到的优势。国外激光近炸引信的研制工作始于 20 世纪 60 年代末到 70 年代初,目前,多数采用 GaAs 边发射半导体激光器作为激光引信光源,激光器峰值功率在数十瓦左右,作用距离比较近,适用于在战术武器上使用。已有报道美国正在加紧进行适用于弹道导弹的激光引信研制工作,对激光器的要求是,脉宽在 10 ns 左右,脉冲重复频率大于 1 kHz,峰值功率大于 100 W。国内某型号的空空导弹激光近炸引信的激光发射系统的典型参数为:激光波长 860 ± 10 nm,水平发散角 $\leq 1^\circ$,垂直发散角 $\leq 7^\circ$,脉冲宽度 100 ns,脉冲频率 3~4 kHz,峰值光功率 ≥ 25 W。

作为激光引信的核心部件,目前采用的半导体激光器均是边发射结构,如图 4 所示,是通过在激光器的两个平行腔面间形成激光反馈,并从一个腔面出射。为形成激光谐振腔,必须在一个腔面上蒸镀高反射光学膜,在另一个腔面上蒸镀减反射光学膜。但

随着激光功率的提高,边发射半导体表现出一个著名的灾变性光学腔面损伤现象(COMD),如图5所示。COMD是影响半导体激光器可靠性及输出功率的重要因素,灾变损伤机理主要有以下几个方面,如图6所示^[12]。

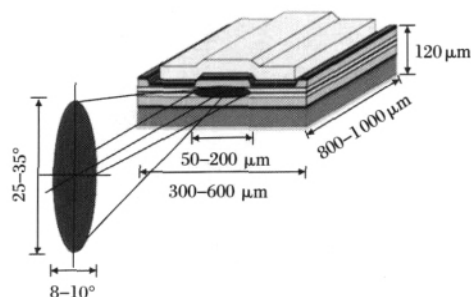


图4 边发射半导体激光器结构和发射激光光斑形状

Fig.4 Structure and beam profile of edge emitting semiconductor laser

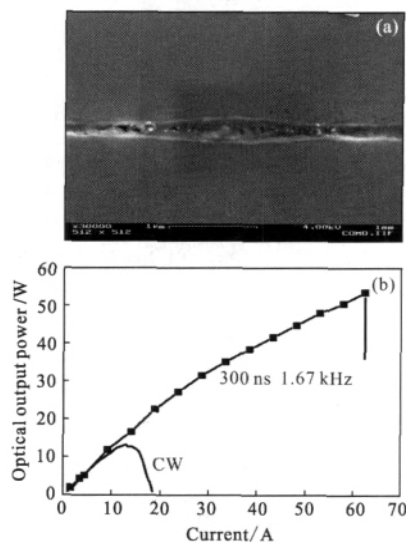


图5 边发射半导体激光器腔面的灾变性损伤(a)和输出功率的突然下降(b)

Fig.5 COMD (a) and the abrupt decrease of output power (b) of edge emitting semiconductor laser

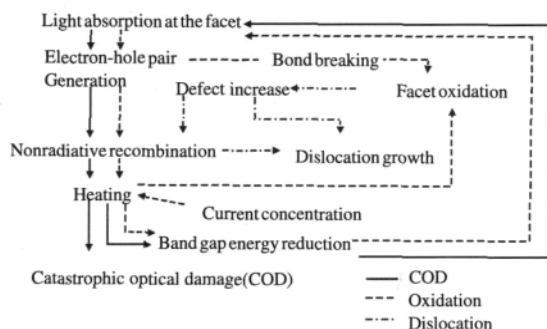


图6 边发射半导体激光器腔面灾变性损伤产生的原因

Fig.6 COMD mechanism of edge emitting semiconductor laser

(1) 激光器内部存在点缺陷和暗线缺陷,缺陷的形成和迁移导致体内和表面非辐射复合中心的形成和增加,引起激光器的失效;

(2) 由于激光器端面处的带隙收缩,增加光吸收;

(3) 半导体激光器芯片在解理时会在端面留下许多表面态,这些表面态很容易与氧、水蒸汽发生反应,使端面氧化,形成非辐射复合中心,从而吸收激光,端面的温度升高,端面温度的增加会使腔面附近的禁带宽度变窄,致使激光更容易被吸收,导致光学灾变损伤发生。

(4) 在激光器的端面附近的电流注入增加了端面处的非辐射复合的发生,从而使端面的温度升高。

为解决 COMD 问题,过去二十多年研究人员采用多种方法来提高大功率半导体激光器的可靠性,包括量子阱无序技术、非吸收窗技术、真空解理镀膜、端面附近引入非注入区技术、钝化处理技术等。通过采用以上技术,边发射半导体激光器腔面灾变损伤阈值得到极大的提高,例如英国 Intense 公司 940 nm 条宽 100 μm 的半导体激光器,连续输出功率 24.4 W,功率密度达到 30.1 MW/cm²。美国 Coherent 公司采用的腔面镀膜技术腔面功率密度可达 29.4 MW/cm²。Bookham 公司 980 nm 单模激光器,发光区尺寸 3 μm×0.6 μm,输出功率达到 1.8 W,功率密度 100 MW/cm²。德国 Ferdinand-Braun-Institut 实验室 1 100 nm 波长条宽 60 μm 的半导体激光器,脉冲输出功率 88 W,功率密度达到 116 MW/cm²,808 nm 波长条宽 100 μm 的半导体激光器,脉冲输出功率 55 W,功率密度达到 81 MW/cm²。

上述这些半导体激光器输出功率和腔面承受的激光功率密度基本已达到极限,很难再有更高的突破,COMD 问题不能回避。而垂直腔面发射激光由于两个腔面反射镜时生长在材料内部,不存在 COMD 现象,所以 VCSEL 激光器能够承受更高的几个功率密度,并表现出优越的工作可靠性,如图 7 所示。

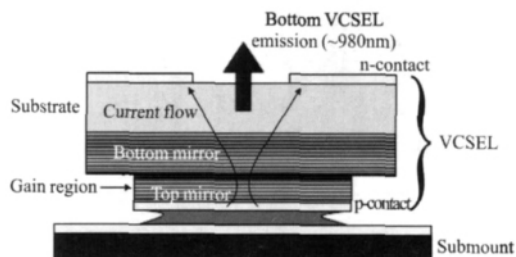


图7 垂直腔发射半导体激光器结构

Fig.7 Structure of VCSEL

针对VCSEL在激光引信方面的应用,美国陆军武器研究发展与工程中心、美国陆军研究实验室于2005年开始相关研究^[13],已报道的引信结构和激光器结果,如图8所示。

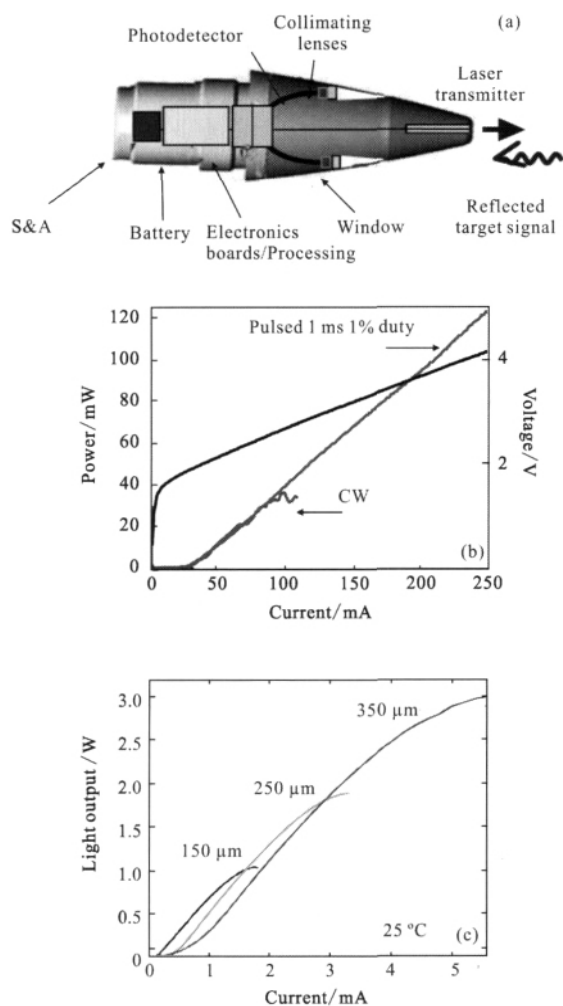


图8 采用垂直腔面发射半导体激光器为光源的激光引信及使用的激光器的输出功率特性

Fig.8 VCSEL-based laser fuse and the power characteristics of VCSEL devices

2008年,美国桑迪亚国家实验室报道了采用VCSEL阵列设计研制的弹药引信,如图9所示。其中,VCSEL激光器是波长850 nm的底发射的1×4阵列,每个单元直径60 μm,单元激光功率60 mW^[14]。

2010年,美国桑迪亚国家实验室支持Aerius光电公司研制低成本、窄脉宽、高峰值功率的VCSEL,用于下一代智能弹药的激光成像探测系统的小型化激光测距模块,如图10所示^[15]。

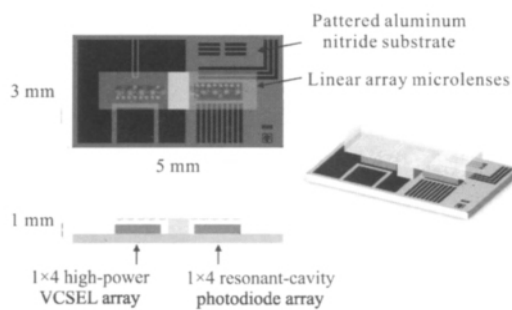


图9 集成VCSEL阵列和探测器阵列的激光引信

Fig.9 Laser fuse with the integration of VCSEL array and photodiode array

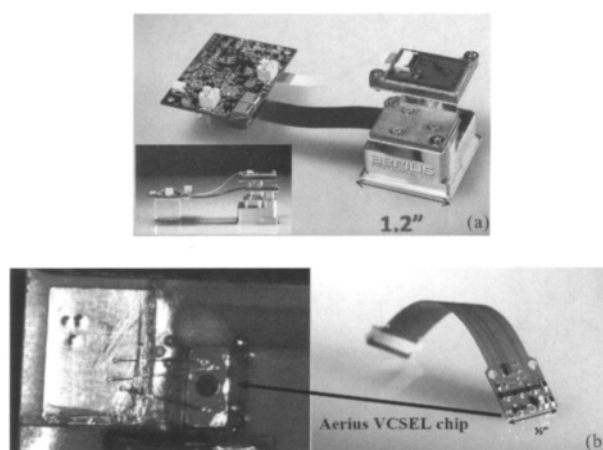


图10 垂直腔面发射半导体激光器测距模块(质量22 g)和圆形出光窗口的VCSEL器件(质量1 g)

Fig.10 VCSEL-based laser range finder module(weight 22 g) and VCSEL device with round emitting window (weight 1 g)

3 窄脉冲大功率和高光束质量VCSEL研究^[16-21]

3.1 窄脉冲大功率激光输出的材料结构设计

大功率垂直腔面发射激光器是在以往追求高效率和极低阈值的光通信垂直腔面发射激光器基础上发展起来的,但以大功率激光输出为应用目标对材料结构、器件结构进行优化设计的论文很少。

针对窄脉冲大功率激光输出应用,考虑了两个方面的结构调整:(1)采用周期增益多量子阱结构,增大激光腔内单程增益。(2)调整垂直腔面发射激光中两个DBR的反射率入手,在阈值电流、效率和激光输出功率之间取得一个平衡。

对第一个途径,周期增益量子阱结构中设计了3组增益区,每个区中均有3个InGaAs/GaAsP量子阱,如图11所示。3个增益区的位置均位于激光腔内

光场振幅极大处,这样才能保证腔内泵浦光与量子阱有最好的耦合,提高增益。

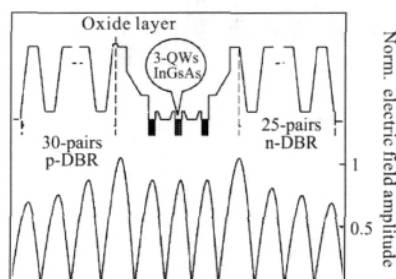


图 11 量子阱增益结构与腔光场的匹配

Fig.11 Quantum well gain section and matching with the standing wave of cavity

图 12 是采用上述材料结构研制的输出光窗口直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的器件的连续输出功率、效率和光谱。

对第二个途径,研究了不同的 n-DBR 反射率对激光输出功率的影响,如图 13 所示。

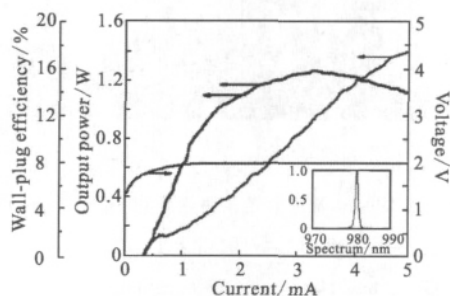


图 12 直径为 $400\ \mu\text{m}$ 器件的连续输出功率、效率和光谱

Fig.12 Output power, wall plug efficiency and spectrum of the $400\ \mu\text{m}$ diameter VCSEL

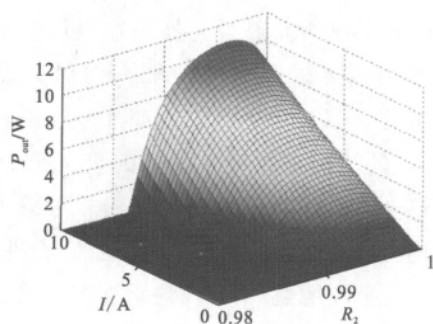


图 13 $300\ \mu\text{m}$ 直径的 VCSEL 输出功率与注入电流和 n-DBR 反射率的关系

Fig.13 Dependence of output power of a $300\ \mu\text{m}$ VCSEL on current I and reflectivity of n-DBR R_2

3.2 集成微透镜改善光束质量

光束质量是激光器应用中一个非常重要的指标。为提高 VCSEL 的激光功率不得不增加出光窗口的孔径,但随之而来的问题是大的孔径造成电流分布的不均匀,影响腔内增益分布和输出激光光束质量。如何实现单横模激光输出是目前研究的一个前沿问题。借鉴固体激光器中的耦合腔思想,设计并在 VCSEL 管芯上集成一个微透镜是一个可能的途径。目前,用于制作微透镜的方法有离子交换法、光敏玻璃热成形法、光刻胶热熔法、光电反应刻蚀法、聚焦离子束刻蚀与沉积法、化学气象沉积法等方法。但对 GaAs 衬底材料来说,比较简便的还是湿法化学腐蚀。图 14 是用限制扩散湿法刻蚀技术在 VCSEL 芯片 GaAs 衬底表面上研制的微透镜,激光束发散角与没有微透镜时相比大大减小,但与单横模目标相比还有很大差距。

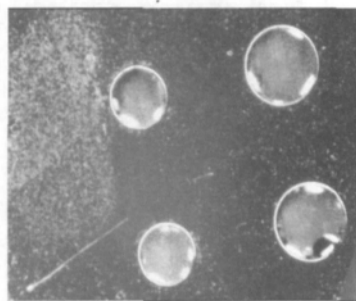


图 14 直径分别为 $200\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m}$ 的微透镜

Fig.14 Microlens of $200\ \mu\text{m}$ and $300\ \mu\text{m}$ diameter fabricated on the emitting window of VCSEL

传统的 VCSELs 列阵均采用单元直径和单元间距相等的排列方式,每个单元的环形或圆形光束叠加后在远场形成具有一系列峰值的周期性强度分布或平顶型强度分布。这种远场限制了激光功率密度的提高,需要复杂的光学系统进行处理,对器件整体体积、结构等都带来负面影响。提出了非均匀分布的排列方式,制作了列阵单元的直径和间距从器件中心向两侧依次递减并对称分布的一维列阵,如图 15 所示。这样列阵中间强度较高的单元光束与两侧强度递减的单元光束耦合后在远场形成高斯强度分布。

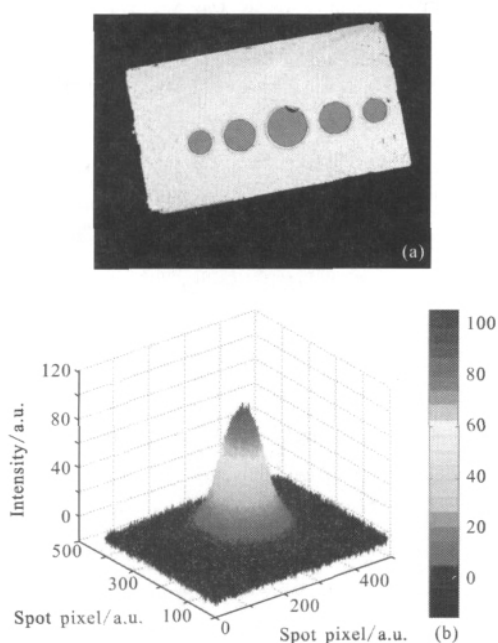


图 15 5 个不同直径的 VCSEL 器件按一定间距构成一维线阵

Fig.15 1-D array consisted of five VCSEL elements with different diameters and certain spacings

3.3 通过改变 p 面电极结构改善激光输出发散角

VCSEL 器件研制中一般采用的 p 面电极结构尺寸与 p 面台面是相当的。但这种结构带来的问题是注入电流在有源区中的分布是不均匀的,更多的电流集中在氧化限制孔径的边缘处,导致激光输出发散角增大、效率降低、模式变差等多方面的问题。文中尝试了研制小尺寸的 p 面电极结构来实现小发散角。

图 16 是一个 $600\mu\text{m}$ 氧化限制孔径的器件在 p 面电极直径分别为 $650\mu\text{m}$ 、 $600\mu\text{m}$ 、 $580\mu\text{m}$ 和 $550\mu\text{m}$ 时电流密度沿径向的分布,可以看出:相对小一点的 p 面电极结构能够获得更均匀的电流密度分布。

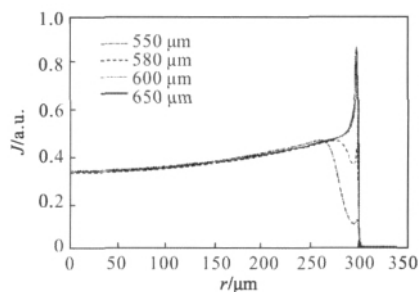


图 16 不同尺寸的 p 面电极时有源区内电流密度的径向分布

Fig.16 Distribution of current density across the active region at different size of p-contact

图 17 为对 $600\mu\text{m}$ 氧化孔径的器件分别采用 $650\mu\text{m}$ 和 $580\mu\text{m}$ 两种 p 面电极结构情况下研制的器件的激光输出功率曲线,在 4 A 电流下两个器件的连续输出功率都达到了接近 0.9 W。

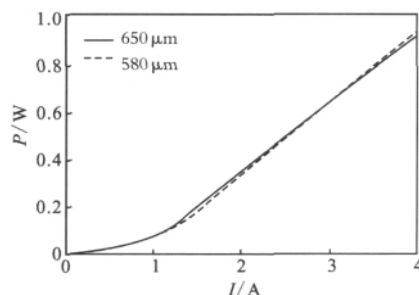


图 17 激光输出功率曲线

Fig.17 Curves of laser output power

图 18 是激光远场光强分布和对应的近场光斑。可以看出对 $650\mu\text{m}$ 电极结构的器件,在输入电流分布为 1 A、2 A 和 4 A 时远场分布都出现很强的边模,发散角半宽达到了 30° ,而对应 $580\mu\text{m}$ 电极结构的器件发散角半宽减小到约 15° ,显著改善了激光输出发散角。

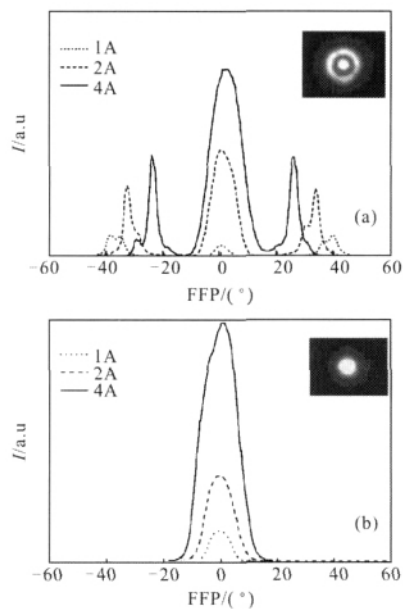


图 18 激光远场光强分布和近场光斑

Fig.18 Far-field distribution and near-field laser spot of laser

4 结 论

分析了当前大功率垂直腔面发射激光研究国内外现状,特别是在激光引信等需要窄脉冲大功率激

光工作情况下 VCSEL 的研究进展情况。针对窄脉冲和高光束质量这两方面的要求,对中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在垂直腔面发射激光材料结构设计、集成微透镜研制、通过远场叠加实现准单模及减小 p 面电极尺寸改善发散角等方面的尝试进行了介绍。

参考文献:

- [1] Soda H, Iga K, Kitahara C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. *Jpn J App Phys*, 1979, 8: 2329–2330.
- [2] Koyama F, Kinoshita S, Iga K, et al. Room temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1989, 55: 221–222.
- [3] Grabherr M, Miller M, Jager R, et al. High -power VCSEL's: single devices and densely packed 2-D-arrays [J]. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electron*, 1999, 5 (3): 495–502.
- [4] Miller M, Grabherr M, King R, et al. Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electron*, 2001, 7(2): 210–216.
- [5] Francis D, Chen H L, Yuan 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.
- [6] McInerney J G, Mooradian A, Lewis A, et al. Novel 980nm and 490nm light sources using vertical cavity lasers with extended coupled cavities[C]//SPIE, 2003, 4994: 21.
- [7] Zhao Lumin, Wang Qing, Yan Changling, et al. 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J of Laser*, 2004, 31(2): 142–144. (in Chinese)
- 赵路民, 王青, 晏长岭, 等. 980 nm 高功率垂直腔面发射激光器[J]. *中国激光*, 2004, 31(2): 142–144.
- [8] Yan Ch L, Ning Y Q, Qin L, et al. A high power InGaAs/ GaAsP vertical cavity surface emitting laser and its temperature characateristics[J]. *Semicond Sci Technol*, 2004, 19: 685–689.
- [9] D'Asaro L A, Seurin J-F, Wynn J D. High power, high efficiency VCSELs pursue the goal [J]. *Photonics Spectra*, 2005, 2: 62.
- [10] Alford W J, Raymond T D, Allerman A A. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external cavity surface emitting laser [J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(4): 663–666.
- [11] Seurin J-F, Ghosh C L, Khalfin V, et al. High-power vertical-cavity surface-emitting arrays[C]//SPIE, 2008, 6876: 68760D.
- [12] Ulrich Martin. COMD behavior of semiconductor laser diodes [R]. Germany: Ulm University, 1999.
- [13] Liu J J, von der Lippe C M. Advanced high-bandwidth optical fuzing technology[C]//SPIE, 2005, 6017: 60170F.
- [14] Keeler G A, Mar A, Geib K M, et al. VCSEL-based microsensors for photonic proximity fuzing of munitions[C]// SPIE, 2008, 7070: 70700V.
- [15] Geske J, Wang C, MacDougal M, et al. High power VCSELs for miniature optical sensors[C]//SPIE, 2010, 7615: 76150E.
- [16] Sun Yanfang, Ning Yongqiang, LI Te, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers with periodic gain structure [J]. *J Luminescence*, 2006, 119–120: 556–559.
- [17] Ning Yongqiang, Li Te, Qin Li, et al. Temperature and far-field distribution characteristics of 980nm high power VCSEL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (6): 984–986. (in Chinese)
- 宁永强, 李特, 秦莉, 等. 980 nm 大功率垂直腔面发射激光器温度和远场分布特性 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37 (6): 984–986.
- [18] Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Jiang Chenyu, et al. Beam quality of High power vertical-cavity bottom emitting semiconductor lasers [J]. *Chinese J of Lasers*, 2011, 38(1): 0102002. (in Chinese)
- 崔锦江, 宁永强, 姜琛昱, 等. 大功率垂直腔底发射半导体激光器的光束质量[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0102002.
- [19] Wang Zhenfu, Ning Yongqiang, Zhang Yan, et al. High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (23): 23900–23905.
- [20] Zhang Yan, Ning Yongqiang, Qin Li, et al. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an optimized p-contact diameter[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): 3793–3797.
- [21] Zhang Yan, Ning Yongqiang, Qin Li, et al. Design and fabrication of vertical cavity surface emitting laser with small divergence [J]. *Chinese J of Luminescence*, 2011, 32(1): 47–52. (in Chinese)
- 张岩, 宁永强, 秦莉, 等. 小发散角垂直腔面发射激光器的设计与制作[J]. *发光学报*, 2011, 32(1): 47–52.