

抑制光学系统中杂散光的非对称微结构的设计与加工

邵晶^{1,2*}, 李卓^{1,2}, 聂真威³, 董浩^{1,2}, 王英明^{1,2}, 孙军月^{4**}, 张海涛^{3,5}, 赵发财⁶¹青岛理工大学山东省激光绿色智能制造与设备协同创新中心, 山东 青岛 266520;²工业流体节能与污染控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266520;³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;⁴北京长峰科威光电技术有限公司, 北京 100195;⁵中国科学院大学, 北京 100049;⁶中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555

摘要 为抑制光学系统内部的杂散光反射,设计了一种具有非对称特征的新型微结构。该微结构通过减少镜面反射的方式,防止外部杂散光到达光学系统像面位置。为实现对非对称微结构的激光高速加工制备,提出了激光振镜加工系统进行倾斜加工的新方式。设计了新型的高速激光加工平台,制备了非对称的铝基微结构,并搭建了镜面反射测试实验和仿真综合实验对样品进行对比测试。结果表明,加工样品对杂散光具有良好的抑制效果。当设定入射角度为 15° 、照明光束为 650 nm 激光时,该微结构与常规的阳极氧化表面相比,抑制杂散光的性能提高了10倍,相对反射率仅为 0.008% 。

关键词 光学设计; 微结构制备; 纳秒激光; 激光材料加工; 杂散光抑制

中图分类号 TN244

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222069

1 引言

杂散光侵扰是光学系统研制过程中的常见问题,一直以来关于抑制杂散光的相关研究从未停止^[1-4]。常规方法是给光学系统加装额外的遮光罩来抑制轴外杂散光^[5-7]。然而,加装遮光罩这一方式不仅增加了额外的重量,还使得系统的整机尺寸大幅增加。对于加装在球机中的光学系统而言,因安装尺寸受限,故遮光罩无法安装。另外,航天光机系统载荷重量和体积受限^[8-9],常规的遮光罩已经无法满足光学系统轴外杂散光抑制的需要。如果研制一种新型的抑制杂散光表面加装在光学系统的内部光机结构中,则能够有效降低光学系统的整机质量和尺寸,无遮光罩光学系统性能将得到进一步提升。激光加工具有能量聚集程度高、工艺集成度强、加工精度高和加工效率高等优点^[10],近年来使用激光加工方法制备杂散光抑制表面的相关研究取得了一些进展。侯孟等^[11]使用纳秒激光器在钛合金(Ti6Al4V)上加工呈六边形分布的微孔阵列结构,并研究了不同加工参数在 $400\sim 1000\text{ nm}$ 波长范围内表面结构的反射率。吴勃等^[12]利用纳秒激光在316L

不锈钢表面制备了微孔结构,实现了金属表面 $200\sim 900\text{ nm}$ 波长范围内的陷光性能,研究了激光的单脉冲能量和累积脉冲数对微孔结构成型和微结构陷光性能的影响。Vorobyev等^[13]利用激光加工技术在铂金表面制备出了微纳粗糙结构,所制备的表面在紫外至红外范围内对光的吸收率达到了 95% 。Smausz等^[14]研究了气体环境对激光加工得到的金属发黑表面反射率和形貌的影响。Vidhya等^[15]使用纳秒激光在非晶硅表面制备了随机纳米锥结构,用来提高其抗反射性能。Imamoto等^[16]为工作在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 波长下的低反射红外传感器设计了一种蜂窝状吸光微结构,并使用飞秒激光并行加工的方法在硅晶片表面进行了微结构制备。Li等^[17]提出了一种基于纳秒激光的超疏水性钛合金表面减反射微结构的制备方法,获得了可见和近红外波长范围内($400\sim 1000\text{ nm}$)具有低反射率的微结构表面。当前研究多集中于加工出具有陷光性能的微纳结构,对小角度入射的强光源杂散光抑制能力有限。本文改“堵”为“疏”设计了一种具有抑制镜面反射功能的非对称微结构,设计了一种新型的高速激光加工平台,制备了该微结构样品,并验证了其抑制杂散光的性能。

收稿日期: 2022-11-29; 修回日期: 2023-01-12; 录用日期: 2023-02-10; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2018M632639)、高等学校学科创新引智计划(111计划)(D21017)、山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010402)、山东省重点研发计划(2019GGX104106)

通信作者: *qunying12@163.com; **sun_junyue@sina.cn

2 微结构设计

研究中发现,轴外杂散光仅有几个独特的角度能够躲过孔径光阑进入光学系统的像面位置。如果所设计的微结构不再是单纯的吸光结构,而是改变轴外光束在表面的反射方向,则杂散光将不会再躲过孔径光阑,进而可以实现轴外杂散光的有效抑制。本文设计了一种特殊的微结构,多个微反射表面在基底表面上呈周期性排布,形成锯齿状结构。其中,前反射面的定义为该微结构朝向光入射方向的表面,后反射面的定义为该微结构背向光入射方向的表面。前反射面和后反射面的夹角为 90° ,经过二次反射后容易形成 180° 的

反向反射,从而实现杂散光的抑制。

如果设计的前反射面与基底表面基线的夹角 β 为 45° ,如图 1 所示。当杂散光与光轴的夹角 θ 不小于前反射面与基底表面基线的夹角 β 时,杂散光会以相同角度反向反射回去,不会进入到光学系统中,如图 1(a) 所示。当杂散光与光轴的角度 θ 小于前反射面与基底表面基线的夹角 β 时,杂散光经反射后会以相同的角度再次进入到光学系统中,经过多次反射后会被衰减进而被抑制,如图 1(b) 所示。当入射角度进一步减小时,光束反射次数有限,故残余的杂散光还是会进入到光学系统中。

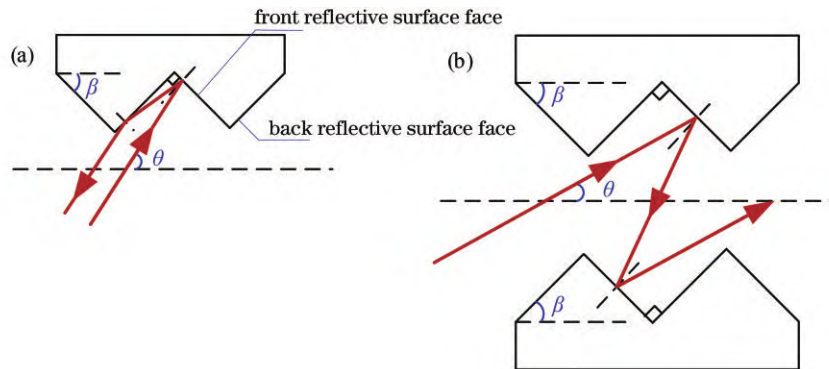


图 1 $\beta=45^\circ$ 时杂散光反射情况。(a)杂散光大角度入射;(b)杂散光小角度入射

Fig. 1 Stray light reflection at $\beta=45^\circ$. (a) Incident stray light at large angle; (b) incident stray light at small angle

如果前反射面与基底表面基线的夹角 β 大于 45° ,杂散光反射情况如图 2 所示。当杂散光与光轴的角度小于后反射面与基底表面基线的夹角时,杂散光会以偏离入射方向一定角度反射回入射方向一侧,进入光

学系统的概率减小,如图 2(b) 所示。当杂散光与光轴的角度大于后反射面与基底表面基线的夹角时,杂散光可以经过多次反射再次以小角度进入系统,微结构不能较好地抑制杂散光,如图 2(a) 所示。

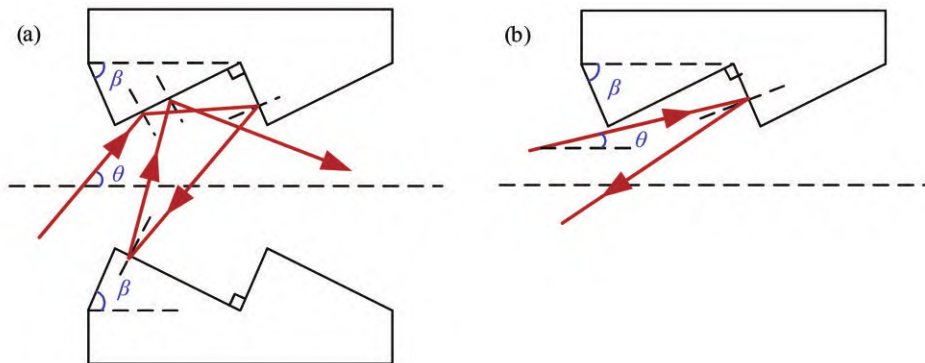


图 2 $\beta>45^\circ$ 时杂散光反射情况。(a)杂散光大角度入射;(b)杂散光小角度入射

Fig. 2 Stray light reflection at $\beta>45^\circ$. (a) Incident stray light at large angle; (b) incident stray light at small angle

可见,图 1 和图 2 并不是理想的设计方案。如果前反射面与基底表面基线的夹角 β 小于 45° ,如图 3 所示。当杂散光与光轴的角度不小于前反射面与基底表面基线的夹角 β 时,杂散光会相对于光轴对称的另一侧微结构微反射面反射回入射光照射方向一侧,不会进入到光学系统中,如图 3(a) 所示。当杂散光与光轴的角度小于前反射面与基底表面基线的夹角 β 时,杂散光

经反射后会以更大入射角射入系统中,并能被后续光阑遮挡,如图 3(b) 所示。

综上所述,图 3 所示的微结构在理论上具有良好的抑光性能,故以此作为微结构的设计方案。

3 非对称微结构的激光加工

实现第 2 章所设计的微结构最优的加工方案是在

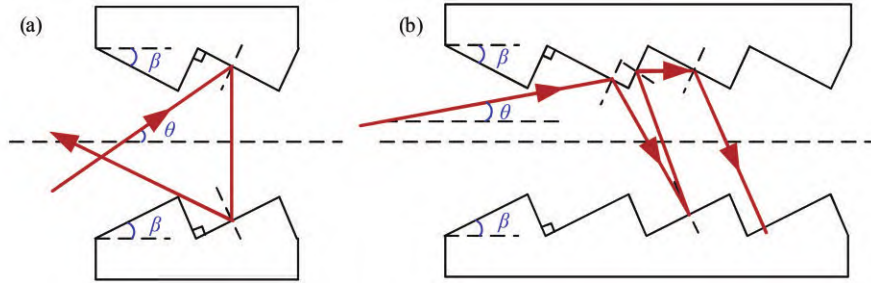


图 3 $\beta < 45^\circ$ 时杂散光反射情况, (a) 杂散光大角度入射; (b) 杂散光小角度入射

Fig. 3 Stray light reflection at $\beta < 45^\circ$. (a) Incident stray light at large angle; (b) incident stray light at small angle

聚焦激光光束焦深范围内倾斜加工。不同倾斜角度下聚焦激光光斑尺寸和光强分布如图 4 所示。图 4(a) 展示了 0° 、 30° 和 60° 倾斜角度下聚焦光斑的作用范围。随着倾斜角度的增大, 作用范围会被拉伸, 由 AB 拓展至 CD 和 EF , 这意味聚焦激光光斑的光强也在被拉伸。在聚焦激光光束的焦深范围内, 采用相位复原技

术获得聚焦激光的光强分布^[18], 如图 4(b) 所示, 可以发现, 随着角度的增大, 聚焦光斑的光强分布会被拉伸。这意味着, 若采用聚焦激光加工凹槽(微结构的前后反射面), 则凹槽两面的角度会随着倾斜角度的增加而增大。由图 4(b) 可知, 当倾斜角度为 60° 时, 可以制备图 3 所示的微结构(前后反射面夹角为 90°)。

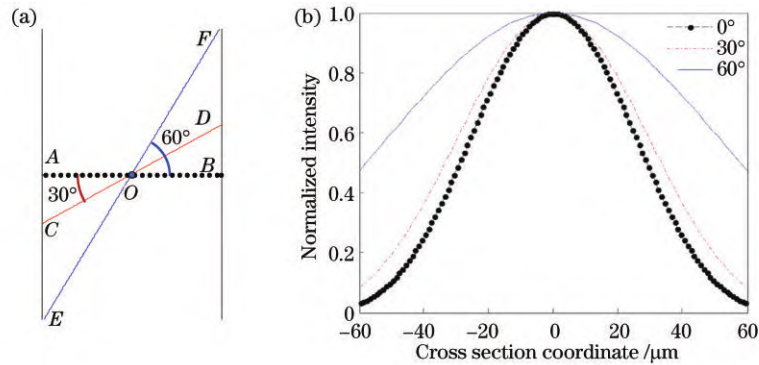


图 4 不同倾斜角度下聚焦激光光斑作用范围和光强分布。(a) 作用范围; (b) 光强分布

Fig. 4 Range and intensity distribution of focusing laser spot at different tilt angles. (a) Range; (b) intensity distribution

现有的光纤激光加工装置只能加工水平表面, 而非对称微结构需要进行倾斜加工, 这会引入离焦, 故实现非对称微结构的加工较困难。为了实现图 3 所示的

非对称微结构, 搭建了一种新型的离焦补偿高速激光加工平台, 如图 5 所示^[19-20]。试样倾斜放置, 振镜沿水平方向对焦深范围内的试样进行扫描, 直线导轨推送

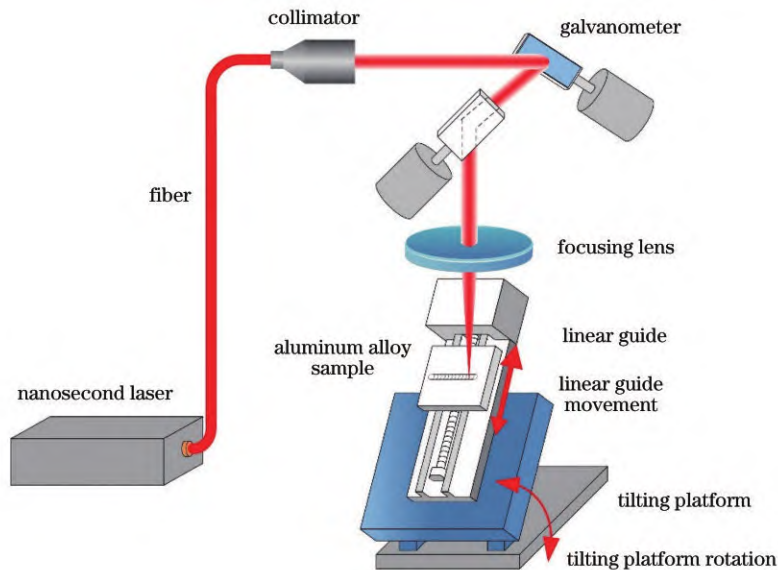


图 5 高速激光加工平台示意图

Fig. 5 Schematic diagram of high-speed laser processing device

试样入场镜的焦平面位置处,补偿倾斜引入的离焦误差,进而能够将样品的不同位置与场镜的焦点位置重合。在焦深范围内,激光光斑的能量密度差异不大,这样通过多层拼接的方式就能完成大尺寸加工。

激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 100 ns,脉冲重复频率为 50 kHz,激光器输出功率为 40 W。加工样品的材料为 6061 铝合金,试样尺寸为 100 mm×100 mm,厚度为 0.5 mm,表面预先进行了阳极氧化发黑处理。试样被固定在直线导轨上,定位精度为 2 μm。具体加工参数如表 1 所示。

由于铝合金的熔点较低,故加工效果对激光加工参数较敏感^[21]。研究了对不同扫描速率下微结构表面

表 1 激光加工参数

Table 1 Laser processing parameters

Parameter	Value
Laser power /W	40
Scanning velocity /(mm·s ⁻¹)	500-2000
Repetition frequency /kHz	50
Tilt angle /(°)	60
Microstructure width /μm	130

的形成规律。使用基恩士公司 VK-X1000 系列激光共聚焦显微镜测量样品表面,获得的样品三维形貌如图 6 所示。当扫描速率为 500 mm/s 时,表面因热累积产生大量的熔融堆积物形成不规则的沟槽,并且样品会发生翘曲变形,如图 6(a) 所示。当扫描速率为 900 mm/s 时,锯齿形沟槽已经显现,熔融堆积开始消失,如图 6(b) 所示。图 6(c) 和图 6(d) 展示的是扫描速率为 1200 mm/s 和 1600 mm/s 时的微结构表面形貌,锯齿化沟槽更加平缓,边缘处更加均匀,整个样品的结构更加平整。对微结构成像数据进行测量,得到图 6(b)~(d) 的微结构前后反射面夹角的平均值分别为 67.5°、100.7°和 93.5°。可以发现,图 6(d) 更接近设计值,而图 6(a)~(c) 的扫描速率过低,加工深度较大,前后反射表面也并不是理想的倾斜表面,故舍弃。

进一步,沿图 6(d) 中带箭头的实线所示的微结构垂直方向测量,获取图 6(d) 的详细表面特征如图 7 所示,其中图 7(a) 为图 6(d) 三维形貌的侧视图,图 7(b) 为图 6(d) 的纵向截面轮廓图。图 6(d) 中的微结构前后反射面夹角均值为 93.5°,接近设计的 90°。继续对该样品表面进行性能测试,从而验证该微结构的杂散光抑制性能。

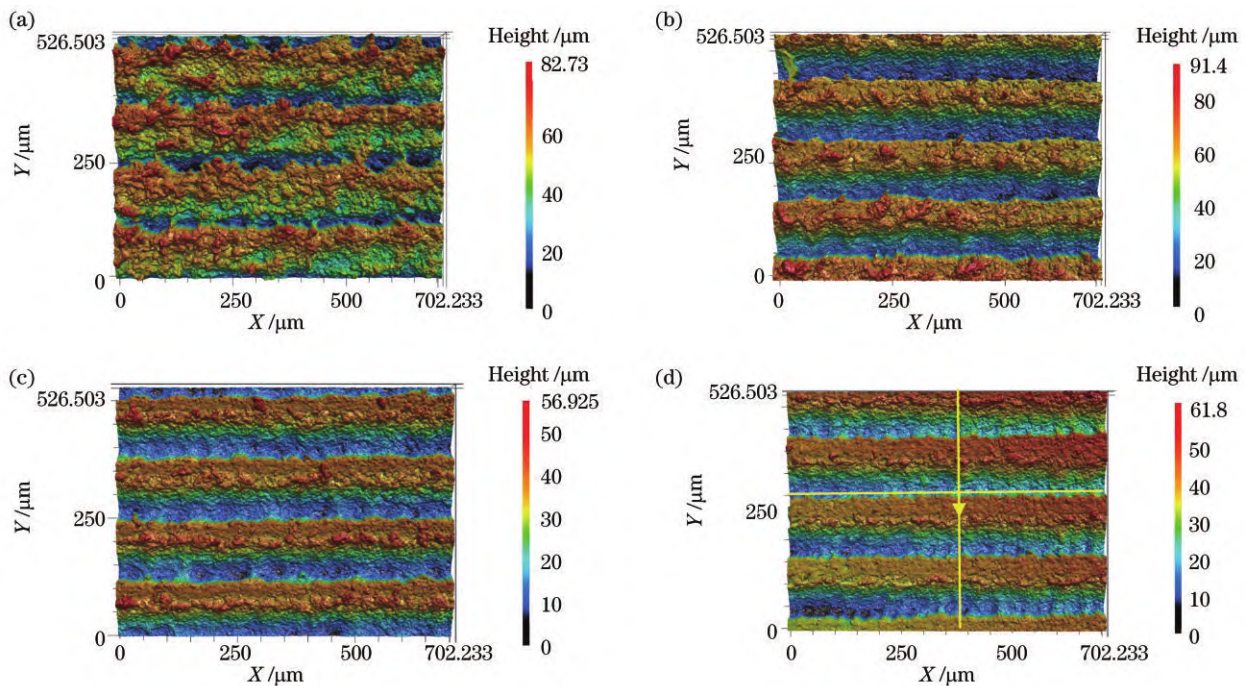


图 6 不同扫描速率下样品表面共焦显微成像。(a) 500 mm/s;(b) 900 mm/s;(c) 1200 mm/s;(d) 1600 mm/s

Fig. 6 Confocal microscopic imaging of sample surface under different scanning velocity. (a) 500 mm/s; (b) 900 mm/s; (c) 1200 mm/s; (d) 1600 mm/s

4 性能测试

对加工的样品进行了镜面反射测试,测试装置如图 8(a) 所示。激光器(绿光,中心波长为 520 nm)沿一定角度照射待测样品,并在镜面反射方向放置白纸作为观测屏,用于观测镜面反射强度。装置示意图如图

8(b) 所示。实验中分别将入射光照向阳极氧化表面和加工得到的微结构表面。如图 8(c) 所示,当光源照射到阳极氧化表面上时,观测屏上能看到镜面反射的光斑,如实线圆圈所示。在图 8(d) 中,当光源照射到加工的微结构表面上时,观测屏上没有光斑,而与激光器方向一致的相机可拍摄到光线沿原路返回形成的高亮

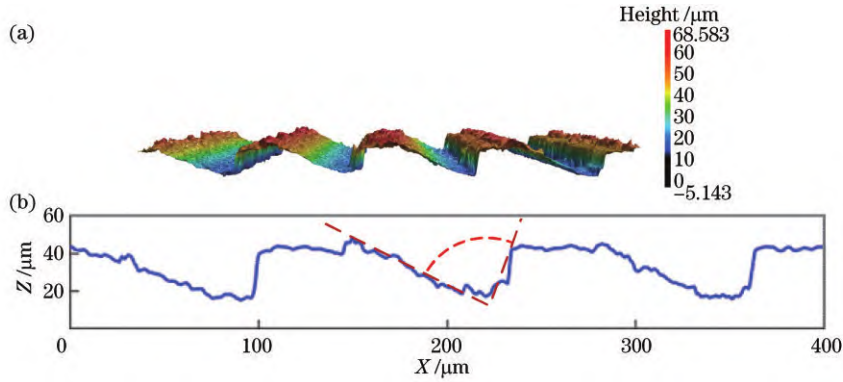


图 7 微结构形貌测量。(a)微结构显微成像侧视图;(b)微结构纵向截面轮廓图像

Fig. 7 Microstructure morphology measurement. (a) Side view of microstructure microscopy image; (b) longitudinal cross-sectional profile image of microstructure

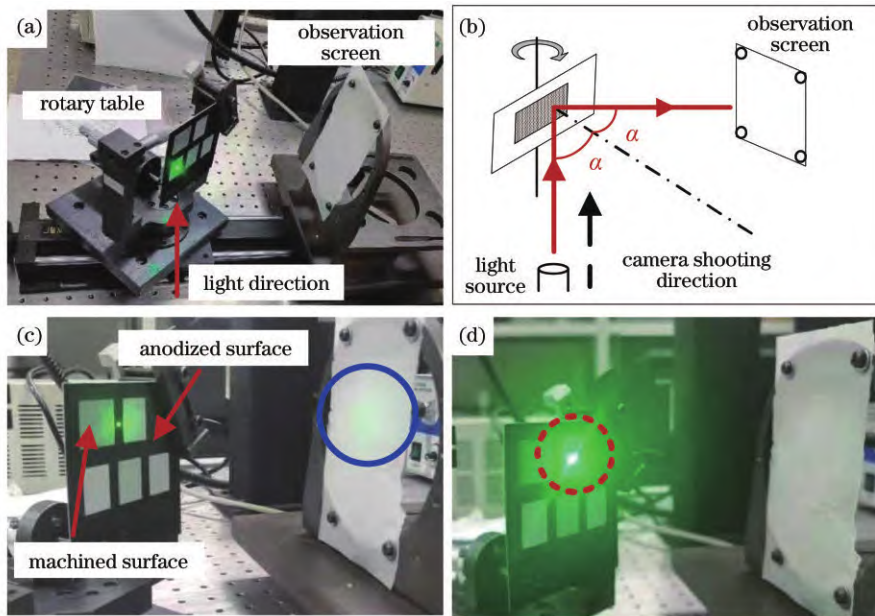


图 8 镜面反射测试实验图。(a)测试装置图;(b)装置示意图;(c)阳极氧化样品测试结果;(d)加工样品测试结果

Fig. 8 Experimental diagram of surface reflection testing. (a) Testing device graph; (b) schematic diagram of testing device; (c) test result of anodized sample; (d) test result of processed sample

光斑,如虚线圆圈所示。由此可见,微结构表面具有良好的抑制镜面反射性能。

为了进一步评估加工的微结构表面对杂散光的抑制性能,模拟测试轴外准直杂散光束对光学系统的影响,设计了仿真综合测试。通常轴外杂散光经光学系统内部构件的多次反射、折射、散射和衍射到达探测器。因此,将两个待测样品平行对称放置,形成“样品通道”以模拟轴外杂散光进入光学系统内部构件的多次反射,如图 9 所示。样品整体长度为 100 mm,间距为 10 mm。激光器(红光,中心波长为 650 nm)固定在“样品通道”的一端,倾斜照射样品表面以模拟轴外杂散光。在“样品通道”的末端放置一台 CCD 相机,靶面尺寸为 2/3 inch (1 inch=2.54 cm),通过调整激光器离轴入射角度 γ 使激光器以不同角度射向样品表面,从 CCD 相机中获取一定曝光时间内成像面亮度的平

均值。测试实验以制备的微结构表面和阳极氧化发黑表面作为对照组,分别测量激光在通过它们组成的通道后所残留的激光强度。

研究中发现,杂散光小角度入射时对光学系统的影响最大。因此,选用 15° 作为轴外杂散光的测试角度。首先,测试光源强度,加载滤光片,获得激光光源直射相机时的输出响应。随后,测试激光束经过“样品通道”后的相机成像输出。计算激光通过不同表面后残留的激光强度相对于光源等效强度的比例。计算发现,阳极氧化发黑表面相对反射率为 0.112%,微结构表面相对反射率仅为 0.008%,微结构表面的抑制杂散光性能明显优于阳极氧化表面。

常规的阳极氧化发黑表面吸光能力有限。在杂散光小角度入射测试中,光的反射次数较少,导致杂散光不能被很好地抑制。所设计的微结构前后两个反射面

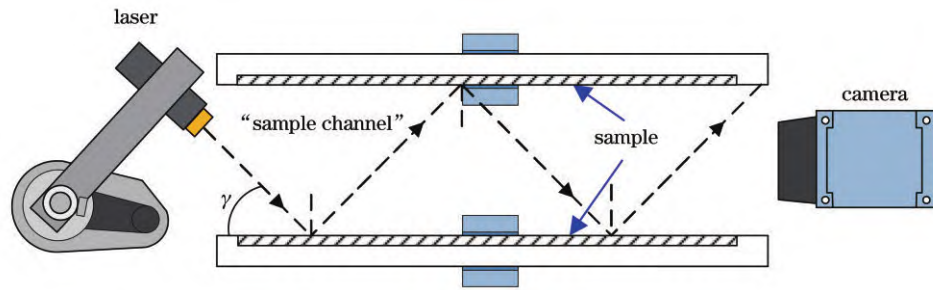


图 9 仿真综合实验示意图

Fig. 9 Schematic diagram of simulation integrated experiment

的夹角成 90° , 经过两次反射后, 可以形成 180° 的反射, 从而抑制杂散光向前传播。这种独特的设计在杂散光小角度入射时仍具有良好的性能。实验中并未对该微结构的周期、前表面的角度进行特殊设计, 这也可以间接地证明决定该微结构抑制杂散光能力的来源的正是前后反射面成 90° 夹角。

5 总 结

为了实现抑制杂散光表面, 提升光学系统整体性能, 设计了一种非对称特征的新型微结构, 该微结构通过改变反射方向的方式抑制轴外杂散光。搭建了新型的离焦补偿高速激光加工平台, 以实现铝合金表面的非对称激光加工。经过不断地对加工参数进行调整, 制备了前后反射面夹角为 $93.5^\circ \pm 2^\circ$ 的非对称微结构表面。镜面反射测试验证了微结构表面具有抑制镜面反射的功能。设计了仿真综合实验, 并使用阳极氧化发黑表面作为对比。在综合测试中, 当入射角设定为 15° 、照明光源为 650 nm 激光时, 发现所制备的微结构表面相对于阳极氧化表面, 抑制杂散光性能提高了 10 倍。所述结果中测试样品没有添加吸光涂层, 相信如果进一步增加吸光涂层, 微结构能够具有更优的性能。

仅使用可见光源(中心波长为 520 nm 和 650 nm) 作为测试光源, 后续将对其在红外波段中的性能进行测试。另外, 所制备的样品与设计的微结构表面仍具有误差。后续的工作将聚焦于进一步优化加工参数和加工装置, 以提升微结构的制造精度, 期待进一步提升该微结构抑制杂散光的性能。

参 考 文 献

[1] 朱杨. 空间光学系统杂散辐射抑制研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
Zhu Y. Research on stray radiation suppression of space optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.

[2] 吕博, 冯睿, 寇伟, 等. 折反射式空间相机光学系统设计及杂散光抑制[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 822-831.
Lü B, Feng R, Kou W, et al. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 822-831.

[3] Montanaro M, Gerace A, Lunsford A, et al. Stray light artifacts in imagery from the Landsat 8 thermal infrared sensor[J].

Remote Sensing, 2014, 6(11): 10435-10456.

[4] 陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 678-685.
Chen X, Hu C H, Yan C X, et al. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 678-685.

[5] 王虎, 陈钦芳, 马占鹏, 等. 杂散光抑制与评估技术发展及展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7): 0751406.
Wang H, Chen Q F, Ma Z P, et al. Development and prospect of stray light suppression and evaluation technology (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7): 0751406.

[6] Sutherland W, Emerson J, Dalton G, et al. The Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy (VISTA): design, technical overview, and performance[J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 575: A25.

[7] 李建华, 李志峰, 刘佳琪, 等. 空间红外探测系统外部杂散光分析与抑制[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 185-188.
Li J H, Li Z F, Liu J Q, et al. Stray light analysis and suppression for space infrared detecting system[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 185-188.

[8] 刘奉昌. 临近空间球载望远镜主光机系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
Liu F C. Research on the main optomechanical system of balloon borne telescope in near space[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.

[9] 石栋梁, 肖琴, 练敏隆. “高分四号”卫星相机杂散光分析与抑制技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(5): 49-57.
Shi D L, Xiao Q, Lian M L. Research on stray light analysis and restrain of GF-4 satellite camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(5): 49-57.

[10] 李苏, 张占辉, 韩善果, 等. 激光技术在材料加工领域的应用与发展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 76-85.
Li S, Zhang Z H, Han S G, et al. Application and development of laser technology in the field of material processing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(4): 76-85.

[11] 侯孟, 许金凯, 廉中旭, 等. 微孔阵列结构的纳秒激光制备及陷光性能研究[J]. 激光杂志, 2022, 43(6): 26-30.
Hou M, Xu J K, Lian Z X, et al. Research on light trapping performance of micro-hole array structure by nanosecond laser[J]. Laser Journal, 2022, 43(6): 26-30.

[12] 吴勃, 周明, 李保家, 等. 不锈钢表面陷光微结构的纳秒激光制备[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903002.
Wu B, Zhou M, Li B J, et al. Fabrication of light trapping microstructures on stainless steel surface by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0903002.

[13] Vorobyev A Y, Guo C L. Femtosecond laser blackening of platinum[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(5): 053516.

[14] Smausz T, Csizmadia T, Tápai C, et al. Study on the effect of ambient gas on nanostructure formation on metal surfaces during femtosecond laser ablation for fabrication of low-reflective surfaces[J]. Applied Surface Science, 2016, 389: 1113-1119.

- [15] Vidhya Y E B, Vasa N J. Fabrication of random nanocones to improve wideband light trapping for thin film photovoltaic devices using nanosecond laser processing[J]. *Manufacturing Letters*, 2022, 33: 195-204.
- [16] Imamoto H, Kanehira S, Wang X, et al. Fabrication and characterization of silicon antireflection structures for infrared rays using a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1176-1178.
- [17] Li J R, Xu J K, Lian Z X, et al. Fabrication of antireflection surfaces with superhydrophobic property for titanium alloy by nanosecond laser irradiation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126: 106129.
- [18] Shao J, Zhang R L, Han S L, et al. The activation threshold evaluation of metallization for aluminum nitride ceramic under nanosecond laser pulses in air[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(17): 24707-24712.
- [19] 邵晶, 李卓, 王英明, 等. 一种抑制杂散光的表面微结构及吸光装置: CN114879291A[P]. 2022-08-09.
Shao J, Li Z, Wang Y M, et al. Surface microstructure for inhibiting stray light and light absorption device: CN114879291A [P]. 2022-08-09.
- [20] 邵晶, 李卓, 赵发财, 等. 一种表面结构激光加工装置: CN217142702U[P]. 2022-08-09.
Shao J, Li Z, Zhao F C, et al. Surface structure laser processing device: CN217142702U[P]. 2022-08-09.
- [21] 张若兰. 高精度纳秒激光清洗 7075 铝合金能场调控参数评估研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
Zhang R L. Evaluation of energy field control parameters for high precision nanosecond laser cleaning of 7075 aluminum alloy [D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2021.

Design and Fabrication of Asymmetric Microstructure for Stray Light Suppression in Optical System

Shao Jing^{1,2*}, Li Zhuo^{1,2}, Nie Zhenwei³, Dong Hao^{1,2}, Wang Yingming^{1,2}, Sun Junyue^{4**}, Zhang Haitao^{3,5}, Zhao Facai⁶

¹Shandong Collaborative Innovation Center of Laser Green Intelligent Manufacturing Technology and Equipment, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China;

²Key Lab of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control (Qingdao University of Technology), Ministry of Education, Qingdao 266520, Shandong, China;

³Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

⁴Beijing Changfeng Kewei Photo-Electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China;

⁵University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁶The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, Shandong, China

Abstract

Objective This paper proposes a novel asymmetric microstructure different from the existing light-trapping structures. By reducing the specular reflection, the microstructure can improve the stray light suppression performance at a small angle of incidence. The microstructure can be installed in the internal structure of the optical system to effectively reduce the mass and size of the optical system and improve the stray light suppression performance of hoodless optical systems.

Methods Comparing the theoretical stray light suppression performance of microstructures with different angles between the front reflective surface and the baseline of the substrate surface, this paper designs asymmetric microstructures whose angle between the front and back reflective surfaces is 90° and angle β between the front reflective surface and the baseline of the substrate surface is smaller than 45° . To fabricate the asymmetrical microstructures, this paper also proposes a laser galvanometer processing system for tilting machining. Subsequently, the intensity distribution of the focused laser is obtained by drawing on the research on the action range of the focused light spot under different tilt angles and applying the phase recovery technique (Fig. 4). When the tilt angle of the laser is 60° , the intensity distribution of the focused light spot is in a shape similar to that of the microstructure shown in Fig. 3. Then, a new high-speed laser processing platform is designed and utilized to process the surface of aluminum alloy samples. The three-dimensional morphology of the processed sample surfaces is measured by confocal laser scanning microscopy (CLSM). The formation mechanism of the microstructure surface under different scanning velocities is preliminarily investigated, and the appropriate processing parameters are obtained. Furthermore, the specular reflection test experiment and the integrated simulation experiment are designed to evaluate the performance of the samples.

Results and Discussions The investigation of the surface morphology of the microstructures processed at different scanning velocities shows that when the processing scanning velocity is 1600 mm/s, the average angle between the front

and back reflective surfaces of the microstructure is 93.5° , which is close to the designed angle of 90° shown in Fig. 6(d). In the specular reflection test experiment, the ability of the microstructure to suppress specular reflection is verified [Fig. 8(d)]. Then, in the integrated simulation experiment simulating the influence of off-axis collimated stray light on the optical system, the angle of incidence is set to 15° , and the illumination light source is 650 nm laser. The relative reflectivity of the microstructure surface is 10% that of the conventional anodized surface. Only visible light sources (520 nm and 650 nm) are used as test light sources in this paper, and the performance of the proposed microstructure in the infrared wavelength range will be tested in the follow-up research. In addition, the processing parameters will be further optimized, and the mechanism of tilting laser on the formation of the microstructure will be investigated to improve the manufacturing accuracy of the microstructure and thereby improve the stray light suppression performance of the microstructure surface.

Conclusions A novel microstructure with asymmetric characteristics is designed. In this microstructure, multiple reflective surfaces are periodically arranged on the substrate surface. The off-axis stray light is suppressed by increasing the reflection angle of the stray light and changing the reflection direction. The angle of incidence is set to 15° , and the illumination light source is 650 nm laser. The stray light suppression performance of the microstructure is 10 times higher than that of the conventional anodized surface, and its relative reflectivity is only 0.008%. No light-absorbing coating is added to the surface of the tested microstructure sample. It is believed that a microstructure surface with better performance can be obtained by adding a light-absorbing coating to the surface.

Key words optical design; microstructure fabrication; nanosecond laser; laser material processing; stray light suppression