

激光通过不同厚度的强散射介质的聚焦

李琼瑶, 扎西巴毛, 陈子阳, 蒲继雄*

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 通常情况下, 激光光束经过散射介质后会产生无序的散斑。基于波前相位调制技术, 利用连续序列算法结合四步相移法对入射激光的波面进行相位调制, 使其通过散射介质在目标位置处形成聚焦。实验着重研究激光经过不同厚度的强散射片样品的聚焦, 讨论散射介质的厚度与聚焦点光强增长因子的关系。实验结果表明, 通过的散射介质越厚, 聚焦光斑尺寸越小, 目标位置处聚焦点的光强增长因子也越小。

关键词 成像系统; 散射; 聚焦; 相位调制; 散射介质厚度; 光强增长因子

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111016

Focusing of Laser Through Strong Scattering Media with Different Thicknesses

Li Qiongyao, Zhaxi Bamao, Chen Ziyang, Pu Jixiong*

Fujian Province Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract In general, disordered speckles occur when a laser beam passes through a scattering medium. Based on wavefront phase modulation technology, we apply a continuous sequential algorithm combined with a four-step phase-shifting technology to phase modulation of the wavefront of the incident laser so that it can focus on the target position when the laser passes through the scattering medium. The experiments primarily investigate the focusing of the laser passing through the strong scattering-medium samples with different thicknesses, and discuss the influence of the scattering-medium thickness upon the enhancement factor of intensity at the focal point. The experimental results show that with the increase in the thickness of the scattering medium, the size of the focal spot and the enhancement factor of intensity of the focal point at the target position decrease.

Key words imaging systems; scattering; focusing; phase modulation; thickness of scattering medium; enhancement factor of intensity

OCIS codes 110.6150; 040.1520; 290.4210; 290.7050

1 引 言

当激光经过纸张、牛奶、粉体、白漆、生物组织等散射介质时, 由于多重散射的原因, 透射光波会沿各个方向散射, 进而随机干涉形成复杂的散斑^[1], 散斑场的混乱性使得自适应波前矫正方法无法控制光的传播^[2-4]。近几年来, 国内外的学者不断地研究, 表明可以利用波前整形技术(WST)调制入射光的相位^[5]、振幅^[6]和偏振态, 来纠正无序介质对入射光产生的畸变, 从而实现光通过散射介质的聚焦^[7]。2007年, Vellekoop等^[8]率先提出利用空间光调制器(SLM), 结合反馈调制技术对每个单元逐个调节入射光的相

位, 实现光通过强散射介质的聚焦。2008年, Yaqoob等^[9]基于对生物组织的研究, 提出利用光学相位共轭法实现穿透生物组织的散射光的聚焦。该聚焦方法基于全息记录和再现的光学相位共轭技术, 使用相位共轭镜产生相位共轭光束来补偿多重散射产生的畸变, 获得了指定位置的聚焦光斑。2010年以来, 法国Popoff等^[10-11]结合全场干涉法和四步相移法测量出散射介质的空域传输矩阵, 再利用相位共轭完成透过散射介质的聚焦与成像。随着激光通过散射介质实现聚焦的研究不断的发展, 这种无透镜、无侵入式的光聚焦技术在生物医学成像^[12]、医学理疗^[13]、荧光成像^[14]等领域的应用越来越受到重视。由于大气环

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-12; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(11674111, 61575070, 11750110426)、华侨大学研究生科研创新基金资助项目

* E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

境和生物组织等散射介质具有强散射特性且其厚度存在不均匀性,因此研究激光透过强散射介质后的聚焦效果受散射介质厚度的影响具有重要意义。

本文利用四步相移法逐个求解整个 SLM 的优化相位图,通过纯相位反射式的 SLM 对入射激光光束进行相位调制,最终获得激光光束通过强散射介质的聚焦。实验研究激光经过不同厚度的 ZnO 散射片样品的聚焦,着重研究聚焦点的光强增长因子随散射介质厚度的变化情况,获得散射介质的厚度与聚焦点光强增长因子的关系。

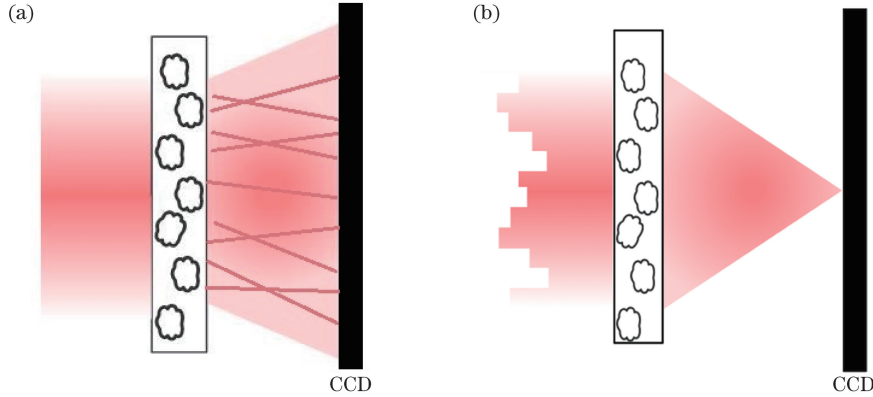


图 1 调控入射激光波前实现透过散射介质的聚焦示意图。(a)平面波透过散射介质后形成随机散斑;
(b)调制后的入射光透过散射介质后在特定位置形成的聚焦光斑

Fig. 1 Schematics of focusing of incident laser after passing through scattering medium by modulating wavefront. (a) Random speckle formed by plane wave passing through scattering medium; (b) focal spot formed at specific position by modulated incident laser passing through scattering medium

由于强散射介质中各个通道独立无关,因此将入射光和出射光通道离散化。将入射光束波面划分成 N 个通道,得到输入场与输出场之间的关系为

$$E_m^{\text{out}} = \sum_{n=1}^N t_{mn} E_n^{\text{in}}, \quad (1)$$

式中: E_m^{out} 表示第 m 个出射通道复振幅; E_n^{in} 表示第 n 个入射通道复振幅, $E_n^{\text{in}} = A_n \exp(i\phi_n)$; t_{mn} 表示第 m 个出射通道与第 n 个入射通道之间光场幅值和相位的关系,即 $t_{mn} = A_{mn} \exp(i\phi_{mn})$ 。故(1)式可简化为

$$E_m^{\text{out}} = \sum_{n=1}^N A_{mn} \exp(i\phi_{mn}) [A_n \exp(i\phi_n)] = \sum_{n=1}^N A_{mn} A_n \exp[i(\phi_{mn} + \phi_n)]. \quad (2)$$

根据连续序列算法(CSA)^[15]原理,将 SLM 平面划分为 N 个单元格,从第一个单元格开始调制,调制单元与其他区域入射光束在 CCD 目标位置处发生干涉。连续序列算法是让调制单元的相位在 $0 \sim 2\pi$ 内循环,然后将 CCD 反馈的目标位置处的光强最大值对应的相位作为优化相位。将当前调制单元的相位设置为优化相位之后,再进行下一个单元

2 基本原理

如图 1(a)所示,激光光束经强散射介质,由于多重散射的原因,通过散射介质的光在电荷耦合器件(CCD)的接收面上干涉形成一个随机的散斑场。基于波前反馈整形技术,利用 SLM 调制入射光的波前相位使透射过散射介质的光在 CCD 上的某一点发生相长干涉,该点光强能达到整场最大值并形成聚焦点,其他位置发生相消干涉呈现暗斑,如图 1(b)所示。

格的相位调制,依次类推,完成整个 SLM 平面的相位优化,连续序列算法逐个单元调制过程如图 2 所示。本文利用四步相移法直接求解出每个调制单元格的优化相位,利用 Matlab 控制 SLM,调制当前调制单元格的入射光波相位,使未调制入射光之间产生一个相移 α 。分别改变相移 $\alpha = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$, 依次采集 CCD 上目标位置处的光强值 I_m^a , 可得到当前调制单元格与其他区域的入射光束到 CCD 指定的第 m 个区域处的相位差 $\Delta\phi$, 即

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{I_m^{\frac{3\pi}{2}} - I_m^{\frac{\pi}{2}}}{I_m^0 - I_m^{\pi}}\right). \quad (3)$$

由此可得到调制单元格对应相位差 $\Delta\phi$ 的共轭值 $\Delta\phi^*$ 。将 $\Delta\phi^*$ 设置为调制单元格的优化相位,使得调制单元格与其他区域的入射光束在 CCD 第 m 个区域发生相长干涉。以同样方式,调制完一个单元格后再接着调制下一个,直至将所有的单元格调制完成。此时,CCD 的第 m 个区域的光强达到最大值,形成聚焦光斑。为衡量目标位置处的聚焦效

果,可通过 CCD 分别探测优化后目标位置处的最大光强 I_m 和优化前的统计平均光强 $\langle I_0 \rangle$, 它们的比值定义为光强增长因子 η 。 η 可表示为^[16]

$$\eta = \frac{I_m}{\langle I_0 \rangle} \quad (4)$$

由(1)式可见,聚焦点的光强与入射光束的分格

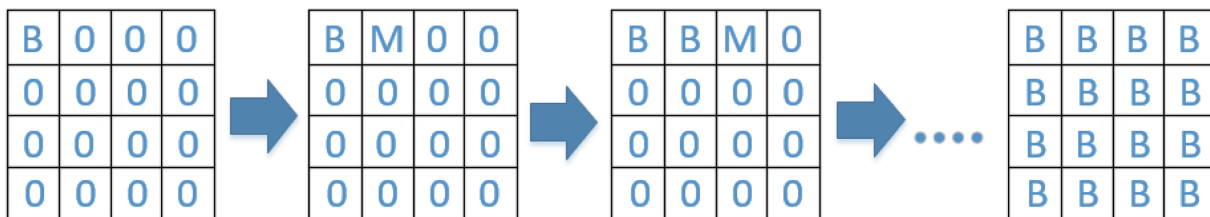


图 2 连续序列算法逐个单元调制相位的流程图。M 表示正在调制的单元格, O 表示相位未调制的单元格, B 表示已经优化后的单元格

Fig. 2 Flow chart of unit phase modulation using continuous sequential algorithm. M represents segment under modulating, O represents segment without phase modulation, and B represents segment after optimization

3 实验装置

激光通过散射介质的聚焦实验装置如图 3 所示, He-Ne 激光器产生波长为 632.8 nm 的激光光束。光束经过焦距 $f=50$ mm 和 $f=200$ mm 的透镜 L1 和 L2 组成的透镜组合扩束后, 入射到纯相位型反射式 SLM (Holoeye Pluto VIS-006) 中。由于本实验中的 SLM 只对水平偏振光有调制作用, 因此在 SLM 前放置一个水平偏振片 P, 使入射到 SLM 激光的偏振是水平方向的。反射光通过显微物镜 O1 (10X, 0.25NA) 聚集到散射片样品 S 上, 第二个显微物镜 O2 (20X, 0.4NA) 用来收集透过 P 后的散射光, 最后由 CCD 相机 (PIKE F421B, AVT, 德国) 接收散斑场的图像。本文应用四步相移法获得整个 SLM 面的优化相位图, 对入射激光的波前相位进行整形, 从而在 CCD 探测区域中心获得较亮

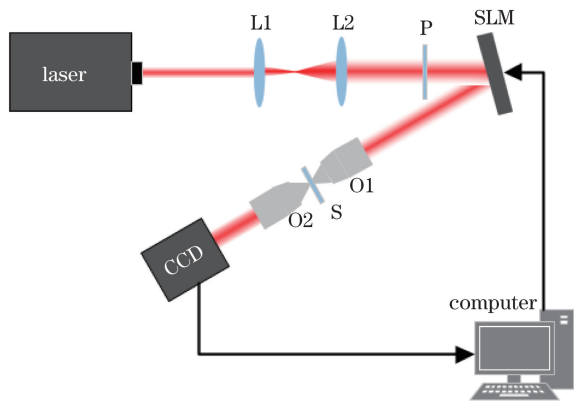


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

数 N 有关。Vellekoop 等^[16] 提出的增长因子 η 的理论值为

$$\eta = \frac{\pi}{4}(N - 1) + 1. \quad (5)$$

由(5)式可知,划分的调制单元数 N 越多,目标位置处的光强增长因子 η 越大,即聚焦光斑的光强越大。

的聚焦光斑。为探究散射片的厚度对聚焦光斑的影响, 实验中选取如图 4 所示的 5 种不同厚度的散射片样品。实验中, 我们将不透明强散射材料纳米 ZnO 与硅胶 A、B 液充分混合形成胶状液体。以载玻片为基底, 滴上制备好的胶状液体, 用四面涂湿器获得厚度分别为 50、100、150、200、250 μm 的散射片样品, 经过凝固形成散射片。在实验过程中更换不同厚度的散射介质, 优化入射激光的波前相位, 均能获得有效的聚焦。

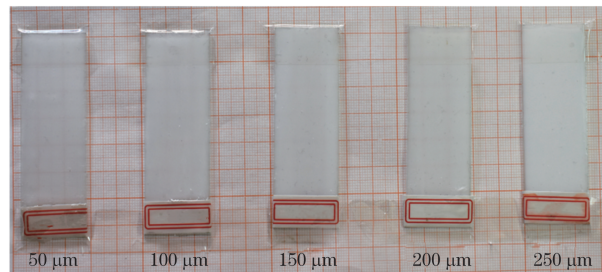


图 4 不同厚度的散射片样品

Fig. 4 Scattering medium samples with different thicknesses

4 实验结果与讨论

在实验中, CCD 的探测区域大小为 464 pixel \times 464 pixel (每个像素大小为 7.4 $\mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$), 由 CCD 探测散斑光场的光强分布。图 5(a)~(e) 为未经调制的激光光束经过厚度分别为 50、100、150、200、250 μm 的散射片后, 形成不同的散斑图样。由图 5 可见, 散射片样品厚度 L 越大, 散射场的分布越大, 散斑尺寸越小。

为获得有效的聚焦, 必须对入射到散射介质的

激光波前进行调控。在实验中,设置 SLM 的划分单元格数为 $N = 25 \times 25$ 。应用连续顺序算法控制 SLM,对入射到相位调制型 SLM 的激光光波面进行逐个单元相位调制,采用四步相移法获得当前调制单元的优化相位,以此类推,可获得所有单元格的优化相位。此时,经相位优化后的激光光束照射散射介质,可在预定的聚焦区域得到光强较大的聚焦光斑。更换不同厚度的散射片,重新调控入射到散射介质的激光波前,经过散射介质后获得聚焦,如

图 6(a)~(e)所示。图 7(a)~(e)为为获得图 6(a)~(e)聚焦光斑而加载在入射激光的波前相位图。由图 6 可见,当散射介质的厚度比较小时,获得的聚焦光斑的尺寸比较大,随着散射片样品厚度 L 增大,聚焦光斑的尺寸减小。由 CCD 探测到图 6(a)~(e)中聚焦光斑的光强增长因子分别为 62.78、51.78、41.68、31.54、25.32。从该组数据可以发现,聚焦光斑的光强增长因子随散射片样品厚度的增大而逐渐减小。

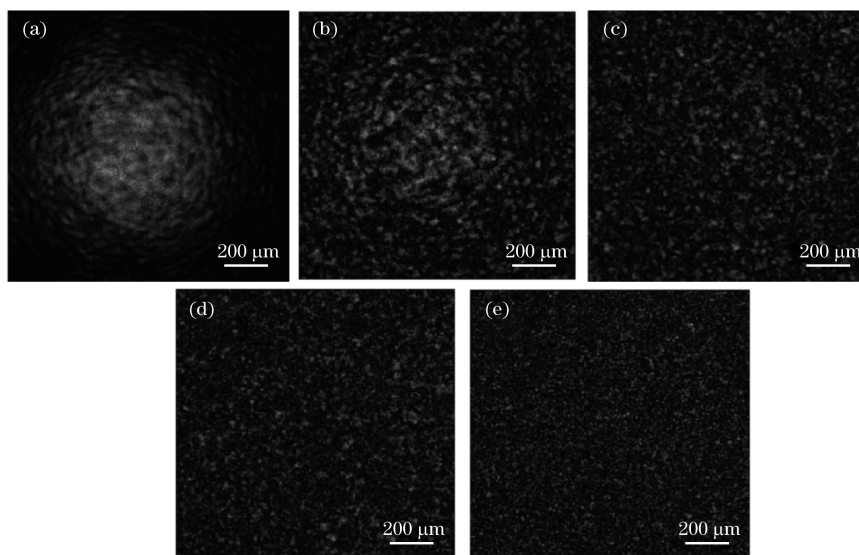


图 5 未调制激光光束经过不同厚度的散射片样品形成的散斑图像。(a) $50 \mu\text{m}$; (b) $100 \mu\text{m}$; (c) $150 \mu\text{m}$; (d) $200 \mu\text{m}$; (e) $250 \mu\text{m}$

Fig. 5 Images of random speckles formed by unmodulated incident laser passing through scattering media with different thicknesses. (a) $50 \mu\text{m}$; (b) $100 \mu\text{m}$; (c) $150 \mu\text{m}$; (d) $200 \mu\text{m}$; (e) $250 \mu\text{m}$

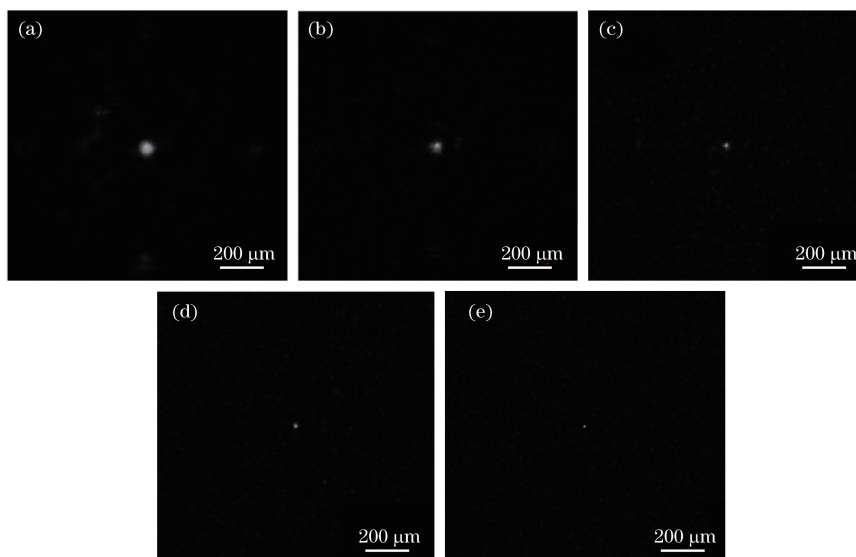


图 6 经相位调制的激光光束经过不同厚度的散射片样品形成聚焦光斑示意图。(a) $50 \mu\text{m}$; (b) $100 \mu\text{m}$; (c) $150 \mu\text{m}$; (d) $200 \mu\text{m}$; (e) $250 \mu\text{m}$

Fig. 6 Focused spots produced by phase-modulated laser passing through scattering media with different thicknesses. (a) $50 \mu\text{m}$; (b) $100 \mu\text{m}$; (c) $150 \mu\text{m}$; (d) $200 \mu\text{m}$; (e) $250 \mu\text{m}$

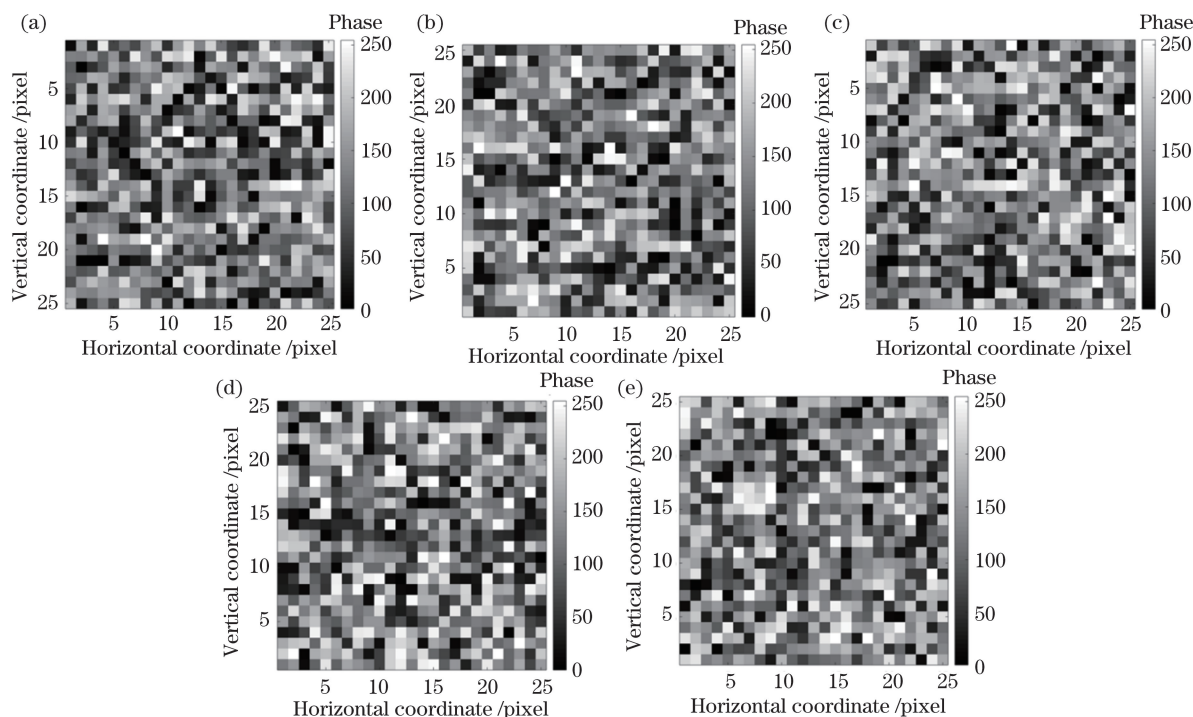


图 7 获得对应图 6(a)~(e)的聚焦,需要加载在入射激光的波前相位图。(a) 50 μm ; (b) 100 μm ; (c) 150 μm ; (d) 200 μm ; (e) 250 μm

Fig. 7 Phase patterns of incident laser wavefront used for generating focal spots which are shown in Fig. 6(a)~(e). (a) 50 μm ; (b) 100 μm ; (c) 150 μm ; (d) 200 μm ; (e) 250 μm

因激光光束会受到环境和光学平台振动的干扰以及散射片在制作过程中会引起厚度误差,在实验中,让激光光束透过每个散射片样品的三个不同位置(随机选取)完成聚焦,记录对应的增长因子,并计算这三个增长因子的平均值。根据 CCD 采集到的聚焦光斑的光强增长因子,绘制出散射介质的厚度与光强增长因子的关系曲线图,如图 8 所示。其中横坐标为实验中所使用的散射片样品的厚度 L ,纵坐标为光强增长因子 η ,图中方形和圆形分别表示调制格数为 $N=25\times 25$ 和 $N=30\times 30$ 对应的光强增长因子平均值,误差棒为光强增长因子波动的标准偏差。从图 8 可以看出,激光透过同种厚度的散射片样品聚焦时,调制格数为 $N=30\times 30$ 的聚焦光斑的光强增长因子大于 $N=25\times 25$,这符合总调制格数 N 越大,光强增长因子 η 越大的理论^[8]。在两种不同的总调制格数情况下,光强增长因子 η 都随散射片样品厚度 L 的增大而减小。

5 结 论

结合四步相移法,按照连续序列算法计算出 SLM 上每个单元与其他区域到达探测区域中心的光波之间的相位差的共轭值,优化了激光光束波前

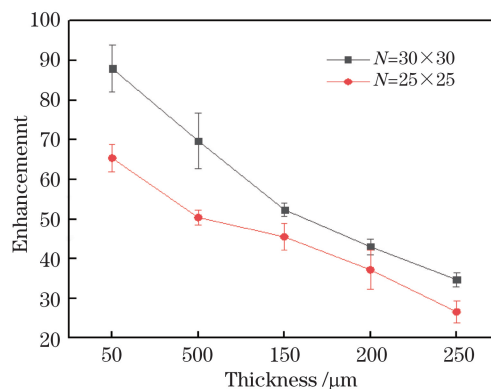


图 8 聚焦点的光强增长因子与散射介质厚度的关系
Fig. 8 Enhancement factor of intensity at focal point as a function of thickness of scattering medium

相位分布,使得激光光束能经过散射介质聚焦。研究了散射介质样品的厚度对聚焦光斑的影响。研究表明,散射介质越厚,聚焦光斑的尺寸越小,光强增长因子也越小。

参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Cao Q Z, Chen J B, Transl. Beijing: Science Press, 2009: 1-37.
- Goodman J W. 光学中的散斑现象: 理论与应用[M].

- 曹其智, 陈家璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 1-37.
- [2] Tyson R K. Principles of adaptive optics [M]. 3rd ed. Florida: CRC Press, 2010: 1-108.
- [3] Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing [J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 320-322.
- [4] Li C H, Xian H, Rao C H, et al. Field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics system [J]. Optics Letters, 2006, 31(19): 2821-2823.
- [5] Zhao M, Zhao M J, Sun C W, et al. Measurement and light focusing by transmission matrices of scattering media based on phase-only modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0129001.
赵明, 赵美晶, 孙程伟, 等. 基于纯相位调制的散射介质传输矩阵测量与光波聚焦 [J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0129001.
- [6] Sun C Z, Chen Z Y, Pu J X. Modulating the amplitude of scattering light for focusing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0829001.
孙存志, 陈子阳, 蒲继雄. 调制散射光束的振幅实现聚焦 [J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0829001.
- [7] Tay J W, Lai P X, Suzuki Y, et al. Ultrasonically encoded wavefront shaping for focusing into random media [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 3918.
- [8] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [9] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples [J]. Nature Photonics, 2008, 2(2): 110-115.
- [10] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(10): 100601.
- [11] Popoff M, Lerosey G, Fink M, et al. Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach [J]. New Journal of Physics, 2011, 13(12): 123021.
- [12] Chang C Y, Cheng L C, Su H W, et al. Wavefront sensorless adaptive optics temporal focusing-based multiphoton microscopy [J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(6): 1768-1777.
- [13] Čižmár T, Mazilu M, Dholakia K. *In situ* wavefront correction and its application to micromanipulation [J]. Nature Photonics, 2010, 4(6): 388-394.
- [14] Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1245-1247.
- [15] Vellekoop I M, Mosk A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid media [J]. Optics Communications, 2008, 281(11): 3071-3080.