

910 nm 高峰值功率垂直腔面发射激光光源

梁雪梅^{1,2}, 张星², 张建伟^{2*}, 周寅利², 黄佑文², 宁永强², 王立军²

(1. 吉林农业大学 信息技术学院, 吉林 长春 130118;

2. 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)

摘要:报道了 910 nm 高峰值功率垂直腔面发射半导体激光器阵列 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 的设计方法及测试结果. 所制备的 910 nm VCSEL 阵列在准连续工作时激光功率达到 2 W; 在重复频率 10 kHz, 脉冲宽度 30 ns, 工作电流 60 A 的电脉冲驱动条件下, VCSEL 阵列峰值输出功率达到 25.5 W. 随着工作电流的增加, VCSEL 阵列输出的激光光谱呈现明显的展宽现象, 证实 VCSEL 阵列即使在窄脉冲工作时大的电流驱动仍然会产生严重的内部热效应; VCSEL 阵列输出激光的光脉冲波形在驱动电流增大至 60 A 时脉宽仅展宽了 6 ns 左右, 证实 VCSEL 阵列具有非常优越的脉冲响应特性. 对 VCSEL 阵列进行光束准直处理后, 在 1 m 距离处得到了近圆形的均匀光斑. 我们相信这种高功率的 910 nm 面阵光源在未来汽车光探测测距 (LiDAR) 等智能驾驶领域具有很大的应用潜力.

关键词:垂直腔面发射半导体激光器阵列; 高峰值功率; 激光雷达; 脉冲

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

910 nm high peak power vertical-cavity surface-emitting laser source

LIANG Xue-Mei^{1,2}, ZHANG Xing², ZHANG Jian-Wei^{2*}, ZHOU Yin-Li²,
HUANG You-Wen², NING Yong-Qiang², WANG Li-Jun²

(1. College of Information Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

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

Abstract: This paper presents the design method and test results of a 910 nm high peak power vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) array. More than 2 W output power was achieved for 910 nm VCSEL array under the Quasi-CW driving current. Under the electric pulsed driving condition with a repetition frequency of 10 kHz and a pulse width of 30 ns, the peak output power of a single VCSEL array reached 25.5 W at 60 A operating current. With the increase of operating current, the laser spectrum outputted by VCSEL array shows obvious broadening phenomenon, which proves that the large current drive of VCSEL array will still produce serious internal thermal effect even at the operation of narrow pulse. When the driving current increases to 60 A, the pulse width of the laser pulse waveform of VCSEL array only widens by about 6 ns. This proves that VCSEL array has a very superior impulse response characteristic. After beam collimation of VCSEL array, nearly circular uniform spot was obtained at a distance of 1 m. We believe that this kind of high power 910 nm array light source has great application potential in the future intelligent driving fields such as vehicle light detection and ranging (LiDAR).

Key words: vertical-cavity surface-emitting laser array, high peak power, light detection and ranging, pulse

PACS: 42.55.Px

收稿日期: 2018-11-08, 修回日期: 2018-12-26

Received date: 2018-11-08, revised date: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (11674314, 61106068, 61874117, 61434005, 61727822), 吉林省重点科技研发项目 (20180201119GX)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11674314, 61874117, 61434005, 61727822), Jilin Scientific and Technological Development Program (20180201119GX)

作者简介 (Biography): 梁雪梅 (1982-), 吉林长春人, 女, 博士, 主要从事半导体激光器器件的设计与实验工作.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zjw1985@ciomp.ac.cn

引言

垂直腔面发射半导体激光器 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 具有无腔面损伤、可快速调制、面阵式出光、圆形均匀对称光斑等独特优点,近年来在 3D 面部识别、激光雷达、Augmented Reality (AR)/ Virtual Reality (VR) 技术中得到广泛应用和发展^[1-2]. 上述应用领域所使用的 VCSEL 为多达数百个发光点组成的列阵形式,这种列阵结构具有远高于传统光通信行业的激光功率水平,被称为高功率 VCSELs^[3-5]. 在高功率 VCSELs 的应用领域,3D 面部识别及 AR/VR 等技术具有较近的光学感应距离,因此对 VCSEL 激光输出功率要求不高,一般在瓦级左右,其波长一般在 940 nm 以降低外部环境光干扰. VCSEL 系统具有更高的集成度、更紧凑的光学系统,以及由此带来的更低的成本和体积,近年来,更高功率的 VCSEL 列阵技术获得了激光雷达系统的青睐. 激光雷达所需的 VCSELs 激光功率需达到数十瓦乃至百瓦功率水平,以保证足够远的探测距离;激光波长采用 910 nm 波段以减小环境中的水汽吸收影响,同时还可进一步增加硅探测器响应度^[6]. 然而,由于 GaAs 材料在 910 nm 波段的高吸收特性,其分布布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 结构具有更低的 Al 组分对比,导致需要更多的 P-DBR 对数以达到预期反射率,这带来了高的串联电阻及光吸收效应^[7-8];VCSEL 所用的 GaAs 衬底具有高的光学吸收,因此必须采用顶发射式的 P 面出光结构,而 P 型材料低的电导率及环形电极结构使得在 VCSEL 内部氧化孔径位置易于产生载流子聚集,引起载流子利用效率低下及光场分布不均^[9-11].

目前为止,国际上仅有 Trilumina 公司的 Richard F. Carson 等人报道了远距离激光雷达专用 910 nm 波段附近的高峰值功率 VCSELs 的研究成果^[12-14]. 他们研发了采用 5 个 VCSEL 列阵串接在一起的激光模块,在驱动电流为 100 A 时,该串接模块的激光功率仅有 80 W 左右,相当于每个 VCSEL 阵列的激光功率仅有 16 W 左右^[14]. 2014 年我们团队曾报道了单个列阵峰值功率达到 60 W 的 980 nm 波段 VCSEL^[15]. 在上述研究基础上,本文中我们报道了用于远距离激光雷达的 910 nm 波段 VCSEL 研究成果. 首先,我们介绍了 910 nm 波段 VCSEL 外延结构反射谱及发光区增益谱的设

计结果;然后对所制备 VCSEL 列阵在准连续及脉冲情况下的工作性能进行了测试分析. 通过测试脉冲情况下 VCSEL 的光谱及脉冲波形变化,证实即使在窄脉冲工作状态下,高的工作电流仍然会在 VCSEL 内部产生热积累效应,引起 VCSEL 出光功率饱和,但是热效应对紧凑封装 VCSEL 列阵的脉冲波形影响较小.

1 VCSEL 结构设计

设计了 910 nm 波段 VCSEL 激光器的外延结构,如图 1 所示,由 N 型掺杂的下 DBR (Distributed Bragg Reflector) 反射镜结构,有源区及 P 型掺杂的上 DBR 反射镜结构组成,其中有源区采用压应变 InGaAs 量子阱及 AlGaAs 势垒层组成,有源区的光学厚度为一个 λ 波长. DBR 反射镜采用 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 材料对,其中 P 型 DBR 反射镜对数为 22 对, N 型 DBR 反射镜对数为 35 对. 在整体结构设计中需保证三个量子阱的位置位于驻波波峰中心位置,以获得高的光学增益,如图 1 中的光场分布示意图所示. 在 VCSEL 采用单氧化层设计的结构中,氧化层为 30nm 厚度的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 材料;VCSEL 结构采用顶出光结构以避免 GaAs 衬底对 910 nm 波段的光学吸收,因此需采用 lift-off 工艺形成 P 面出光窗口及 P 面环形电极.

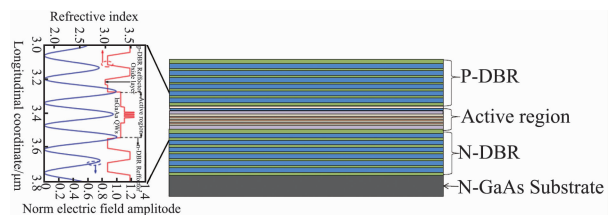


图 1 910 nm VCSEL 激光器横截面结构示意图,插图为有源区附近的驻波光场

Fig. 1 Schematic of multi-layer structure in the VCSEL devices, inserted was the normalized optical field distribution within the active region

VCSEL 激光器谐振腔腔长非常短,因此为了获得优越的性能,VCSEL 激光器发光区的材料增益必须足够大. 在本研究中,我们采用近红外波段相对成熟的 InGaAs/AlGaAs 材料体系作为发光区的量子阱/势垒层材料结构. 对于 InGaAs 量子阱,其材料组分及厚度的选择主要考虑 VCSEL 激光器所需的增益谱峰值波长位置. 图 2a 为利用 PICS3D 软件模拟的增益谱峰值波长在 870 nm, 880 nm 以及 890 nm 时, InGaAs 量子阱的 In 组分及量子阱厚度对应关

系. 由于量子阱厚度增加带来能级量子效应减弱, 相应的激光波长随之增加; 而在相同量子阱厚度下, In 组分越多, 则量子阱能级对应的出光波长也会增加. 因此, 要达到相同增益峰值, 量子阱厚度与 In 组分呈现反比关系. 考虑到 InGaAs 与 GaAs 的晶格失配效应, 为保证良好的发光区材料制备质量, 我们选取量子阱厚度在 5-6 nm, 量子阱个数为 3 个左右.

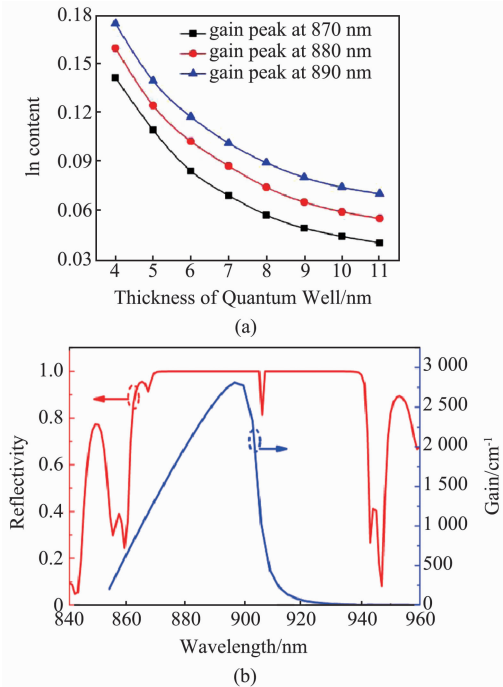


图2 不同增益峰值 InGaAs 量子阱组分及厚度关系 (a), 及增益光谱与 VCSEL 反射谱 (b)
Fig.2 The relationships between indium contents and thicknesses of InGaAs QWs for different gain peak wavelengths (a), and the gain- and reflectivity spectra of the VCSEL

所设计的 VCSEL 结构发光区增益谱与 VCSEL 整体反射谱见图 2b 所示. 其中发光区采用 3 个厚度为 5.5 nm 的 InGaAs 量子阱. 由光学传输矩阵理论计算得到的 VCSEL 整体反射谱中可以很明显地看出腔模位置, 而腔模位置就是 VCSEL 的激光波长位置. VCSEL 的腔模由 AlGaAs 材料折射率温漂决定, 其温漂仅为 0.06 nm/K 左右, 而发光区增益谱峰值波长的则由材料能带温漂系数决定, 在 0.3 nm/°C 左右. 考虑 VCSEL 器件腔模与量子阱增益谱的温漂相差较大, 一般情况下结构设计时量子阱增益谱的波长相对 VCSEL 腔模蓝移量选取在 10-15 nm 左右, 以保证室温工作时发光区增益谱峰值与腔模匹配, 为 VCSEL 提供最高的有效增益. 本项目选取增益峰值——腔模的失配量为 13 nm.

2 VCSEL 器件制备结果

采用 Aixtron 公司的 200/4 型号 MOCVD 设备对上述设计的 910 nm VCSEL 激光器结构进行外延生长调试. 在整体结构生长前首先对 DBR 反射谱及发光区量子阱结构进行了单独调试, 最后得到整体结构中心区域的反射谱及量子阱的光致发光光谱 (Photoluminescence spectra, PL spectra), 如图 3 所示. 测试反射谱采用的光源为白光光源, 图中对 VCSEL 整体反射谱进行了归一化处理. 测试反射谱用的光谱仪型号为 OceanOptics USB4000-VIS-NIR, 该光谱仪在波长位于 900-1000 nm 波段时, 光谱响应度随波长增加而逐渐降低, 我们认为这是导致图 3 中所测试的 900-950 nm 反射带随波长增加而衰落的原因, 但是 VCSEL 外延片整体的反射谱形貌及腔模位置仍然是准确的. 由于驻波微腔效应, VCSEL 反射谱中心出现明显的凹陷. PL 光谱中心位于 896 nm 附近, 整体谱型平滑. 从图 3 外延测试结果可以看出, VCSEL 反射谱及发光区 PL 光谱位置与图 2b 中的理论设计结果基本吻合.

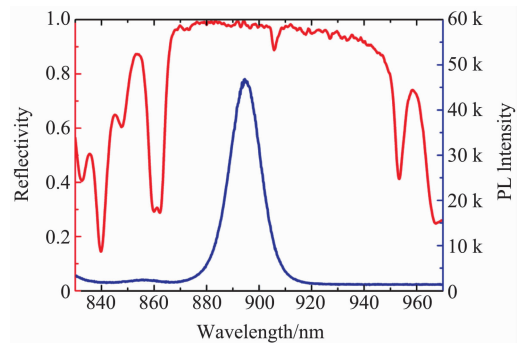


图3 MOCVD 外延片发光区 PL 光谱及整体结构反射谱
Fig.3 The measured photoluminescence spectra of QW and the reflectivity spectra of the wafer

在对 VCSEL 进行材料外延制备后, 考虑 GaAs 衬底对 910 nm 波段的吸收作用, 所制备 VCSEL 拟采用顶发射工艺结构. 但是顶发射结构 VCSEL 列阵单元的氧化孔及环形电极尺寸会严重影响到单元激光的出光功率及效率. 为保证所开发的 VCSEL 列阵具有良好的脉冲输出特性, 首先依据 Jean-Francois Seurin 等人提出的列阵优化方式^[16] 对单个激光发光单元进行了氧化孔与电极孔径结构优化, 以获取最高的单元斜率效率与低的阈值电流. 最终确定 VCSELs 列阵发光单元的氧化孔尺寸为 8 μm , 电极窗口尺寸为 12 μm . 由于 VCSELs 阵列的各发光单

元间的并联关系,我们尽可能多的集成 VCSEL 发光单元以降低整个列阵的电感效应;为保证各单元之间具有最为相似的工作状态,保证 VCSEL 列阵均匀性,最终我们制备了发光单元具有六角蜂窝状排布的 VCSEL 阵列结构,阵列发光单元个数为 163 个。

为验证 VCSEL 列阵的制备效果,首先我们将制备的 VCSEL 阵列进行 TO 封装.在无制冷条件下采用准连续(Quasi Continuous Wave, QCW)驱动电源(重复频率 100 Hz,脉宽 200 μ s)对 VCSEL 进行了测试,VCSEL 阵列的激光输出特性见图 4 所示.图 4a 为 QCW 驱动电流下 VCSEL 列阵的功率-电压-效率曲线.可以看出,VCSEL 阵列的阈值电流约为 0.5 A,在工作电流达到 5 A 时的激光输出功率达到近 2 W,并且没有出现功率饱和现象.采用自己搭建的远场测量系统测试了 VCSEL 阵列的远场发散角,见图 4b 所示.VCSEL 阵列在两个正交方向上的发散角非常类似,FWHM(Full Width at Half Maximum)角度分别为 16.2°与 16.8°,说明我们获得了圆形对称的光斑形貌.VCSEL 在两个正交方向上的光斑形貌均较为平滑,说明整个列阵中的各个发光点发光强度分布均匀。

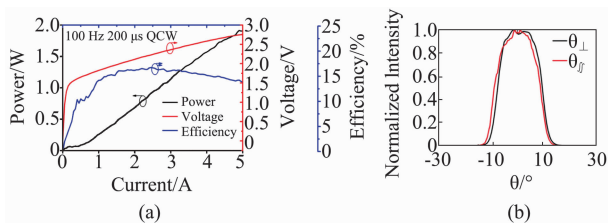


图 4 VCSEL 单元列阵 PIV 曲线 (a) 及其在 5A 时的远场发散角 (b)

Fig. 4 The Power-current-voltage relationship of fabricated VCSEL array (a) and its beam divergence angle at the operation current of 5A (b)

将驱动电源换成重复频率 10 kHz,脉宽 30 ns 的窄脉冲驱动电源,我们测量了上述 VCSEL 列阵在大电流、窄脉冲下的峰值激光功率,测试结果见图 5 所示.当激光工作电流小于 40 A 时,该功率曲线的斜率效率与 QCW 工作状态下类似.工作电流达到 40 A 时,激光器的输出功率可以达到 20 W.然而随着工作电流的进一步增加,VCSEL 列阵的功率曲线呈现出明显的饱和现象.单个 VCSEL 列阵在 70 A 工作电流下峰值激光功率达到最大值 25.5 W.这说明即使是在极低填充因子的脉冲驱动电流下,VCSEL 列阵的激光功率也不能够随着工作电流的增加而无限提升。

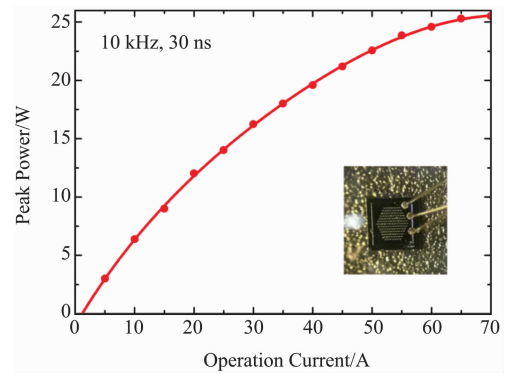


图 5 窄脉冲、高重频驱动时 910 nm VCSEL 列阵激光输出功率与工作电流关系

Fig. 5 Laser output power versus driving current under a repetition frequency of 10 kHz and a pulse width of 30 ns for the single VCSEL array

为进一步分析 VCSEL 列阵功率饱和问题产生的原因,我们测量了不同工作电流下 VCSEL 列阵模块的激光光谱随驱动电流的变化情况,见图 6 所示.VCSEL 模块的激光光谱随着工作电流的增加呈现出明显的光谱展宽现象.当驱动电流由 20 A 增加到 60 A 时,光谱宽度由 0.8 nm 增加到了 1.38 nm.这主要因为 VCSEL 在大电流下产生了较为严重的热效应.对于高密度发光点组成的 VCSEL 阵列,其内部热交联效应将会使得整个列阵的温度呈现中心较高边缘较低分布形式,由此引起 VCSEL 阵列各发光单元间的激光波长略有偏移,因此整个列阵的光谱呈现出展宽的现象.该现象在其他文献^[17]中也见有报道。

由图 6 中可以看到,在工作电流为 60 A 的情况下,除了激光光谱波形的展宽,光谱的右侧还出现了明显的拖尾现象,这也是由于 VCSEL 列阵的热效应产生的.由于热效应导致 VCSEL 列阵部分区域发光单元温度升高,因此这部分列阵的激光波长趋于向长波方向偏移,这是激光光谱向右侧展宽的原因.对于产生严重热效应的发光单元,其激光功率会有所下降,因此这部分发光单元的激光光谱强度要弱于大部分发光单元的光谱强度.列阵中的发光单元热效应越严重,则其激射的波长偏向长波方向越多,其光谱强度则相对越小,这就是图 6 中工作电流在 60 A 时激光光谱右侧部分出现了逐步衰减的激光强度,也就是拖尾效应的原因.由于 VCSEL 列阵的热饱和效应是由该条件下的内部热效应引起的,在后续研究中如果我们采用更为良好的散热结构和封装焊料,将会有效改善这一现象。

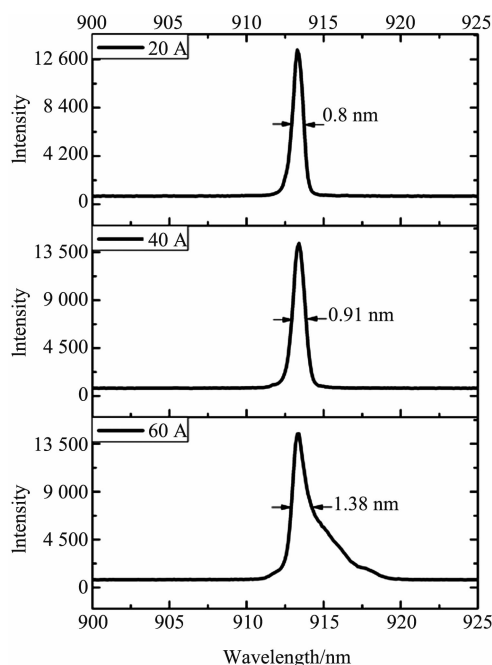


图6 激光器出光光谱随工作电流变化关系
Fig. 6 Laser spectra of the VCSEL array under different driving currents in pulsed operation

VCSEL 列阵的光脉冲输出波形表征了其在窄脉冲驱动下的脉冲响应特性,该特性将直接影响到激光雷达的时间测量精度.为此,我们采用光电探测器及示波器系统对 VCSEL 列阵的光脉冲波形进行捕捉,获取了不同驱动电流下 VCSEL 列阵的光脉冲波形,见图 7 所示.列阵呈现出平滑的光脉冲波形信号,并且我们发现光波形信号结束后并未出现以前文献中所报道的严重拖尾现象^[17-18],而是出现一个负过冲信号,且信号很快就回复至零.上述现象说明我们开发的 VCSEL 列阵很好的消除了窄脉冲驱动下的电迟滞效应.在图 7 中,当列阵的驱动电流由 20 A 增加至 60 A 的过程中,脉冲波形半宽由 30 ns 展宽至 36 ns,展宽幅度为 6 ns. VCSEL 列阵在大电流下的光脉冲展宽现象主要是由于 VCSEL 在大电流下的内部热效应引起的:热效应引起 VCSEL 芯片温度升高,导致其本身电阻增加,相应的脉冲响应时间变长.虽然光脉冲在大电流下出现了微弱的展宽,但是图 7 中列阵在不同驱动电流下的光脉冲波形仍然具有非常好的一致性. VCSEL 列阵表现出的上述脉冲稳定性对于实现激光雷达在不同环境下的稳定工作非常重要.

我们采用焦距 100 mm 的常规球面准直镜对制备的 VCSEL 列阵模块进行了直接光束准直,以检查该模块在实际应用中的光束处理效果.在调节准直

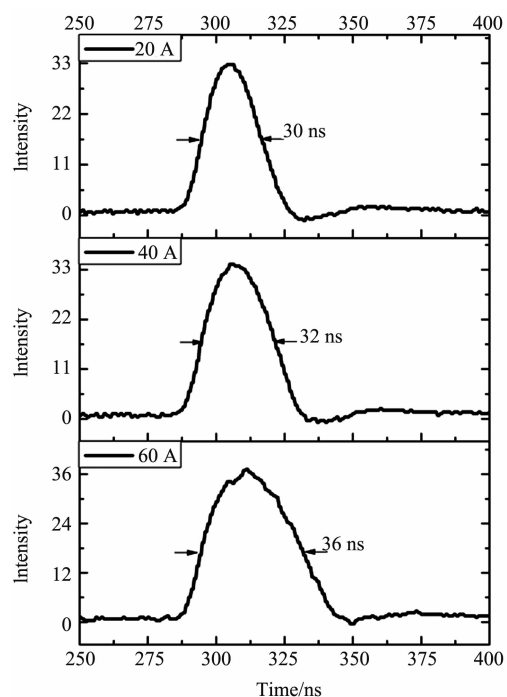


图7 VCSEL 列阵在不同工作电流下的光脉冲波形对比
Fig. 7 Comparison of the optical pulse waveforms of the VCSEL array at different working currents

镜位置以保证良好的准直效果后,我们在距离准直镜 1 m 左右的位置采用 CCD 观察到其光斑形貌如图 8 所示.准直后 VCSEL 发出的激光光斑呈现出很好的圆形对称形貌.由图 8 在水平和垂直方向上光场强度分布可以看出,光场强度分布由中心区域向边缘逐渐降低,整个光场区域未出现暗斑现象,说明我们的 VCSEL 列阵器件各个发光点具有较为一致

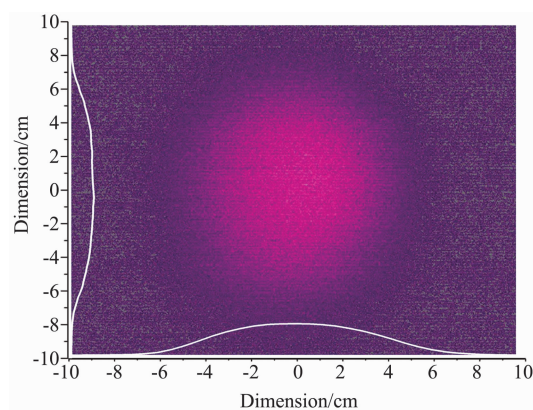


图8 VCSEL 列阵准直后的光场强度分布,插图曲线为光斑中心的光场强度分布
Fig. 8 The collimated beam morphology of the VCSEL array at 1 m distance, inserted curves show the intensity distribution at the center of the optical field

的发光性能.

3 结论

设计了 910 nm 波段 VCSEL 激光器结构,为 VCSEL 材料外延制备提供了依据.采用制备的外延片开发出高密度集成的 VCSEL 列阵器件.在准连续工作状态下,VCSEL 激光功率达到 2 W,且未出现功率饱和现象.在 10 kHz,30 ns 脉冲驱动下,单颗 VCSEL 列阵激光功率可以达到 25.5 W.通过 VCSEL 工作在不同驱动电流下的光谱展宽现象可以推断出 VCSEL 在脉冲情况下仍然存在热效应.所研制的 VCSEL 列阵输出激光脉宽在功率饱和时仅展宽了 6 ns,不同电流下的脉冲波形一致,证实该列阵具有良好的脉冲响应.最后,采用单个准直透镜对 VCSEL 的光场进行简单处理得到圆形均匀光斑形貌,证实 VCSEL 列阵具有很好的发光均匀性.下一步我们将对该类型 VCSEL 阵列在远距离探测系统中的实际应用效果进行实验验证.

References

- [1] Holger M, Mark C, Philipp G, *et al.* VCSEL based sensors for distance and velocity [C]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9766**(97660A):1-11.
- [2] Jean F S, De L Z, Guo Y X, *et al.* High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications [C]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9766**(97660D):1-9.
- [3] Andreas P E, Johanna S K, Friedhard R, *et al.* Efficiency optimization and analysis of 808nm VCSELs with a full electro-thermal-optical numerical model [C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9381**(93810M):1-9.
- [4] Holger M, Manuel F, Martin G, *et al.* VCSELs as light source for time-of-flight sensors [C]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10122**(1012204):1-7.
- [5] Samman A, Rimai L, McBride J R, *et al.* Potential Use of Near, Mid and Far Infrared Laser Diodes in Automotive LIDAR Applications [C]. *IEEE-VTS Fall VTC*, 2000, **5**: 2084-2089.
- [6] Markus C A, Werner H. InP-Based Long-Wavelength VCSELs and VCSEL Arrays [J]. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 2009, **15**(3):861-868.
- [7] Kopf R F, Schubert E F, Downey S W, *et al.* N- and P-type dopant profiles in distributed Bragg reflector structures and their effect on resistance [J]. *Applied Physics Letters*. 1992, **61**(15):1820-1822.
- [8] Lysak V V, Chang K S, Lee Y T. Current crowding in graded contact layers of intra cavity-contacted oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Applied Physics Letters*. 2005, **87**(231118):1-3.
- [9] Akira H, Hideyuki N, Kousuke T, *et al.* High power density vertical-cavity surface emitting lasers with ion implanted isolated current aperture [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(4):4206-4212.
- [10] GAO Shi-Jie¹, ZHANG-Xing, ZHANG Jian-Wei *et al.* Miniaturized VCSEL pulsed laser source with high peak power at 980 nm[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (高世杰,张星,张建伟,等. 980nm 高功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源. *红外与毫米波学报*) 2016, **35**(5):578-583.
- [11] 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*, 2015, **9381**(93810C):1-13.
- [12] Carson R F, Warren M E, Preethi D, *et al.* Progress in High-Power, High-Speed VCSEL Arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9766**(97660B):1-15.
- [13] Rosprim J P, Li W, David P, *et al.* Progress in Optimization of High-Power, High-Speed VCSEL Arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10122**(1012205):1-10.
- [14] Jian W Z, Yong Q N, Xing Z, *et al.* High-peak-power vertical-cavity surface-emitting laser quasi-array realized using optimized large-aperture single emitters [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, **53**(070303):1-4.
- [15] Jean F S, Guo Y X, Viktor K, *et al.* Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, **7229**(722903):1-11.
- [16] Hideyuki N, Masahiro M, Yuta A, *et al.* Development of a high power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser array with ion-implanted current apertures [C]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8639**(86390N):1-8.
- [17] Hideyuki N, Masahiro M, Yuta A, *et al.* Short-Pulse Operation of a High-Power-Density Proton-Implanted Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array [J]. *Applied Physics Express*, 2012, **5**(082104):1-3.
- [11] Nusinovich G S, Pu R F, Granatstein V L. Suppression and nonlinear excitation of parasitic modes in second harmonic gyrotrons operating in a very high order mode [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**: 013501.
- [12] Gregory S. Nusinovich, Oleksandr V. Sinityn, Leonid Velikovich, *et al.* Startup Scenarios in High-Power Gyrotrons [J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2004, **32**(3):841.

(上接第 667 页)