

高功率 VCSEL 激光器光束发散角的测量方法

崔辰好, 李正权

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, 简称 VCSEL)由于其能发射出垂直于腔面光束的特性使得多个 VCSEL 激光器可以在同一片芯片上紧密集成, 而不需要大量的空间; 且 VCSEL 激光器使用共振腔的反射镜来增强光并放大, 从而实现高效的光发射; 通常情况下, VCSEL 激光器的发光效率可以达到 40% 至 60% 之间, 与传统的激光器相比, VCSEL 激光器更容易实现高效率。由于 VCSEL 激光器的可集成性好、效率高等特点, 使其广泛应用于 3D 感知、自动驾驶、光通信等领域。因此, VCSEL 激光器的质量检测工作也显得越来越重要。随着 VCSEL 激光器进军高功率领域, 其发光束的模式也经历了从基模变为高阶模的过程, 光束已经从类高斯光束变为了类拉盖尔-高斯空心圆环光束。虽然传统的 $1/e^2$ 、D86 等算法在测量基模下的类高斯光束的发散角较为精确, 但对于高阶模式下的类拉盖尔-高斯空心圆环光束, 这些方法则出现了明显的误差。考虑到 VCSEL 激光器在自动驾驶等重要领域的广泛应用, 其光束精确度的要求也随之提高。因此, 本文采用了 $D4\sigma$ 算法, 针对类拉盖尔-高斯空心圆环光束进行发散角测量, 与 $1/e^2$ 、D86 等传统算法进行了比较。结果显示, 新方法在发散角测量准确度上最高提升了 2.30%。

关键词: $D4\sigma$ 算法; 光束质量; 光束发散角; 垂直腔面发射激光器; 类拉盖尔-高斯空心圆环光束

中图分类号: TN247; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.004

High-power VCSEL lasers measurement method for beam divergence angle

CUI Chen-hao, LI Zheng-quan

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) is distinguished by its ability to emit light beams perpendicular to the cavity surface. This unique characteristic allows multiple VCSEL lasers to be densely integrated on a single chip without requiring a significant amount of space. Additionally, VCSEL lasers utilize the reflective mirrors of a resonant cavity to enhance and amplify the light, leading to efficient light emission. Typically, the luminous efficiency of VCSEL lasers can range between 40% and 60%. Compared to traditional lasers, VCSELs are more apt to achieve high efficiencies. Due to their excellent integrability and high efficiency, VCSELs have found broad applications in fields such as 3D perception, automatic driving, and optical communication. Hence, the quality inspection of VCSEL lasers is becoming increasingly vital. As VCSEL lasers venture into the high-power domain, their light beam modes

基金项目: 网络与交换技术全国重点实验室开放课题项目 (No. SKLNST-2023-1-13) 资助。

作者简介: 崔辰好 (1998 -), 男, 硕士研究生, 主要从事嵌入式开发、激光器等方面研究。E-mail: 6211924037@stu.jiangnan.edu.cn.

通讯作者: 李正权 (1976 -), 男, 博士, 教授, 主要从事 6G 移动通信系统物理层关键技术、物联网关键技术研究。E-mail: lzq722@jiangnan.edu.cn.

收稿日期: 2023-08-25

have evolved from fundamental mode to high-order mode. The beam has transitioned from a Gaussian-like beam to a Laguerre-Gaussian hollow ring beam. While traditional methods such as $1/e^2$ and D86 are quite accurate for measuring the divergence angle of Gaussian-like beams in fundamental mode, they exhibit notable discrepancies when applied to the Laguerre-Gaussian hollow ring beams in high-order mode. Given the widespread use of VCSEL lasers in crucial areas like autonomous driving, the demand for precise beam measurements has also surged. Therefore, this article adopts the $D4\sigma$ algorithm to measure the divergence angle of the Laguerre-Gaussian hollow ring beam and compares it with conventional methods like $1/e^2$ and D86. The results indicate that the new method enhances the accuracy of divergence angle measurements by up to 2.30 %.

Keywords: $D4\sigma$ algorithm; beam quality; beam divergence angle; VCSEL; Laguerre-Gaussian hollow ring beam

1 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, 简称 VCSEL), 是一种以砷化镓 (GaAs) 材料为基础研制的半导体激光器, 以能够发射出垂直于腔面的激光与其他类型激光器所区别, 目前 VCSEL 激光器都是将多个单孔 VCSEL 激光器通过二维阵列的方式集成在一个激光器芯片上来提高其功率。VCSEL 激光器作为半导体激光器具有体积小、低阈值、低功耗、调制带宽高、圆形光束、易与光纤耦合、成本低等特性, 在激光器领域里的应用越来越广泛^[1]。VCSEL 激光器目前广泛应用于光通信、3D 感知、自动驾驶等领域^[2]。VCSEL 激光器检测中有一项“光束质量”参数是衡量激光器是否合格的重要因素, 这也是 VCSEL 激光器必须要测量的一项重要参数, VCSEL 激光器光束质量的好坏决定了其在市场上的应用^[3]。例如 M^2 因子可以帮助确定激光光束的质量, 从而达到精确聚焦, 在激光加工和微加工应用中, 需要将激光聚焦到非常小的区域, M^2 因子的准确测量和优化可以确保高质量的加工结果。对于需要在远距离传输的激光通信和激光雷达等应用, M^2 因子的值决定了光束在传输过程中的稳定性和能量损失; 低 M^2 值的光束能够更好地保持其形状和强度, 降低了信号丢失的风险。目前常用于评价光束质量的指标主要有桶中功率 (Power in the bucket, PIB)、高斯含量 (Gaussian content)、 M^2 因子、光束参数积 (Beam Parameter Product) 等, 其中以远场发散角和 M^2 因子最为常用, 激光光束的 M^2 因子会限制给定光束发散角的光束被聚焦的程度, 通常是受限于透镜的数值孔径。光束质量因子与光功率一起决定了激光光束的亮度。 M^2 因子越接近 1 说明聚焦性能越好, 光束质量越高^[4-6]。而 M^2 因子的测量需要先得到激光器的远场发散角, 发散角越小说明激光器的光束质量越好。根据 ISO 标准规

定, 测量远场发散角的方法主要有光束质量分析仪、刀口法、套孔法、CCD 摄像法等^[7-9]。光束质量分析仪可以直接并准确测量光束质量, 但是其复杂的实施条件无法对大量的激光器芯片进行测量; 刀口法测量刀片位置的螺旋测量器、激光功率计测试步骤多且变化量小, 所产生的误差比较大且不好控制; CCD 摄像法既能满足精度较高且能够对大量激光器芯片进行测量, 只要调整好摄像头与发光源之间的距离就能够达到比较标准的测试环境。

相较于边发射激光器, VCSEL 激光器在检测成本、工艺步骤上更具优势, 由于 VCSEL 激光器能发射出垂直于腔面光束的特性, 使其能在晶圆级别进行测试, 即在测试步骤上可以先测试再切割, 大大节省了边发射激光器先切割再测试的成本, 且若能够在晶圆级发现不良品便可以提前将其剔除, 能够进一步降低检测成本。切割分选过后, 再进行 TO 封装贴片时 VCSEL 激光器只需要定位贴在 TO 底座中心即可; 而边发射激光器由于其工艺特性, 需要将其发射孔垂直于 TO 管帽, 甚至需要辅助零件帮助其定位, 这对贴片机编程来说非常复杂, 且容易出错导致芯片报废, 因此 VCSEL 激光器在测试的工艺步骤上更加简化。

为了迎合市场的发展, VCSEL 激光器的工况也从小电流不断向大电流增加^[10-12], 随着注入电流的增加, VCSEL 激光器发射的阵列光束也由基模出射 (TEM_{00}) 变为高阶模式, 即在阈值电流下 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, 此时的阵列远场分布为各发光单元的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 阵列光场就变为类拉盖尔-高斯空心圆环状; 若注入电流继续增加, 高阶模式功率也

会继续增加,而基模功率被抑制,光束中心光强变弱而边缘光强增强,即光斑空心程度增加,如图 1 所示^[13]。传统计算远场光斑发散角的算法 $1/e^2$ 、D86、FWHM(半高全宽)对于测量 VCSEL 阵列为基础出射时的类高斯光束能得到比较准确的结果,但是在测量高阶模式下的类拉盖尔-高斯空心圆环得到的结果存在较大误差。

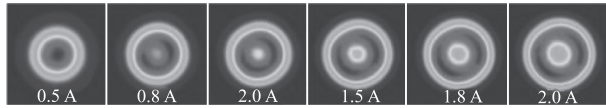


图 1 VCSEL 阵列在不同电流应力下的远场光斑
Fig. 1 Far-field beam patterns of VCSEL arrays under different current stresses

目前,现有的测试光束质量的方法与算法主要解决的是测量精度和测试成本的问题,但是都各有优缺点。2009 年,杨晓东等人根据高斯光束光强分布公式,用刀口法通过分析透过刀口边缘激光功率占总功率的百分比判断光斑中心距比值及相应的光斑半径的测量误差,对高斯光斑半径进行测量^[14],然而,因为刀口法需要选取激光器输出镜距离刀口不同距离时逐点推入刀口,测试步骤多且变化量小,容易出现误差。2018 年,时凯等人基于 CCD 多点测试法代替两点法和三点法,用 $1/e^2$ 算法测量 M^2 因子,获得较高精度的远场发散角^[15],但是,在测试大数量芯片时更加费时。2023 年,刘若仙等人,用 $1/e^2$ 算法测量光纤阵列准直器发出的高斯光束发散角,并对测量结果进行了测量不确定度的分析与评定^[16],其发散角还是存在较大误差。

因此,本文根据 ISO11146-1 规定的标准算法提出用 $D4\sigma$ 算法^[17] 测量 VCSEL 激光器在发射类拉盖尔-高斯空心圆环光束下光束发散角的工程化测量方法。

实验结果证明,采用 $D4\sigma$ 算法测量 VCSEL 激光器在类拉盖尔-高斯空心圆环光束下的远场光斑发散角的误差相较于传统 $1/e^2$ 算法误差率降低了最多 2.30%。

2 测试原理

2.1 CCD 摄像法测量 VCSEL 远场发散角方法

如图 2 所示,阵列型 VCSEL 激光器是将多个单孔发射的 VCSEL 激光器以二维阵列的方式集成到一块芯片上从而提高 VCSEL 激光器的发光功率,弥补其在功率低方面的缺点,又由于 VCSEL 激

光器能垂直发射激光的特点,相比于其他类型的激光器他制作成阵列型的成本更低,所以目前最常见的 VCSEL 激光器都是阵列型的。在 VCSEL 激光器的近场测试图像中通过判断每个单孔是否正常发出圆形的且没有污渍的光,即是否有损坏单元来判定芯片是否合格^[18];每个单孔都有一定的发散角,并且都为类高斯光束,通过一定距离的传播后单孔光束会重合到一起形成远场光斑。最后到达摄像头的光束一般都是经过透镜处理的光束而不是“原始”光束^[19]。透镜处理高斯光束的传播路径如图 3 所示。

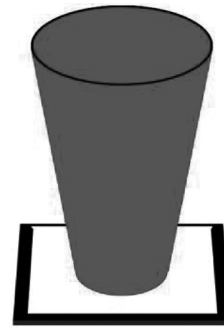


图 2 VCSEL 激光器光束传播路径
Fig. 2 Beam propagation path of VCSEL laser

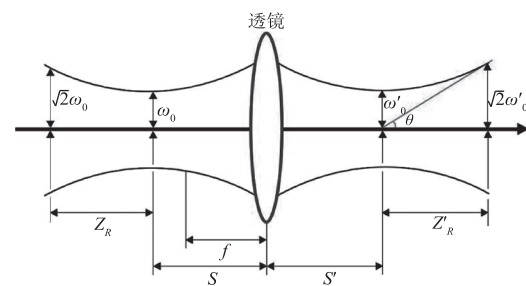


图 3 透镜处理高斯光束的传播路径

Fig. 3 Propagation path of a Gaussian beam through a lens

图中 S 和 S' 分别是物距和像距也是输入束腰和输出束腰到透镜的距离; f 为透镜的焦距;高斯光束中光束半径在束腰 ω_0 处最小,而且距离束腰越远光束半径越大,一束光通过透镜后产生一个新的光束,且两边的光束都有各自的束腰半径和发散角,输入束腰半径 ω_0 视为物体大小,输出束腰半径 ω_0' 视为图像大小; Z_R 和 Z_R' 分别为输入前与输入后的瑞利距离,即光束从束腰半径处变大到 $\sqrt{2}$ 倍束腰半径所经过的距离。发散角 θ 就是极限处束腰半径 ω 与瑞利距离 Z_R 的积分或 $\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$ 。

在实际工况下,VCSEL 激光器发射的光线为类拉盖尔-高斯空心圆环,中心区域发光单元的光强分

布低于边缘区域发光单元的光强,其光斑发散角的测量方法除了光束质量分析仪,最常用的就是 CCD 摄像法,通过计算先后求解出光斑的质心坐标和光斑半径的大小,再由光斑半径计算出发散角大小。

CCD 摄像法的具体操作流程:由于 VCSEL 激光器能垂直腔面发射光束的特性,所以 VCSEL 激光器有可以进行晶圆级测试的优点。首先,通过调整垂直步进电机和 X, Y 平台,将 VCSEL 激光器的发光孔对准 CCD 摄像头,垂直距离为 d ;其次,调整 X, Y 平台每次移动的距离,使得每次移动 CCD 摄像头都能够准确的对准下一个 VCSEL 激光器;第三,得到原始光斑图像后进行去灰、减噪的操作^[20-23],得到一张更准确的图片;最后,可以计算出光斑的半径,从而得到远场光斑发散角。计算发散角时需要注意选取的区域大小至少为光斑直径的 3 倍^[24]。

CCD 摄像法测量 VCSEL 远场光斑发散角示意图如图 4 所示。

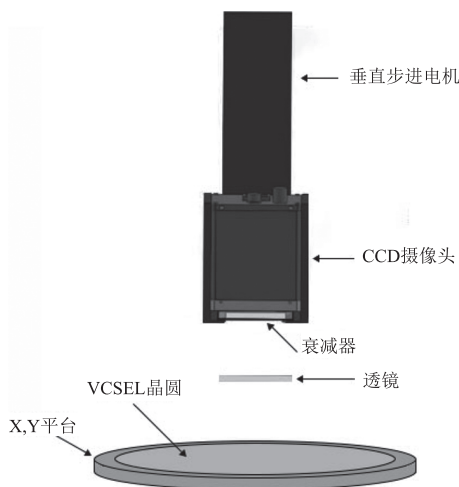


图 4 CCD 采集装置原理图

Fig. 4 Schematic diagram of CCD acquisition device

检测设备主要由 CCD 摄像头、衰减器、透镜、 X, Y 平台、垂直步进电机组成。CCD 摄像头主要用来拍摄并记录光斑图像。垂直步进电机用于将摄像头与测量平面调节到适合的焦距位置。衰减器用于处理 VCSEL 发射出的光,因为太强的光强也会影响测试结果,衰减器可以将光强衰减到摄像头可以测量的范围,控制检测的准确性。 X, Y 平台通过移动放有 VCSEL 激光器芯片的平台将激光器发光孔对准 CCD 摄像头。

2.2 通过背景图相减方法的减噪处理

记录为测量功率密度分布 $E_{\text{meas}}(x, y)$ 和

$H_{\text{meas}}(x, y)$ 的信号可分为两部分:由被测光束产生的“真实”功率密度分布 $E(x, y)$ 或 $H(x, y)$,以及由其他源如外部、环境辐射或传感器设备本身(噪声)产生的可能不均匀的背景图 $E_B(x, y)$:

$$E_{\text{meas}}(x, y) = E(x, y) + E_B(x, y)$$

其中背景信号可以进一步划分为均匀部分 $E_{B, \text{offset}}$ (Baseline offset) (例如基线偏移)、非均匀部分 $E_{B, \text{inh}}(x, y)$ (例如基线倾斜) 和 高频噪声分量 $E_{B, \text{noise}}(x, y)$:

$$E_B(x, y) = E_{B, \text{offset}}(x, y) + E_{B, \text{inh}}(x, y) + E_{B, \text{noise}}(x, y)$$

通常,既不能校正高频噪声分量,也不需要这样做,由于计算波束参数所涉及的积分,高频噪声分量决定了固有的统计误差,因此只影响测量的再现性,而其他背景信号会导致系统误差。

背景分布可以通过其平均值 $E_{B, \text{offset}}$ 和标准差 $E_{B, \sigma}$ 来表示,如果探测器上背景信号的变化小于标准偏差 $E_{B, \sigma}$,则探测器背景可以被认为是均匀的。在分析参数之前必须进行背景校正,否则分布在背景信号中的噪声信号可能会主导所涉及的积分。首先,在获取功率密度分布“信号”图之前需要先记录“暗图像”背景图。其次,通过从测量的功率密度分布中减去完整的“暗图像”背景图进行校正。

通过,记录平均背景分布的至少 $n > 10$ 个单独测量值,得出平均检测器的背景图:

$$\overline{E_B}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{B, i}(x, y)$$

使用背景图减法,校正后的分布由下式给出:

$$E(x, y) = E_{\text{meas}}(x, y) - \overline{E_B}(x, y)$$

在时间波动的残余环境辐射入射到探测器的情况下,可能会使结果失真,所以应该直接连续进行“信号”图和“暗图像”背景图的测量。

2.3 D4 σ 算法

在计算远场光斑前需要做一些准备工作,首先需要先通过计算功率密度分布的一阶矩(数学期望)求出光斑的质心坐标:

$$\bar{x}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) x dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (1)$$

$$\bar{y}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) y dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (2)$$

上式中求出的 x 和 y 就是光斑的质心坐标。其次,再以质心坐标为中心,计算功率密度分布的二阶矩(方差),即功率密度分布上的归一加权积分可求解出光斑的半径:

$$\sigma_x^2(z) = \langle x^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) (x - \bar{x})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (3)$$

$$\sigma_y^2(z) = \langle y^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) (y - \bar{y})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (4)$$

$$\sigma_{xy}^2(z) = \langle xy \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) (x - \bar{x})(y - \bar{y}) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (5)$$

其中,式(3)、式(4)中的结果分别为 x 轴和 y 轴方向上的光斑半径,基于功率密度分布的中心二阶矩,在沿着该主轴的轴向位置 z 处的束腰横截面中的功率密度分布范围,该主轴分别更靠近实验坐标系的 x 轴和 y 轴。

$$d_{\sigma_x}(z) = 2\sqrt{2} \{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + \gamma [(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4(\sigma_{xy}^2)^2]\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$d_{\sigma_y}(z) = 2\sqrt{2} \{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \gamma [(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4(\sigma_{xy}^2)^2]\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中:

$$\gamma = \text{sgn}(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{|\sigma_x^2 - \sigma_y^2|} \quad (8)$$

当 $\sigma_x^2 \neq \sigma_y^2$, 光束宽度由下式给出:

$$d_{\sigma_x} = 2\sqrt{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2|\sigma_{xy}^2|)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$d_{\sigma_y} = 2\sqrt{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2|\sigma_{xy}^2|)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

通过计算最小与最大光束宽度的比值可以计算出光斑的椭圆度 ε , 当椭圆度大于 0.87 时则认为该

光斑为一个圆形光斑(VCSEL 激光器的椭圆度一般大于 0.87)。光束直径也可由下式给出:

$$d_{\sigma}(z) = 2\sqrt{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

光束直径结合束腰位置就可以确定光斑的发散角,且光束直径随着光束腰部位置的增加而增加,由下式给出:

$$\theta_{\sigma_x} = \lim_{(z-z_{0x}) \rightarrow \infty} \frac{d_{\sigma_x}(z)}{z - z_{0x}} \quad (12)$$

$$\theta_{\sigma_y} = \lim_{(z-z_{0y}) \rightarrow \infty} \frac{d_{\sigma_y}(z)}{z - z_{0y}} \quad (13)$$

最后,由上面所求得的结果可以对光束质量因子 M^2 因子进行计算,求得光束质量因子:

$$M_x^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d_{\sigma_{x0}} \theta_{\sigma_x}}{4} \quad (14)$$

$$M_y^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d_{\sigma_{y0}} \theta_{\sigma_y}}{4} \quad (15)$$

同样,当椭圆度大于 0.87 时光束质量因子也可由下式给出:

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d_{\sigma_0} \theta_{\sigma}}{4} \quad (16)$$

光束质量因子的参数同时包含了远场和近场的特性,能够综合描述光束的品质,具有理想介质传输变换时不变的重要性质,由上式可知,对光束质量因子的测量可以归结为对光束束腰半径和远场光斑发散角的测量。

3 实验结果与分析

实验采用的激光器为 940 nm 波长,砷化镓(GaAs)材料制成,共 305 个发光单元的 VCSEL 激光器,在暗室环境下,移动相机位置并对准 VCSEL 激光器,使其分别在 1 A 和 1.8 A 电流应力的工况下工作,测量其远场光斑发散角大小,标准发散角大小为 18° ,对实验对象的每种电流应力的每种算法进行 10 组数据采集,最后通过对比 $D4\sigma$ 算法与 $1/e^2$ 算法在类拉盖尔-高斯空心圆环下光斑发散角的大小验证实验结果,如图 5 所示。

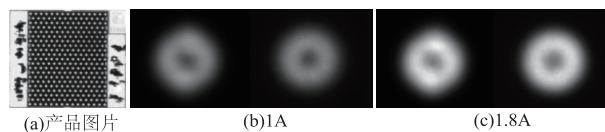


图 5 VCSEL 产品图片及 1 A 和 1.8 A 电流应力下的光斑图像

Fig. 5 VCSEL product diagrams and spot images under 1 A and 1.8 A current stresses

由于本文的研究对象是 VCSEL 激光器的优良品,所以不考虑 VCSEL 激光器在部分单元损坏下工作的情况。由图 6(a)与表 1 的测量结果表明,VCSEL 激光器在 1A 电流应力下使用 $1/e^2$ 算法与 $D4\sigma$ 算法得出的束腰宽度测量出的发散角的测量值最大存在 2.26 % 偏移量,而且测量结果显示, $D4\sigma$ 算法的测量结果要略大于 $1/e^2$ 算法的测量结果,此结果与图 5(b)一致。同样图 6(b)与表 2 的测量结果表明,VCSEL 激光器在 1.8A 电流应力下使用 $1/e^2$ 算法与 $D4\sigma$ 算法得出的束腰宽度测量出的发散角的测量值最大存在 2.30 % 偏移量, $D4\sigma$ 算法的测量结果要略大于 $1/e^2$ 算法的测量结果,此结果与图 5(c)一致;而且在 1.8A 电流应力工况下使用 $1/e^2$ 算法和 $D4\sigma$ 算法测量出的激光器发散角均略大于 VCSEL 激光器标准发散角 18° ,说明 $D4\sigma$ 算法对 VCSEL 激光器发散角大小有一定的检测能力。通过两组电流应力每组有 10 次测量数据的对比也可以说明 $D4\sigma$ 算法在测量 VCSEL 激光器发散角上具有一定的稳定性,所以使用 $D4\sigma$ 算法相较于 $1/e^2$ 算法在测量 VCSEL 激光器发射的激光束为类拉盖尔-高斯空心圆环时更加准确。

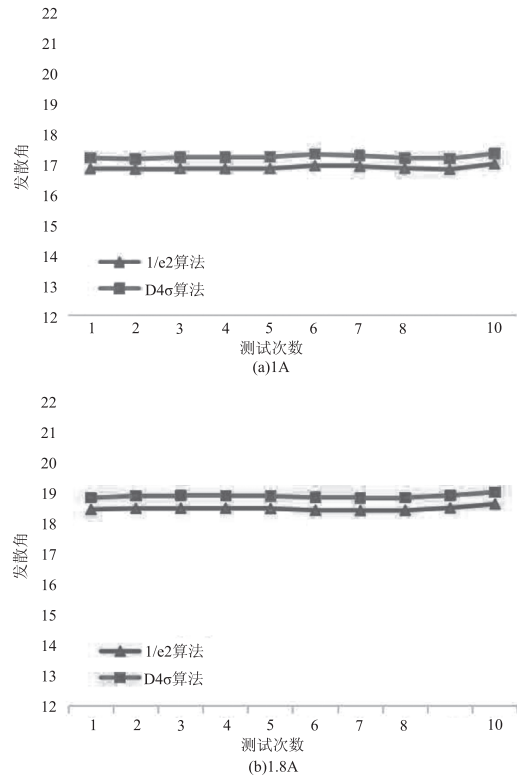


图 6 不同电流应力下连续 5 次发散角测试折线图
Fig.6 Line graph of 10 consecutive divergence angle tests under different current stress

表 1 1 A 电流应力下发散角

Tab.1 Divergence angle under 1A current stress

测试算法	1	2	3	4	5	发散角最大偏移量
$1/e^2$	16.932°	16.905°	16.844°	16.809°	16.991°	
$D4\sigma$	17.304°	17.260°	17.181°	17.162°	17.331°	
测试算法	6	7	8	9	10	发散角最大偏移量
$1/e^2$	16.831°	16.815°	16.835°	16.833°	16.838°	
$D4\sigma$	17.184°	17.151°	17.205°	17.203°	17.220°	

表 2 1.8 A 电流应力下发散角

Tab.2 Divergence angle under 1.8A current stress

测试算法	1	2	3	4	5	发散角最大偏移量
$1/e^2$	18.453°	18.487°	18.492°	18.494°	18.481°	
$D4\sigma$	18.841°	18.894°	18.917°	18.901°	18.887°	
测试算法	6	7	8	9	10	发散角最大偏移量
$1/e^2$	18.427°	18.419°	18.423°	18.503°	18.631°	
$D4\sigma$	18.851°	18.824°	18.846°	18.910°	19.022°	

4 结论

针对目前 VCSEL 激光器在大电流应力下发射出的类拉盖尔-高斯空心圆环光束,传统测量激光

器远场光斑发散角的算法如 $1/e^2$ 、FWHM(半宽全高)等算法在测量这种光束时存在较大偏差,本文根据 ISO 规定的 $D4\sigma$ 算法对该种光束的发散角进

行测量,采用 CCD 摄像方法,将 VCSEL 激光器对准 CCD 摄像头,并通过对采集到的图像进行去灰、减噪等操作,得到干扰更少的图像,再通过功率密度分布一阶矩计算出光斑的质心坐标,以质心坐标为中心再通过功率密度分布的二阶矩计算出光束束腰半径,将光束束腰宽度进行了更准确的定义,分别求出 X 方向和 Y 方向的最大、最小光束宽度并计算其比值,判断光斑是否为圆形光斑。最后,可以用之前求出的光束宽度以及瑞利长度计算出光斑的发散角大小,求出光斑发散角大小后就可以通过发散角的大小和激光器发射光束的波长计算出光束质量因子。实验结果证明 $D4\sigma$ 算法比传统的 $1/e^2$ 算法计算远场光斑发散角有着更高的精确度,其精确度最高提升了 2.30%。本文使用 CCD 摄像法得到了更好的实验结果,因此不需要使用精度更高的光束质量分析仪,大大减低了测试的成本,在测试大数量芯片的测试情况下更为明显。

参考文献:

- [1] Chen Lianghui, Yang Guowen, Liu Yudian. Development of semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 13–31. (in Chinese)
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 13–31.
- [2] Xu Lei. Research on reliability of high speed directly modulated semiconductor laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
徐磊. 高速直接调制半导体激光器的可靠性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [3] Tan Zhongwei, LV Chao. Optical fiber communication technology: present status and prospect [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 100–107. (in Chinese)
谈仲伟, 吕超. 光纤通信技术发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 100–107.
- [4] Zhang Chengdong. Diagnosis and measurement of laser beam quality [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
张成栋. 激光光束质量诊断与测量研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
- [5] Sasnett M. Propagation of multimode laser beams—the M^2 factor [M]. CRC Press, 2020: 132–142.
- [6] M CM, Teboho B, Nokwazi M, et al. Beam quality factor of aberrated Laguerre-Gaussian optical beams [J]. Optics Express, 2023, 31(16).
- [7] Xing Yong, Xing Jichuan, Song Yan. Engineering study on the CCD-based measurement of pulse laser far-field divergence angle [J]. Infrared Technology, 2011, 33(9): 525–529. (in Chinese)
邢勇, 邢冀川, 宋艳. 基于 CCD 的脉冲激光器远场发散角工程化研究 [J]. 红外技术, 2011, 33(9): 525–529.
- [8] Jing Chenrui, Wang Zhaohui, Ma Baohong, et al. Error analysis on measurement of laser divergence angle by Hole-Set method [J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(12): 101–104. (in Chinese)
井晨睿, 王朝晖, 马宝红, 等. 套孔法激光发散角测量误差分析 [J]. 光电与控制, 2020, 27(12): 101–104.
- [9] Ma Jingbo, Li Peng, Zhou Ziheng, et al. Theoretical and experimental study on the measurement of laguerre-gaussian vortex spot size using knife-edge method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1–10. (in Chinese)
马靖博, 李鹏, 周子恒, 等. 刀口法测量拉盖尔-高斯涡旋光斑的理论与实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1–10.
- [10] Seurinjf, Zhoud, 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, Rrss 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] Arshad M K, Noor M M, Manaf A A, et al. Packaging design and thermal analysis for 1 mm² high power VCSEL [J]. Microelectronics International, 2023, 40(1).
- [13] 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): 56–63. (in Chinese)
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): 56–63.
- [14] Wei Nanping, Zhang Xiangwu. Re-cognition of knife-edge method measuring of He-Ne laser beam divergence angle [J]. Physical Experiment Of College, 2015, 28(4): 78–80. (in Chinese)
魏奶萍, 张相武. 刀口法测量 He-Ne 激光束发散角实验的再认识 [J]. 大学物理实验, 2015, 28(4): 78–80.
- [15] Shi Kai, Su Junhong, Yang Lihong, et al. A convenient method for testing laser beam parameters [J]. Optical Instruments, 2018, 40(2): 1–5. (in Chinese)
时凯, 苏俊宏, 杨利红, 等. 一种激光束形参数简便测

- 试方法[J]. 光学仪器,2018,40(2):1-5.
- [16] Liu Ruoxian,Zhao Shiyuan,Gu Yiyang,et al. Design of fiber array collimator and measurement of its divergence angle[J]. Optics Precision Engineering, 2023, 31(1): 89-98. (in Chinese)
刘若仙,赵士元,谷一英,等. 光纤阵列准直器设计及其发散角测量[J]. 光学精密工程,2023,31(1):89-98.
- [17] UNE-EN ISO 11146-1-2021 Lasers and laser-related equipment-test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios-part 1: stigmatic and simple astigmatic beams[S]. ISO 11146-1,2021.
- [18] Yu Lei. The application of near-field optics in laser[D]. Hefei:Anhui University,2006. (in Chinese)
余雷. 近场光在激光器中的应用[D]. 合肥:安徽大学,2006.
- [19] Fei Xiang,Lin Zhang,Tao Chen,et al. Transverse propagation characteristics and coherent effect of Gaussian beams[J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(6): 21-25.
- [20] BSPD ISO/TR 11146-3-2004. Lasers and laser-related equipment. test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods[S]. ISO 11146-3,2004.
- [21] Lu Miaoxia. Investigation of noise generated by imaging devices in CCD type[J]. Modern Electronics Technique, 2010,33(10):178-180,183. (in Chinese)
陆苗霞. CCD 类成像器件的噪声研究[J]. 现代电子技术,2010,33(10):178-180,183.
- [22] Zhong Hairong,Liu Tianhua,Lu Qisheng,et al. Review on the laser-induced damage mechanism study of photoelectric detectors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000,(4):423-428. (in Chinese)
钟海荣,刘天华,陆启生,等. 激光对光电探测器的破坏机理研究综述[J]. 强激光与粒子束,2000,(4):423-428.
- [23] Liu Chang'an,Chen Jinbao,Ma Jinlong,et al. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser[J]. High Power Laser and Particle Beams,2010,22(8):1727-1730. (in Chinese)
刘长安,陈金宝,马金龙,等. 红外激光对可见光 CCD 成像系统的干扰[J]. 强激光与粒子束,2010,22(8):1727-1730.
- [24] Zhang Haizhuang,Meng Zhiyong,Ding Shuai,et al. Laser spot image acquisition method by using CCD camera method[J]. Optics & Optoelectronic Technology,2013,11(5):33-35,61. (in Chinese)
张海庄,孟智勇,丁帅,等. CCD 摄像法采集激光光斑图像方法研究[J]. 光学与光电技术,2013,11(5):33-35,61.