

# 多模光纤散斑场的纵向偏振调控

扎西巴毛, 范伟如, 胡显声, 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** 相干光经过多模光纤传输, 在出射端形成一个随机的散斑场。对于非保偏多模光纤, 还将出现退偏现象, 使得入射的线偏振光不再保持线偏振分布。因此, 非保偏多模光纤散斑场的随机性不仅表现在光强方面, 也表现在偏振方面。基于反馈波前整形技术, 实现了对多模光纤出射端无序散斑场的光强和偏振的调控, 获得了光强集中的聚焦线, 并且可以有效控制聚焦线的偏振分布。

**关键词** 物理光学; 多模光纤; 散斑; 偏振态; 光场调控

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0126018

## Polarization Modulation Along Longitudinal Direction of Speckle Field Formed by Laser Beam Through Multimode Fiber

Zhaxi Bamao, Fan Weiru, Hu Xiansheng, Chen Ziyang\*, Pu Jixiong

*Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation,*

*College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China*

**Abstract** A random speckle field is generated in the propagation of coherent light through a multimode fiber (MMF). For a non-polarization-maintaining MMF, linearly polarized incident light cannot maintain the linear polarization distribution owing to the depolarization effect. Therefore the randomness of the speckle pattern is observed in both intensity and polarization distributions. In this study, the intensity and polarization of the disordered speckle field generated by the MMF is controlled with the feedback wavefront shaping technology that generates a focal line with controllable polarization distribution.

**Key words** physical optics; multimode optical fiber; speckle; polarization state; optical field modulation

**OCIS codes** 260.5430; 030.6140; 060.2420; 290.5855

## 1 引 言

激光在非均匀介质(如生物组织、毛玻璃等)传输时,会因为多重散射而产生散斑<sup>[1]</sup>,散斑严重影响了激光在一些领域中的应用<sup>[2-3]</sup>。这种随机的散斑现象在很长的一段时间内被认为是不可控制的,2007年 Vellekoop 等<sup>[4]</sup>提出反馈波前整形技术,实现了激光光束经过散射介质的聚焦。该技术将入射光用空间光调制器(SLM)划分成一定数目的单元,通过控制每个单元的相位,实现了入射光经过散射介质后,在散斑场中某个空间点的干涉叠加,从而在该位置形成一个光强很集中的聚焦点。研究表明,通过引入合适的相位调控,可以产生超过衍射极限的聚焦光斑<sup>[5]</sup>。这种控制随机散斑场的技术一经提

出,立刻引起了研究人员的关注和兴趣,并被应用于成像、聚焦、微粒捕捉等研究<sup>[6-13]</sup>。

光纤作为传输信息的媒介,在医学诊断的内窥镜以及通信等领域中具有非常重要的应用<sup>[14-17]</sup>。多模光纤由于可以同时实现多个模式的传输而引起了研究人员的兴趣<sup>[15]</sup>,然而,由于多模光纤自身的工艺缺陷、光纤弯曲、模间色散、各模式相速度不同等原因,耦合到多模光纤的光在输出端形成散斑<sup>[17]</sup>。这种散斑特性和激光经过强散射介质所形成的散斑场具有非常类似的性质,因此反馈波前调制技术也被应用于多模光纤出射端的光场调控<sup>[18-23]</sup>。例如,研究人员把多模光纤作为散射介质,在光纤出射端实现聚焦,通过加入不同的调制相位,可以在散斑场上任何位置实现聚焦<sup>[17]</sup>。

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-09-26; 录用日期: 2018-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11674111,11504116,61575070)、福建省自然科学基金(2017J01003)

\* E-mail: ziyang@hqu.edu.cn

对于非保偏型多模光纤,当入射的线偏振完全相干光经过该光纤传输后,出射端散斑场的光强分布出现了随机性,其偏振分布也是随机的,即难以预测整个散斑场的光强和偏振,这种随机性限制了光纤在很多领域中的应用。本文基于反馈波前整形技术,利用空间光调制器调控入射光束的相位,实现对随机散斑场的光强和偏振的双重调控。已有的关于散斑场光强和偏振控制的相关研究<sup>[24-28]</sup>主要集中于某一个特定平面的二维横向调控,本研究实现了对散斑场纵向的光强和偏振的有效调控。

## 2 理论基础

入射到空间光调制器上的光场可以表示为

$$E_{in} = A \exp(i\varphi), \quad (1)$$

式中: $A$  为入射光的振幅; $\varphi$  为入射光的相位。

考虑到空间光调制器只改变入射光的相位,经过空间光调制器后的光场可以表示为

$$E^{SLM} = A \exp(i\varphi) \exp(i\varphi^{SLM}), \quad (2)$$

式中: $\varphi^{SLM}$  为空间光调制器的调制相位。

引入  $T$  表示空间与模式之间的变换<sup>[18]</sup>:

$$E_m(A_m, \varphi_m, \Psi_m) = T \{E^{SLM}\}, \quad (3)$$

式中: $A_m$  和  $\varphi_m$  为第  $m$  个模式的振幅和初始相位; $\Psi_m$  为模式的空间轮廓。经过光纤传输后的光场可以表示为<sup>[28]</sup>

$$E(r, \theta, \lambda, L) = \sum_m A_m \Psi_m(r, \theta, \lambda) \cdot \exp\{-i[\beta_m(\lambda)L - \omega t + \varphi_m]\}, \quad (4)$$

式中: $r$  为径向坐标; $\theta$  为角向坐标; $\lambda$  为输入波长; $L$  为光纤的长度; $\beta_m(\lambda)$  为该模式的传播常数; $\omega$  为频率; $t$  为时间。因此,通过空间光调制器改变入射光的相位,可以改变光纤中的模式,从而改变光纤出

射端的光场特性(例如光强、偏振等)。

将光场偏振度的定义为<sup>[29]</sup>

$$\alpha_{DOP} = \left| \frac{I_H - I_V}{I_H + I_V} \right|, \quad (5)$$

式中: $I_H$  为水平偏振方向的光强; $I_V$  为垂直偏振方向的光强。

## 3 实验原理

反馈波前整形技术<sup>[4]</sup>是以目标光场的性质(如光强)作为反馈,利用优化算法改变入射光的相位,通过运行算法程序,最终获得一个预期的目标光场。在实验上,利用空间光调制器实现对入射光相位的调控。实验过程中,将空间光调制器分成为一定数目的单元格,当激光入射到该空间光调制器上,其波面被分割为一定数目的单元。选取散斑场的一个特定位置作为目标位置,利用空间光调制器调控每个单元格的相位,使得各个单元格经过散射介质传输后在光场中具有相同的目标位置相位,从而在目标位置形成一个很强的聚焦点。

反馈波前整形技术的关键是获得所需要的相位分布,从而实现对入射光的调控。采用人工免疫算法选取最优相位,空间光调制器上所加载相位图的控制面积根据光斑的大小来确定,将相位图控制的面积划分成  $58 \times 58$  的单元格。经过多次实验,根据聚焦点光强的增长趋势和饱和度选取迭代次数为 200。

反馈波前整形技术的实验原理图如图 1 所示。 $L1$  和  $L2$  表示焦距分别为 50 mm 和 150 mm 的透镜。由 HeNe 激光器(HNL-150L-NC, Thorlabs, 美国)发出的相干光经过双透镜系统扩束后,照射到反射式纯相位空间光调制器上。由于空间光调制器

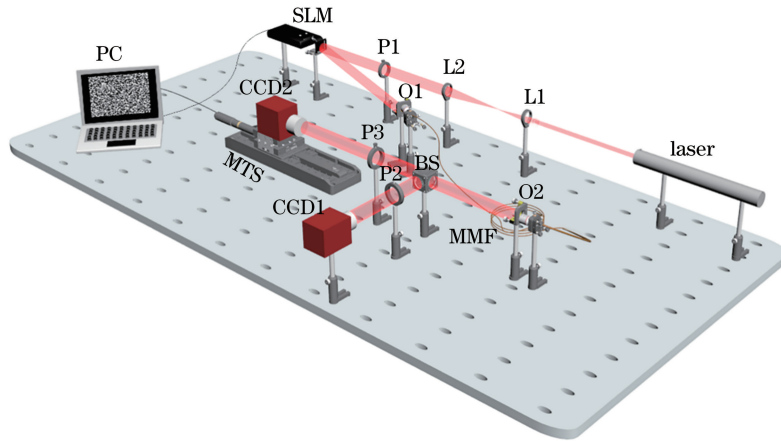


图 1 反馈波前整形实验装置图

Fig. 1 Setup of feedback wavefront shaping experiment

只对水平线偏振光有调制效果,所以在空间光调制器前加入了一个水平方向的偏振片(P1)。空间光调制器反射光经过显微物镜(O1)耦合到长度为2 m的多模光纤(MMF)中,光束在多模光纤传输后,在其出射端用显微物镜(O2)进行收集。光纤的输出光用分束器(BS)进行分束,在分束器的反射光方向放一个相机 CCD1(PIKE F421B, AVT, 德国),在分束器透射光的方向放置另外一个相机 CCD2(PIKE F421B, AVT, 德国),且将 CCD2 放在电动位移平台(MTS)上,由于 CCD 可以探测光场的二维横向光强分布,再加上利用电动位移平台纵向移动 CCD,可以实现一定范围内三维光强分布的扫描。为了实现散斑场的纵向偏振调控,在两个相机前面各加一个偏振片(P2 和 P3)。

#### 4 实验结果与讨论

当一束线偏振的相干光束入射到多模光纤中,光纤的弯曲、模式之间的叠加、光纤的色散(包括偏振色散)等造成光纤的出射端出现随机的散斑状光强分布,如图 2(a)所示。对于非保偏型光纤,线偏振光经过光纤传输后,其偏振分布也将发生变化,不再保持原有的线偏振性质。为了验证其偏振变化现象,在 CCD 前加上偏振片来观察散斑的光强变化情况。图 2(b)、(c)分别为偏振片的偏振方向沿着水平方向和垂直方向的散斑场光强分布,可以看出两

个互相垂直偏振片的散斑场并不相同。考虑到入射线偏振光的偏振方向沿着水平方向,而加上垂直方向的偏振片后,散斑场并没有消光,且其平均光强(5.0396)与加水平偏振片的平均光强(4.8303)相差不大,这意味着出射的散斑场出现了非常明显的退偏振效应。散斑的偏振特性已经随机化,因此利用波前调制技术,可以在光纤出射端的散斑场实现不同偏振特性的聚焦点。

为了获得具有线偏振性质的聚焦光斑,在 CCD1 前面加上了偏振片。利用计算机运行算法程序,使得目标位置处的光强逐渐增大。由于加了偏振片,因此只有偏振方向沿着该偏振片偏振方向的光才会增强,当沿着偏振片偏振方向的光达到较高的增长倍数时,可以获得准线偏振光。首先,选取偏振片的方向沿着垂直方向,利用反馈波前整形技术,通过运行优化算法,最终获得一个增长因子为 30.4 的聚焦点,如图 3(a)所示,此处增长因子定义为目标位置处的光强与初始散斑场平均光强的比值。利用可移动的相机 CCD2 扫描纵向的光强分布,结果如图 3(c)所示。可以看出,随着相机离开该聚焦平面,光强出现衰减的趋势。根据同样的步骤,将偏振片的方向移动到水平方向,就可以获得偏振方向沿着水平方向的线偏振聚焦光斑,如图 3(b)和 3(d)所示,其中图 3(b)的光强增长因子为 40.4。

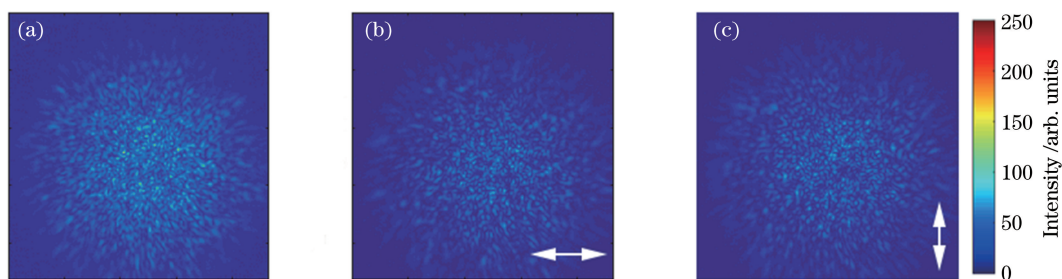


图 2 线偏振相干光经过非保偏多模光纤所产生的随机散斑场。(a)总光强;(b)水平偏振分量光强;(c)垂直偏振分量光强

Fig. 2 Random speckle field formed by a linearly polarized coherent light through a non-polarization-maintaining fiber.

(a) Total intensity; (b) intensity of the horizontal polarization component; (c) intensity of the vertical polarization component

在上述例子中,利用一个偏振片来产生线偏振聚焦光线,并通过改变偏振片的方向,实现对聚焦光线偏振方向的调控。为了获得更丰富的偏振性质变化,以两个相机上的光强分布作为反馈,两个相机前面的偏振片方向互相垂直,这样可以同时获得两个偏振方向互相垂直的聚焦光斑。通过控制两个聚焦光斑的空间分布,例如它们之间的距离,就可以控制一定距离内的偏振度变化性质。

要获得偏振度具有一定变化规律的聚焦线,首先要在 CCD1 和 CCD2 上确定光束传输过程中空间上的同一个点。实验过程中,偏振片本身工艺缺陷以及实验本身对环境振动较敏感等因素,造成在 CCD1 和 CCD2 上寻找同一个聚焦光斑具有一定难度。先在 CCD2 上用优化算法聚焦一个 P3 偏振方向为  $45^\circ$  的一个点,确保该点在水平和垂直偏振方向都有光强分量,当旋转 P3 偏振片到垂直方向,在

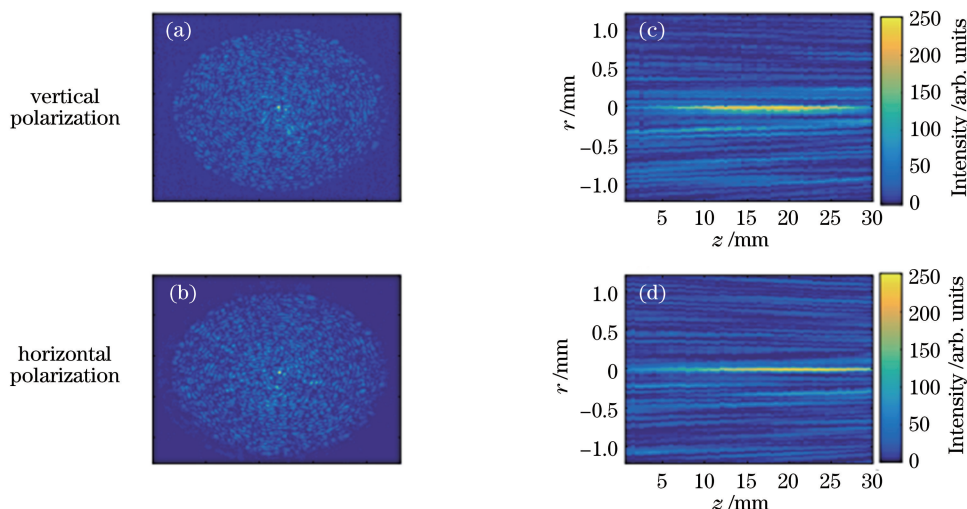


图 3 聚焦光斑及其光强分布。(a)(b)聚焦光斑;(c)(d)纵向光强分布

Fig. 3 Focal spots and corresponding intensity distribution. (a)(b) Focal spots; (c)(d) intensity distribution along the longitudinal direction

CCD2 上观察到一个聚焦光斑,再用程序读取 CCD2 采集图样的光强值,寻找最大数值来确定聚焦点的位置,再旋转 P3 偏振片到水平方向,以同样的方式在 CCD1 上确定聚焦点的位置。确定目标位置点之后,将 CCD1 和 CCD2 放置在距离分束器分别为 80 mm 和 85 mm 的位置处(即 CCD1 与分束器之间的距离和 CCD2 与分束器之间的距离相差 5 mm),利用优化算法在 CCD1 和 CCD2 上获得偏振方向相互正交的两个聚焦点。

两个偏振方向互相垂直的聚焦光斑在空间中叠加之后,可以形成一条聚焦线,其光强分布如图 4(a)所示。读取聚焦光线轴上的点光强数值,获得其纵向光强分布曲线,如图 4(b)所示。可以看出,聚焦光斑具有纵向分布,聚焦光斑在聚焦中心处光强最大,两侧光强逐渐变弱。CCD 所采集的数据

表明水平方向的光强峰值为 250.91,位置为  $z = 23$  mm 处,垂直方向的光强峰值为 118.72,位置在  $z = 18.5$  mm 处,两者之间的距离为 4.5 mm,这和 CCD1 到分束器的距离与 CCD2 到分束器的距离差值(5 mm)基本一致。基于这些光强曲线,可以进一步得到其偏振度变化曲线,如图 4(c)所示,其中 10.5 mm 处偏振度最低,为 0.2434。由图 4(b)得知,随着  $z$  从 0 开始增大,竖直偏振方向和水平偏振方向的光强都在增长,虽然竖直偏振方向的光强始终大于水平偏振方向的光强,但是在 10.5 mm 位置处,水平偏振方向与竖直偏振方向光强之间的比值最小,此时偏振度最小。之后,水平偏振方向的光强值增长缓慢,而竖直偏振方向的光强值增长较快,因此竖直偏振方向的光强占优势,从而偏振度的数值也相应增加。

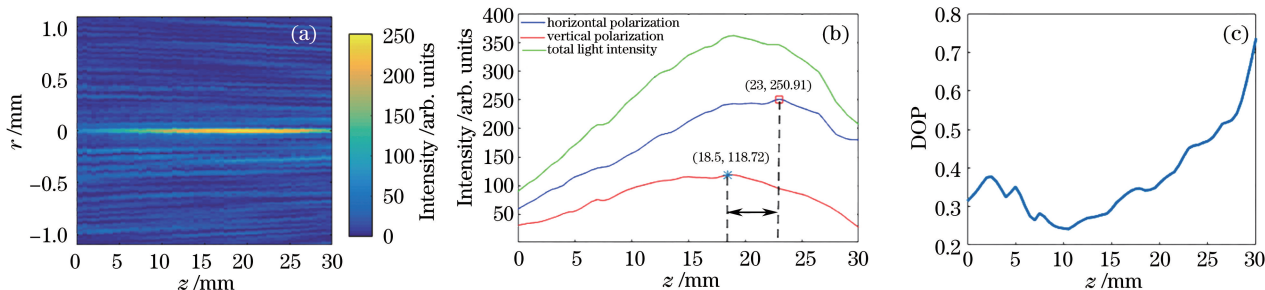


图 4 聚焦线的光强分布及偏振度变化。(a)纵向光强分布;(b)光强变化曲线;(c)偏振度变化曲线

Fig. 4 Intensity distribution and degree of polarization of focal line. (a) Intensity distribution along the longitudinal direction; (b) variation curves of intensity; (c) variation curve of the degree of polarization

## 5 结 论

激光经过非保偏多模光纤传输后,在光纤的出射端形成了一个光强和偏振随机分布的散斑。基于反馈波前整形技术,利用人工免疫算法,实现了对出射端无规则散斑场纵向的光强和偏振调控。除了具有不同偏振方向的线偏振聚焦线外,还获得了偏振度可控的聚焦线。通过调控入射光的相位,在多模光纤输出端产生了偏振方向相互正交的两个聚焦点,这两个聚焦点前后相连,形成了一条聚焦线。在30 mm的范围内对聚焦线进行空间扫描,得出聚焦线光强的空间分布,并获得其偏振度变化规律。实验结果表明,在不改变偏振片方向的情况下,利用波前调制技术可以对聚焦线进行纵向偏振调控。

## 参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and application [M]. Cao Q Z, Chen B, Transl. Beijing: Science Press, 2009: 1-37.  
顾德门. 光学中的散斑现象——理论与应用[M]. 曹其智, 陈璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 1-37.
- [2] Ishimaru A. Limitation on image resolution imposed by a random medium [J]. Applied Optics, 1978, 17(3): 348-352.
- [3] Bouma B E, Tearney G J. Handbook of optical coherence tomography [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2002.
- [4] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [5] Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 320-322.
- [6] Vellekoop I M. Feedback-based wavefront shaping [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12189-12206.
- [7] Park C, Park J H, Rodriguez C, *et al.* Full-field subwavelength imaging using a scattering superlens [J]. Physical Review Letters, 2014, 113 (11): 113901.
- [8] He X, Liu C, Zhu J Q. Beam splitting amplitude modulation phase retrieval imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0911002.  
何西, 刘诚, 朱健强. 基于振幅分束调制的相位恢复成像技术[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0911002.
- [9] 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.
- [10] Wan L P, Chen Z Y, Huang H L, *et al.* Focusing light into desired patterns through turbid media by feedback-based wavefront shaping [J]. Applied Physics B, 2016, 122(7): 204.
- [11] Čižmár T, Mazilu M, Dholakia K. *In situ* wavefront correction and its application to micromanipulation[J]. Nature Photonics, 2010, 4(6): 388-394.
- [12] Fiolka R, Si K, Cui M. Complex wavefront corrections for deep tissue focusing using low coherence backscattered light [J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16532-16543.
- [13] Mariampillai A, Standish B A, Moriyama E H, *et al.* Speckle variance detection of microvasculature using swept-source optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2008, 33(13): 1530-1532.
- [14] Flusberg B A, Cocker E D, Piyawattanametha W, *et al.* Fiber-optic fluorescence imaging [J]. Nature Methods, 2005, 2(12): 941-950.
- [15] Choi Y, Yoon C, Kim M, *et al.* Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(20): 203901.
- [16] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [17] Florentin R, Kermene V, Benoist J, *et al.* Shaping the light amplified in a multimode fiber[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(2): e16208.
- [18] Gover A, Lee C P, Yariv A. Direct transmission of pictorial information in multimode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(4): 306-311.
- [19] di Leonardo R, Bianchi S. Hologram transmission through multi-mode optical fibers [J]. Optics Express, 2011, 19(1): 247-254.
- [20] Čižmár T, Dholakia K. Exploiting multimode waveguides for pure fibre-based imaging[J]. Nature Communications, 2012, 3(8): 1027.
- [21] Papadopoulos I N, Farahi S, Moser C, *et al.* Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10583-10590.
- [22] Yin Z, Liu G D, Liu B G, *et al.* Research on the objective function of spatial light modulator-based output spot focusing for multimode fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0705003.  
尹哲, 刘国栋, 刘炳国, 等. 基于空间光调制器的多模光纤出射光斑聚焦目标函数研究[J]. 中国激光,

- 2015, 42(7): 0705003.
- [23] Zhao G Z, Geng Y, Chen H, *et al.* A method for focusing and scanning light through multimode fiber based on binary amplitude modulation DMD technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0911004.  
赵广智, 耿焱, 陈慧, 等. 一种基于 DMD 二值振幅调制的多模光纤出射光斑聚焦扫描技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0911004.
- [24] Guan Y, Katz O, Small E, *et al.* Polarization control of multiply scattered light through random media by wavefront shaping [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4663-4665.
- [25] Soni N K, Vinu R V, Singh R K. Polarization modulation for imaging behind the scattering medium [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 906-909.
- [26] Liu S, Li P, Zhang Y, *et al.* Transmission and control of polarization modulated light field in free space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026001.  
刘圣, 李鹏, 章毅, 等. 自由空间中偏振调制光场的传输及控制 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026001.
- [27] Fan W R, Hu X S, Zhaxi B M, *et al.* Generation of focal pattern with controllable polarization and intensity for laser beam passing through a multi-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7693-7700.
- [28] Redding B, Popoff S M, Cao H. All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6584-6600.
- [29] Born M, Wolf E. *Principles of optics* [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.