

文章编号 1004-924X(2017)09-2333-06

## 基于多光束照明的回波光场散斑抑制机理

王 锐<sup>1</sup>, 史瑞新<sup>2\*</sup>

(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. 吉林大学 口腔医学院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 为了有效抑制激光照射目标表面所产生的散斑效应, 提高激光主动成像图像质量, 提出采用多光束照明技术, 通过理论分析与仿真实验相结合的方式验证了多光束照明在抑制回波散斑效应方面的作用。首先, 建立了多光束分光照明模型, 理论分析了多光束照明对于完全散射叠加场和部分散射叠加场的散斑抑制原理。在此基础上, 根据理论模型构建了仿真实验系统, 采用不同能量分配的分光方式, 对 3 种不同表面粗糙度的目标进行了单光束回波散斑对比度和多光束回波散斑对比度实验评估。实验结果表明: 等能量 4 光束照明的回波散斑对比度仅为单光束对比度的 1/2, 与理论分析结果完全吻合, 充分验证了多光束照明技术在回波光场散斑抑制方面的有效性。

**关键词:** 激光主动探测; 多光束照明; 散斑效应; 粗糙度

**中图分类号:** TP929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2333

## Suppression mechanics of returning wave speckle with multibeam illumination

WANG Rui<sup>1</sup>, SHI Rui-xin<sup>2\*</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;  
2. School and Hospital of Stomatology, Jilin University, Changchun 130021, China)

\* Corresponding author, E-mail: srx781110@sina.com

**Abstract:** In order to suppress the speckle effect of target surface induced by laser illumination, and to increase the image quality of laser active imaging, the multibeam illumination technology was adopted and its effect on rejection of returning wave speckle was investigated theoretically and experimentally. The splitting illumination model of multibeam was established. The speckle suppression principle of multibeam illumination in entire speckle superposed field and partly speckle superposed field was analyzed. On the basis of the principle and theory model, the simulation experiment system was set up, where the returning speckle contrast of single beam and multibeam illuminated on three different roughness targets with different splitting ways was evaluated by adjusting the energy distribution. The experiment result indicates that the contrast of homenergetic four beam can be reduced to half of that of single beam, which complies to the theory analysis and proof the feasibility of speckle rejection using multibeam illumination.

**Key words:** laser active detection; multibeam illumination; speckle effect; roughness

收稿日期: 2017-06-23; 修订日期: 2017-07-15.

基金项目: 中科院创新基金资助项目 (No. CXJJ-17-M132)

## 1 引言

随着激光器技术的不断进步,激光主动探测技术发展迅速。其中,激光主动照明成像技术已成功应用于国防、城市安全、水下探测<sup>[1]</sup>等多个领域。相比于传统的被动成像技术,激光主动照明成像在全天时条件下可提供目标高分辨率、高对比度图像。但激光光源的相干性易引起散斑效应<sup>[2]</sup>,这种效应在针对粗糙目标表面照明的过程中会影响图像质量。在保证激光主动照明成像系统作用距离的情况下,如何有效抑制散斑噪声,是目前亟待解决的技术问题。

针对散斑场强度的不均匀性,Goodman<sup>[3-4]</sup>通过增加光场偏振多样性、利用运动漫反射体进行时间平均、波长和角度多样性以及减弱时间和空间相干性等方法进行抑制。Dayton<sup>[5]</sup>利用 3 种不同相干性的激光器(高相干脉冲激光器、带宽分别为 2 nm 和 12 nm 的两台连续半导体激光器)进行了主动照明成像实验,对像面散斑和闪烁进行了对比,随着照明激光器相干度的下降,成像结果相关性明显增加。由上述理论基础研究可知,通过降低照明光束相干性可有效抑制散斑效应,但激光相干性的降低势必会引起其他相关技术指标的下降,因此,如何在保证系统作用距离的情况下降低照明光束相干性,成为实现散斑效应抑制的难点问题。

多光束照明技术通过改变照明光束间的相干性可在一定程度上影响远场光斑的某些特性,美国林肯实验室曾开展过多光束照明在闪烁效应抑制方面的研究工作,通过理论仿真和实验研究,充分证明了多光束照明技术的先进性<sup>[6]</sup>。但多光束照明技术对散斑效应的抑制作用尚未得到充分证实。

本文通过建立多光束分光照明模型,对单光束及多光束照明光场的散斑产生机理进行理论分析,并构建了仿真实验系统,评估了单光束及多光束的回波散斑对比度。

## 2 多光束分光照明模型

本文所提出的多光束分光照明模型的基本原理是通过破坏照明光束的时间相干性进而降低其

空间相干性<sup>[7]</sup>,在设计合理的分光系统的基础上,将单束光分为多束光,并在相邻光束间加入相应的光程差,导致各光束间互不相干。在远场目标处,通过多光束合成对目标进行照明,可保证每一束光相干性的基础上,有效降低了整个照明光场的相干性,进而达到抑制散斑效应的目的。

多光束分光照明模型如图 1 所示,以 4 光束分光为例做简要介绍:激光器所出射光束依次经过四套偏振分光组件,每个组件由 1/2 波片和偏振分光棱镜组成,1/2 波片可改变入射激光偏振方向,偏振分光棱镜可实现  $p$  偏振态分量反射, $s$  偏振态分量透射,通过 1/2 波片和偏振分光棱镜的相互配合,即可在不同的分光组件上实现不同比例的反射光和透射光调节,因此,通过该分光模型可以得到任意能量分配比例的四束光。在此基础上,通过调整折转反射镜的位置,可调整相邻光束间的光程差,进而形成能量分配比例可调、光程差可调的多光束照明光场。

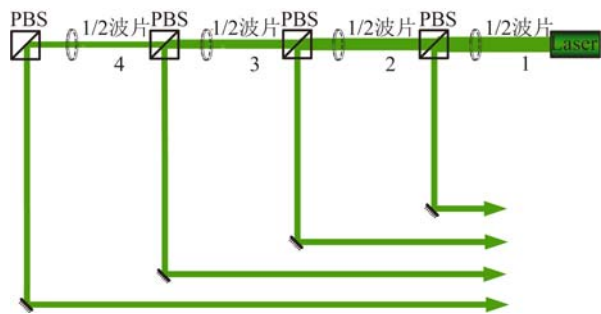


图 1 能量可调的多光束照明发射模型

Fig. 1 Multibeam illumination model with adjustable energy

如果要实现等能量 4 光束发射,调整的原则就是保证每束光在  $p$  偏振态方向的能量相等。

## 3 多光束散斑抑制原理

多光束照明条件下的散斑效应可归结为独立散斑强度叠加和相关散斑强度叠加问题。

### 3.1 完全散射散斑叠加场

目标表面为完全粗糙表面时,激光发射能量为  $E_s$ ,  $N$  束光形成的散斑场能量分别为  $E_i, i=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  束光互不相干,因此,叠加场散斑强度可以看作  $N$  束光各散斑场的强度叠加:

$$E_s = \sum_{i=1}^N E_i. \quad (1)$$

在讨论叠加散斑场对比度的过程中,同样由于  $N$  束光互不相干,且每束光均产生完全散射散斑,因此,可认为叠加散斑场对比度是  $N$  束光散斑叠加形成的。散斑对比度的具体表达形式为<sup>[8]</sup>:

$$C = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle^2}}{\sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle}, \quad (2)$$

其中  $\langle E_i \rangle$  为第  $i$  束光的强度均值。在各光束强度相同的情况下,式(2)可简化为:

$$C = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle^2}}{\sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (3)$$

由于完全散射散斑场对比度为 1,所以式(3)可以理解为当等能量  $N$  束光照明目标时,能将散斑对比度降低为原来的  $1/\sqrt{N}$ 。

### 3.2 部分散射散斑叠加场

目标表面为非完全粗糙表面时,单束光形成的散斑场服从修正 Rice 分布,因此, $N$  束光叠加情况下的散斑场与完全散射散斑叠加场有所不同。同样拟定激光的发射能量为  $E_s$ ,  $N$  束光形成

$$p_{E_s}(E_s) = \frac{(2E_s)N-1}{\langle E_{0n} \rangle} \exp\left[-\frac{E_s + NE_{0CR}}{\langle E_{0n} \rangle}\right] \frac{E_{N-1}\left[\frac{2\sqrt{NE_{0CR}E_s}}{\langle E_{0n} \rangle}\right]}{\left[\frac{2\sqrt{NE_{0CR}E_s}}{\langle E_{0n} \rangle}\right]^{N-1}}, \quad (8)$$

其中  $E_{N-1}(x)$  表示  $N-1$  阶修正 Bessel 函数。此时叠加场对比度可以表示为:

$$C = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sqrt{2E_{0CR}\langle E_{0n} \rangle + \langle E_{0n} \rangle^2}}{E_{0CR} + \langle E_{0n} \rangle} = \frac{1}{\sqrt{N}} C_0, \quad (9)$$

则叠加场对比度表示为:

$$C = \frac{\sqrt{\langle E_s^2 \rangle - \langle E_s \rangle^2}}{\langle E_s \rangle} = \left[ \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\langle E_i \rangle}{\langle E_s \rangle} C_i \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

其中  $C_i$  为第  $i$  个散斑场对比度。如果能保证在  $N$  束光能量不同的情况下照明同一目标,则叠加场散斑对比度可简化为:

$$C = \left[ \sum_{i=1}^N \langle E_i \rangle^2 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{C_0}{\langle E_s \rangle}, \quad (11)$$

通过以上理论推导可知,叠加场对比度与各光束散斑场对比度及各光束占总能量的比值有关,因此,等能量  $N$  光束叠加散斑场,对光场不均

的散斑场能量分别为  $E_i, i=1,2,\dots,N$ ,  $N$  束光互不相干,则发射场强度可看作是各光束强度的叠加:

$$E_s = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N |A_i|^2 = \sum_{i=1}^N (A_{iR_c}^2 + A_{iE_m}^2), \quad (4)$$

其中  $A_{iR_c}$  和  $A_{iE_m}$  为第  $i$  束形成的散斑场振幅的实部和虚部。其联合概率密度为:

$$p_{A_{is}}(A_{iR_c}, A_{iE_m}) = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp\left[-\frac{(A_{iR_c} - \sqrt{E_{iCR}})^2 + A_{iE_m}^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (5)$$

其中  $E_{iCR}$  为第  $k$  个散斑场镜面反射部分的强度,振幅实部和虚部的  $\sigma_i^2$  为<sup>[9-10]</sup>:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2} \langle I_m \rangle, \quad (6)$$

其中  $I_m$  为第  $i$  个散斑场完全散射部分的强度。如果各个散斑场强度相等且振幅实部和虚部方差相等,则有:

$$E_{1CR} = \dots = I_{iCR} = \dots = I_{NCR} = I_{0CR}, \\ \sigma_1^2 = \dots = \sigma_i^2 = \dots = \sigma_N^2 = \sigma_0^2 = \frac{1}{2} \langle E_{0n} \rangle. \quad (7)$$

通过特征函数的 Fourier 变化得到叠加场的概率密度函数<sup>[12]</sup>:

匀性能达到最佳抑制效果。将回波散斑对比度减小为原来的  $1/\sqrt{N}$ 。

基于上述理论分析可知:针对完全粗糙表面和部分粗糙表明进行照明时,等能量多光束均可获得较好的散斑抑制效果。

## 4 多光束散斑效应抑制仿真实验

为验证多光束照明回波光场散斑抑制效果的理论分析结果,构建了仿真实验系统,分别针对单光束和不同能量分配比例多光束的散斑对比度进行了仿真评估。

### 4.1 仿真实验系统构建

根据多光束分光照模型图 1,搭建发射实验装置。整套实验系统包括多光束分光系统、光束合成系统和参数评估系统。其中分光器组件及

多光束分光系统分别如图 2 和图 3 所示。实验所用激光器波长为 532 nm,功率为 1 W。

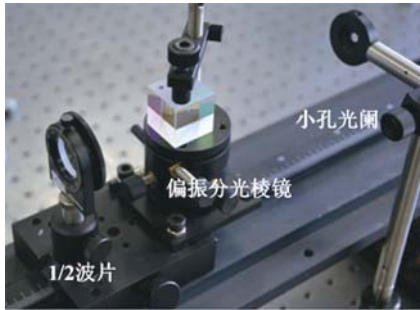


图 2 偏振分光棱镜及 1/2 波片组合

Fig. 2 Polarization splitting prism and 1/2 wave plate

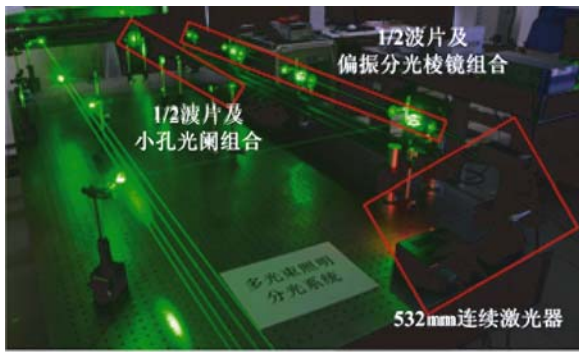


图 3 多光束分光照系统

Fig. 3 Multibeam illumination system

光束合成系统及参数评估系统如图 4 所示。采用长焦光学系统实现光束合成,并利用不同粗糙度反射面配合 CCD 相机实现到靶散斑特性参数评估。

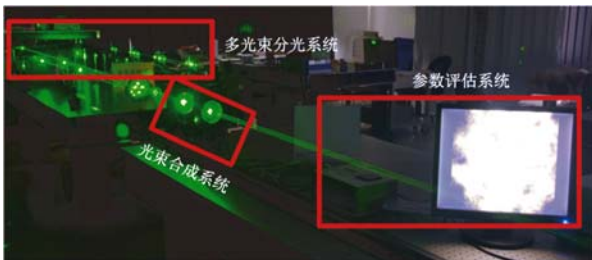


图 4 多光束散斑效应抑制仿真实验系统

Fig. 4 Simulation experiment system of multibeam speckle suppression

#### 4.2 单光束散斑效应评估实验

利用仿真实验系统首先进行单光束散斑效应的评估,分别针对 3 种不同表面粗糙度目标(粗糙

镜头盖、毛玻璃和白色接收屏)进行散斑图样采集以及散斑对比度分析,图 5 给出了 3 类目标的外观及散斑采集图样。图中 surface 1 为粗糙镜头盖,surface 2 为毛玻璃,surface 3 为白色接收屏。

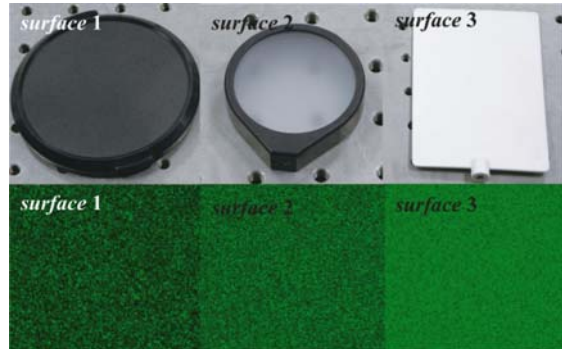


图 5 三种粗糙表面回波散斑场图样

Fig. 5 Three different roughness surface and their speckle images

针对每一种目标分别进行了 10 次散斑图样采集,并进行了散斑对比度参数评估,结果如图 6 所示,在此基础上,计算出 3 种不同目标的散斑对比度平均值,如表 1 所示。由实验结果可以看出,各类目标的散斑对比度差异较大,但 10 次统计结果显示同一目标散斑对比度相对稳定,数据变化幅度较小。

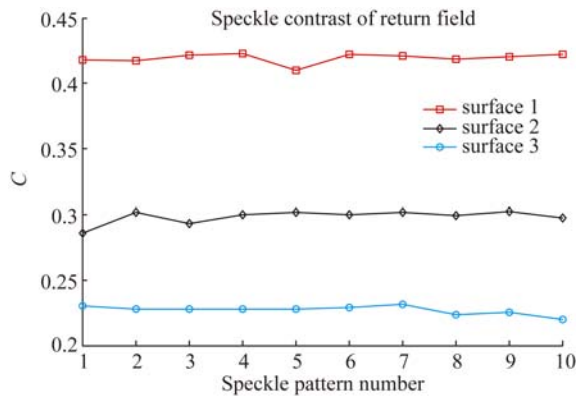


图 6 三种粗糙表面回波场散斑对比度

Fig. 6 Returning wave speckle contrast of three different roughness surfaces

表 1 三种粗糙表面回波场散斑对比度平均值

Tab. 1 Average values of speckle contrast of three different roughness surfaces

	surface 1	surface 2	surface 3
$\langle C \rangle$	0.419 3	0.298 3	0.227 0

4.3 多光束散斑效应评估实验

为验证等能量多光束的散斑对比度抑制效果,分别针对两组不同能量分配比例的多光束进行散斑对比度参数评估,如图表 2 所示。评估过程同样分别针对 3 种粗糙表面目标进行了散斑图样采集。

表 2 多光束照明实验能量分配

Tab.2 Energy distribution of multibeams

$I_i/I$	Group	
	1	2
$I_1/I$	1/8	1/4
$I_2/I$	18	1/4
$I_3/I$	18	1/4
$I_4/I$	5/8	1/4

图 7、图 8 和图 9 为不同粗糙度目标表面在两组不同能量分配多光束照明情况下的回波散斑图样,表 3、表 4、表 5 给出不同条件下单光束和 4 光束叠加场散斑对比度。其中,各单光束对比度和 4 光束实验对比度为实测结果,4 光束理论对比度是根据各光束所占总能量的比例和各自散斑对比度计算所得。对于单光束而言,能量强弱对回波散斑场对比度无影响,因此单光束对同一目标表面的照明散斑对比度数值基本相同,但是在多光束散斑场叠加情况下,不同强度单光束的叠加效果差异较大。其中,等能量 4 光束的散斑对比度最低,约为单光束条件下的 1/2。3 种不同粗糙度表面目标均获得了相同的数据结果,说明目标表面颗粒度并不影响多光束照明在抑制散斑噪声方面的效果。实验结果很好地印证了理论分析结果。

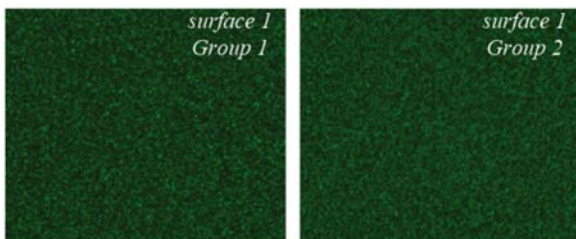


图 7 surface 1 实验结果

Fig. 7 Experiment result of surface 1

表 3 四光束照明散斑对比度平均值(surface 1)

Tab.3 Average values of 4 beams speckle contrast (surface 1)

		Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	4 Beams	
						Experiment	Theory
Group 1	$I_i/I$	0.125 1	0.123 8	0.123 5	0.627 6	—	—
	C	0.454 9	0.437 7	0.450 3	0.446 7	0.300 9	0.296 4
Group 2	$I_i/I$	0.247 2	0.245 8	0.259 1	0.247 8	—	—
	C	0.427 7	0.421 5	0.438 9	0.419 3	0.219 1	0.213 7

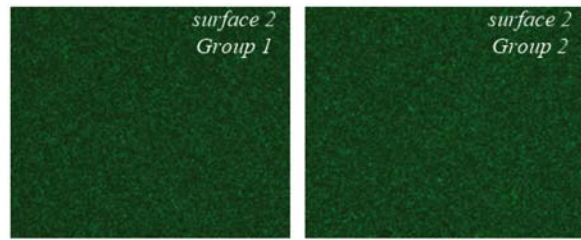


图 8 surface 2 实验结果

Fig. 8 Experiment result of surface 2

表 4 四光束照明散斑对比度平均值(surface 2)

Tab.4 Average values of 4 beams speckle contrast (surface 2)

		Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	4 Beams	
						Experiment	Theory
Group1	$I_i/I$	0.124 9	0.123 6	0.122 7	0.629 3	—	—
	C	0.326 8	0.311 0	0.316 6	0.305 9	0.211 0	0.204 3
Group2	$I_i/I$	0.248 7	0.247 3	0.245 4	0.258 6	—	—
	C	0.321 0	0.307 2	0.309 9	0.298 3	0.155 0	0.154 5

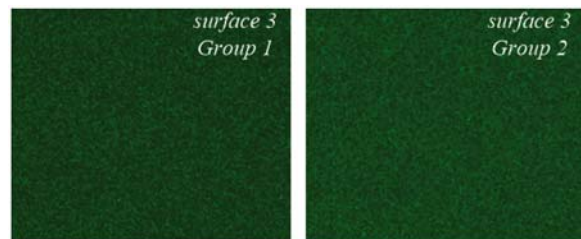


图 9 surface 3 实验结果

Fig. 9 Experiment result of surface 3

表 5 四光束照明散斑对比度平均值(surface 3)

Tab.5 Average value of 4 beams speckle contrast (surface 3)

		Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	4 Beams	
						Experiment	Theory
Group1	$I_i/I$	0.125 1	0.124 4	0.123 4	0.627 1	—	—
	C	0.259 3	0.257 1	0.253 6	0.243 5	0.166 6	0.162 4
Group2	$I_i/I$	0.250 7	0.249 3	0.247 3	0.252 7	—	—
	C	0.243 9	0.234 5	0.229 8	0.228 9	0.117 0	0.117 2

在此基础上,采用 808 nm 激光重复以上试验过程。实验结果表明,等能量 4 束光照明能够将回波散斑对比度减小为相同条件下单光束回波场的 1/2。同时,在改变 4 光束间光程差(采用 4 种不同光程差)的情况下评估了散斑对比度,不同光程差情况下均能够实现波散斑对比度减小为相同条件下单光束回波场的 1/2。

## 5 结 论

本文提出并讨论了多光束分光发射模型对回

波光场散斑的抑制原理。从理论分析入手,证明了等能量多光束照明可获得最佳的散斑抑制效果。在此基础上,建立多光束散斑效应抑制仿真实验系统,对单光束及不同能量分配情况下的多光束散斑对比度进行了评价。实验结果表明,在对不同粗糙度表面照明的过程中,等能量 4 束光均可将回波散斑对比度减小为相同条件下单光束回波场的 1/2,实验结果与理论分析结果完全吻合,有利证明了多光束照明技术在散斑抑制方面的有效性。

### 参考文献:

- [1] 王灿进,石宁宁,孙涛,等. 基于光纹特征的激光主动照明图像去模糊[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1159-1167.  
WANG C J, SHI N N, SUN T, *et al.*. Image deblurring for laser active illumination based on light vein features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1159-1167. (in Chinese)
- [2] 张绍阳,侯旭阳,崔华,等. 利用激光散斑获取深度图[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 633-641.  
ZHANG SH Y, HOU X Y, CUI H, *et al.*. Depth image acquisition using laser speckle [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 633-641. (in Chinese)
- [3] GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2008.
- [4] 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.  
GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics* [M]. CAO Q Z, CHEN J B, trans. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [5] DAYTON D, GONGLEWSKI J, ARNAULD C S. Laser speckle and atmospheric scintillation dependence on laser spectral bandwidth [J]. *SPIE*, 2009, 7476: 74760A.
- [6] HIGGS C, BARCLAY H T, BILLMAN K W. Multibeam laser illuminator approach [J]. *SPIE*, 1999, 3706: 206-215.
- [7] 王锐. 多束部分相干光抑制光强闪烁效应的仿真实验研究[J]. 发光学报, 2014, 35(7): 835-839.  
WANG R. Simulation experiment of using multiple partially coherent beams to limit laser intensity scintillation effect [J]. *Chinese Journal of luminescence*, 2014, 35(7): 835-839. (in Chinese)
- [8] 孔平,杨晖,林伟民,等. 动态散斑对比度颗粒测量法[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2633-2638.  
KONG P, YANG H, LIN W M, *et al.*. Measurement of particle sizes by contrast of dynamic laser speckle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2633-2638. (in Chinese)
- [9] OHTSUBO J, ASAKURA T. Statistical properties of laser speckle produced in the diffraction field [J]. *OSA Publishing*, 1977, 16(6): 1742-1753.
- [10] OHTSUBO J, ASAKURA T. Statistical properties of the sum of partially developed speckle patterns [J]. *OSA Publishing*, 1977, 1(3): 98-100.
- [11] OHTSUBO J. Joint probability density function of partially developed speckle patterns [J]. *OSA Publishing*, 1988, 27(7): 1290-1292.

### 作者简介:



王锐(1982—),男,吉林长春人,副研究员,2005年于长春理工大学获得学士学位,2010年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事激光探测方面的研究工作。E-mail: darui9999@163.com

### 通讯作者:



史瑞新(1978—),女,河北唐山人,博士,主治医师,2002年、2011年于吉林大学口腔医院分别获得硕士、博士学位,2014年9月至今于美国阿拉巴马大学牙学院正畸科做访问学者,主要从事低能量激光照射促进正畸牙齿移动过程中的骨重建研究。E-mail: srx781110@sina.com