

引用格式: ZHU Zijun, LIU Yudong, HUI Wu, et al. Beam Space Propagation Characteristics of Vertical Cavity Surface Emitting Laser Arrays[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12):1214001

朱子军,刘玉东,惠武,等.垂直腔面发射激光器阵列光束的空间传输特性[J].光子学报,2022,51(12):1214001

垂直腔面发射激光器阵列光束的空间传输特性

朱子军,刘玉东,惠武,王丙辛,张峰,关宝璐

(北京工业大学 光电子技术教育部重点实验室,北京 100124)

摘 要:针对垂直腔面发射激光器阵列光束空间相干特性及其光场分布开展理论分析和实验研究。垂直腔面发射激光器阵列光束为部分相干光,在不同激励电流下,远场光斑分别表现出类高斯和类拉盖尔-高斯两种光场分布,光束空间相干度随注入电流的增大而减小。进一步实验表明,与标准相干光源相比,在类湍流大气散射媒介中传输时,垂直腔面发射激光器阵列光束具有更小光斑扩散和更低光强衰减。随着垂直腔面发射激光器阵列光束空间相干度由 0.695 降低为 0.608,其传输时的光斑扩展率由 8.6% 减小为 3.4%,光强衰减率由 24.9% 降低为 15%,空间相干度较低的垂直腔面发射激光器阵列光束表现出更好的传输特性,这对垂直腔面发射激光器阵列光源在自由空间雷达探测和光通信等领域的应用有重要指导意义。

关键词:垂直腔面发射激光器;阵列光源;空间相干性;部分相干光;传输特性

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225112.1214001

0 引言

垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)阵列具有高集成度、高调制带宽、高输出功率、快速响应和可单独寻址等优点^[1-4],因此被广泛地运用于并行光互连,3D 识别与传感,高分辨率打印等领域^[5-9]。特别是随着科学技术的不断发展,对激光器阵列光源光束质量提出了更高的要求^[10-12]。例如,为了抑制散斑现象,实现高空间分辨率、高对比度共聚焦显微干涉探测,要求 VCSEL 阵列光源具有低空间相干的平顶光束输出;在生物细胞光学捕获和微操作中,为了产生光镊阵列效应,VCSEL 阵列的光束需要调控为拉盖尔-高斯空心圆环状分布,VCSEL 及其阵列的光束分布及空间相干性受到越来越多人们的关注^[13-15]。KNITTER S 等研制了一种电泵半导体筒并 VCSEL,实现了发射激光的空间相干性,可以在低和高之间切换:低空间相干性照明实现动态高速无散斑成像,高空间相干性照明实现激光散斑对比成像^[16]。BIRKBECK A L 等利用 3×3 VCSEL 阵列产生拉盖尔-高斯光束形成光镊阵列,实现了多细胞灵活操作^[17]。REDDING B 等将 VCSEL 阵列作为多模光纤耦合全场干涉共聚焦显微镜的光源,实现了 100 μs 的高速高对比度图像采集^[18]。同样,在自由空间光通信中,激光的光束分布和空间相干性与其在类湍流大气散射媒介中传输的光束展宽、光斑漂移及光强闪烁等扰动效应密切相关。CAI Yangjian 等研究了部分相干激光阵列光束在湍流大气中的平均强度和传播特性^[19-20],EYYUBOGLUH T 等研究了湍流大气中激光阵列光束的闪烁特性^[21],SHIRAI T 等利用部分相干光束的相干模式分解,研究了光束在湍流介质中的光束展宽和平均光强分布^[22],因此,研究阵列光源的空间相干性及光场分布对优化其传输特性有重要意义。但 CAI Yangjian、EYYUBOGLUH T、SHIRAI T 的研究均从建模仿真的角度对激光光束进行分析,未针对 VCSEL 阵列光源开展具体实验研究。在实际应用中,随着 VCSEL 阵列工作状态不同,其输出光束特性也会改变。本文从实

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 60908012, 61575008, 61775007),北京市自然科学基金(No. 4172011),北京市教育委员会基金(Nos. 040000546319525, 040000546618006)

第一作者:朱子军(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为半导体光电子器件。Email: zhuzj@emails.bjut.edu.cn

导师(通讯作者):关宝璐(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为半导体光电子器件。Email: gbl@bjut.edu.cn

收稿日期:2022-05-10; **录用日期:**2022-06-27

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

验角度详细分析了 VCSEL 阵列光束的空间相干性对阵列光束空间传输特性的影响。随着注入电流增加, VCSEL 阵列光束远场由圆形光斑变为空心环状光斑, 分别表现出类高斯和类拉盖尔-高斯两种光场分布, 光束空间相干度降低。同时, 通过改变 VCSEL 阵列的注入电流, 研究了不同空间相干度 VCSEL 阵列光束在类湍流大气散射介质中的传输特性。与标准相干光源相比, VCSEL 阵列光束在散射介质中传输时的光斑扩展随光束包含高阶模式数量的增加而减少, 空间相干度较低的 VCSEL 阵列光束在散射介质中传输时具有更小光束展宽与更低的光强衰减, 表现出更好的抗散射性, 这为 VCSEL 阵列光源在自由空间的应用研究提供了新的思路。

1 VCSEL 阵列结构与制备

VCSEL 阵列截面结构如图 1(a) 所示, 本实验使用的 20×20 VCSEL 阵列器件结构采用金属有机化学气相沉积法 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 外延生长而成。有源区由 3 对 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 应变量子阱组成, 分布式布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflection, DBR) 材料为 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, 上 DBR 21 对, 下 DBR 39.5 对, 氧化孔径 $10 \mu\text{m}$, 间距为 $40 \mu\text{m}$, 阵列单元呈六边形蜂窝状排列, 中心波长为 940 nm 。制备过程为: 首先, 采用感应耦合等离子体刻蚀法 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 制备圆柱形台面, 暴露高铝含量氧化限制层; 在 $410 \text{ }^\circ\text{C}$ 下将 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层选择性湿法氧化得到 $10 \mu\text{m}$ 的氧化限制孔并在表面沉积 SiO_2 层作为电隔离层, 将出光孔区域 SiO_2 腐蚀后再次光刻; 然后在表面溅射 Ti/Au , 采用剥离法制备光孔和注入电极, 并在背面溅射 AuGeNi/Au 作为 n 型电极; 最后, 在 $380 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行高温退火, 使电极与半导体材料形成良好的欧姆接触, 如图 1(b) 为制备完成后的 VCSEL 阵列近场图片。

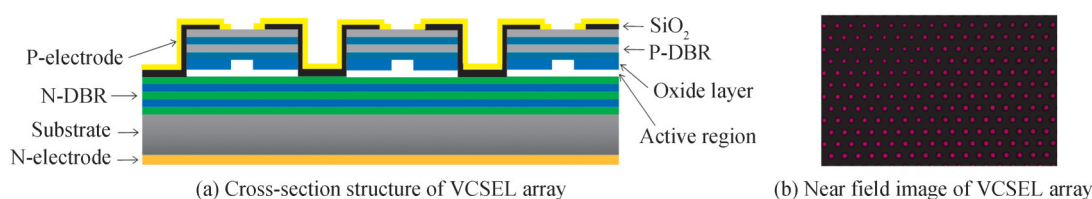


图 1 VCSEL 阵列结构示意图
Fig. 1 VCSEL array structure diagram

2 实验结果与分析

图 2(a) 为 VCSEL 阵列输出功率特性曲线, VCSEL 阵列的阈值电流为 0.4 A , 当 VCSEL 阵列在 $0.4 \sim 1.2 \text{ A}$ 连续电流工作时, 其输出功率近似成线性增加, 斜率效率为 0.9 W/A 。VCSEL 阵列的光谱反映了出射光束的横模特性, 如图 2(b) 所示, VCSEL 阵列光束为各发光单元出射光束的叠加, 当 VCSEL 阵列工作在阈

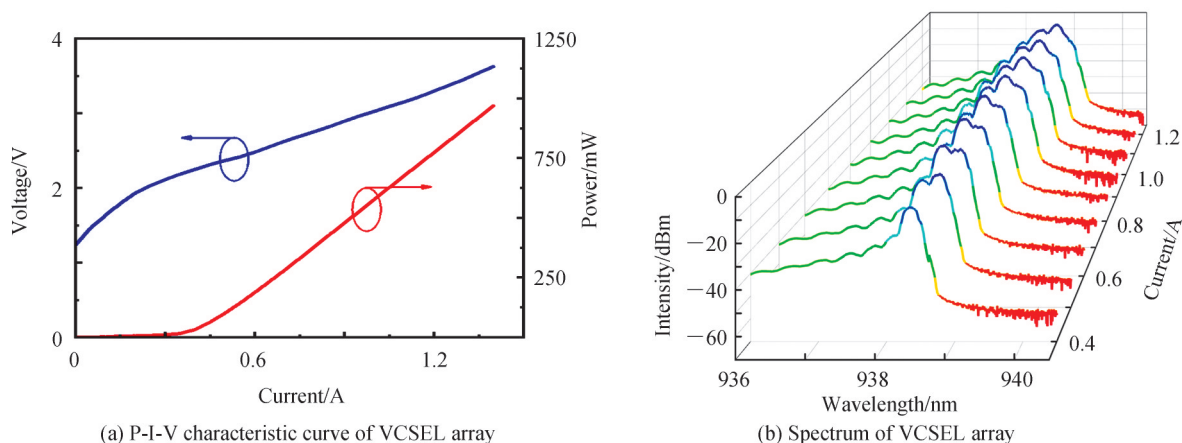


图 2 VCSEL 阵列的光输出特性
Fig. 2 Optical output characteristics of VCSEL array

值电流时,阵列光束为基模出射,光谱半宽为0.208 nm。随着注入电流增加,基模增益下降,高阶模式被增强,在0.5 A时,高阶模式的出现使得阵列光谱半宽增大为0.464 nm。此后,VCSEL阵列光束变为多横模出射,平均光谱半宽随电流变化率为0.6 nm/A。

在不同激励电流下,VCSEL阵列远场光斑表现出不同的光场分布,如图3所示。在阈值电流下,VCSEL阵列为基模出射,基模光束的能量分布在发光孔径中心且光斑发散程度小,此时的阵列远场为各发光单元光束的叠加形成的圆形光斑,光场为高斯分布。随着注入电流的增加,VCSEL阵列光束中高阶模式逐渐出现,由于高阶模式的能量主要集中在发光孔径边缘,VCSEL阵列光场为类拉盖尔-高斯空心圆环状。此后,由于模式竞争,高阶模式功率继续增加,基模功率被抑制,光束中心光强与边缘光强差异增大,光束空心程度增加。

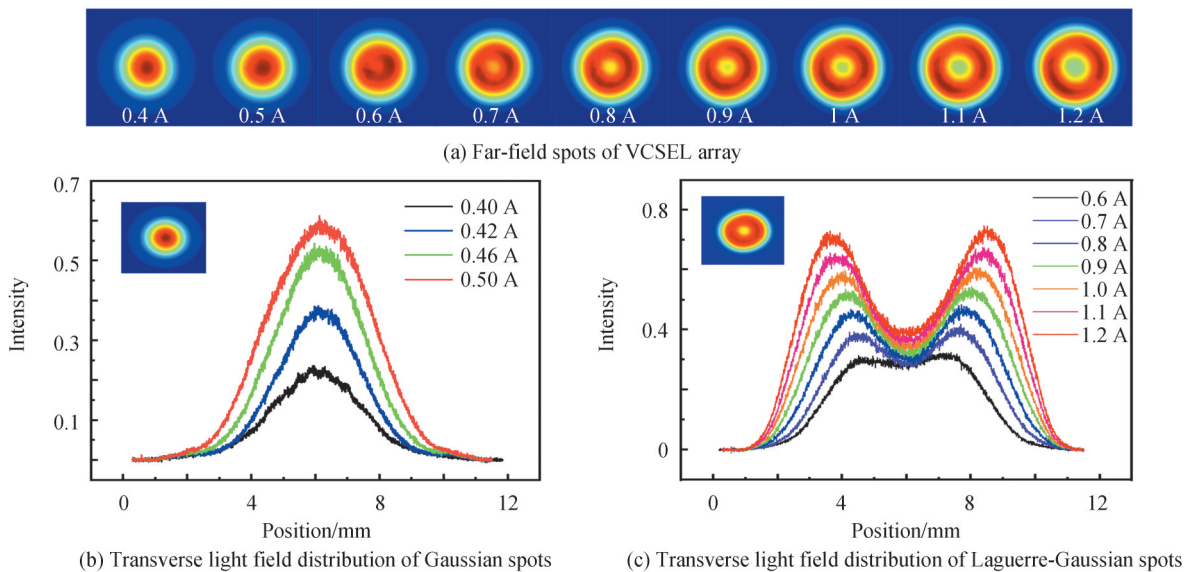


图3 VCSEL阵列的光场

Fig. 3 The light field distribution of VCSEL array

VCSEL阵列光束表现出高斯和拉盖尔高斯两种不同光场分布时,其光束发散角也会发生改变,图4为VCSEL阵列光束远场发散角。在阈值电流下,VCSEL阵列光束的远场发散角为 17° ,当VCSEL阵列光场为高斯分布时,其发散角随电流变化率为 $15.3^\circ/\text{A}$ 。随着注入电流增加,阵列光束中更多的高阶横模的出现导致光束发散角继续增大,在1.2 A时,VCSEL阵列光束的远场发散角为 24.1° ,当VCSEL阵列光场为类拉盖尔-高斯分布时,其光束发散角随电流变化率为 $3.9^\circ/\text{A}$ 。

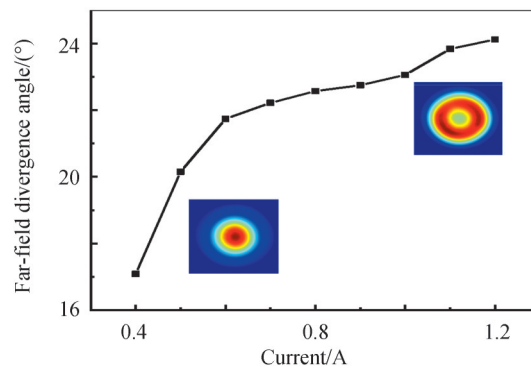


图4 不同光场分布下VCSEL阵列远场发散角

Fig. 4 Far-field divergence angle of VCSEL array under different light field distribution

VCSEL 阵列光束在类大气湍流散射介质中传输实验装置如 5 所示, VCSEL 阵列光束经透镜准直出射, 光束经过分束镜后采用双孔干涉测量光束的空间相干度 μ 。当光束在大气中传输时, 湍流涡旋会对光束产生不同程度的散射和衍射, 光束的振幅和相位均会发生变化, 产生光束扩展, 导致光斑分析仪接收面上光斑半径及光束截面能量的改变。实验中采用硅胶散射介质模拟大气湍流的随机性和不均匀性, 光束在自由空间中光斑半径为 r_0 , 相对光强为 I_0 , 由于散射介质作用, 经过散射介质传输后的光斑半径为 r_1 , 相对光强值为 I_1 。采用 Spiricon SP920s 光束分析仪记录 VCSEL 阵列远场光斑半径与光强, 并计算传输过程中的光束扩展率 $\frac{r_1 - r_0}{r_0}$, 光强衰减率 $\frac{I_0 - I_1}{I_0}$ 。

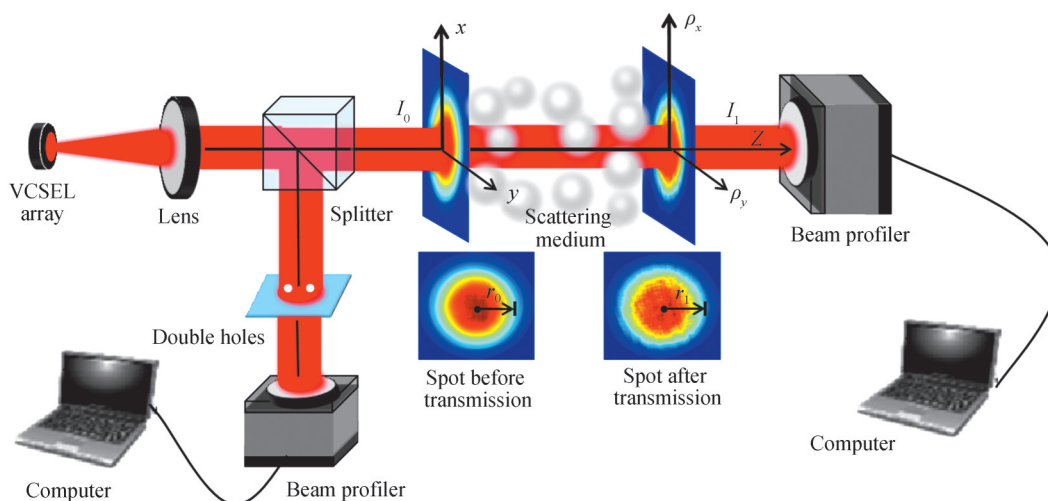


图 5 VCSEL 阵列光束在散射介质中的传输实验装置图
Fig. 5 Schematic of VCSEL array beam propagation in scattering medium

图 6(a) 为经过双孔干涉后测得 VCSEL 阵列光束干涉条纹横向光强分布, 插图为阈值电流时的干涉条纹, 光强曲线中波峰与波谷分别对应明暗条纹。随着注入电流的增加, VCSEL 阵列光束强度增加, 干涉条纹光强分布曲线中波峰波谷逐渐上移, 干涉条纹的整体亮度提升, 但波峰与波谷的差值降低, 这表现为干涉图样中亮条纹和暗条纹的对比度降低, 光束的空间相干性降低。通过计算干涉条纹的对比度得到 VCSEL 阵列光束的空间相干度随注入电流变化曲线如图 6(b) 所示, VCSEL 阵列光束为部分相干光, 在阈值电流下, 各发光单元出射基模高斯光束, 发散角小, VCSEL 阵列光束空间相干度为 0.695。随着激励电流增加, VCSEL 阵列变为多横模激励, 光束中包含的高阶模式数量增加, 发散角增大, 不同高阶模式光波场的非相干使得光束空间相干性降低。

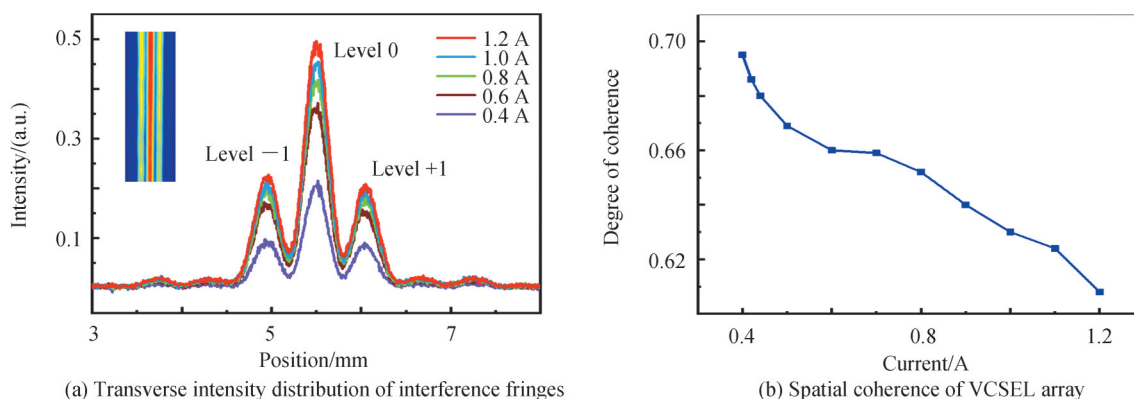


图 6 VCSEL 阵列光束的空间相干性
Fig. 6 Spatial coherence of VCSEL array beams

图7为不同空间相干度光束经散射介质传输的横向光强分布,插图对应传输前后的远场光斑。从图7(a)可以看出,标准相干光源能量分布集中,在散射介质中传输时,光束自身会发生干涉,传输后光斑明显增大,出现明显的散斑现象,同时光强衰减严重。标准相干光源在传输过程中光束扩展率为40.9%,光强衰减率为34.8%。在不同注入电流下,VCSEL阵列光束具有不同的空间相干度 μ ,其在散射介质中传输状态如图7(b)~(d)所示,VCSEL阵列光束的光强没有标准相干光源光强分布集中,但对比自身光强分布的变化,经散射介质传输后,VCSEL阵列光束光强衰减明显小于标准相干光源。这是因为标准相干光源可以看作单模光场,光束的能量主要通过单一的相干模传播。在散射介质中传输时光斑自身会发生干涉,并且光束会因为散射效应而发生退化,导致探测器接收面上的光斑会产生抖动;而VCSEL阵列光束中包含更多光波模式,由于每个模式的传播方式不同,在散射介质中传输的路径更多,不同模式间的非相干也有效减弱了远场光斑的散斑现象,所以探测器接收到光斑比较稳定,表现出更好的抗干扰性。

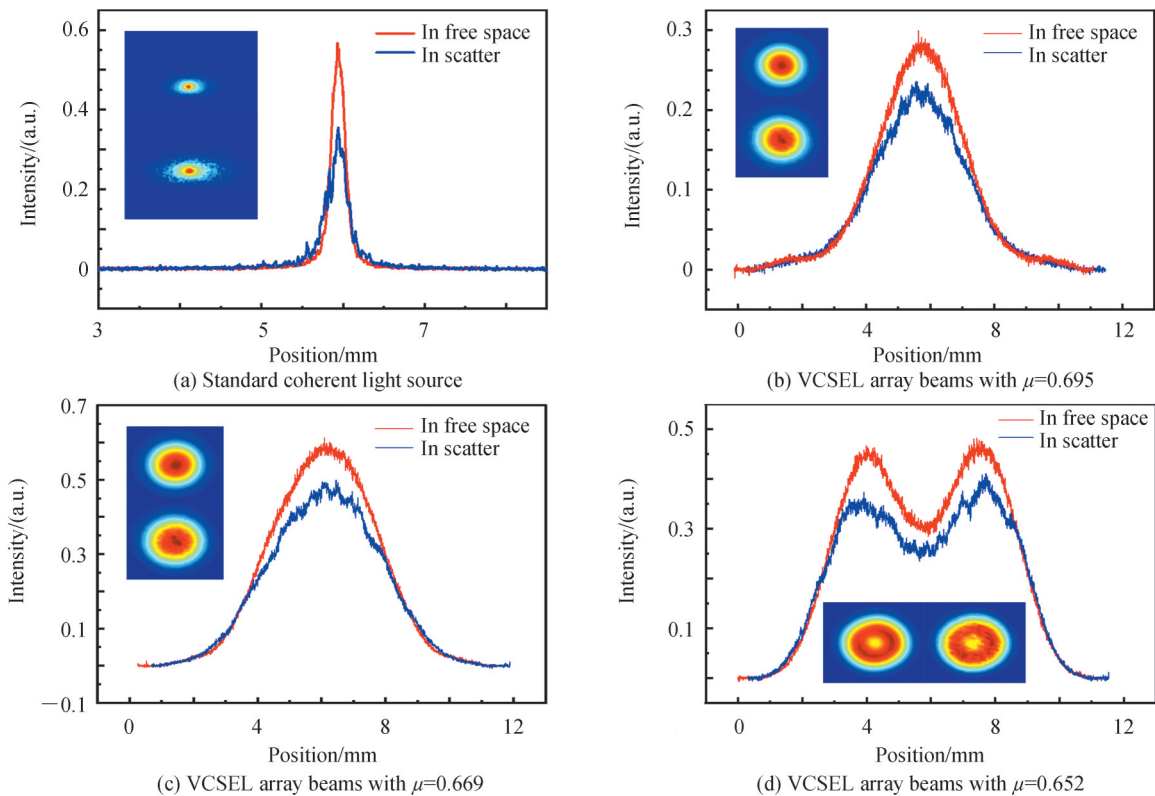


图7 光束传输前后光强分布

Fig. 7 Intensity distribution before and after beam transmission

VCSEL阵列光束在传输前后的光束扩展率和光强衰减率如图8所示,相比于标准相干光源,VCSEL阵列光束在传输中具有更小光束展宽与更低的光强衰减。在阈值电流下,空间相干度为0.695的VCSEL阵列光束在散射介质中传输的光束扩展率为8.6%,光强衰减24.9%。在光束传输过程中,光束中高阶模式受介质折射率起伏影响产生的光斑扩散现象比低阶模式小^[23],随着注入电流的增加,VCSEL阵列光束由基模出射变为多横模出射,光束空间相干度降低。VCSEL阵列光束在散射介质中传输时的光束扩展随光束中包含高阶模式数量的增加而减少。此外,由于模式竞争,低阶模式功率被抑制,阵列光束能量主要为高阶模式功率,光束在传输过程中的光强衰减率更小。当VCSEL阵列光束空间相干度降低为0.608时,其在散射介质中传输时的光束扩展率减小为3.4%,光强衰减降低为15%,表现出更好的传输特性。但VCSEL阵列光束空间相干度降低的同时常伴随光源发散角的增大、远场光束空心程度的加剧,这对阵列光源的准直和光束传输后的再整形提出了更多要求。

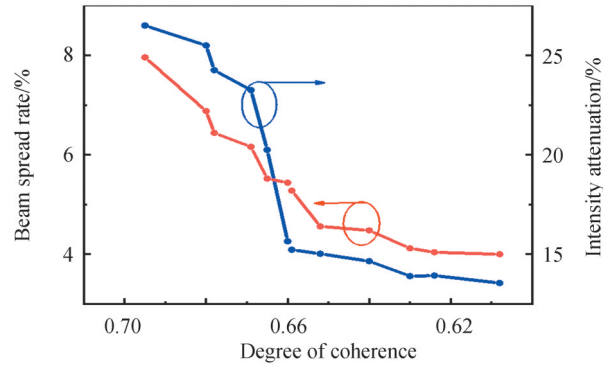


图8 VCSEL 阵列光束扩展率及光强衰减率

Fig. 8 VCSEL array beam expansion rate and intensity attenuation rate

3 结论

本文详细分析了不同注入电流下 VCSEL 阵列光束的空间相干度和光场分布。VCSEL 阵列光束为各发光单元叠加形成的部分相干光,其空间相干度随注入电流的增大而减小。在阈值电流下,VCSEL 阵列光束为基模出射,阵列光场为类高斯圆形光斑,随着阵列光束转变为多横模出射,VCSEL 阵列光场变为类拉盖尔-高斯空心环状光斑且光束发散角增大。此外,通过调控 VCSEL 阵列的注入电流得到了不同空间相干度的阵列光束,并研究了其在类湍流大气散射介质中的传输特性。不同于标准相干光源,VCSEL 阵列光束通过散射介质传输时的光束扩展随光束中高阶模式数量的增加而减少,空间相干度较低的 VCSEL 阵列光束在散射介质中传输时表现出更小的光束扩展及更低的光强衰减,具有更好的传输特性,这对 VCSEL 阵列在自由空间光通信中的应用研究有重要意义。

参考文献

- [1] IGA K, KINOSHITA S, KOYAMA F. Microcavity GaAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th}=6$ mA[J]. Electronics Letters, 2007, 23(3):134-136.
- [2] LARSSON A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6):1552-1567.
- [3] MOENCH H, CARPAIJ M, GERLACH P, et al. VCSEL-based sensors for distance and velocity[C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XX, International Society for Optics and Photonics, 2016, 9766: 97660A.
- [4] LIU A, WOLF P, LOTT J A, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 121-136.
- [5] LIN C K, TANDON A, DJORDJEV K, et al. High-speed 985 nm bottom-emitting VCSEL arrays for chip-to-chip parallel optical interconnects[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(5): 1332-1339.
- [6] SAFAISINI R, JOSEPH J R, DANG G, et al. Scalable high-power, high-speed CW VCSEL arrays[J]. Electronics Letters, 2009, 45(8): 414-415.
- [7] LIM Y L, NIKOLIC M, BERTLING K, et al. Self-mixing imaging sensor using a monolithic VCSEL array with parallel readout[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5517-5525.
- [8] SAFAISINI R, JOSEPH J R, LEAR K L. Scalable high-CW-power high-speed 980-nm VCSEL arrays[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(11): 1590-1596.
- [9] LIVERMAN S, BIALEK H, NATARAJAN A, et al. VCSEL array-based gigabit free-space optical femtocell communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(7): 1659-1667.
- [10] SEURIN J F, ZHOU D, XU G, et al. High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications[C]. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XX, International Society for Optics and Photonics, 2016, 9766: 97660D.
- [11] CHEN B, CLAUS D, RUSS D, et al. Generation of a high-resolution 3D-printed freeform collimator for VCSEL-based 3D-depth sensing[J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5583-5586.
- [12] CHILLA J L A, BENWARE B, WATSON M E, et al. Coherence of VCSEL's for holographic interconnects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(5): 449-451.
- [13] VERSCHAFFELT G, VANDER S G. Spatial coherence properties of pulsed red VCSELs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9): 1026-1029.
- [14] VERSCHAFFELT G, CRAGGS G, PEETERS M L F, et al. Spatially resolved characterization of the coherence area

- in the incoherent emission regime of a broad-area vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(3): 249-255.
- [15] PEETERS M, VERSCHAFFELT G, THIENPONT H, et al. Spatial decoherence of pulsed broad-area vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9337-9345.
- [16] KNITTER S, LIU C, REDDING B, et al. Coherence switching of a degenerate VCSEL for multimodality imaging[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 403-406.
- [17] BIRKBECK A L, FLYNN R A, OZKAN M, et al. VCSEL arrays as micromanipulators in chip-based biosystems[J]. *Biomedical Microdevices*, 2003, 5(1): 47-54.
- [18] REDDING B, BROMBERG Y, CHOMA M A, et al. Full-field interferometric confocal microscopy using a VCSEL array[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4446-4449.
- [19] CHEN Y, CAI Y, EYYUBOGLUH T, et al. Scintillation properties of dark hollow beams in a weak turbulent atmosphere[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(1): 87-92.
- [20] CAI Y, CHEN Y, EYYUBOGLUH T, et al. Scintillation index of elliptical Gaussian beam in turbulent atmosphere[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2405-2407.
- [21] EYYUBOGLUH T, BAYKAL Y, SERMUTLU E, et al. Scintillation advantages of lowest order Bessel - Gaussian beams[J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(2): 229-235.
- [22] SHIRAI T, DOGARIU A, WOLF E. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(6): 1094-1102.
- [23] GBUR G, WOLF E. Spreading of partially coherent beams in random media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(8): 1592-1598.

Beam Space Propagation Characteristics of Vertical Cavity Surface Emitting Laser Arrays

ZHU Zijun, LIU Yudong, HUI Wu, WANG Bingxin, ZHANG Feng, GUAN Baolu
(*Laboratory of Opto-electronics Technology, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract: Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) array has the advantages of high integration, high modulation bandwidth, high output power, fast response and individual addressing, so it is widely used in parallel optical interconnection, 3D recognition and sensing, high resolution printing and other fields. With the development of science and technology, the quality of laser array light source is required to be higher. For example, in order to suppress the speckle phenomenon and realize confocal micro-interference detection with high spatial resolution and high contrast, the VCSEL array light source is required to have flat top beam output with low spatial coherence. In the optical capture and microoperation of biological cells, in order to produce an optical trapping array effect, the beam of the VCSEL array needs to be regulated into Laguerre-Gaussian hollow circular distribution. The beam distribution and spatial coherence of VCSEL and its array have attracted more and more attention. Similarly, in free-space optical communication, the laser beam distribution and spatial coherence are closely related to the disturbance effects such as beam broadening, spot drift and intensity scintillation transmitted in a turbulent atmospheric scattering medium. It is of great significance to research the spatial coherence and light field distribution of array light source to optimize their transmission characteristics. In this paper, the spectrum of the VCSEL array is measured and the light field distribution of the VCSEL array is researched. At the threshold current, the VCSEL array is emitted as the fundamental mode, and the energy of the fundamental mode beam is distributed in the center of the luminous aperture and the light spot divergence degree is small. At this time, the far field of the array is a circular light spot formed by the superposition of the light beams of each luminous unit, and the light field is Gaussian distribution. With the increase of injection current, the high-order mode of the VCSEL array beam gradually appears. Because the energy of the high-order mode is mainly concentrated at the edge of luminous aperture, the light field of the VCSEL array is Laguerre-Gaussian hollow circle. Furthermore, the experimental device of VCSEL array beam space transmission was built. The propagation characteristics of a standard coherent light source and VCSEL array beam with

different coherence were compared in the atmospheric turbulent scattering medium. The VCSEL array beam is collimated out through the lens, after the beam splitter through the two-hole interference, the interference fringes are recorded by Spiricon SP920s beam analyzer, and the spatial coherence of the beam is obtained by calculating the contrast of the interference fringes. At the same time, the randomness and inhomogeneity of atmospheric turbulence are simulated by a scattering medium. The beam analyzer is used to record the far-field spot radius and light intensity before and after VCSEL array beam transmission, and the beam expansion rate and light intensity attenuation rate in the transmission process is calculated. Experiments show that compared with the standard coherent light source, the VCSEL array beam has smaller spot diffusion and lower light intensity attenuation when propagating in a turbulent atmospheric scattering medium. As the spatial coherence of the VCSEL array decreases from 0.695 to 0.608, the spot spread rate decreases from 8.6% to 3.4%, and the intensity attenuation rate decreases from 24.9% to 15%. VCSEL array beams with relatively low spatial coherence show better propagation characteristics, which has important guiding significance for the application of VCSEL array light source in the fields of free space radar detection and optical communication.

Key words: Vertical cavity surface-emitting laser array; Array light source; Spatial coherence; Partially coherent light; Propagation properties

OCIS Codes: 140.3290; 250.7260; 030.1640; 010.1300