

激光光斑分布测量系统中光纤传光特性

罗杰^{1,2,3}, 秦来安^{2,3*}, 侯再红^{2,3}, 管雯璐^{1,2,3}, 朱文越^{1,2,3}, 张巳龙^{2,3}, 谭逢富^{2,3}¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 为解决传统激光光斑分布测量系统限制光束入射角度的问题, 引入大数值孔径、大芯径的传光型光纤, 阵列排布后作为测量系统的光斑取样前端, 以增大系统允许的入射角度范围, 并分析了相关的传光特性: 对光纤透过率的影响因素进行了分析, 并综合数值分析方法和实验测量研究了光纤传光的入射角度宽容性和作为阵列单元的一致性, 验证了光纤应用于激光光斑分布测量系统的可行性和优越性。本研究成果可为建立完善的光纤集成设备并将其应用到相关激光测量系统提供有效的理论依据。

关键词 激光光学; 激光束特性; 传光型光纤; 光谱响应一致性; 角度宽容性

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1214002

Light-Transmitting Characteristics of Optical Fiber in Laser Spot Distribution Measurement System

Luo Jie^{1,2,3}, Qin Laian^{2,3*}, Hou Zaihong^{2,3}, Guan Wenlu^{1,2,3},
Zhu Wenyue^{1,2,3}, Zhang Silong^{2,3}, Tan Fengfu^{2,3}¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology,

University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract In this paper, we introduced a light-transmitting fiber with a large numerical aperture and core diameter to solve the problem that the traditional measurement systems for laser spot distribution restricted the incident angle of beams. Then, the fiber array was arranged as the front end of spot sampling in the system, so as to increase the allowable incident angle range and analyze the associated light-transmitting characteristics. Furthermore, we analyzed the influencing factors of optical fiber transmittance and studied the tolerance for the incident angle of optical fiber transmission and the consistency of optical fiber as an array unit by combining numerical analysis method and experimental measurement. This verified the feasibility and superiority of optical fiber applied in the measurement systems for laser spot distribution. The results can provide an effective theoretical basis for the establishment of perfect optical fiber integrated equipment and its application to the relevant laser measurement systems.

Key words laser optics; laser beam characteristics; light-transmitting fiber; spectral response consistency; angle tolerance

OCIS codes 110.2350; 140.3295; 060.2300

收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2021-01-04; 录用日期: 2021-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

* E-mail: laqin@aiofm.ac.cn

1 引言

激光光斑分布测量是激光光束质量评价的重要基础,随着高质量激光在探测、加工、通信等领域的应用愈加广泛,科学研究与工业生产对激光光斑分布测量精度的要求日益提高,对其系统场景适用性的要求更加广泛,因此不断更新与优化相关设计一直是激光测量领域的研究热点^[1]。

目前,激光光斑分布测量已根据不同的使用场景发展出多类集成系统,系统常以车载、机载、星载等形式应用到实际探测中^[2]。搭载平台的快速移动常导致入射光束方向与接收系统轴向的角度出现偏差,此时所截光斑未与光轴垂直,光斑径向畸变带来接收误差;同时取样系统对入射角度具有较高的敏感性,造成入射角度变化后取样出现误差^[3]。现有系统多依赖于快速对准设备来保证正入射状态,进而减小这两类误差^[4-5]。但随着系统向集成化、实时测量化方面发展,已出现新的研究思路:依靠对入射角度低敏感的光学元件降低取样误差,结合标定算法进一步补偿接收和取样误差。相较于伺服电机等快速对准设备,光学元件更加轻量化,且易于集成。这一研究方向的难点在于入射角度小的敏感性光学元件的选择及其相关设计,考虑到传递误差主要表现为取样孔侧壁损耗,常见的解决途径为在取样孔中增设漫反射材料或漫透射材料,取样单元的典型设计有漫透射窗+漫反射材料+积分球结构^[6],以及漫透射材料+高反射率腔体^[7],它们都是依靠光学材料的漫散射特性来保障在角度变化环境中测量结果的一致性,并建立起光学模型进一步分析补偿误差。但理想漫散射体对材料的选型、加工等有着十分严苛的要求,当结合积分球等设计时又会限制取样分辨率。

光纤可依靠纤芯与包层交界面的全反射来降低光束入射角度变化引起的孔侧壁损耗,从而降低取样误差;并且生产工艺成熟,可定制较大的数值孔径(NA);同时,光纤可通过增大芯径来提高输入阈值,从而提升传光稳定性^[8-9],一般芯径可增至百微米至毫米量级,其分辨率相较于漫散射材料和积分球等结构仍具有优势;另外,传光型光纤所用石英具有良好的光谱响应一致性,可适用于宽谱光源的测量^[10-11]。综上所述,本文使用传光型光纤代替漫散射材料,将激光光斑分布测量系统的角度范围提升至需求水平。虽然目前已有相关激光测量系统使用了光纤阵列,但其主要是依靠光纤尾端的发散出射

来衰减光束,没有系统地讨论入射角度变化带来的影响和阵列中各光纤单元的一致性^[12]。

由于不同变量影响下的光纤透过率相对变化是阵列低畸变传输的主要参考指标^[13],本文对光纤透过率进行了数值分析;设计了这一应用背景下的光纤参数;仿真计算并实验验证了所设计光纤的良好角度响应一致性和单元一致性,说明将传光型光纤应用至激光光斑分布测量系统中的可行性。

2 基本原理

为满足光斑能量分布测量系统的高集成度要求,采用直、短、阶跃折射率光纤棒,将其紧密排列后可获得较高的分辨率和较短的轴向长度;纤芯和包层材料选用具有良好光谱响应一致性的掺杂石英;光纤满足大 NA 和大芯径的要求,可提升入射角度范围和输入阈值。此类传光型光纤透过率的影响因素主要分为以下几类。

2.1 光纤端面的反射

当光波从一类介质传播至另一类介质时,由于介质物理性质的差异,电磁场在界面上是不连续的,因此两种电介质的分界面上会发生折射与反射。当光从空气入射到纤芯时,将有部分光发生反射,入射光与反射光的能量关系可由菲涅耳公式推导,入射时的透过率 τ_1 可以表示为

$$\tau_1 = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2, \quad (1)$$

式中: n_0 表示空气折射率,可取 1; n_1 表示纤芯折射率,取值范围一般在 1.45~1.65。(1)式适用于入射角为 0° 的情况,但当入射角处于 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, τ_1 基本不变^[14],而激光光束测量系统的入射角度一般小于 45° ,故可以认为入射光的透过率满足(1)式。由于传输光需经过纤头和纤尾两个端面,因此要考虑两次端面反射损失。

2.2 纤芯与包层的界面透射

理想状态下,NA 角度范围内入射的光在纤芯与包层界面发生全反射,从波动光学角度考虑,从纤芯出射的光将透入包层约一个波长的深度,最后也会再返回纤芯,即全反射时不发生能量损失。但在实际制造工艺中,纤芯与包层的分界面不可能为理想的光学反射面,部分光在界面发生透射。假设全反射系数为 α ,则纤芯与包层界面的透过率 τ_2 可表示为

$$\tau_2 = \alpha^N, \quad (2)$$

式中: N 表示光线在纤芯中的总反射次数。与光纤

中心轴同面的入射光线及折射光线称为子午光线, 不满足此条件的为偏斜光线, 两者即使入射角度一致, 在纤芯中的反射次数也有可能不一致, 它们满足关系^[15]

$$N_{\text{mer}} = N_{\text{def}} \sin \psi = \frac{L}{d} \tan \varphi, \quad (3)$$

式中: N_{mer} 和 N_{def} 分别为子午光线和偏斜光线的反射次数; d 为纤芯直径; L 为纤长; ψ 为偏斜光线在光纤端面上的投影线与反射点处纤壁切线的夹角; φ 为空气-纤芯分界面的折射角。由图 1 可知,

$$\cos \psi = \frac{2l}{d}, \quad (4)$$

式中: l 为入射光线和折射光线所在面与光纤中心轴的距离。纤芯侧壁边界和以 l 为半径的同心圆共同限制了偏斜光线的传输, 偏斜光线在这样的环形筒内以空间螺旋折线传输。由于子午光线传输时 $\psi=0$, 因此子午光线和偏斜光线的总反射次数都可以表示为

$$N = \frac{L \cdot \tan \varphi}{\sqrt{d^2 - 4l^2}}. \quad (5)$$

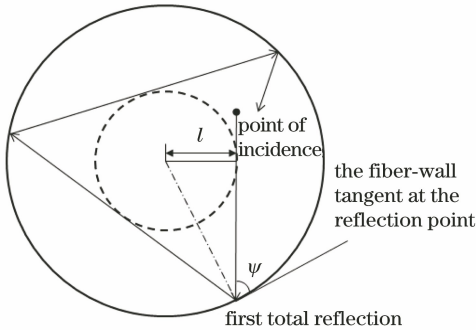


图 1 偏斜光线的传输轨迹在端面的投影

Fig. 1 Projection on the end face of the transmission trajectory of deflected light

2.3 材料的吸收

纤芯材料对光能势必会有吸收作用, 这一损耗的透过率 τ_3 与吸收系数和光程 S 有关, 即

$$\tau_3 = \exp(-\beta S), \quad (6)$$

式中: β 为材料的吸收系数; 子午光线和偏斜光线的光程 S 相等, 计算公式为

$$S = \frac{L}{\cos \varphi}. \quad (7)$$

2.4 总透过率

综上所述, 对于以角度 φ 在空气-纤芯分界面折射的单根光线, 其总透过率可表示为

$$\tau = \tau_1 \tau_2 \tau_3 = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \exp \left[L \left(\frac{\ln \alpha \cdot \tan \varphi}{\sqrt{d^2 - 4l^2}} \right) - \beta \sec \varphi \right]. \quad (8)$$

当光纤确定后, τ 是关于入射光线的角度和位置的函数。对于入射光束来说, 总透过率 T 为

$$T = \frac{\iint \tau(\varphi, l) f(\varphi, l) d\varphi dl}{\iint f(\varphi, l) d\varphi dl} = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \frac{\iint \exp \left[L \left(\frac{\ln \alpha \cdot \tan \varphi}{\sqrt{d^2 - 4l^2}} \right) - \beta \sec \varphi \right] f(\varphi, l) d\varphi dl}{\iint f(\varphi, l) d\varphi dl}, \quad (9)$$

其中, 折射角 φ 由入射角决定, l 由光线的入射位置决定, $f(\varphi, l)$ 为光线在入射截面上每一点的功率随 φ 和 l 变化的分布函数。由于光斑的分布函数正是测量系统所求, 因此难以通过公式推导得到准确的量化结果, 但数值分析可以帮助分析后续的仿真和实验数据。

3 数值分析

3.1 仿真模型

使用光学追迹软件 TracePro 对传光过程进行蒙特卡洛仿真, 建立 NA 为 0.41、对应 NA 角为 24° 、芯径为 0.78 mm、纤长为 20 mm 的硬质光纤单元构成的 11×11 阵列模型, 如图 2 所示。设置光源为随机光斑照射阵列端面, 其入射角度范围为 $0^\circ \sim 20^\circ$, 仿真光线数为 10^5 根。当选取入射角度和光纤 NA 时, 要考虑到一般激光光斑分布测量系统的入射角度宽容范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ ^[2,16]。采用图 3 所示的网格定位算法, 使用(10)式计算每根光纤在不同角度下的透过率, 即

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}, \quad (10)$$

式中: η 为光纤透过率; P_{in} 为纤芯输入功率; P_{out} 为纤芯输出功率。

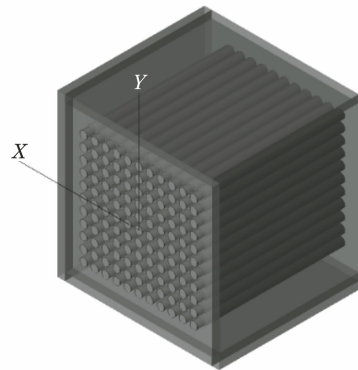


图 2 光纤阵列仿真模型

Fig. 2 Simulation model of fiber array

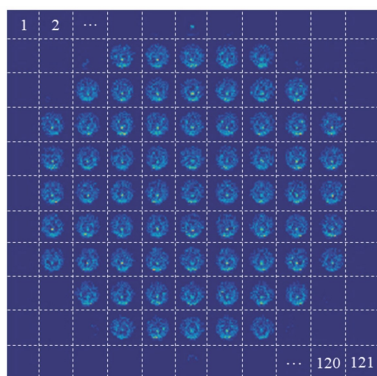


图 3 网格算法处理

Fig. 3 Grid algorithm processing

3.2 角度响应一致性分析

角度响应一致性分析的仿真结果如图 4 所示,随着入射角度的变化,121 根光纤的透过率平均值在 86% 上下浮动,浮动极差为 5.57%,标准差为 1.62%,初步验证了透过率对于入射角度的敏感性较低,当入射角度在允许范围内变化时,得到的测量值保持稳定。但入射角度在 $10^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 内变化时,透过率有一个较小的起伏,参考(2)~(7)式进行分析:入射角度决定了全反射次数,从而影响界面透射与材料吸收,这些影响体现到透过率上是单调递减的,并会在一个小的角度范围内,由于全反射次数增加的光线数开始增多而表现出较为明显的趋势,这一趋势具有一定的周期性,在长光纤中体现得更加清晰。

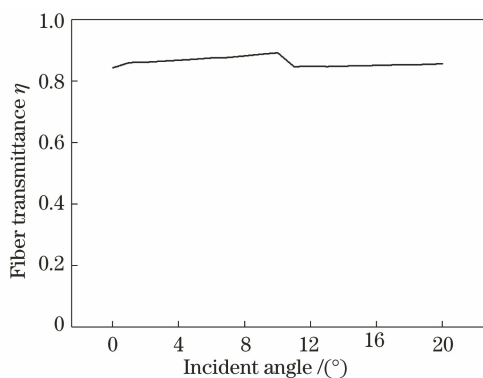


图 4 121 根光纤透过率平均值随入射角度的变化曲线

Fig. 4 Curve of average transmittance changed with incident angle of 121 optical fibers

3.3 单元一致性分析

单元一致性可以根据 121 根光纤透过率的标准差来分析,由图 5 可知,在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的范围内,光纤透过率的标准差均在 3% 以下,初步验证了光纤阵列的一致性较为良好。由(9)式可知,仿真中光纤透过率不一致的原因是每根光纤的输入光束功率分布是

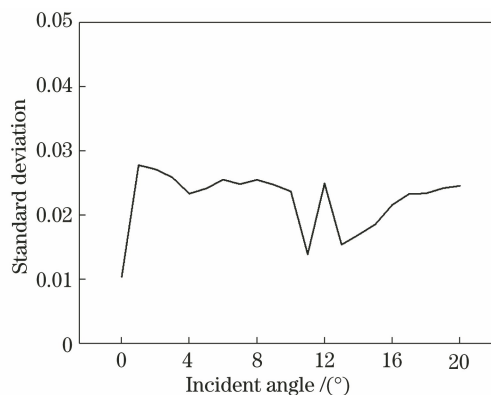


图 5 不同角度下的光纤透过率标准差曲线

Fig. 5 Standard deviation curve of optical fiber transmittance at different angles

随机变化的,而在实际应用中,影响一致性的因素还有光纤的个体差异,如加工和固定的差异,下面结合实验数据进行综合分析。

4 实验分析

4.1 实验系统

对仿真结果进行相应的验证实验,实验系统如图 6 所示,主要由 532 nm 激光器、准直及扩束系统、单排传光型光纤、金属板、接收屏、旋转平台、CCD 相机和数值处理系统组成。扩束后的准直光束进入由金属板固定的光纤后,从光纤尾端出射并由紧贴尾端面的接收屏接收,使用 CCD 相机拍摄光斑^[17];通过旋转平台改变光束与光纤的相对角度,测量不同角度下不同光纤的透过率。使用定制传光型光纤棒,与第 2 节的光纤仿真模型参数一致,具体参数见表 1。

4.2 实验数据分析

实验主要采集了正入射、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 这 5 个角度下的光纤输入和输出光斑,采用图 3 所示的网格定位算法,统计每根光纤的输入和输出功率,使用(10)式计算透过率,结果如图 7 所示。关于角度宽容性,从图 8(a)可以看到,每根光纤在不同角度下的透过率标准差小于 8%,与仿真结果的 1.62% 相比有所增大,主要为接收屏角度响应不一致引入的误差,在激光测量系统集成时,可在光纤尾端直接采用 CCD 阵列或者光电探测器阵列测量,以消除这一误差的影响;关于光纤的一致性响应,从图 8(b)可以看到,不同光纤在相同角度下的透过率标准差也小于 8%,大于仿真结果的 3%,除了接收屏引入的误差外,仿真阵列模型中每根光纤的参数一致,而实际加工的光纤具有一定的个体差异,这都会导致透

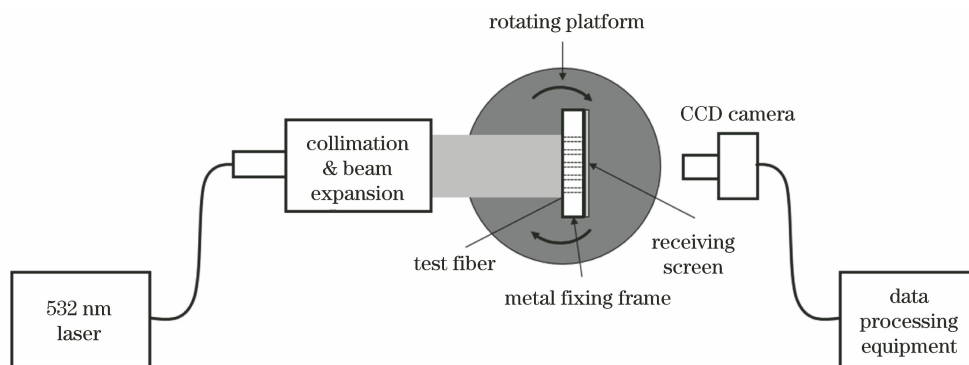


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Schematic of the experimental system

表 1 光纤具体参数

Table 1 Specific parameters of optical fiber

Parameter	Length /mm	Core diameter /mm	Cladding diameter /mm	Core refractive index	Cladding refractive index	Material
Value	20	0.78	0.80	1.540	1.485	Quartz & doped quartz

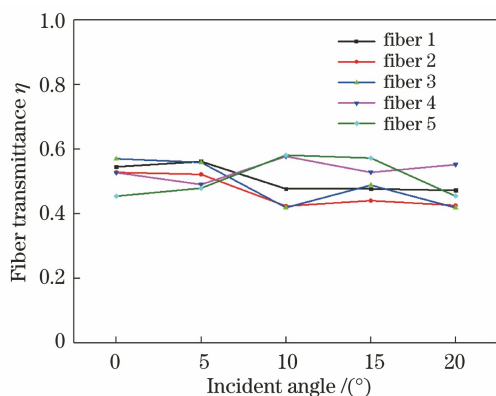


图 7 不同角度下的不同光纤透过率曲线

Fig. 7 Transmission curves of different optical fibers at different angles

透过率标准差变大。在实际应用时期望光纤的包层端面不入光,以避免包层接触高折射率介质,从而导致光泄漏,本实验定制了厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的薄包层,以降低包层入光的影响,但从实验结果来看,包层入光带来的误差仍不可忽略,考虑其他误差源后,标准差的起伏小于 4%,包层入光误差有望进行统一补偿。另外,实际应用时包层环状端面可以进行涂黑处理以防止包层入光,从而减小包层能量损失在不同角度下的差异给光纤总透过率带来的负面影响。

在光纤角度宽容性、透过率一致性较为良好的基础上,原始光斑和单排光纤输出光斑的灰度值 (ADU) 剖线和相对强度剖线如图 9 所示。可以看到,原始光斑与光纤输出光斑具有较高的一致性。对高分辨率、高占空比的取样光斑进行插值处理,有

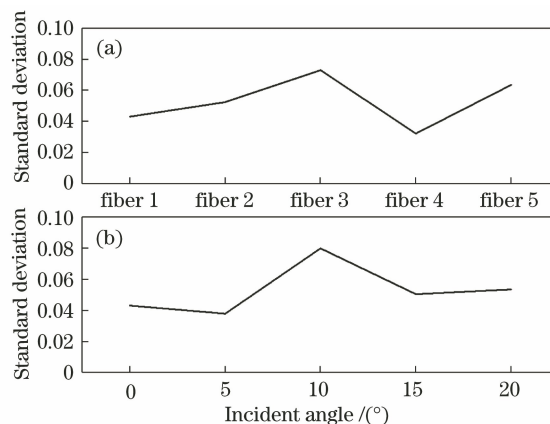


图 8 光纤透过率标准差。(a)每根光纤的透过率标准差; (b)不同角度下光纤透过率标准差

Fig. 8 Standard deviation of transmittance of optical fibers. (a) Standard deviation of transmittance of each optical fiber; (b) standard deviation of transmittance at different angles

望复原出具有低畸变的原始光斑,当要求高精度复原时,一致性的校准可在系统的总标定中完成。

5 结 论

将传光型光纤应用于激光光斑分布测量系统,仿真计算出入射角度变化引起的光纤透过率标准差低于 1.62%,验证实验的透过率标准差小于 8%,说明了传光型光纤透过率对于入射角度具有低敏感性,从而验证了光纤为系统带来 NA 角度范围内的入射角度宽容性;并对光纤的透过率一致性进行了分析,仿真计算出不同光纤的透过率标准差为 3%,

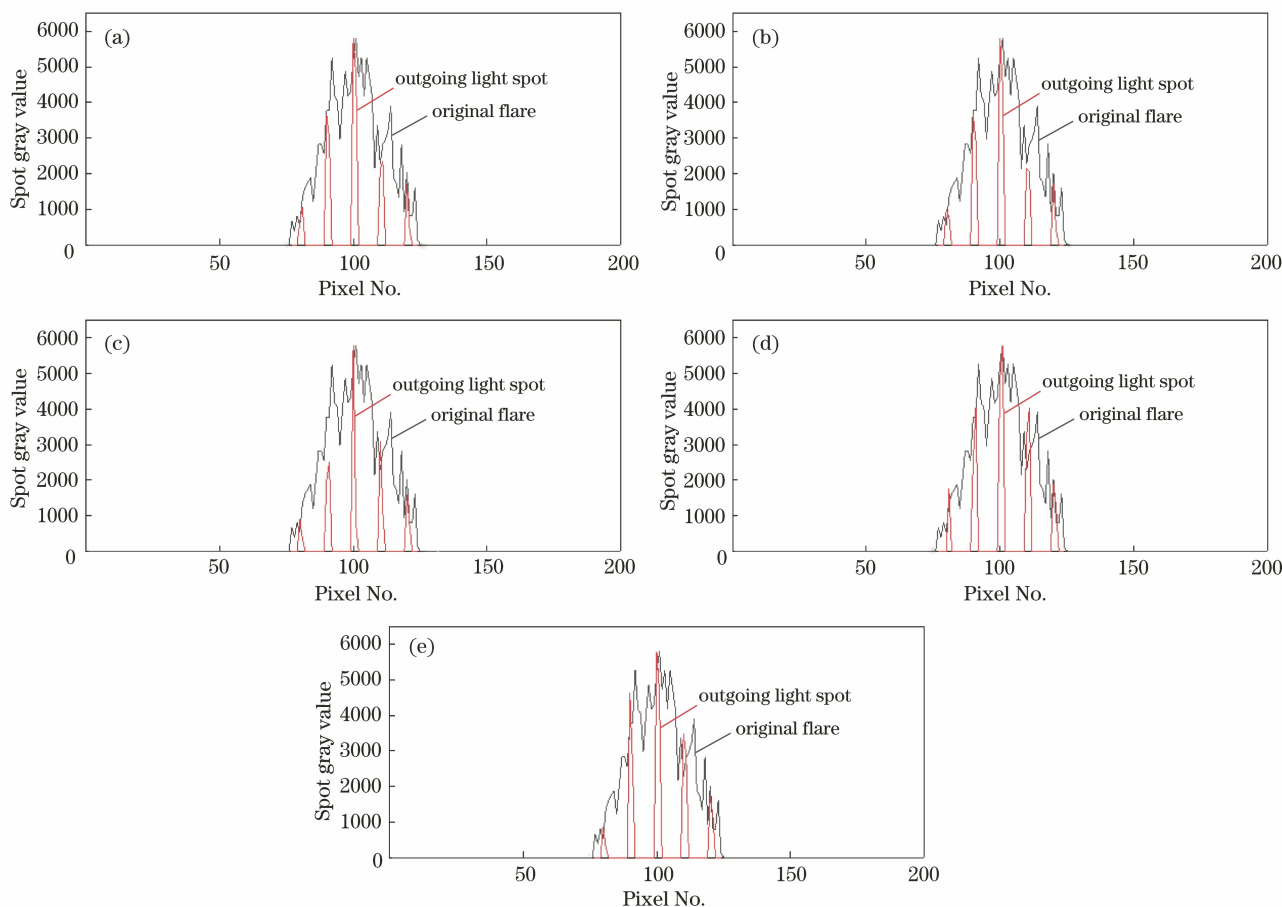


图 9 不同角度下的原始光斑与光纤输出光斑的灰度值剖面对比。(a)正入射；(b) 5°；(c) 10°；(d) 15°；(e) 20°
 Fig. 9 Comparison of the gray value profiles of the original spot and the optical fiber output spot at different angles.

(a) Normal incidence; (b) 5°; (c) 10°; (d) 15°; (e) 20°

验证实验的透过率标准差小于 8%，说明了光纤作为传光单元被集束为阵列时具有良好的一致性响应。根据这一设计思想及验证结果，下一步工作可以考虑设计具体的光纤阵列传光系统，结合光斑接收和测量设备，进行完整的光束质量评价。

参 考 文 献

[1] Yu Y A, Zhang L L, Tang Q J, et al. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(2): 255-258.
 于永爱, 张玲玲, 唐前进, 等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 255-258.

[2] Feng G B, Yang P L, Wang Q S, et al. Measuring technology for far-field beam profile of high power laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1615-1619.
 冯国斌, 杨鹏翎, 王群书, 等. 强激光远场光斑强度分布测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1615-1619.

[3] Gao X Y, He J Z, Xie C L, et al. Laser power measurement uncertainty of array detectors under

oblique incidence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1656-1662.

高学燕, 何均章, 谢川林, 等. 阵列探测器对斜入射激光的功率测量不确定度[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1656-1662.

[4] Ke Y, Zeng C L, Xie P Y, et al. Measurement system with high accuracy for laser beam quality[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4876-4880.

[5] Zeng Q Y, Qin K Y, Deng J, et al. Overall design of electro-optical stabilization platform based on MDO [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0918003.

曾钦勇, 秦开宇, 邓键, 等. 光电稳定平台的 MDO 总体设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0918003.

[6] Wang Z B, Yang P L, Feng G B, et al. Small integrating sphere structure made for measuring spatial power profile of high energy laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(S1): 118-121.

王振宝, 杨鹏翎, 冯国斌, 等. 用于高能激光功率取样测量的积分球单元[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(S1): 118-121.

- [7] Pang M, Zhou S, Wu J, et al. Research on scattering sampling and attenuating in measurement of laser intensity distribution[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3213-3217.
庞森, 周山, 吴娟, 等. 激光强度时空分布测量漫散射取样衰减技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3213-3217.
- [8] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [9] Li X W, Yu C L, Shen H, et al. Thermo-optic effect and mode instability threshold characteristics of high-power fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1001001.
李学文, 于春雷, 沈辉, 等. 高功率光纤激光热光效应及模式不稳定阈值特性研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1001001.
- [10] Chen L J, Song R, Hou J. Visible to near-infrared supercontinuum generated by random fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1136001.
陈兰剑, 宋锐, 侯静. 随机光纤激光器输出可见光至近红外波段超连续谱[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1136001.
- [11] Zhai C C, Zhang B, Qi S S, et al. Fabrication and properties of flexible chalcogenide fiber image bundles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0806005.
翟诚诚, 张斌, 祁思胜, 等. 柔性硫系玻璃光纤传像束的制备及性能研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0806005.
- [12] Wu Y, Yang P L, Chen S W, et al. Laser intensity distribution measuring method based on fiber array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 276-280.
吴勇, 杨鹏翎, 陈绍武, 等. 基于光纤阵列的激光光斑测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2): 276-280.
- [13] Xiang S B, Feng C G. Properties and applications of energy transmission in optical fiber[J]. *Optical Technology*, 2002, 28(4): 341-342.
项仕标, 冯长根. 光纤的能量传输特性及应用[J]. *光学技术*, 2002, 28(4): 341-342.
- [14] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics*[M]. 4th ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2018: 314-327.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2018: 314-327.
- [15] Zhang W G. *Principle and application of optical fiber*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 33-35.
张伟刚. *光纤光学原理及应用*[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2017: 33-35.
- [16] Yang P L, Feng G B, Wang Z B, et al. Detectorarray for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 521-525.
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 521-525.
- [17] Meng J J, Yu J, Mo Z Q, et al. Laser spot illuminance measurement method based on scattering imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0712004.
孟晶晶, 余锦, 谟泽强, 等. 激光光斑照度的散射成像测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0712004.