

引用格式: CHENG Jin, ZHOU Shun, SUN Xue-ping, *et al.* Laser Speckle Suppression Based on Tunable Metasurface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0724001
程进,周顺,孙雪平,等. 基于可调超表面的激光散斑抑制方法[J]. 光子学报, 2020, 49(7):0724001

基于可调超表面的激光散斑抑制方法

程进¹,周顺¹,孙雪平¹,蒲欣欣¹,孙其梁²,徐英舜³,刘卫国¹

(1 西安工业大学 光电信息工程学院, 西安 710021)

(2 无锡微视传感科技有限公司, 江苏 无锡 214101)

(3 天津医科大学 生物医学工程与技术学院, 天津 300072)

摘要:为抑制激光散斑现象,利用时间平均抑制散斑理论的基本思想,设计了一个具有高透射率、随机相位功能的超表面结构,并结合 MEMS 技术实现了微纳旋转载台的设计制造,实现了超小型的散斑抑制器件制造.实验结果显示激光散斑对比度可降低至 2.63%,满足激光投影领域使用需求.该激光散斑抑制器件使用方法简单、能量利用率高、成本低且易于批量制造.

关键词:激光显示;散斑抑制;可调超表面;随机相位;微机电

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204907.0724001

Laser Speckle Suppression Based on Tunable Metasurface

CHENG Jin¹, ZHOU Shun¹, SUN Xue-ping¹, PU Xin-xin¹, SUN Qi-liang², XU Ying-shun³,
LIU Wei-guo¹

(1 School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 Wuxi V-Sensor Technology Co., Ltd, Wuxi, Jiangsu 214101, China)

(3 School of Biomedical Engineering and Technology, Tianjin Medical University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to suppress laser speckle, a metasurface structure with high transmittance and random phase function is designed, which utilizing the basic idea of time-averaged suppression speckle theory. Then integrated with MEMS technology, the design and manufacture of micro-rotation stages is realized, and to achieve a ultra-small speckle suppression device. The experimental results show that the laser speckle contrast can be reduced to 2.63%, which meets the needs of laser projection. This novel laser speckle suppression device is simple in use, high in energy utilization rate, low in cost, and easy to mass-produce.

Key words: Laser display; Speckle suppression; Tunable metasurface; Random phase; MEMS

OCIS Codes: 240.3695; 240.6700; 220.2740; 220.4000; 220.4241; 030.6140

0 引言

激光具有较高的单色性和较高的方向性,且色域广、亮度高、寿命长等优点,它的良好光束质量和亮度高的特点使其在激光显示设备中被广泛的应用,在激光显示领域占有重要地位^[1].但激光的强相干性会产生大干涉条纹和散斑现象,影响了投影成像质量,降低了图像的清晰度和分辨率,使其在激光投影显示的实际应用中受到了限制^[2].为了消除激光散斑对成像的影响,国内外的研究机构先后提出了很多种解决方法.本质方法可以分为两类:空间相干性抑制和时间相干性抑制^[3].常规技术有毛玻璃^[4]、振动光纤^[5]、转动微透

基金项目:国防基础科研项目(No.JCKY2016208A002)

第一作者:程进(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为微纳光学器件. Email: 624788236@163.com

导师:刘卫国(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光电子技术及电子材料. Email: wgliu@163.com

收稿日期:2020-03-26;录用日期:2020-05-12

<http://www.photon.ac.cn>

镜^[6]、振动 Hadamard 位相板^[1,7]、转动散射体^[8]等,其中毛玻璃因具有良好的散斑抑制效果已在很多光学系统中被广泛的应用.但毛玻璃具有较强的光学散射特性,在实际使用过程中造成了很大一部分的光能无法被利用.因此,毛玻璃方案虽然有较好的激光散斑抑制效果,但在激光显示领域中一直没有被大量的实际应用.散射体或者位相板通常会结合振动或者转动机构用在消相干系统中,抑制激光散斑的效果比较理想,但通常这些机构体积较大,不利于紧凑光学系统集成,且振动装置可能会干扰系统整体性能,所以适用性不是很强.随着光学技术的飞速发展,超表面技术成为当前研究的热点,它可实现电磁波的基本物理参量(相位、振幅、偏振)的精准控制从而对光束的灵活操纵^[9-10].如采用可调超表面技术获得一个可调随机相位板,那么它不仅具有高分辨率相位、高透过率、低发散角,且整体光路改动最小、光学设计简单.

本文提出基于时间相干性抑制的方式,通过可调超表面结构,实现激光散斑的抑制,并进行了相应的实验验证.可调超表面结构分为两个部分,一个是随机相位板功能的超表面平板结构,另一个是可电压调控的微纳旋转载台结构.超表面随机相位板可以看成一块针对工作波长透过率很高的光学平板,每个像素上都会附加一个随机相位值且像素非常高,当激光照射在旋转变化的相位板后,出射光斑在每个像素点上将附加随机相位,在探测器曝光时间内将会采集到数个不相干的散斑图案,从而实现激光散斑的抑制.

1 散斑抑制器件的结构设计

本文提出的方案为,设计具有随机相位功能的超表面作为随机相位板,采用 MEMS 微纳旋转振动技术实现超表面的可调.其原理如图 1 所示,当相干光经过超表面后,相位已经被打散呈随机分布,如图 1(b)所示,当它再叠加微纳旋转机构周期振动,散斑图案随时间和空间不断变化,探测器每一个像元在一个采集周期内会得到 N 种散斑图案,则散斑对比度相应地减弱至原静态时的 $1/\sqrt{N}$ ^[11].当在一个采样周期内非相干的独立散斑图案数目 N 增加时,则合成的散斑对比度将会减小,即散斑现象削弱.

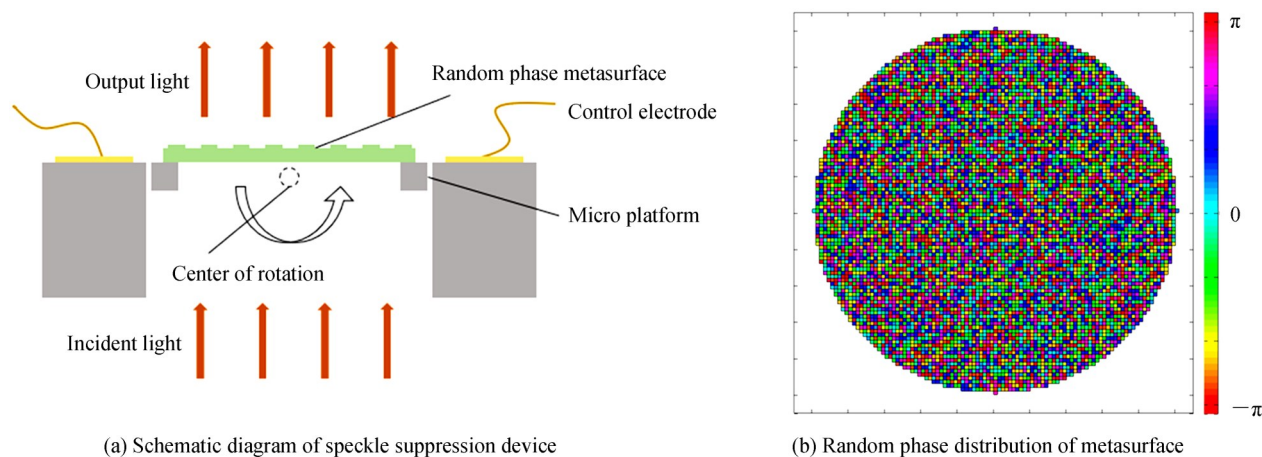


图 1 散斑抑制器件原理图
Fig. 1 Schematic of speckle suppression device structure

由于超表面的最小相位单元的大小 $< \lambda$ (850 nm),本设计选取的最小相位单元尺寸为 $550 \text{ nm} \times 550 \text{ nm}$,超表面直径为 1 mm ,当微纳旋转载台旋转 2.7° 时,每个相位单元相对于原来空间位置(水平方向)产生最大位移量约为 555 nm ,那么可将超表面旋转 2.7° 视为产生一种不同的散斑图案,如果微纳旋转载台的最大旋转角度为 10.8° ,超表面转动周期为 10 kHz ,探测器的积分时间为 $1/30 \text{ s}$,这样在探测器积分时间内,超表面转动 333 次,转动 1 次可产生 4 个不同的散斑图案,这样粗略估算一共可产生 $N=333 \times 4$ 幅不同的散斑图像.那么根据估算的散斑图像数目,根据散斑对比度理论公式, $C=1/\sqrt{(333 \times 4)}=0.0274=2.74\%$.通常激光显示系统散斑对比度 $\leq 4\%$,即认为是合格的系统^[11],故本文提出的散斑抑制器件理论可行.

1.1 随机相位的超表面结构设计

需要构成图 1(b)中的随机相位波前,首先要设计相位单元,本文采用圆孔结构作为相位子单元,如图 2(a)左下角所示,蓝灰色结构为衬底石英、红色结构为相位单元结构,单元结构的周期为 U 、孔径为 D 、孔

深为 H . 设计方法参见文献[13-14], 介质材料选择 TiO_2 ($n=2.483$), $U=550 \text{ nm}$, $H=180 \text{ nm}$, $D=200\sim 480 \text{ nm}$, 工作波长 $\lambda=850 \text{ nm}$, 其结构孔径 D 与透射率、相位的关系(仿真值)如图 2(a)所示. 从图 2(a)中可以看出, 直径 $D=200\sim 480 \text{ nm}$ 可完整覆盖 $-\pi\sim\pi$, 满足相位需求. 当孔径为 $400\sim 480 \text{ nm}$ 时透射率较低, 但大部分的透射率还是较高. 将这些孔状单元结构随机排布在石英基底上, 即可实现随机相位板, 其局部排布如图 2(b)所示, 其中白色为孔状结构.

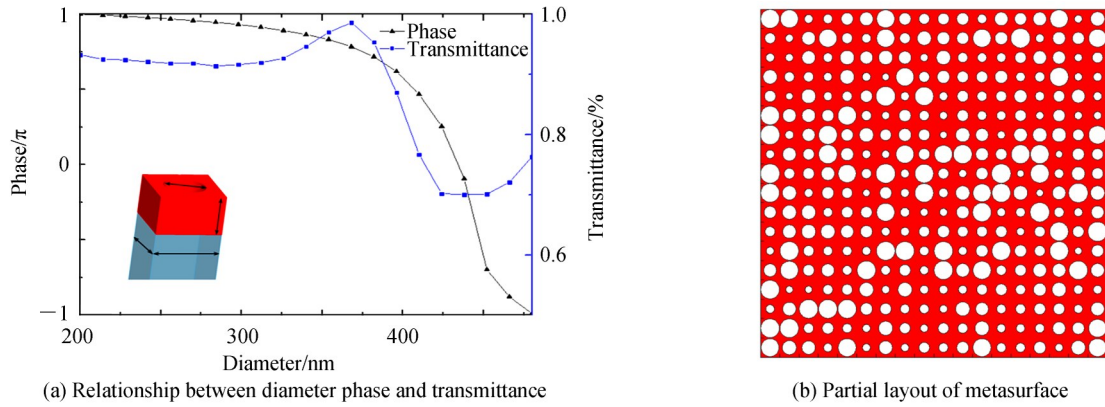


图 2 随机相位的超表面设计
Fig. 2 Design and layout of random phases

1.2 微纳载台可调结构的设计

本文采用 MEMS 技术^[15], 实现微纳旋转平台的角速度控制, 结构如图 3(a)所示, 采用纯硅制造, 包含固定基底、转轴、载物平台、静电驱动梳齿和电极. 当电极通电后, 静电驱动梳齿会产生驱动力带动载物平台绕转轴进行转动. 微纳旋转平台的关键参数如表 1 所示, 其中 A 为器件的长度、 B 为器件的宽度、 D 为载台大小、 L 为转轴长度、 w 为转轴宽、 h 为厚度、 c 梳齿长度、 d 为梳齿宽度、 N 为梳齿对数.

表 1 微纳旋转平台关键参数
Table 1 Key parameters of micro rotating platform

Parameter	A	B	D	L	w	h	c	d	N
Value	3.8 mm	2.1 mm	1 mm	510 μm	47 μm	50 μm	150 μm	5 μm	132

微纳旋转平台的旋转振动模态如图 3(b)所示, 通过仿真得到 $f=10.708 \text{ kHz}$, 此时仿真模型中包含了超表面结构; 当施加驱动电压 110 V 时, 可产生约 10° 的机械旋转角度, 满足设计需求.

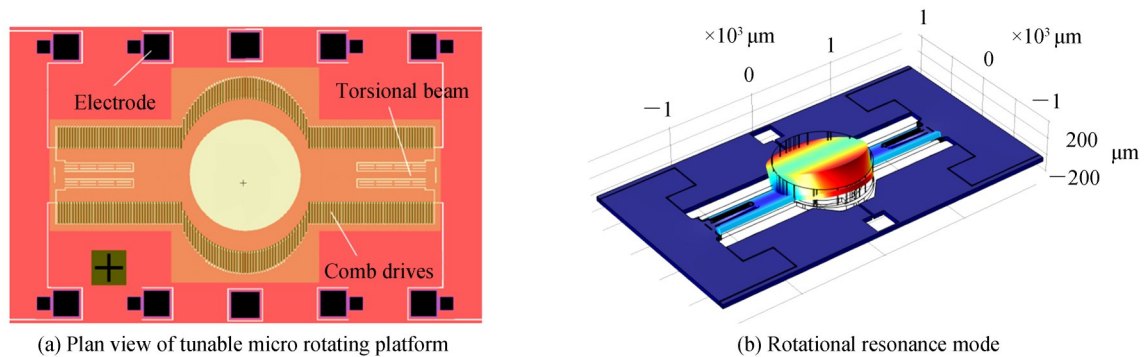


图 3 微纳旋转载台的设计
Fig. 3 Design of micro-rotation platform

2 实验与结果

根据上述的设计, 进行了器件制造. 制作出的随机相位超表面结构如图 4(a)所示, 结构特征尺寸符合预期设计值, 在工作波长 850 nm, 其透过率约 82%; 微纳旋转载台如图 4(b)所示, 结构符合预期设计值, 中心

孔区域是为了搭载超表面结构后光线可以很好的传播;采用微组装技术将两者进行键合,形成最终需要的消散斑器件,如图4(c)所示.对装配后的消散斑器件的驱动电压和机械转角进行了测试,通过调节频率,使其工作在旋转谐振状态,频率 $f=9.8$ kHz,测试在此频率下的电压和机械转角的关系,测试结果如图4(d)所示,其旋转转角最大值为 9.98° ,满足消散斑器件的设计需求.

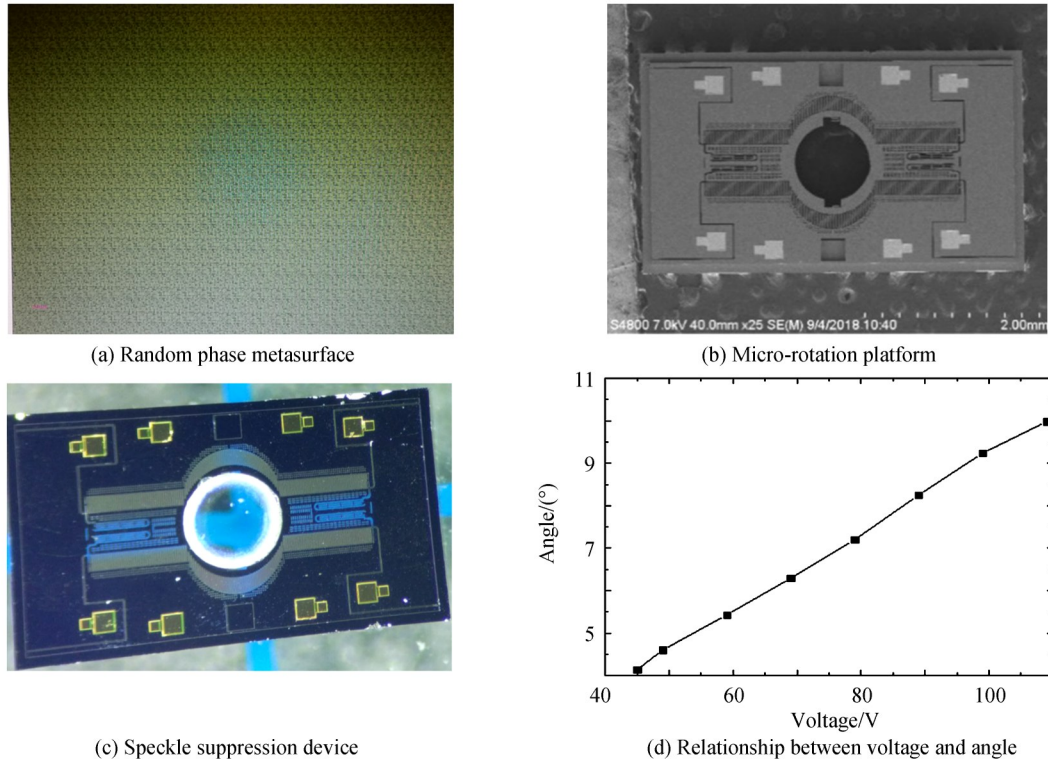


图4 散斑抑制器件及其驱动电压
Fig.4 Speckle suppression device and its driving voltage

对本文提出的新型散斑抑制器进行了光学测试,图5为激光扫描显示的一个简单的实验示意图.通过模拟激光扫描显示的工作方式,这里采用工作波长为 850 nm、功率为 50 mW的半导体激光器作为入射光源,经过散斑抑制器后,照射在旋转振镜上,此时旋转振镜进行连续扫描,将光线投射至屏幕上(图案为一字线

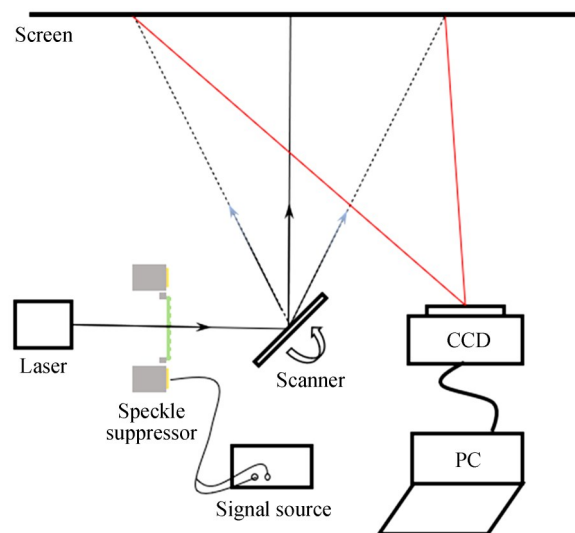


图5 实验测试装置
Fig. 5 Schematic of the test experiment equipment

形状,如图6(a)所示),通过红外CCD进行图像采集,然后通过电脑对图像进行处理,测得散斑对比度数值.散斑对比度可衡量图案光强噪声情况,本文散斑对比度采用的计算方式为: $SC = \frac{\sigma[g(x,y)]}{\text{mean}[g(x,y)]}$,式中 $g(x,y)$ 为图像光强, $\sigma[g(x,y)]$ 为图像光强的标准差, $\text{mean}[g(x,y)]$ 为图像光强的平均值.

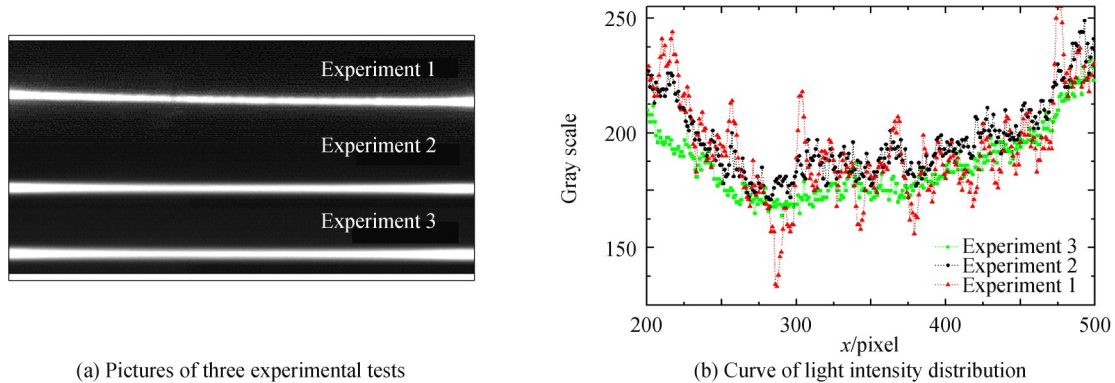


图6 实验结果—光强分布曲线
Fig. 6 Experimental results

实验分别测试了光路中无散斑抑制器、有散斑抑制器但微纳转台没有转动、有散斑抑制器并设置微纳转台工作在最大角度的散斑情况,并分别命名为实验1、实验2、实验3.图6(a)为实验得到的3组CCD采集得到的光强图片,其光强分布曲线如图6(b)所示,由于图5的实验装置中旋转振镜的扫描速度为非线性,其在扫描最大角时速度处于最低值,故光强分布曲线两端光强值大于其它区域.为考虑光强整体分布的不均匀性,在计算散斑对比度SC时, x 坐标选取范围为250~400, $g(x,y)$ 是选取图6(a)中的同一列坐标像素中光强平均值(黑色区域不在计算范围内)作为计算值.从图6(b)中可以看出实验1光强曲线存在明显的波动,这个波动也正是激光散斑效应引起的,通过计算此时散斑对比度为8.62%;实验2中加入了静止的随机相位超表面结构,纳米散射单元在一定程度上削弱了散斑对比度,大的光强跳变基本不存在,此时散斑对比度为4.21%;实验3中加入了动态的随机相位超表面结构,光强的均匀性明显地好于前两者,此时散斑对比度为2.63%,满足激光投影显示要求.

3 结论

本文设计了一种具有高透射率、随机相位功能的超表面结构,并结合MEMS技术实现了微纳旋转载台的设计制造,将两者进行融合,实现了超小型的散斑抑制器件的制造.通过实验测试表明激光散斑对比度可降低至2.63%,提高了图像的清晰度,满足激光投影领域使用需求.该激光散斑抑制器件使用方法简单、能量利用率高、成本低且易于批量制造.

参考文献

- [1] LI Xia, KANG Yu-si. Speckle contrast reduction in laser display[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(4): 648-651.
李霞, 康玉思. 激光显示中散斑噪声的抑制[J]. *应用光学*, 2010, **31**(4):648-651.
- [2] TIAN Zhi-hui, LIU Wei-qi, LI Xia, et al. Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(9):1366-1370.
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.
- [3] 董磊. 激光三维显示中散斑抑制及散斑测量[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [4] SUN Rong, LUO Zhen-kun, ZHAO Ying-xue, et al. Study of two methods to average the laser energy based on speckle interferometry[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(5):455-458.
孙嵘, 罗振坤, 赵映雪, 等. 两种激光散斑均化方法研究[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(5):455-458.
- [5] WANG Xiao-lin, HE Feng-tao, JIA Qiong-yao, et al. Laser speckle control based on optical fiber vibration[J]. *Laser Technology*, 2014, **38**(2):177-180.
王晓琳, 贺锋涛, 贾琼瑶, 等. 基于光纤振动的激光散斑控制[J]. *激光技术*, 2014, **38**(2):177-180.
- [6] FU Han-yi, LIU Wei-qi, WEI Zhong-lun, et al. Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display

- [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, **30**(2):359-364.
付瀚毅, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制[J]. *液晶与显示*, 2015, **30**(2):359-364.
- [7] ZHANG Wei-liang, ZHANG Wen-wen, HE Ruiqing, *et al.* Iterative denoising ghost imaging based on local Hadamard modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(4): 0411001.
张伟良, 张闻文, 何睿清, 等. 基于局部Hadamard调制的迭代去噪鬼成像[J]. *光学学报*, 2016, **36**(4):0411001.
- [8] MENG Xiang-xiang, LIU Wei-qi, WEI Zhong-lin, *et al.* Speckle suppression by new diffuser in laser projection display system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(2):503-507.
孟祥翔, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 激光投影显示中新型散射体的散斑抑制[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(2):503-507.
- [9] LIN Dian-min, FAN Peng-yu, HASMAN E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, **345**(6194):298-302.
- [10] HU Sen, LIU Dan, YANG He-lin. Electromagnetic induced transparency based on all-dielectric metasurface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1116001.
胡森, 刘丹, 杨河林. 基于全介质超表面的电磁诱导透明研究[J]. *光子学报*, 2018, **47**(11): 1116001.
- [11] GAO Wen-hong, KAREASHOV V, OUYANG G, *et al.* The matrices used to reduce speckle in laser projector system [C]. SPIE, 2010, **7387**(8):854 - 870.
- [12] AN S, LAPCHUK A, YURLOV V, *et al.* Speckle suppression in laser display using several partially coherent beams[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(1): 92-103.
- [13] CHENG Jin, SUN Xue-ping, ZHOU Shun, *et al.* Ultra-compact structured light projector with all-dielectric metalens for 3D sensing[J]. *AIP Advances*, 2019, **9**(1):105016.
- [14] HA J, NDAO A, HSU L, *et al.* Planar dielectric cylindrical lens at 800 nm and the role of fabrication imperfections[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(18): 23178-23184.
- [15] CHENG Jin, LIU Wei-guo, CHEN Qiao, *et al.* A mems variable optical attenuator based on a vertical comb drive with self-elevated stators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, **271**(1):398-408.