

文章编号:1007-2780(2018)07-0548-07

高均匀性小孔径激光照明系统

付瀚毅^{1*}, 刘原原²

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春富维安道拓汽车饰件系统有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要:激光照明应用当中激光的高斯分布和散斑现象极大地影响了照明质量,为了将激光器出射的高斯分布的激光整形成类似平顶分布,同时对散斑进行抑制,实现均匀的激光照明,对随机漫射体抑制散斑的可行性进行了探讨。设计了一套基于“随机微透镜阵列”的激光照明系统,可实现出光孔径 2 mm,半发散角 18°的平顶均匀激光照明。并对比了在此种结构下采用石英玻璃棒和自聚焦透镜作为光导元件时光斑质量的差别,对光斑的分布及散斑进行了测量,验证了此种方法能够将散斑对比度降低到 4.84%,极大地提升了激光照明质量。

关键词:散斑抑制;随机微透镜阵列;激光照明;散斑测量

中图分类号:TM923.01 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20183307.0548

High uniformity laser illumination system with small aperture

FU Han-yi^{1*}, LIU Yuan-yuan²

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun Faway Adient Automotive Systems CO., LTD, Changchun 130033, China)

Abstract: The speckle phenomenon and the Gaussian distribution affects image quality greatly in laser illumination. In order to change Gaussian distribution to flat-top distribution and reduce the speckle phenomenon to get uniform light spots, this paper discusses the feasibility of speckle reduction using random diffuser. We designed a laser illumination system using "random micro-lens array" as the random diffuser. It can achieve a flat-top light illumination with divergence angle 36° and aperture 2 mm. A comparison of the quality of the light spot is made using fused silica stick and G-lens as the light transmitting component. We measured the distribution of the light spot and the speckle. This method can be verified to reduce speckle contrast to 4.84%, which reflects the excellent ability to enhance the quality of laser illumination.

Key words: speckle reduction; random micro-lens array; laser illumination; speckle measurement

收稿日期:2018-01-10;修订日期:2018-03-29.

基金项目:吉林省自然科学基金项目(No.20150101040JC);吉林省重点科技研发项目(No.20180201031GX)

Support by Natural Science Foundation of Jilin Province(No.20150101040JC);Key Technology Research of Jilin Province(No.20180201031GX)

* 通信联系人, E-mail:ciomp_fhy@163.com

1 引言

激光在照明方面具备许多的显著优点:方向性强、亮度高、运行寿命长、无有害电磁辐射等,同时还可实现近红外以及红外波段的高功率输出,因而,激光照明技术受到了广泛的关注^[1]。激光照明可以应用于主动红外夜视监控、激光显示、航天交会对接等领域,应用范围极其广泛,其中光源可选择可见波段激光和红外波段激光,但无论选择哪个波段的激光都对其照明光斑的质量有着较高的要求,激光照明光斑的质量直接影响到各领域产品的性能。影响光斑质量的主要是激光出射的高斯分布以及因激光干涉而产生的激光散斑,对激光出射光束进行整形,同时对激光散斑进行抑制,是提高激光照明效果最有效的途径^[2]。

在激光平顶整形方面,目前大多数的研究主要是应用非球面、二元光学元件进行整形,可以实现某一焦面位置处或固定光斑大小下一定距离内的激光平顶输出。这两种方法都对光学元件的加工、入射光束的指标有着精准的要求。在散斑抑制方面,学者们也提出了诸多方法,如震动光纤法、转动积分棒法、震动屏幕法、波长多样性法和相位元件法等。然而都有各自的不足之处,如结构复杂、成本高、抑制散斑效果一般等^[3-9]。

本文通过对随机漫射体抑制散斑的原理进行分析,提出了一片转动“随机透镜阵列”与一片固定“随机透镜阵列”组合的抑制散斑的结构,这种结构具有实现方法简单、成本低、占用空间小、光能利用率高和抑制散斑效果好的特点,同时具有激光平顶整形功能。应用此结构设计了小出光孔径激光照明系统,满足如夜视监控应用下的隐蔽安装,并对比了采用自聚焦透镜和石英玻璃棒实现小孔径照明输出的优劣。

2 随机微透镜阵列抑制散斑结构

当激光照明在用波长来度量的粗糙表面上时,激光会在空间上产生干涉,构成散斑。如果一个激光器发出的激光对物体照明,在它和激光器之间加入一个运动漫射体和一个静止的漫射体,漫射体的表面相对于光波来说是粗糙的。

在漫射体持续运动的过程中,照明在物上的

每一点激光的位相在持续地变化,所以这些点对于在照明像面上的对应点所产生的振幅也在不断变化,使得在此时间内,照明像面中每一点上的散斑强度随时间变得强弱起伏。在积分时间 T 内照明光斑上的每一点测量得到的强度不同散斑的积分。根据 Goodman 的理论,如果在积分时间 T 内产生了 M 幅不同的散斑图样,那么,散斑的对比度可以降低至 $1/\sqrt{M}$ ^[10-12]。

一般的漫射体如磨砂玻璃,在激光照射到其表面时,在 2π 空间发散,降低了入射光的利用率。在激光照明应用当中,要求出射光的有较好的亮度均匀性好和较高的光能利用率。一种“随机微透镜阵列”可以实现如上要求,它所出射的光有着固定的发散角而不是漫反射,并且在发散角内的光分布均匀。

与普通的漫射体相比,“随机微透镜阵列”有着不可比拟的优势,“随机微透镜阵列”由许多不同的、单独的可控微透镜单元组成,可以对整个发光分布区域和光束质量进行控制。图 1 可以看到在显微镜下“随机微透镜阵列”的图像,一个微透镜的直径约 $50\ \mu\text{m}$ 。

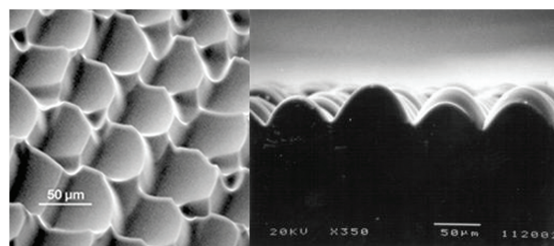


图1 显微镜观测下的“随机微透镜阵列”的图像
Fig.1 Image of the “random micro-lens array” observed by microscope

图 2 对比了为 LED 手电直接照射的光斑图像和经过“随机微透镜阵列”后的光斑图像。可见 LED 直接发出的光分布不均匀,而在经过“随机微透镜阵列”后在照明平面上形成的是具有一定发散角的、均匀的光斑。

“随机微透镜阵列”的另外一个特点是可以提供特定的发散角,如图 3 所示,光源经准直后照明在“随机微透镜阵列”上,出射光分布在一定发散角内,而不是在 2π 空间发散。

与其它漫射体相比,“随机微透镜阵列”还有着更高的透射率,其透过率为 92%,我们对“随机

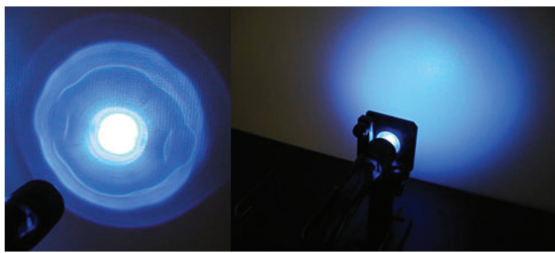


图 2 “随机微透镜阵列”LED 手电照明光斑的整形效果

Fig.2 Effect of LED glim illuminating spot shaping by the “random micro-lens array”

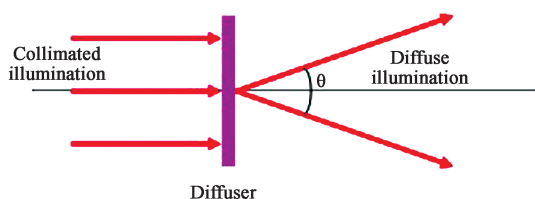


图 3 “随机微透镜阵列”的发散特性

Fig.3 Diverge characteristic of the diffuser

微透镜阵列”的后表面镀相应波段的增透膜,可以进一步将其透过率提高到 95%。所以这种随机漫射体不但可以对出射光的发散角度进行精确的控制,同时也有着较高的透射率,这样可以极大增加了后续光学系统所收集的能量,确保了在激光照明应用当中尽可能地降低光能损失。

3 小孔径激光照明系统设计

根据之前的理论,我们选用两片“随机微透镜阵列”串联,其中一片旋转、一片静止,作为光束整形和激光散斑抑制结构,结合此结构整体照明系统设计思路如下:

首先要对光纤发出的激光进行准直,照明在第一片“随机微透镜阵列”上,根据光纤孔径 200 μm ,准直后要求发散角小于 0.5°,此时留有余量取准直光学系统焦距为 30 mm,总体长为 21 mm。

随着照明在“随机微透镜阵列”上的光斑尺寸的增大,那么光斑所覆盖的微透镜也就越多,匀化效果也就越好,这里我们取光斑直径为 8 mm,图 4 为准直光路。

当平行光照射“随机微透镜阵列”时,出射光发散角为“随机微透镜阵列”的设计值,当具有一

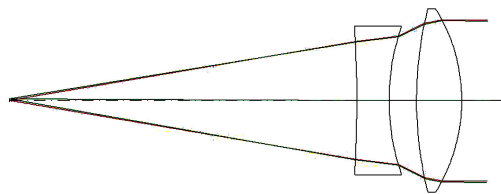


图 4 激光准直光学系统

Fig.4 Optical system of laser collimation

定发散角的光入射“随机微透镜阵列”时,出射光发散角由下式得出:

$$\theta_{\text{output}} = \sqrt{\theta_{\text{lightsource}}^2 + \theta_{\text{RMA}}^2},$$

其中: θ_{output} 为出射光角度, $\theta_{\text{lightsource}}$ 为入射光角度, θ_{RMA} 为“随机微透镜阵列”设计发散角。根据不同的需求我们可以用光刻技术加工不同角度的“随机微透镜阵列”,此时我们按“随机微透镜阵列”设计发射角 3°设计。

此时由于第一片运动“随机微透镜阵列”被准直光照明,故从第一片出射角度为 3°,在照射第二片“随机微透镜阵列”后出射光发散角 = $\sqrt{3^2 + 3^2} = 4.24^\circ$,此时出射光可视为远心光。

照明光学系统是将“随机微透镜阵列”出射的光的口径进行控制,使其等于 2 mm,为了保证边缘照度相对于中心照度更加均匀,采用双远心光学结构,边缘视场照度均匀性达到 85% 以上,在光学系统前端加入导光光学元件,可将 2 mm 的出光端向外延长,便于隐蔽安装。

这里导光光学元件我们考虑在石英玻璃棒和自聚焦透镜之间选择。石英玻璃棒的方式是,入射端面的光在其内部进行多次全反射最终从另一端面出射。自聚焦透镜由于其内部具有梯度折射

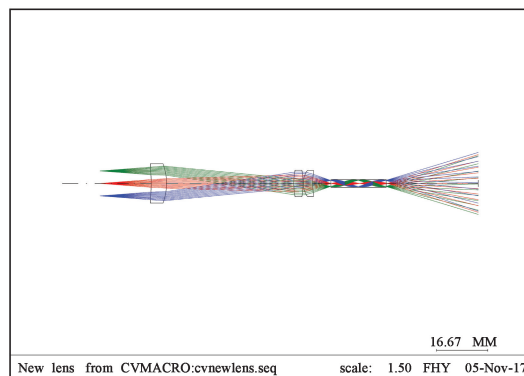


图 5 照明光学系统

Fig.5 Optical system of laser illumination

率,入射端面的光在其内部进行S型传导,可将在其端面的入射光进行传导,若满足自聚焦透镜的一个周期,可将入射端面的“像”平移至出射端面。

我们这里按出射光发散角 36° ,根据散射片光斑尺寸及出光孔径的放大关系对照明光学系统进行类双远心结构设计,照明光学系统的作用是将“随机微透镜阵列”出射的均匀分布的光调制为所需的发散角及尺寸,成像在导光元件的前表面,然后通过石英玻璃棒或自聚焦透镜进行传导,最终由后表面出射,图5为照明光学系统示意图。

4 照明光斑测试

对实际照明质量进行评估,主要考察光斑的强度分布及对散斑对比度进行检测,单波长激光通过不同的系统投影到屏幕上,对形成的光斑进行测试,这里我们选用波长 850 nm 的近红外激光。

首先,我们用相机拍摄光纤直接出射光斑,然后分别拍摄加入转动“随机微透镜阵列”后应用自聚焦透镜和石英玻璃棒的光斑,并用 Matlab 对光斑分布进行分析,不同条件下的光强分布图见图6~图8。

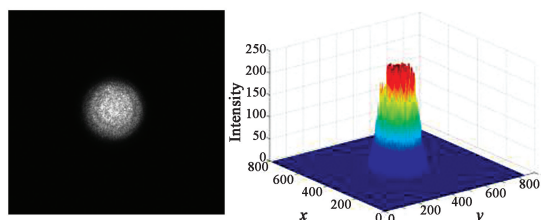


图6 光纤直接出射光斑光强分布

Fig.6 Light intensity distribution of the light spot from the fiber

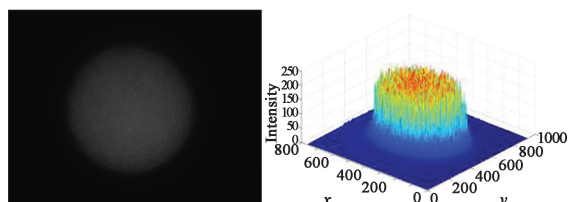


图7 加入转动“随机微透镜阵列”后自聚焦透镜结构出射光斑光强分布

Fig.7 Light intensity distribution of the light spot from the optical system with rolling “random micro-lens array” and G-lens

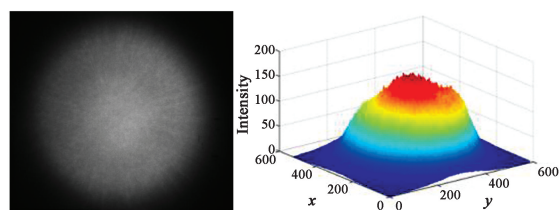


图8 加入转动“随机微透镜阵列”后石英玻璃棒结构出射光斑光强分布

Fig.8 Light intensity distribution of the light spot from the optical system with rolling “random micro-lens array” and fused silica stick

从图中可以看出,光纤直接出射光斑具有明显的高斯分布特征,加入转动“随机微透镜阵列”后自聚焦透镜结构出射光斑分布呈近似“平顶”分布,而石英玻璃棒结构出射的光斑仍具有高斯分布特征,经分析认为由于石英玻璃棒依靠全反射对端面的均匀像进行传导,对于大角度的光有一定损失,造成边缘光强降低。对比可见自聚焦透镜结构作为此系统的导光结构具有明显的优势。

散斑对比度是考察散斑效应强弱的指标,它的计算公式如下:

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}},$$

其中: σ_I 为光斑每一点强度的标准差, $\bar{I}$ 为光斑强度的平均值。

接下来我们对光纤直接出射以及加入转动“随机微透镜阵列”下的散斑对比度进行测试,同时将“随机微透镜阵列”静止时光斑的散斑加入比较。取光斑的中心区域计算散斑对比度。

对光纤直接出射光斑的散斑图样进行测试,拍摄图像如图9所示,我们能够看到,光纤直接出

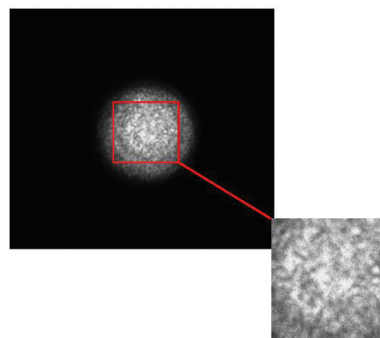


图9 光纤直接出射光斑的散斑图像

Fig.9 Image of the speckle with no speckle reduction

射光斑的不但呈高斯分布且散斑严重。

光强分布图如图 10 所示,经计算散斑对比度为:27.38%,能够看出光纤直接出射的光斑散斑对比度高,散斑清晰可见。

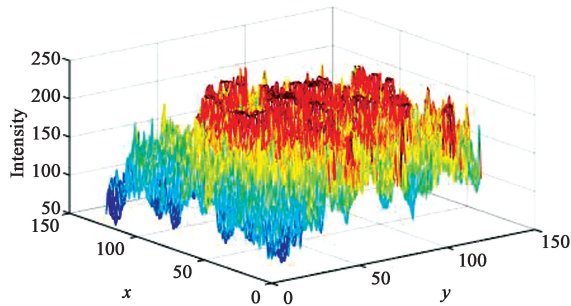


图 10 光纤直接输出光斑的散斑分布

Fig. 10 Distribution of the speckle with no speckle reduction

我们将光学系统中加入静止“随机微透镜阵列”结构后出射光斑的散斑进行测试,从图 11 可以看出,虽然光斑中心和边缘变得均匀但依旧存在相对剧烈的散斑。

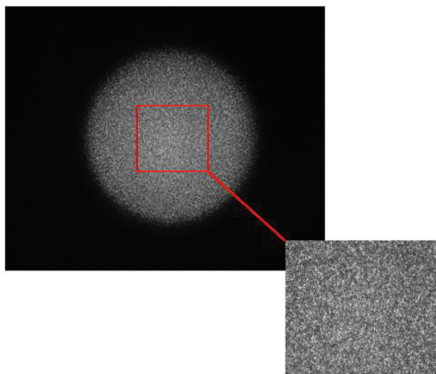


图 11 加入静止“随机微透镜阵列”后光斑的散斑图像

Fig.11 Image of the speckle with static “random micro-lens array”

光强分布图如图 12 所示,计算得出加入静止“随机微透镜阵列”出射光斑的散斑对比度为 20.79%。

我们使光学系统中的“随机微透镜阵列”转动,并对散斑进行拍摄,散斑图像如图 13 所示。

经 Matlab 计算光强分布图如图 14 所示,经计算散斑对比度为 4.84%。

可以看出在光路中加入了转动“随机微透

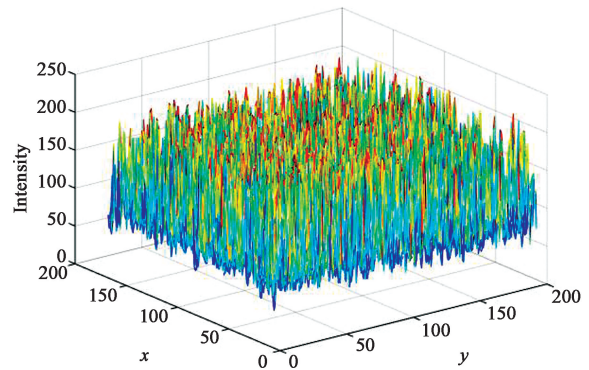


图 12 加入静止“随机微透镜阵列”后光斑的散斑分布

Fig.12 Distribution of the speckle with static “random micro-lens array”

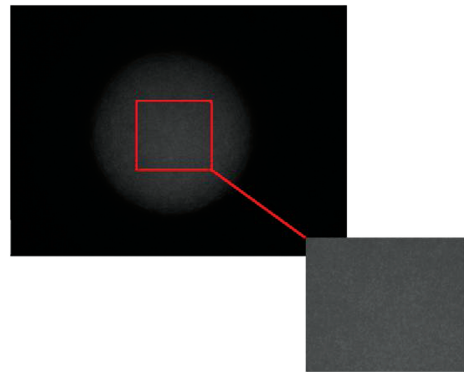


图 13 加入转动“随机微透镜阵列”后光斑的散斑图像

Fig.13 Image of the speckle with rolling “random micro-lens array”

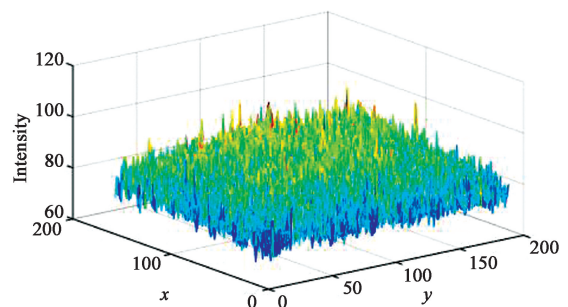


图 14 加入转动“随机微透镜阵列”后光斑的散斑分布

Fig.14 Distribution of the speckle with rolling “random micro-lens array”

阵列”后,光强的分布变得更加均匀,与此同时散斑对比度也有了显著的下降,极大地提升了光斑

质量,可以得出在“随机微透镜阵列”转动的过程中,光斑上的各点在积分时间内不再是固定的明或暗,而是不断变化,使得每一点的亮度变得均匀,从而降低了散斑对比度。同时对光纤出光端功率及经过系统后出光功率进行了测量,得出该系统能量利用率为71.2%。

5 结 论

利用一片转动“随机微透镜阵列”,一片静

止“随机微透镜阵列”的结构可以将光纤出射激光进行平顶整形,同时可将散斑对比度降低到4.84%,提高了激光照明的均匀性,解决了长期以来激光散斑对各领域照明效果的影响,并设计了小孔径激光照明系统,为夜视监控领域提供了隐蔽的光机结构,并测试分析了自聚焦透镜作为光导元件优于石英玻璃棒,与此同时由于这种结构占用整个光学系统空间很小,且光能利用率高,为激光照明提供了一种值得借鉴的结构形式。

参 考 文 献:

- [1] 陈林,毛茗,林熙烨. 激光辅助照明主动近红外成像系统[J]. 半导体光电,2014,35(3):541-542,545.
CHEN L, MAO M, LIN X Y. Laser light added active near infrared image system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(3): 541-542, 545.
- [2] 胡传国,胡煜,王红. 用于微光观瞄系统的激光照明器[J]. 应用光学,2001,22(3):5-8.
HU C G, HU Y, WANG H. Laser illuminator used in low-light level observing & sighting system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(3): 5-8. (in Chinese)
- [3] 康玉思,刘伟奇,冯睿,等. 激光电视的消干涉[J]. 中国激光,2008,35(4):615-619.
KANG Y S, LIU W Q, FENG R, *et al.* Offset interference of laser TV [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(4): 615-619. (in Chinese)
- [4] TRAN T T K, SVENSEN Ø, CHEN X Y, *et al.* Speckle reduction in laser projection displays through angle and wavelength diversity [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1267-1274.
- [5] 张岳,郝丽,柳华,等. 激光显示的原理与实现[J]. 光学精密工程,2006,14(3):402-405.
ZHANG Y, HAO L, LIU H, *et al.* Principle and realization of laser display technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 402-405. (in Chinese)
- [6] 田志辉,刘伟奇,李霞,等. 激光显示中散斑的减弱[J]. 光学精密工程,2007,15(9):1366-1370.
TIAN Z H, LIU W Q, LI X, *et al.* Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(9): 1366-1370. (in Chinese)
- [7] 梁传样,张巍,芮大为,等. 基于硅基液晶实现激光投影显示系统匀光整形和散斑抑制[J]. 中国激光,2016,43(12):12010016.
LIANG C X, ZHANG W, RUI D W, *et al.* Beam homogenized shaping and speckle suppression in laser projection display system using liquid crystal on silicon [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 12010016. (in Chinese)
- [8] 张金凯,陈晓波,邵海燕,等. 基于混合镜组模型的变焦镜头设计[J]. 光学精密工程,2018,26(1):38-47.
ZHANG J K, CHEN X B, SHAO H Y, *et al.* Zoom lens design using mixed lens modules [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 38-47. (in Chinese)
- [9] 任淑艳,张琢,刘国栋,等. 精密测量中激光成像系统散斑的抑制因素[J]. 光学精密工程,2007,15(3):331-336.
REN S Y, ZHANG Z, LIU G D, *et al.* Restraining speckle of laser imaging system in accurate measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3): 331-336. (in Chinese)
- [10] 刘韬,胡玥,董健,等. 激光主动照明光学系统设计[J]. 中国光学,2016,9(3):342-348.
LIU T, HU Y, DONG J, *et al.* Design of laser active illumination optical system [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 342-348. (in Chinese)

-
- [11] GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007.
- [12] FRANÇON M. *Laser Speckle and Applications in Optics* [M]. Holtand:Elsevier, 2012.
- [13] BARIBEAU R, RIOUX M. Influence of speckle on laser range finders [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(20): 2873-2878.

作者简介:付瀚毅(1985—),男,吉林长春人,助理研究员,2014 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光显示及空间目标成像方面工作。E-mail:ciomp_fhy@163.com