

二元振幅调制的单次曝光光束质量分析技术研究

何思源^{1,2,3}, 潘兴臣^{1,2*}, 刘诚^{1,2}, 朱健强^{1,2}¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;²中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光光束质量因子(M^2)是全面表征激光光束质量的一个技术评价指标。提出了一种基于振幅调制的 M^2 测量方法,该方法通过记录单幅激光光斑就可以利用迭代计算重建光束的复振幅;进而根据标量衍射理论,可以得到沿光束传输方向任意截面位置的光束强度分布;最后由二阶矩和双曲线拟合方法计算 M^2 因子。模拟和实验验证了所提方法的有效性,且该实验技术简单、快速,不需要复杂的机械扫描结构,适用于脉冲激光光束质量的测量。

关键词 激光技术; 相干振幅调制成像; 图像重建; 二阶矩拟合; M^2 因子

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1705003

1 引言

在激光应用中,光束的传播特性直接影响应用质量,为了更好地评价激光束质量,人们提出了多种测定激光光束质量的标准,如激光光束质量因子(M^2)^[1]或其倒数光束传输因子(K)^[2-3]、衍射极限倍数因子(β)^[4]、桶中功率比(BQ)^[5]、斯特列尔比(S_R)^[6-7]。在表征激光束质量的各种方法中,Siegman^[8]引入的 M^2 因子已经成为普遍接受的标准, M^2 因子为实际光束和理想光束的空间束宽积的比值^[9],可以证明激光通过理想无像差、无穷大孔径的光学系统时,虽然束腰直径或远场发散角发生变化,但 M^2 因子是束腰直径和远场发散角的乘积,不会随光学系统变化而发生变化^[10-11]。因此,使用 M^2 因子比仅用聚焦光斑尺寸或发散角衡量光束质量更为严格且全面一些。 M^2 因子代表性测量方法有刀口扫描法^[12]、阵列探测法^[13]等,但这些方法的测量过程较慢且需要多次捕捉,对光束的稳定性有很高的要求,但脉冲光束,如高功率驱动器输出的激光^[14],具有一定的不稳定性,因此需要简单的脉冲激光束质量测量方法。

为了实现对瞬态或动态激光过程更快更详细的分析,研究人员提出并发展了几种激光束表征测量的方法。例如,Akondi 等^[15]基于 Shack-Hartmann 波前传感器开发了一种快速而简单的方法来确定 M^2 因子,但该方法对多模光束的测量结果是不准确的。Du 等^[16]提出了一种基于马赫-曾德尔自参照干涉仪波前传感器的振幅和相位重构实时确定 M^2 因子的新方法,该方法操作简单,且不需要移动部件,适用于动态激光光束质量的表征,但对实验环境的稳定性有很高的要求,此外,该传感器的灵敏度和动态范围主要受到亚孔径数目和微透镜焦距的限制。Merx 等^[17]提出了一种基于强度传递方程(TIE)的非迭代解表征相干激光束的新方法,该方法将恢复的相位分解为激光沿着光轴方向傍轴传播的径向基函数,从而可以在不需要初始猜测的情况下,通过最小二乘拟合得到相位的直接解,这种方法对 TIE 直接进行求解,因此可以比其他实时测定方法更快速预测 M^2 因子。卷积神经网络(CNN)是近些年的热点技术,An 等^[18]将 CNN 和光束分析相结合,通过模拟近场波束数据计算 M^2 因子,对 M^2 因子数据集进行深度 CNN 训练,只需 5 ms 即可实

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-02; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61827816,11875308,61675215)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180024)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA25020306,XDA25020105)、上海市“科技创新行动计划”(19142202600)、国家青年科学基金(61905259)

通信作者: *xchpan@siom.ac.cn

现波束模式的预估。

基于振幅编码的相干调制成像(CAMI)算法^[19]利用一块二元随机振幅板对待测波前进行振幅调制,只需要单幅衍射光斑就可以通过迭代计算实现对待测波前复振幅的快速重建,利用标量衍射理论进行数值反演后,可以计算得到任意平面的光强分布,进而采用标准的光束质量分析算法计算相应的光束参数。由于采用的振幅调制结构不需要标定,理论上适用于任何波长,因此相较于现有方法,结构更加简单,适用于单次曝光测量,理论上可以作为一种全新的光束质量分析技术。本文首次将 CAMI 算法用于解决脉冲光束的测量问题,并通过模拟计算和实验对该算法可行性进行了验证。

2 基本原理与测量方法

2.1 CAMI 算法原理

图 1 为 CAMI 基本光路示意图,主要由会聚透镜、调制器及记录衍射光斑的探测器组成。其中波前调制板是实现单次曝光下相位恢复的关键,频谱越宽,收敛性越好。同时需要考虑实际加工能力和对不同波长光场的适用性,因此 CAMI 算法中调制器为纯振幅型的随机调制板,由微米量级宽度的方形基元随机排布而成,典型结构如图 1 所示,其中黑色区域不透光,振幅透过率为 0,白色区域透光,对应的振幅透过率为 1。所采用的振幅调制板可以为镀铬的掩模板,考虑到目前亚微米量级的加工精度

较为容易获得,同时考虑到振幅板上照明光直径通常在毫米量级,因此如果忽略掩模板基板带来的相位常数因子,可以将掩模板设计值作为其实际分布而不需要额外标定。由于纯振幅板是一种弱调制结构,因此具备很强的零级透射光,在光斑探测器动态范围有限且不饱和的情况下,极其重要但较弱的高频衍射光将会淹没在背景噪声中,进而导致不收敛。为避免上述问题所带来的影响,CAMI 将光斑探测器放置于会聚透镜的焦平面处,同时让零级光饱和,如图 1 所示,其中心亮点白色区域为饱和点,此时较弱的高频信息可以以大于背景噪声的强度被记录到,基于衍射过程的卷积特性^[20],中心饱和区域丢失的强度信息在迭代过程中也可以同时恢复。经会聚透镜会聚后的光场经过随机振幅调制板调制后,出射光传播距离 L 后,由光斑探测器记录到一幅强度图 I ,迭代过程如图 2 所示。

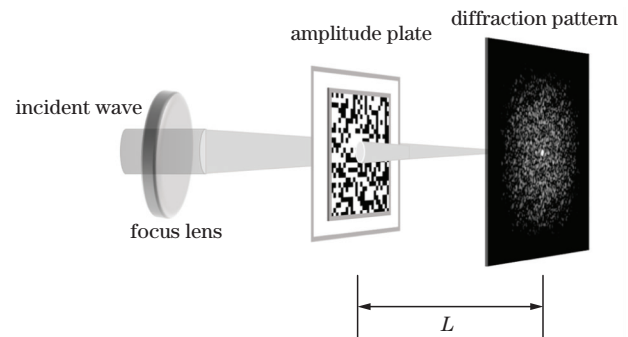


图 1 CAMI 算法基本光路示意图

Fig. 1 Basic optical path diagram of CAMI algorithm

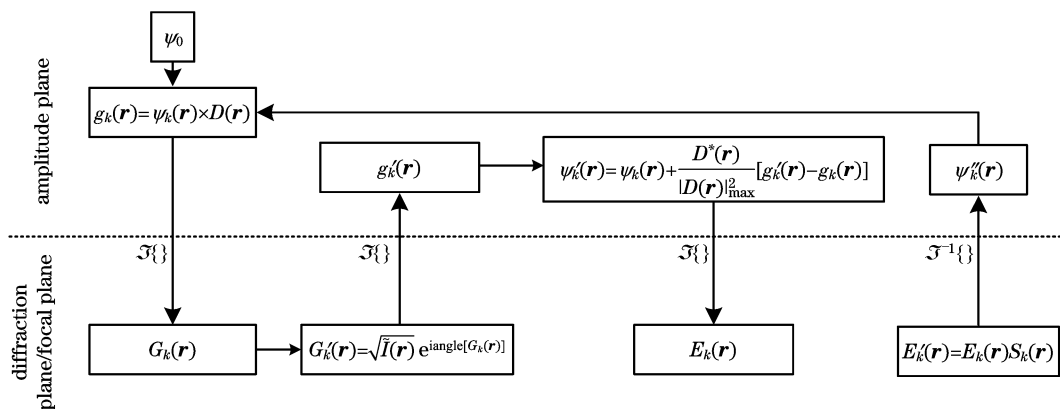


图 2 波前重建算法流程图

Fig. 2 Flow chart of wavefront reconstruction algorithm

假设振幅板的分布 $D(\mathbf{r})$ 已知,振幅板照明光和计算得到的光斑探测面衍射光斑分别为 $\psi_k(\mathbf{r})$ 和 $G_k(\mathbf{r})$,其中 k 表示第 k 次迭代过程, $\mathbf{r} = (x, y)$ 表示空间坐标。迭代算法包括三个平面:振幅调制面、光斑记录面和焦平面。其中焦平面和光斑记录面重合,当无振幅调制板时,待测光束经过会聚透镜后聚

焦在透镜后焦面,因此 CAMI 算法中的空间限制选在能量集中的焦平面也即光斑记录面上。振幅板面待测波前随机初始猜测为 $\psi_0(\mathbf{r})$,第 k 次迭代过程如下。

1) $\psi_k(\mathbf{r})$ 乘以振幅板分布 $D(\mathbf{r})$,得到振幅板的出射光为

$$g_k(\mathbf{r}) = \psi_k(\mathbf{r}) \times D(\mathbf{r}). \quad (1)$$

出射光沿着 z 轴传输距离 L 到探测器平面, 得到

$$G_k(\mathbf{r}) = \mathfrak{S}\{g_k(\mathbf{r}), L\}, \quad (2)$$

式中: $\mathfrak{S}\{\}$ 表示正向传播过程。重建得到的光强 $|G_k|^2$ 和实际记录的光强 I 误差为

$$E_{\text{error}}(k) = \sqrt{\sum (|G_k|^2 - I)^2 / \sum I^2}. \quad (3)$$

2) 保持相位不变, 利用实际记录的光斑对振幅进行更新, 同时保持饱和区域不更新, 即

$$G'_k(\mathbf{r}) = \sqrt{\tilde{I}(\mathbf{r})} \exp\{i \text{angle}[G_k(\mathbf{r})]\}, \quad (4)$$

式中: $\text{angle}[\cdot]$ 表示取相位; $\tilde{I}(\mathbf{r}) = \begin{cases} I(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \notin \mathbf{A} \\ |G_k(\mathbf{r})|^2, & \mathbf{r} \in \mathbf{A} \end{cases}$, 其中 \mathbf{A} 表示光斑饱和的点。

3) 将 $G'_k(\mathbf{r})$ 逆传播到振幅调制面, 得到更新后的出射光为

$$g'_k(\mathbf{r}) = \mathfrak{S}^{-1}\{G'_k(\mathbf{r}), L\}, \quad (5)$$

式中: $\mathfrak{S}^{-1}\{\}$ 表示逆向传播过程。修正后的振幅板照明光为

$$\psi'_k(\mathbf{r}) = \psi_k(\mathbf{r}) + \frac{D^*(\mathbf{r})}{|D(\mathbf{r})|_{\max}^2} [g'_k(\mathbf{r}) - g_k(\mathbf{r})]. \quad (6)$$

4) $\psi'_k(\mathbf{r})$ 正向传播到光斑探测器面, 得到

$$E_k(\mathbf{r}) = \mathfrak{S}\{\psi'_k(\mathbf{r}), L\}, \quad (7)$$

式中: $E_k(\mathbf{r})$ 为重建得到的光斑探测器面波前复振幅。并进行空间约束, 得到更新后的结果为

$$E'_k(\mathbf{r}) = E_k(\mathbf{r}) S_k(\mathbf{r}), \quad (8)$$

式中: $S_k(\mathbf{r})$ 为半径随迭代次数 k 增加逐步增加的孔函数, 孔中心为零级直透光中心。

5) $E'_k(\mathbf{r})$ 逆向传播到振幅板面, 得到更新的振幅板照明光为

$$\psi''_k(\mathbf{r}) = \mathfrak{S}^{-1}\{E'_k(\mathbf{r}), L\}, \quad (9)$$

同时将 $\psi''_k(\mathbf{r})$ 作为下一次迭代的初始值 $\psi_{k+1}(\mathbf{r})$ 。

6) 重复步骤 1)~5), 直至 $E_{\text{error}}(k)$ 足够小或者基本不变。

2.2 测量光束质量因子 M^2

光束 M^2 因子描述了激光能量的空间分布, 目前常用的测量方法是, 首先对不同位置的光束宽度进行测量, 然后对得到的束宽数据进行双曲线拟合, 最后根据拟合曲线参数来计算 M^2 因子。经过 CAMI 单次曝光得到待测光束的复振幅分布 $\psi(x, y, 0)$ 后, 根据角谱衍射理论可计算出光束传播距离 z 后的复振幅分布, 计算公式为

$$\psi(x, y, z) = \text{FFT}^{-1} [\Psi(f_x, f_y) H(f_x, f_y)], \quad (10)$$

式中: $\text{FFT}^{-1}(\cdot)$ 为快速傅里叶逆变换; $H(f_x, f_y)$ 为基于角谱理论的光场传播函数; 重建复振幅的频谱 $\Psi(f_x, f_y) = \text{FFT}[\psi(x, y, 0)] \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} z\right]$, 其中 $\text{FFT}(\cdot)$ 为快速傅里叶变换。

根据光束质量分析国标 ISO50254-001, 对于光束横截面上任意分布的实际光束, 用光束强度分布的二阶矩表示束宽, 光束横截面上强度分布二阶矩为

$$\omega_x^2 = \frac{\iint I(x, y)(x - \bar{x})^2 dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} = \frac{\iint \psi(x, y) \psi^*(x, y)(x - \bar{x})^2 dx dy}{\iint \psi(x, y) \psi^*(x, y) dx dy}, \quad (11)$$

$$\omega_y^2 = \frac{\iint I(x, y)(y - \bar{y})^2 dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} = \frac{\iint \psi(x, y) \psi^*(x, y)(y - \bar{y})^2 dx dy}{\iint \psi(x, y) \psi^*(x, y) dx dy}. \quad (12)$$

当以原点作为光强重心时, 光强一阶矩 \bar{x}, \bar{y} 均为 0, 光束束宽的变化遵循传输方程

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z - L_0)^2 / Z_0^2}, \quad (13)$$

式中: ω_0 为束腰宽度; L_0 为瑞利长度; Z_0 为束腰位置。(13)式改写成多项式形式:

$$\omega^2 = Cz^2 + Bz + A, \quad (14)$$

式中: A, B, C 均是测量的多组数据经过双曲线拟合求出的系数。求出 A, B, C 后, 即可由相应换算关系求得光束衍射极限倍数 M^2 、束腰宽度 ω_0 、瑞利长度 L_0 、远场发散角 θ 和束腰位置 Z_0 , 具体换算关系为

$$\begin{cases} M^2 = \frac{\pi}{8\lambda} \sqrt{4AC - B^2} \\ \omega_0^2 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \\ L_0 = \frac{1}{2A} \sqrt{4AC - B^2} \\ \theta = \sqrt{C} \\ Z_0 = -\frac{B}{2C} \end{cases} \quad (15)$$

3 模拟验证

首先对 CAMI 算法求解光场参数的可行性进行了模拟验证,所采用的光路示意图如图 1 所示。假定待测光场为理想高斯光束,入射高斯光波长为 351 nm;光束束腰位于光斑探测器平面;采用的探测器像素尺寸为 $3 \mu\text{m}$,位数为 8 bit;计算矩阵为 2048×2048 ,像素尺寸为 $3 \mu\text{m}$,振幅板照明光分布如图 3(a)所示。在不考虑噪声和部分饱和处理情况下,光斑探测器面记录的光强如图 3(b)所示,强度范围为 $0 \sim 255$,根据右上角像素值变化曲线可以看出,此时由于中心零级直透光较强,高频信息对比度极低,其对应的随机振幅调制板最小的单元尺寸为 $12 \mu\text{m}$,位于光束束腰前 20 mm 处。振幅透过率 $0 \sim 1$ 二元随机分布,如图 3(c)所示。

为模拟部分饱和过程,将强度值大于 255 的点强制设置为 255,同时为模拟光斑探测器的量化过程,将图 3(e)的衍射光斑量化为 $0 \sim 255$ 的整数,量化后的衍射光斑记为 I_0 ,并用其进行迭代计

算。在实际应用中,记录的衍射图样不可避免地受到多种误差的影响,除了饱和误差外,在仿真中还考虑了两种附加误差:均匀分布的随机背景噪声 ($0 \sim 1$) 和量化噪声。探测器实际记录的衍射光斑为

$$I(\mathbf{r}) = \begin{cases} \text{round}[I_0(\mathbf{r}) + R_{\text{rand}}(\mathbf{r})] & , I_0 < 255 \\ 255 & , I_0 \geq 255 \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $\text{round}[\cdot]$ 表示取整数; $R_{\text{rand}}(\cdot)$ 为 $0 \sim 1$ 的随机数。处理后的衍射光斑如图 3(e)所示,其中方框区域为饱和区域,中心饱和区域像素数量为 69,此时可以明显看到高频调制信息。对入射光场进行迭代计算,经过 100 次迭代计算后,重建得到的振幅板所在平面的高斯光强度和相位如图 3(d)所示,两者误差初始为 1,迭代完成后变为 0.0045,即在存在量化噪声、背景噪声和饱和噪声的条件下,可以对入射光场进行有效重建,重建得到的衍射光斑强度如图 3(f)所示。其中图 3(b)右上角、图 3(e)(f)右下角插图横坐标为像素,纵坐标为强度值。

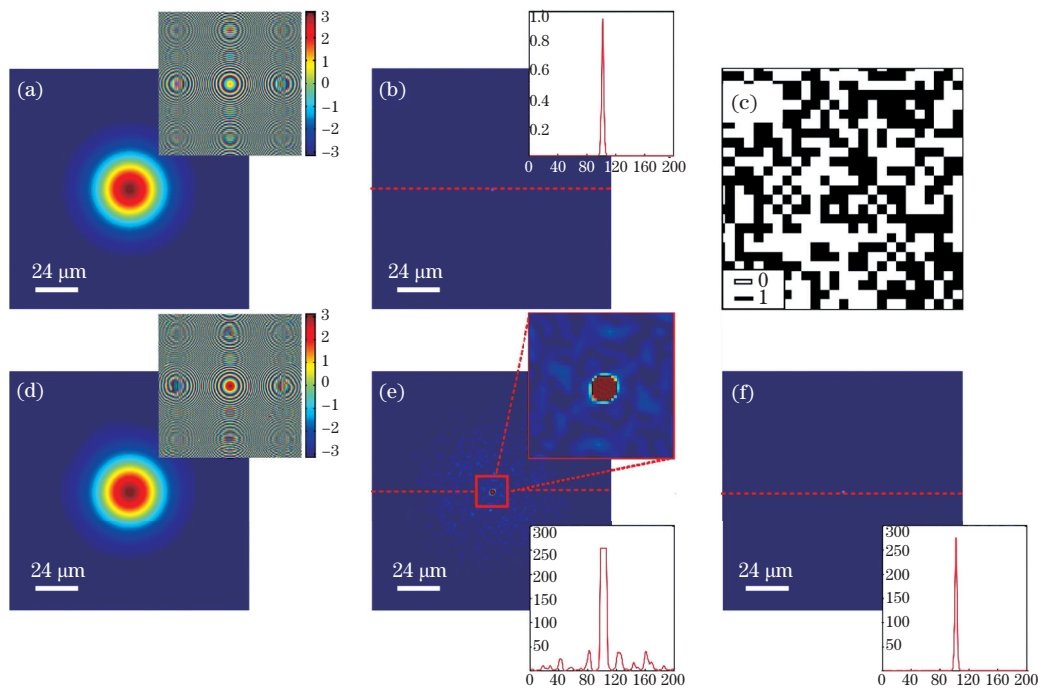


图 3 模拟实验。(a)调制板上照明光振幅和相位;(b)不饱和衍射光斑图,右上角为虚线处像素值曲线;(c)调制板强度分布图;(d)CAMI 重建照明光振幅和相位;(e)饱和处理后的衍射光斑图,右上角为中心区域放大图,右下角为横向虚线处像素值曲线;(f)重建衍射光斑图,右下角为虚线处像素值曲线

Fig. 3 Simulation experiment. (a) Amplitude and phase of the incident wave on the modulation board; (b) unsaturated diffraction spot pattern, the upper right corner is the pixel curve at the dashed line; (c) intensity map of the modulation plate; (d) amplitude and phase of the incident wave reconstructed by CAMI; (e) diffraction spot pattern after saturation treatment, the upper right corner is the enlarged view of the central area, the lower right corner is the pixel curve at the dashed line; (f) reconstructed diffraction spot pattern, the lower right corner is the pixel curve at the dashed line

对 CAMI 算法恢复得到的振幅板入射光波前分布进行角谱传输,图 4(b)~(f)5 幅光斑从左到右分别表示距离 CCD 记录面 $-20, -10, 0, 10, 20$ mm 处

的波前分布对比,其中虚线上半部分为真实波前,下半部分为 CAMI 迭代 100 次后的恢复结果,可以明显观察到,CAMI 算法精准地将待测波前恢复出来了。

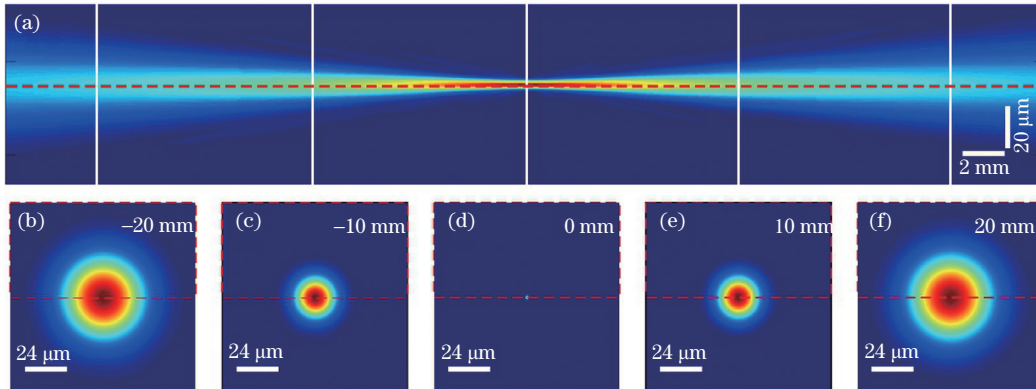


图 4 重建结果图。(a) $x-z$ 面波前强度图;(b)~(f)距离调制板分别为 $-20, -10, 0, 10, 20$ mm 处 $x-y$ 面光束振幅图
Fig. 4 Reconstructed results. (a) Intensity of wavefront on plane $x-z$; (b)~(f) beam amplitude diagram on plane $x-y$ at $-20, -10, 0, 10, 20$ mm away from modulation plate

为计算 M^2 因子等光场参数,以步长 0.006 mm 为间隔,计算并获得 20000 个位置处的光强分布,利用 2.2 节描述的计算方法对光束参数进行计算,可获得衍射极限倍数 M^2 、束腰宽度 ω_0 、瑞利长度 L_0 、远场发散角 θ 和束腰位置 Z_0 参数。由于在模拟验证中采用的照明光束为理想高斯光,光束束腰直径为 $6 \mu\text{m}$,基模束腰位于随机振幅调制板后 20 mm 处,水平方向和垂直方向的 M^2 因子相同,重建得到 $M_x^2 = 1.005, M_y^2 = 1.004, Z_{0x} = Z_{0y} = 20$ mm, $\omega_{0x} = \omega_{0y} = 6.0527 \mu\text{m}, L_{0x} = 7.3402 \times 10^2 \mu\text{m}, L_{0y} = 7.4027 \times 10^2 \mu\text{m}, \theta_x = \theta_y = 8.2$ mrad,而实际的参数为 $M_x^2 = 1.000, M_y^2 = 1.000, Z_{0x} = Z_{0y} = 20$ mm, $\omega_{0x} = \omega_{0y} = 6.0 \mu\text{m}, L_{0x} = L_{0y} = 7.2493 \times 10^2 \mu\text{m}, \theta_x = \theta_y = 8.3$ mrad,对应的误差量分别为 $0.50\%, 0.40\%, 0\%, 0.88\%, 1.25\%, 2.12\%, 1.22\%$,因此在存在误差的情况下,所提方法依然可以对光束质量进行有效测量,可行性得到验证。

4 实验验证

为进一步验证所提方法的可行性,利用图 1 所示的 CAMI 光路对 He-Ne 激光进行实际测量。入射光波长为 632.8 nm;所采用的振幅板如图 5(a)所示,透过率以 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 基元为单位随机排布,忽略振幅板面型误差和石英基底的吸收,透过率认为是 1 或 0,相位为常数;CCD(型号 AVT-F1100b)的像元尺寸为 $9 \mu\text{m}$,光斑记录位数为 8 bit,分辨率为 $4008(\text{H}) \times 2672(\text{V})$;随机振幅调制板最小的单元尺寸为 $18 \mu\text{m}$,采用的探测器像素尺寸为 $9 \mu\text{m}$,

位数为 8 bit。记录的衍射光斑如图 5(b)所示,采用 Ophir-Spiricon 光束质量分析仪(型号 BSQ-SP920)对光束进行测量验证,光束质量分析仪记录的振幅板面波前分布如图 5(c)所示。而经过 300 次迭代后,利用波前重建算法重建得到振幅板面振幅分布如图 5(d)所示。图 5(c)、(d)的结果进一步验证所

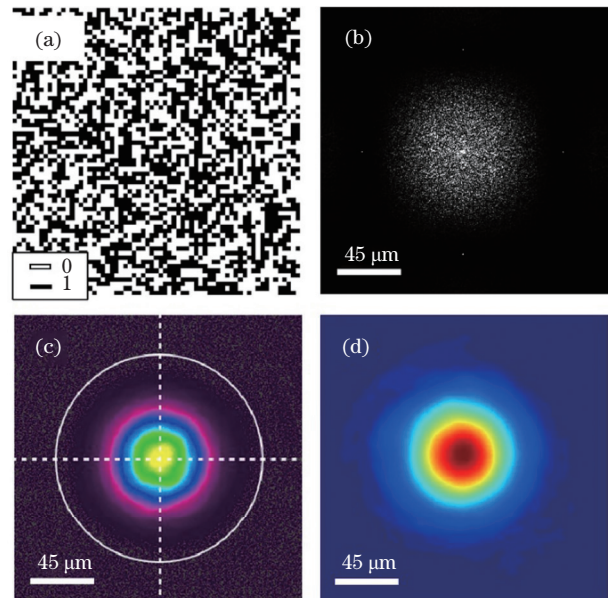


图 5 He-Ne 激光测量。(a) 振幅板分布;(b) 实验记录的衍射光斑;(c) 振幅板面波前分布;(d) 重建振幅板照明光振幅
Fig. 5 Measurement of the He-Ne laser. (a) Amplitude plate distribution; (b) diffraction shot recorded experimentally; (c) wavefront distribution of amplitude plate; (d) reconstructed illumination amplitude of amplitude plate

提方法的有效性。

由于两套装置采用的透镜焦距各不相同,成像面也不相同,因此图 5(c)、(d)的空间分布有所差异,没有对比由焦距决定的参数,如束腰、发散角等,仅对比了 M^2 因子。Ophir-Spiricon 光束质量分析仪测量 He-Ne 激光器出射光,得到的质量因子为 $M_x^2=1.044, M_y^2=1.042$; 采用 CAMI 算法对相同 He-Ne 激光器出射光进行光束质量测量,计算得到的质量因子为 $M_x^2=1.090, M_y^2=1.044$, x 方向和 y 方向的相对误差分别为 4% 和 0.2%。由于两套测量方案在一些细节处理、硬件性能和算法优化等方面存在差异,该误差属于可接受范围。

5 脉冲光测量

经可行性实验验证后,利用 CAMI 算法对 351 nm 脉冲光束进行了实际测量。基于 CAMI 算法实现脉冲测量的基本光路如图 6(a) 所示,该光路主要包括倍频晶体、CCD、随机振幅板和会聚透镜。1053 nm 脉冲光依次经过倍频晶体和三倍频晶体后

转换为 351 nm 脉冲光,脉宽为 3 ns,利用滤光片滤除 1053 nm 和 526.5 nm 激光后,剩余的三倍频 351 nm 激光经过透镜,再经过振幅调制板到达 CCD,为减小饱和区域面积,CCD 位于束腰附近。所采用的振幅板和 CCD 均与 He-Ne 激光测量实验中的相同,记录的衍射光斑如图 6(b) 所示,中心区域为过饱和区域,通过迭代计算可以重建得到饱和区域丢失的强度信息。

经过 300 次迭代后,衍射光斑饱和区域得到恢复,如图 6(c) 所示,左下角区域为重建衍射光斑强光图,右上角为重建衍射光强的对数结果,可以看出衍射光斑的饱和区域可以在 CAMI 重建过程完全恢复出来。振幅板面重建得到的振幅和相位如图 6(d) 和图 6(e) 所示。通过波前反演,可以计算得到其他沿光轴方向垂直截面的光强分布,如图 7(a)~(e) 所示。对不同位置处截面的二维光强进行三维重组,得到入射光束的三维分布,如图 7(f)~(h) 所示。光束束宽沿着光束传输方向按双曲线规律向外扩展,由多组光强数据拟合出该双曲线的系数,从而计算得到光束质量因子为 $M_x^2=1.4746, M_y^2=1.2101$ 。

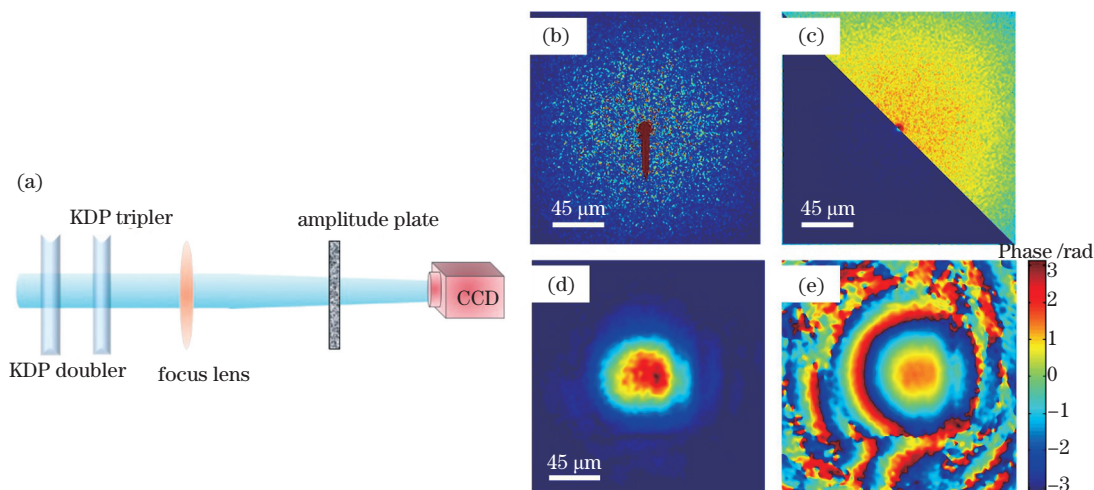


图 6 脉冲光测量实验。(a) CAMI 测量光路; (b) 实验记录的单幅衍射光斑; (c) 恢复衍射光斑图; (d) 重建振幅板照明光振幅; (e) 重建振幅板照明光相位

Fig. 6 Pulsed light measurement experiment. (a) Measurement optical path of CAMI; (b) single diffraction shot recorded experimentally; (c) recovered diffraction spot pattern; (d) reconstructed illumination amplitude of amplitude plate; (e) reconstructed illumination phase of amplitude plate

CAMI 单次曝光实时复振幅重建法不仅能够测定激光束 M^2 质量因子,还能确定其他质量评价参数,将 M^2 质量因子与其他质量评价参数相结合,多方位多维度地评价激光质量的好坏,表 1 为 CAMI 单次曝光实验测得的参量。

表 1 激光质量评价参数

Table 1 Laser quality evaluation parameter		
Parameter	Horizontal	Vertical
M^2	1.4746	1.2101
$\omega/\mu\text{m}$	239.3	227.2
$L_0/\mu\text{m}$	3.63×10^5	3.57×10^5
θ/mrad	2.8	2.4
Z_0/mm	86.9	95.5

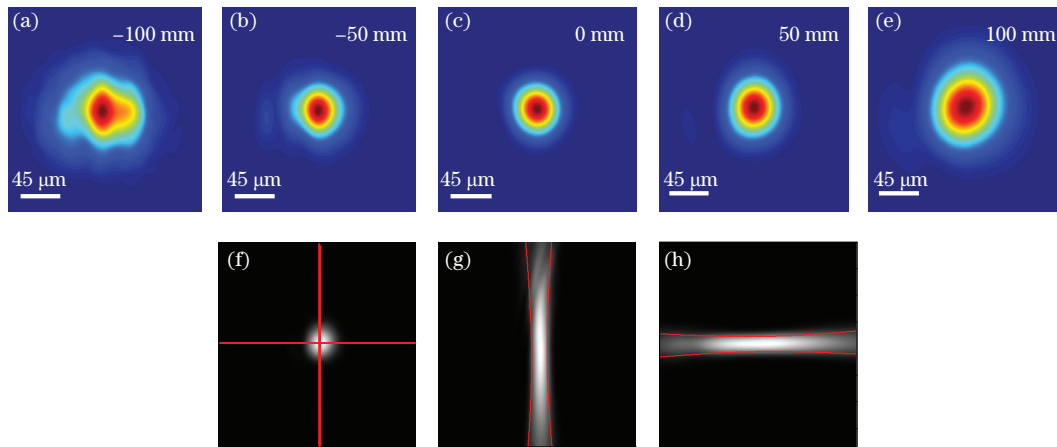


图 7 重建结果。(a)~(e)距调制板分别-100,-50,0,50,100 mm 处 $x-y$ 面光束重建结果；(f)~(h) $x-y$ 面、 $x-z$ 面、 $y-z$ 面高斯光束重建结果分布图

Fig.7 Reconstruction results. (a)-(e)Reconstructed incident wave amplitude results on plane $x-y$ at $-100, -50, 0, 50, 100$ mm away from modulation plate; (f)-(h) $x-y$ plane, $x-z$ plane, $y-z$ plane Gaussian wave reconstruction results

6 结 论

所提基于相干调制成像 CAMI 算法的实时复振幅重建法测定激光束 M^2 质量因子时采用 CCD 作为图像传感器对激光束分布直接探测,通过数值计算得到不同位置处的波前分布,激光光束测量以二阶矩理论为依据,用传播轨迹曲线拟合方法对 M^2 因子进行测量。所提方法与传统的通过移动 CCD 来获得不同位置波阵面分布的方法相比,实现了更方便、更快捷的自动测量,可以精确地获得激光光束波前分布信息。模拟和实验证明了所提方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Cortés R, Villagómez R, Coello V, et al. Laser beam quality factor (M^2) measured by distorted fresnel zone plates[J]. Revista Mexicana de Física, 2008, 54 (4): 279-283.
- [2] Siegman A E. Defining, measuring, and optimizing laser beam quality[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1868: 2-12.
- [3] Wang H B, He B, Yang Y F, et al. Beam quality improvement of coherent beam combining by gradient power distribution hexagonal tiled-aperture large laser array [J]. Optical Engineering, 2019, 58 (6): 066105.
- [4] Jia S C. Research on the measurement of laser beam quality parameters [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
贾少春. 激光光束质量评价参数测量技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [5] Huang Z L, Guo J, Fu Y Y. Various methods for evaluating laser beam quality [J]. Laser Journal, 2004, 25(3): 1-3.
黄忠伦, 郭劲, 付有余. 评价激光光束质量的各种方法[J]. 激光杂志, 2004, 25(3): 1-3.
- [6] Andrews L C, Phillips R L, Sasiela R J, et al. Strehl ratio and scintillation theory for uplink Gaussian-beam waves: beam wander effects [J]. Optical Engineering, 2006, 45(7): 076001.
- [7] Mahajan V N. Strehl ratio of a Gaussian beam [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(9): 1824-1833.
- [8] Siegman A E. New developments in laser resonators [J]. Optical Resonators, 1990, 1224: 2-14.
- [9] Meng L Q, Huang Z Q, Han Z G, et al. Simulation and experiment studies of aberration effects on the measurement of laser beam quality factor (M^2) [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 100: 226-233.
- [10] Scholes S, Forbes A. Improving the beam quality factor (M^2) by phase-only reshaping of structured light [J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3753-3756.
- [11] Jing W B, Luo Q, Liu P, et al. Measurement of laser beam quality by non-equidistant and bidirectional propagation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1205002.
景文博, 罗秦, 刘鹏, 等. 基于激光光场非等距双向传播的光束质量测量[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1205002.
- [12] Liu P F, Yan J, Hao H, et al. Phase retrieval for short wavelength orbital angular momentum beams using knife-edge diffraction [J]. Optics Communications, 2020, 474: 126077.
- [13] Zhang Y M, Li Y L, Gu X K, et al. Research on measurement of laser beam M^2 factor based on

- LabVIEW[J]. *Optik*, 2020, 203: 163759.
- [14] Zhao B Y, Jing H Q, Zhong L, et al. Improving slow-axis laser beam quality of semiconductor laser with edge adiabatic package[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0105002.
赵碧瑶, 井红旗, 仲莉, 等. 半导体激光器边缘绝热封装改善慢轴光束质量[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0105002.
- [15] Akondi V, Akondi V, Vohnsen B. Myopic aberrations: impact of centroiding noise in Hartmann Shack wavefront sensing[J]. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 2013, 33(4): 434-443.
- [16] Du Y Z, Fu Y Q, Zheng L X. Complex amplitude reconstruction for dynamic beam quality M^2 factor measurement with self-referencing interferometer wavefront sensor[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(36): 10180-10186.
- [17] Merx S, Stock J, Widiasari F R, et al. Beam characterization by phase retrieval solving the transport-of-intensity-equation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20898-20907.
- [18] An Y, Li J, Huang L J, et al. Deep learning enabled superfast and accurate M^2 evaluation for fiber beams[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18683-18694.
- [19] Pan X C, Liu C, Zhu J Q. Coherent amplitude modulation imaging based on partially saturated diffraction pattern[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21929-21938.
- [20] Hoppe W. Beugung im inhomogenen primärstrahlwellenfeld. i. prinzip einer phasenmessung von elektronenbeugungsinterferenzen[J]. *Acta Crystallographica Section A*, 1969, 25(4): 495-501.

Single Exposure Beam Quality Analysis Technique with Binary Amplitude Modulation

He Siyuan^{1,2,3}, Pan Xingchen^{1,2*}, Liu Cheng^{1,2}, Zhu Jianqiang^{1,2}

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²National Laboratory on High Power Laser and Physics, China Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective In laser applications, the propagation characteristics of the beam directly affect its application quality. Accordingly, various standards for measuring the laser beam quality have been proposed to better evaluate the laser beam quality. The laser beam quality factor M^2 is the product of the beam waist diameter and the far-field divergence angle, which does not change with the optical system. Therefore, using M^2 for the beam quality measurement is stricter and more comprehensive. The representative measurement methods of the M^2 factor are knife-edge and array detection, among others. However, the measurement process of these methods is slow and requires multiple captures, exhibiting high requirements on the beam stability. A pulsed beam (e.g., laser output from a high-power driver) shows a certain degree of instability; hence, a simple pulsed beam quality measurement method is required.

Methods The algorithm of coherent modulation imaging based on amplitude coding (CAMI), which uses a binary random amplitude plate to modulate the incident beam. A single-shot method based on coherent modulation imaging is presented for the measuring of the beam quality. The laser beam to be measured first illuminates a highly random phase plate with a known structure and subsequently the intensity of the resulting diffraction pattern is recorded by a charge-coupled device positioned behind the phase plate. Intensity distribution of the laser beam is accurately reconstructed with the coherent modulation imaging method, then the scalar diffraction theory is used to perform numerical inversion, the beam intensity distribution of any plane can be obtained by calculation. According to the standard beam quality analysis algorithm, the quality of the laser beam is calculated. In addition, since the CAMI method adopts an amplitude modulation structure and does not require calibration, in theory, this method is applicable to any wavelength. Therefore, compared with the existing method, the structure is simpler, suitable for single exposure measurement, and theoretically can be used as a brand-new beam quality analysis technology.

Results and Discussions First, the feasibility of using CAMI algorithm to realize beam quality parameters was

simulated and verified. It is assumed that the incident beam is an ideal Gaussian beam with a wavelength of 351nm. Considering the diffraction pattern saturation error, uniform random background noise ($0 \sim 1$) and quantization noise, the reconstruction results are shown in Fig. 3. The incident beam at the amplitude plate recovered by CAMI is transmitted through the angular spectrum, and the beam parameters are calculated using the calculation method described in section 2.2. The maximum error is 2.12%, and all errors are within acceptable limits. For further verification, the CAMI optical path diagram shown in Fig. 1 and the Ophir-Spiricon beam quality analyzer (model: BSQ-SP920) were used to measure the beam. Ophir-Spiricon beam quality analyzer measured the He-Ne laser beam quality factor $M_x^2 = 1.044$, $M_y^2 = 1.042$, CAMI method calculated $M_x^2 = 1.090$, $M_y^2 = 1.044$, the relative error along x direction and y direction was 4% and 0.2%. Finally, using the CAMI 351nm pulsed beam algorithm actual measurement, the beam path diagram is shown in Fig. 6 (a). After 300 iterations, the saturated area of the diffraction spot is restored, and the reconstruction results are shown in Fig. 6 (b)–(e). Through wavefront inversion, the beam intensity distribution of other vertical sections along the optical axis can be calculated. The beam width expands outward along the transmission direction in accordance with the hyperbolic law, and the coefficients of the hyperbola are fitted by multiple sets of beam intensity data, thereby calculating the beam quality factor $M_x^2 = 1.4746$, $M_y^2 = 1.2101$.

Conclusions Compared with the far-field divergence angle and focal spot size, the laser beam quality factor M^2 is a technical evaluation that can strictly characterize the laser beam quality. A real-time complex amplitude reconstruction method based on the coherent amplitude modulation imaging algorithm is proposed to determine the laser beam quality factor M^2 . CCD is used as an image sensor to directly detect the laser beam distribution, and the wavefront distributions at different positions are obtained by numerical calculation. Laser beam quality measurement is based on the theory of second-order moments, and the M^2 is measured by the method of propagation trajectory curve fitting. Compared with the traditional mobile CCD method to obtain the wavefront distribution at different positions, the automatic measurement is more convenient and faster, and the wavefront distribution information of laser beam can be accurately obtained, which is suitable for measuring the quality of pulsed laser beam. Simulations and experiments have proved the effectiveness of proposed method.

Key words laser technique; coherent amplitude modulation imaging; image reconstruction; second moment fitting; M^2 factor

OCIS codes 140.3295; 110.1650; 050.1970