

引用格式: MA Shanghua, XIE Zhengmao, ZHANG Yihui, et al. Study on influence of Rough Surface of Optical Elements on Irradiation Uniformity of High-Energy Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0714006

马尚华,谢正茂,张毅晖,等. 光学元件表面粗糙度对大能量激光辐照均匀性的影响研究[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0714006

光学元件表面粗糙度对大能量激光辐照均匀性的影响研究

马尚华^{1,2}, 谢正茂^{1,2}, 张毅晖^{1,2}, 闫亚东^{1,2}, 何俊华^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:大能量激光大面积均匀辐照在材料起爆中具有重要作用。本文提出一种大能量激光均匀辐照的光学系统,旨在针对在实现远距离、大面积及异形材料的起爆。从光学元件表面粗糙度的工艺角度出发,探讨其对激光能量分布均匀性的影响。为定量刻画表面粗糙度,引入分形维D作为关键表征参数,采用三维分形函数在MATLAB中构建具有不同分形特征的纳米级三维粗糙表面模型。在此基础上,将表面导入COMSOL Multiphysics几何光学模块中,模拟高斯光束在粗糙元件表面传播过程。结合MATLAB中对出射端图像的处理与一维光强剖面分析,计算匀化效率 η 指标,系统评估了粗糙表面对光束整形的调制作用。结果表明,适当的粗糙结构可提升光束匀化效果,当 $D=2.6$ 时最优,均匀性由83.79%提高至95.56%。该研究为高功率激光系统中利用加工工艺优化元件表面形貌以实现被动匀化提供了理论依据和数据支撑。

关键词:大能量激光;光波导;均匀辐照;粗糙表面;分形

中图分类号:TH74

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265507.0714006

0 引言

自20世纪60年代激光器问世以来,激光与物质相互作用的机理研究便成为前沿热点,其中,利用激光实现材料的精确点火与起爆^[1-2],是极具代表性的研究方向。该技术以非接触的激光能量替代传统电火工品,展现出能量精准可控、作用迅速及抗电磁干扰的显著优势,为航天推进剂测试、工业安全爆破、新材料合成等科研与工业领域提供了全新的高可靠性技术手段。

然而,将激光技术应用于此类高能材料的精密加工与过程控制,仍面临一系列技术挑战。核心问题在于,不均匀的辐照极易导致材料表面局部过热或能量不足,不仅影响反应过程的均匀性与可重复性,也为实现大规模、异形结构下的稳定工业应用带来了困难。因此,研究能量分布均匀、参数可控性强的先进激光系统,成为推动该技术走向成熟应用的关键。

激光光束整形匀化的方法^[3]有微透镜阵列、液晶空间调制器、衍射光学元件、非球面元件、光波导等,具有代表性的工作有:郑耀杰等^[4]设计了一种基于柱面微透镜阵列的光束匀化系统,成果获得了光束长宽比可调(如65 mm×65 mm、100 mm×100 mm、100 mm×130 mm)的光斑;周源等^[5]利用液晶空间调制器实现光束整形,经过光束整形系统后激光分布呈现平顶分布,最终输出的平顶光束均匀性为82.37%,系统能量利用率为88%;朱泉锋等^[6]分析了一体化非球面透镜阵列进行准直扩束,对系统进行仿真,得到能量利用率为88.79%、能量均匀度为94.51%的光束。

基金项目:国家自然科学基金(62005077)

第一作者:马尚华,(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向:高能激光应用.Email:18512598201@163.com

通讯作者:谢正茂,(1982—),男,高级工程师,博士,主要研究方向:激光聚变光学诊断和流场测试与分析技术.Email:xiezhengmao@opt.ac.cn

收稿日期:2026-01-26;**录用日期:**2026-04-21

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

液晶空间调制器和衍射光学元件损伤阈值低,不适用于大功率激光器。微透镜阵列会使光斑出现干涉条纹,非球面元件加工成本高。相比之下,光波导结构简单、造价低、损伤阈值高,因此本文选用光波导作为匀化元件。

针对上述问题,本文提出了一种基于锥形光波导的激光阵列化匀化扩束方法。该方法通过设计特定结构的锥形光波导,实现激光束的空间扩展与能量分布优化,从而获得更大面积、更高均匀性的输出光斑,适用于复杂形状和大面积含能材料的起爆需求。

为进一步提升激光匀化的性能,研究系统并分析了光波导内部表面粗糙度对输出光场均匀性的影响机制,并通过实验验证了表面处理工艺对整体匀化效果的改善作用。

1 大能量激光辐照光学系统设计

针对实际应用需求,激光扩束匀化系统需在目标平面实现不低于 2 mJ/mm^2 的能量密度以及不小于 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的均匀辐照区域。基于上述指标要求,系统设计中选用工作波长为 $1064 \pm 5 \text{ nm}$ 的光纤耦合激光器,单台输出能量为 50 J ,通过四台激光器并行工作实现系统总输出能量不低于 200 J ,同时要求辐照区域内能量均匀性优于 90% ,系统整体透过率不低于 95% 。

由于高能光纤激光器输出光束口径较小,且能量分布呈典型高斯型,直接辐照难以满足大面积、高均匀性的应用需求;同时,高能输出条件下光学元件的抗激光损伤能力成为系统设计的关键制约因素。为在满足能量密度指标的前提下降低光学元件的功率负载及系统工程实现难度,本文采用多台高功率激光器并行工作的阵列化拼接扩束匀化方案,实现光束扩束与能量匀化输出。

系统总体结构如图1采用 2×2 阵列式扩束匀化设计,由四组相互独立的扩束匀化光学组件构成。在距离为 d 的辐照平面处,各子光束经扩束与匀化后形成四个子辐照区域并实现空间拼接,最终获得尺寸为 $L \times H$ 的均匀辐照光斑,其中单组扩束匀化组件对应的辐照区域尺寸为 $L/4 \times H/4$ 。通过对扩束倍率、匀化参数及系统几何关系的合理设计与优化,可实现不同工作距离条件下的大尺寸匀化辐照输出。

单路扩束匀化光学组件的光路结构依次由光纤激光光源、光波导、扩束物镜及光学窗口构成。经光学参数优化设计及匀化性能评价后,单路组件可进一步通过光机结构组合扩展为 $n \times n$ 阵列形式,从而满足不同辐照尺寸及应用场景下的使用需求。

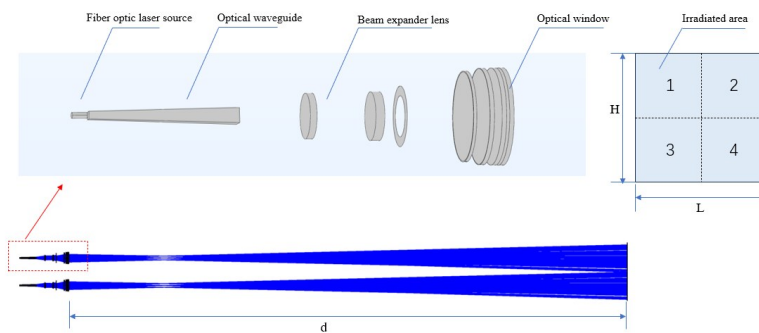


图1 激光扩束匀化光学系统

Fig.1 Laser beam expansion and homogenization optical system

1.1 光波导设计

光波导的匀化机制^[7-8]本质上是基于全反射原理的几何光学过程,通过光线在有限空间内的混合实现能量分布的重构。如图2所示,当非均匀光束(如高斯激光)入射至波导端面时,光线在光密介质(折射率 n_1)与光疏介质(折射率 n_2)界面处反复发生全反射(入射角 $\theta_i \geq$ 临界角 θ_c),使具有不同能量的光线最终叠加在出射面处,实现均匀化。

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1)$$

光波导^[9-10]是一种用于光束传输与匀化的多面棱柱型光学元件,其基本结构可分为实心光波导和空心

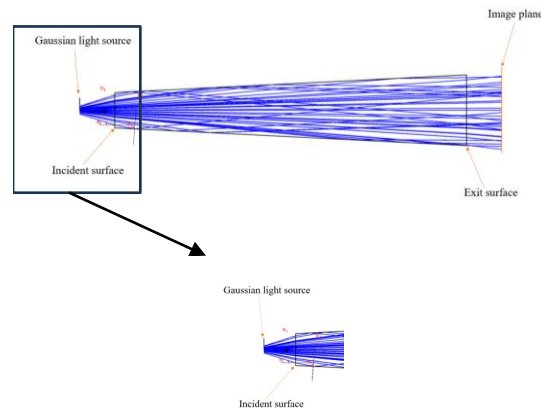


图2 波导匀化原理

Fig.2 Schematic of waveguide homogenization

光波导两类。实心光波导通常由光学玻璃整体加工而成,依靠光束在介质内部发生全反射实现能量传输;空心光波导则通过在内表面镀制高反射薄膜,利用多次镜面反射引导光束传播。相比空心光波导,实心光波导具有反射效率高、结构稳定、加工工艺成熟且成本较低等优点,特别适用于对光束均匀性要求较高的应用场景。尽管实心玻璃材料在传输过程中会引入一定的吸收损耗,同时入射面和出射面存在折射损失,但在综合考虑系统能量效率、加工可行性及稳定性后,实心光波导仍表现出明显的工程优势。因此,本设计中选用实心光波导结构,其截面形状为方形,以满足后续系统对光斑形态和匀化效果的要求。

在光波导基底材料的选择过程中,表1对H-K9L与熔石英两种常用光学材料进行了对比分析。结果表明,熔石英在密度、线膨胀系数及热导率等关键物理参数方面均优于H-K9L,在高功率激光应用条件下更有利于提高器件的抗激光损伤能力、增强面形稳定性并降低环境应变对光学性能的影响。为了验证超光滑平面元件加工工艺的可行性,试制了平面光学元件,材料为熔石英,其粗糙度 R_a 达到0.8 nm,优于1 nm,因此采用熔石英材料实现超光滑光学元件加工是可行的。后续扩束物镜光学元件也按上述工艺的表面粗糙度 $R_a \leq 1$ nm的超光滑加工。基于材料性能优势,本文最终确定选用熔石英作为光波导的基底材料。

表1 材料参数对比

Table 1 Comparison of material parameters

Parameter	H-K9L	Fused silica
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	2.52	2.2
Thermal expansion coefficient/ 10^{-7}K^{-1}	76	51
Elastic modulus/ 10^7Pa	7920	7170
Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.05	1.38

光波导长度直接影响出射光场的均匀性。在一定结构参数条件下,随着光束在波导内发生的全反射次数增加,辐照光斑的均匀性逐步改善,但当反射次数达到一定值后,均匀性提升趋于饱和。基于几何光学模型,如图3所示,设光波导长度为 L 、入射高度为 a 、出射高度为 b 、材料折射率为 n ,光源边缘光线以入射角 θ 入射,则光束在波导内的总反射次数 m 可以表示为:

$$m = \frac{L}{b-a} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \tan\left(\arcsin \frac{\sin\theta}{n}\right) \quad (2)$$

式中, $L(\text{mm})$ 为光波导长度, $a, b(\text{mm})$ 分别为波导入口和出口高度, $\theta(^{\circ})$ 为入射角, n 为材料折射率。结合系统参数,光纤激光器输出数值孔径为0.28,对应空气入射角 $\theta=16.26^{\circ}$,熔石英材料折射率取 $n=1.458$,光波导入口高度 $a=5$ mm,出口高度 $b=10$ mm,由式(2)计算可知,当反射次数 $m=3$ 时,可获得较为充分的匀化效果,对应光波导理论长度为 $L=103.03$ mm。综合在反射次数达到饱和的前提下,光波导长度取100 mm,以兼顾匀化效果与系统紧凑性。

由于光纤输出激光的整形形状为方形,考虑光束孔径角及光束的耦合效率,确定光波导截面为方形,入

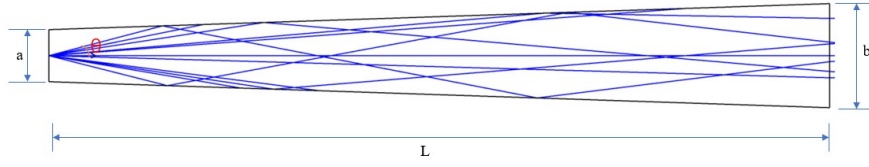


图3 光波导参数

Fig.3 Parameters of waveguide

射端尺寸 5 mm × 5 mm, 出射端尺寸 10 mm × 10 mm。

根据所确定的光波导参数对光波导进行仿真分析,如图4所示,激光器输出光纤(1064 nm, 芯径 2 mm, 数值孔径 0.28, 其能量分布接近高斯分布)位于光波导输入端,经光波导匀化后在出射端设置探测器,对其获得的辐照区域的均匀性进行评估,通过(3)式对其均匀性进行评估: η 值越大,光强分布越均匀。

$$\eta = \left(1 - \frac{\max(E) - \min(E)}{\max(E) + \min(E)}\right) \times 100\% \quad (3)$$

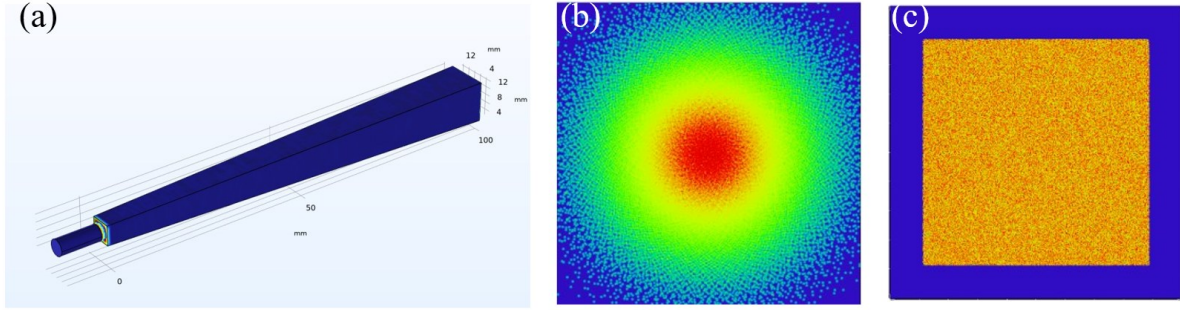


图4 光波导建模。(a)Comsol实体建模;(b)输入端能量分布;(c)输出端能量分布

Fig.4 Optical waveguide modeling. (a) Comsol solid modeling; (b) Input end energy distribution; (c) Output end energy distribution

1.2 扩束物镜设计及评价

本文目标实现大能量激光的大面积均匀辐照,而上述光波导已经实现了匀化,还需考虑扩束物镜对波导出射端的光斑进行扩束。光波导出射端面尺寸为 10 mm × 10 mm,辐照区域为 150 mm × 150 mm,工作距离 3000 mm,工作波长为 1064 ± 5 nm,由此需要放大 -15×,同时计算出焦距为 194 mm。根据以上参数,完成了扩束物镜的光学设计与优化,如图5所示。

该物镜系统的设计以有限共轭成像理论为一阶基础,有限共轭系统的线放大率^[11]可表示为: $M = \frac{-F_i}{F_o}$,

其中 F_o 和 F_i 分别为系统的物方与像方等效焦距。然而,该模型仅描述系统的几何成像关系,难以满足高倍率条件下对波前质量和能量均匀性的要求。因此,在该理论基础上,本文采用多片透镜结构对系统进行扩展与优化。系统前组透镜用于接收并整形入射光束,建立稳定的孔径条件;在此基础上,在系统中部引入孔径光阑,以限定系统的有效数值孔径并抑制边缘光线对能量分布的不利影响;后组透镜承担系统的主要光学功率,通过大口径多片结构实现光束的进一步扩束与波前整形,从而在远距离工作面获得均匀的照明分布。

实际结构中,系统由四片熔石英球面透镜和两片保护窗口共同构成,实现了高质量的共轴成像与光束扩展功能。两片保护窗口分别设置于光学系统的内外侧,并均采用适当倾斜的方式以抑制杂散反射。其中,外侧窗口采用可更换设计,便于系统维护及适应不同应用环境;内侧窗口作为永久防护元件,用于防止灰尘及污染物接触内部透镜表面,从而在保证光学性能的同时显著提升系统的环境适应性与长期稳定性。系统中所有光学元件均采用熔石英材料,具备优异的热稳定性和较高的激光损伤阈值,适用于高功率激光

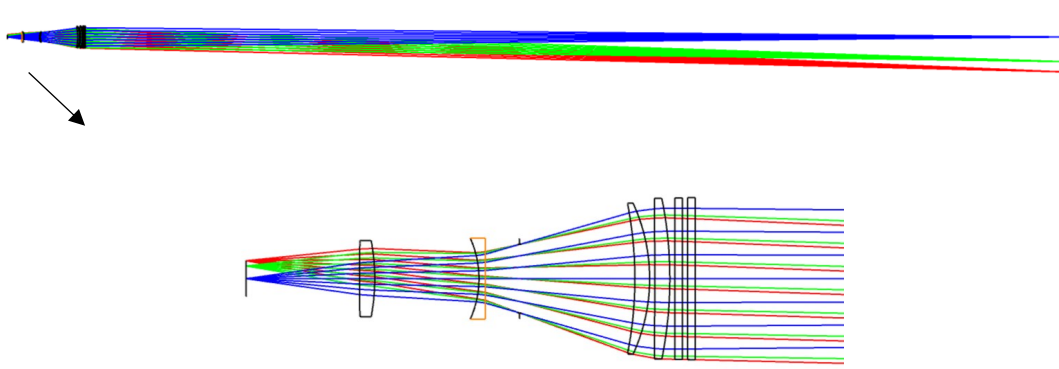


图5 扩束物镜光路图

Fig5 Beam extending objective optical path diagram

扩束及匀化等精密光学应用。

根据分辨率指标 $50\ \mu\text{m}$, 其对应的空间频率约为 $10\ \text{lp/mm}$, 在该频率处, 系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 反映了对目标结构的对比度传递能力。本文以 $\text{MTF} \geq 0.3$ 作为分辨性判据, 以确保在设计工作条件下系统具备稳定、可靠的分辨能力。图 6(a) 中 MTF 图显示, 在各视场和子午、弧矢方向上, 调制传递函数曲线均接近衍射极限, 直至 $10\ \text{lp/mm}$ 的空间频率仍保持较高值, 若转换成分辨率为 $50\ \mu\text{m}$, 对应的物方分辨率为 $3.3\ \mu\text{m}$, 表明系统具有良好的成像对比度和分辨率, 像散得到了良好校正。

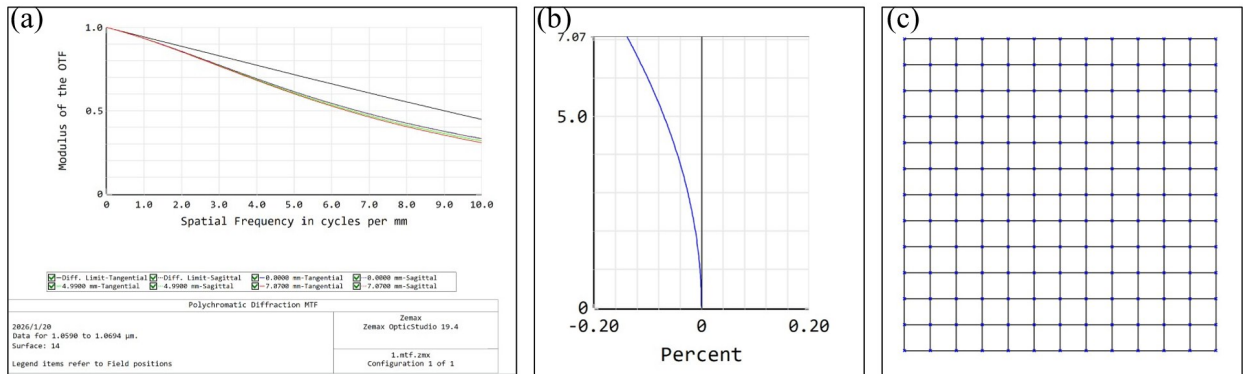


图6 扩束匀化光学系统评价。(a)扩束物镜MTF曲线;(b)畸变曲线;(c)网格成像图

Fig.6 Evaluation of beam expansion and homogenization optical system; (a) MTF curve of the beam expansion objective; (b) Distortion curve; (c) grid imaging

尤为关键的是,扩束物镜不仅需要在传输过程中无损地保持匀光元件的能量分布特性,还应在几何意义上保持能量分布形状的不失真和不变形,以为后续扩束匀化光路中的阵列拼接提供稳定的基础条件。然而,在实际光学系统中,不同视场高度的离轴光线在透镜组中的成像路径存在差异,其横向放大率会随视场位置发生变化,从而引发畸变,使辐照光斑边缘出现轻微的几何拉伸或压缩。由于本系统需在较大扩束倍率和工作距离条件下实现大面积均匀辐照,扩束物镜同时承载较大的视场角和数值孔径,这在几何光学上对畸变控制提出了要求。

畸变分析结果如图 6(b) 表明,该系统的最大畸变被严格控制在约 0.20% 的极低水平,表明物象之间具有较高的形状保持度。网格畸变图进一步对这一结果进行了直观验证,如图 6(c) 所示,其成像网格线条保持良好的直线性和均匀性,未出现明显的桶形或枕形畸变。综合来看,该设计不仅在能量分布保持方面表现良好,同时在几何保真度方面亦满足高质量激光扩束匀化系统的技术要求,并根据式 (3) 计算得到均匀度 $\eta = 98.73\%$ 。

1.3 扩束匀化系统集成仿真

上文中,对光波导和扩束物镜分别进行了参数计算、分析与评价。为了实现目标需求,需要对扩束匀化组件进行阵列拼接。图7(a)是实现了 2×2 阵列拼接后的光学系统总图,各匀光组件的匀化光斑在辐照面上实现了 2×2 的阵列拼接。

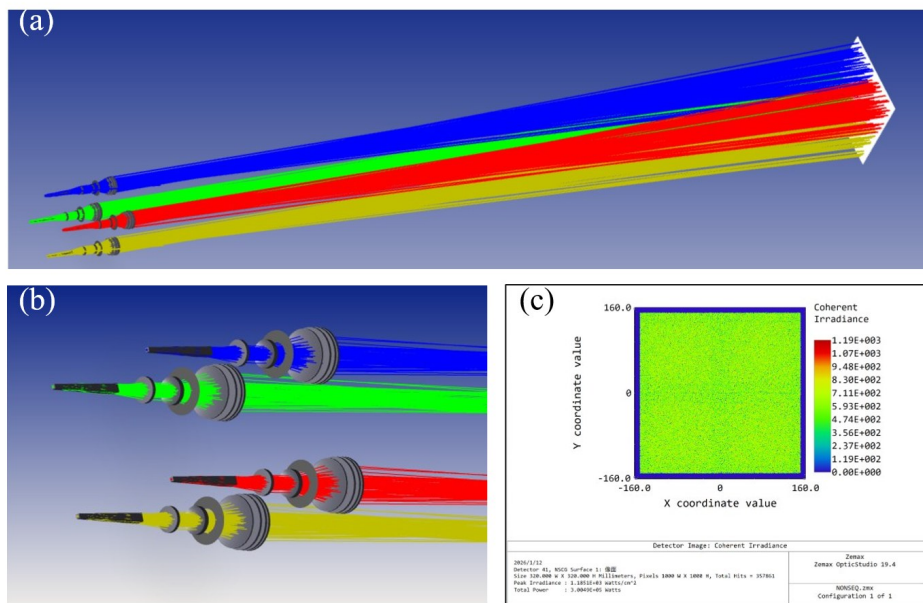


图7 扩束匀化系统集成仿真。(a)激光匀化扩束系统结构图;(b)扩束物镜局部放大;(c)匀化效果图
Fig.7 Beam expansion and homogenization system integrated simulation. (a) Structure diagram of laser homogenization beam expansion system; (b) Beam Expander Objective Local Magnification; (c) Homogenization effect

系统完成集成后,在被辐照面设置 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ 的探测器,四个组件同时进行非序列光学追迹,得到探测器处的激光分布如图7(c),经公式(3)计算,其均匀度 $\eta=95.10\%$ 。

2 光学元件表面粗糙度的分形建模与数值仿真

在大能量激光匀化系统中,光学元件的激光损伤阈值是决定系统稳定运行的首要约束条件。本研究设计的激光系统单脉冲能量为 50 J ,进入口径为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的锥形光波导,其承载的平均能流密度约为 200 J/cm^2 。根据高功率激光领域的实验研究^[12],经超光滑加工且辅以化学深层刻蚀的熔石英表面,能够有效抑制电场增强效应,在此类极限加工条件下,熔石英表面的激光损伤阈值在脉冲辐照下可被提升至 500 J/cm^2 以上,远高于本系统实际运行的能流水平。这证实了,在该能流密度下,光学元件的损伤风险并非来源于宏观的形貌起伏,而是取决于材料本身的极限耐受力。

上述仿真将光波导和扩束物镜视为理想光滑表面,其匀化效果代表了系统理论极限。然而,实际加工中受工艺精度与材料特性限制,光学元件表面必然存在微观起伏。这类由工艺引入的非理想形貌会显著调制光波传输,影响最终匀化效果。因此,要逼近仿真性能,必须在加工层面系统研究表面特性对光束均匀性的具体影响。前文1.1中试制的平面光学元件主要用于验证熔石英材料在超光滑加工工艺下实现亚纳米级表面粗糙度的可行性,其粗糙度数值(约 0.8 nm)代表了当前加工工艺可达到的实际水平。

在此基础上,接下来所引入的粗糙度模型并非对某一具体加工表面的直接复现,而是作为一种等效几何描述方法,用于系统在保持粗糙度幅值处于纳米量级的前提下,研究不同空间频率特征的微观表面形貌对光束匀化性能的影响规律。

表面粗糙度通过相位调制与散射效应,直接影响光场分布:过高将加剧散射、降低匀化效率,甚至引发激光损伤;过低则需更高精度工艺,显著提升成本与复杂度。因此,有必要从理论分析表面粗糙度,尤其是分形特征对匀化质量的作用机制。第2节将对一组扩束匀化系统重点探讨粗糙度对匀化效果的定性影响与

理论分析方法,旨在通过建模与仿真为参数优化提供依据,从而在光学性能、可靠性与制造成本之间取得平衡。

2.1 光学元件表面粗糙度

光学表面粗糙度^[13]是指实际面与理想光滑表面之间法向上的微小高度偏差。这些偏差通常为峰谷式微观结构,由制造工艺(如抛光、研磨)导致,具有短波长、高频率的特性。

粗糙度可从两个方向刻画:垂直高度(峰谷深度)和水平尺度(相邻峰谷的间距)。其中,常用参数包括:算术平均偏差 R_a 、均方根差 R_q 或偏斜度 R_{sk} 。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \quad (5)$$

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \left(\sum_{i=1}^N Y_i^3 \right) \quad (6)$$

其中 l 为扫描或截止长度, $y(x)$ 为连续高度轮廓函数, N 为采样点数;

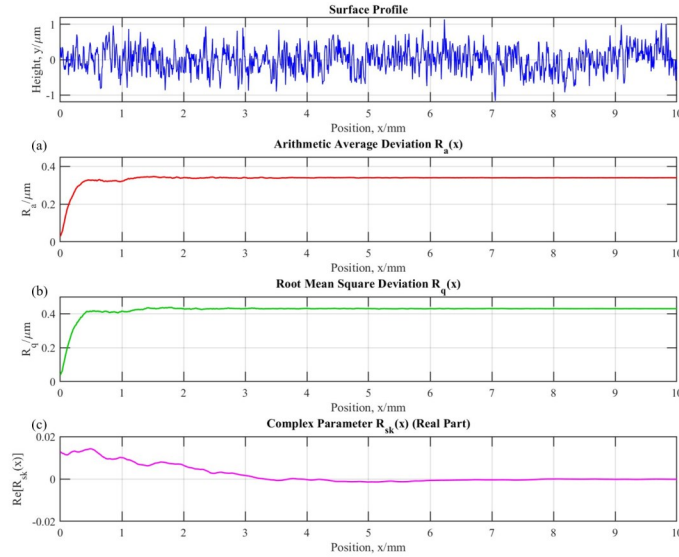


图8 随机表面轮廓图。(a) R_a 的累计过程;(b) R_q 的累计过程;(c) R_{sk} 的实部情况

Fig.8 Random surface profile diagram . (a) Cumulative process of R_a , (b) Cumulative process of R_q , (c) Real part of R_{sk}

随机表面轮廓由高斯随机过程生成,其高度分布满足均值为零的正态分布假设。随后引入高斯相关函数对随机高度序列进行滤波处理,以模拟实际光学加工过程中表面起伏的空间相关性。通过调节高斯相关函数的特征长度,可有效控制表面形貌的相关尺度,使所得随机表面在统计特性和空间结构上均与真实加工表面相一致。图8蓝色曲线模拟了一个由高斯随机函数组成的表面轮廓,其峰谷结构为计算以上三个参数提供基础。图8中(a)、(b)分别呈现了算术平均偏差 R_a 、均方根差 R_q 的累计过程:二者起始于收点高度绝对值,随测量长度增加加快波动后逐渐趋于稳定(R_a 收敛于 $0.34 \mu\text{m}$ 、 R_q 收敛于 $0.43 \mu\text{m}$), R_q 收敛比较慢且值大于 R_a ,反映了其对极端峰谷的敏感性。图8中(c)显示了 R_{sk} 的实部在零附近的波动,表明了整体轮廓对称但局部存在非对称性。因此 R_a 抗噪性最强且收敛最快, R_q 对极值敏感, R_{sk} 持续波动揭示局部的非对称性,可以区分两个具有相同的 R_a 或 R_q 值但形状不同的侧面。此外, R_q 在数学上具有良好的统计稳定性,其平方和形式更适用于表征具有自相似性或多重分形特征的粗糙表面,因此在分形粗糙度建模与分析中, R_q 能提供更全面、更具区分度的表面形貌信息。

2.2 分形建模与数值仿真研究

由于本实验所用的光学元件表面粗糙度达到超光滑级别 $R_a < 1\text{nm}$,传统的测量方法及评价方法已无法

准确描述在 nm 尺度上的表面微观形貌,因此,必须使用一种新的评价参数来描述 nm 尺度下的表面几何形貌。1977 年 KOMVOPOULOS K^[14]引入了分形维数 D 来表征物体的不规则程度或粗糙度,分形维数 D 超过了物体的拓扑维数 d。例如,对于拓扑维数 d=2 的粗糙表面,分形维数 D 的取值范围为 2.1~2.9。当分形维数 D 从 2.1 增大到 2.9 时,粗糙度增大。该分形理论可用于获得轮廓曲线的频谱图,并产生具有不确定性的随机轮廓曲线。同时,它还可以用来模拟真实表面的轮廓曲线。它的复合函数为:

$$w(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r^{(D-2)n} (1 - e^{ir^n x}) e^{i\Phi_n} \quad (7)$$

式中, w 为变量 x 的复函数; r 是控制曲面轮廓曲线空间频率密度的参数, $r > 1$, 对于表面光滑度和频率分布密度, r 常取 1.5; D 为表面轮廓分形曲线的分形维数, $1 < D < 2$; n 为频率指数, Φ_n 是随机的相位, 可以使 w 表现出确定或随机性。该理论常用于分形曲线的研究, 也可用于对分形函数的数学表征进行评估。

在工程与科学领域的许多应用中, 对三维表面形貌的准确分析与表征具有至关重要的意义。实际粗糙表面的形貌往往极为复杂, 表现出显著的空间变异性、各向异性以及局部非均匀特征。仅凭粗糙表面上某一剖线的分形维数、或若干剖线的平均分形维数, 难以全面描述整个三维表面的形貌特性。为此, 一些学者将分形理论从二维推广至三维, 提出了适用于三维分形表面的函数表征形式。在此基础上, Ausloos 和 Berman^[15]提出了一类高维随机分形函数 Ausloos-Berman 函数 (Ausloos - Berman function, A-B):

$$Z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{(D_s-2)/2} \left(\frac{\ln r}{M} \right)^{1/2} \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{n_{\max}} r^{(D_s-3)n} \times \left\{ \cos \varphi_{m,n} - \cos \left[\frac{2\pi r^n (x^2 + y^2)}{L} \times \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \varphi_{m,n} \right] \right\} \quad (8)$$

式中, $Z(x, y)$ 表示分形粗糙表面的高度分布函数, x, y 为空间坐标; L 为特征长度, 用于限定表面计算区域; r (μm) 为空间位置变量, 控制不同尺度分量之间的间隔; k_0 (μm^{-1}) 为空间频率; D_s 为分形维数, 无量纲; M 为叠加方向数; n 为尺度级数; $n_{\max}$ 为尺度截断上限; $\varphi_{m,n}$ 为随机相位。

图 9(a) 表示当方向分量 $M=15$ 、频率范围 $N=30$ 、分形维数 $D_s=2.65$, 剖面角度 $\theta=45^\circ$, 采样点为 5000 时, 公式 (8) 的分形轮廓曲线。 D_s 为表面分形维数, $2 < D_s < 3$, 图 9(b) 展示了 D_s 越大, 轮廓曲线的振幅显著增大、高频成分增强和随机性加剧, 粗糙表面的占位空间越大, 表面的精细结构和空间层次越大。

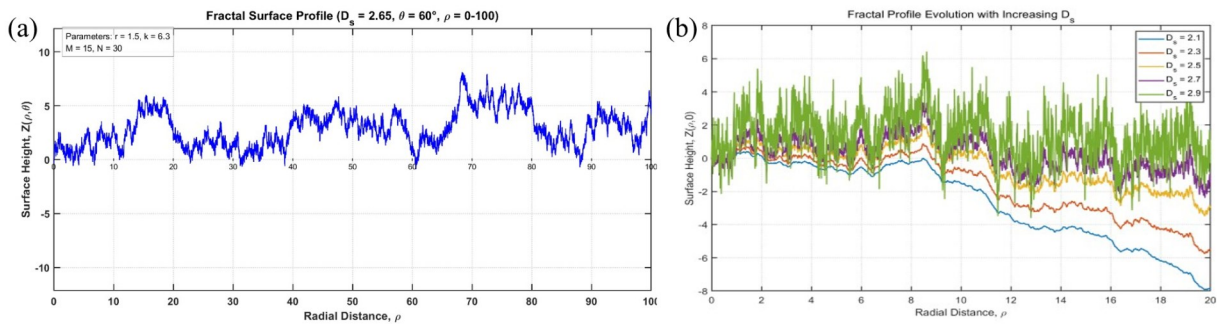


图 9 A-B 函数表面轮廓曲线。(a) $D_s=2.65$ 的 A-B 函数表面轮廓图; (b) 不同粗糙度的分形轮廓曲线
Fig.9 Surface contour curves of A-B function. (a) Surface profile of A-B function with $D_s=2.65$; (b) Fractal contour curves with different roughness

Manjumdar 和 Tien^[16]通过建立轮廓谱和表面谱之间的关系, 建立了模拟函数 Manjumdar - Tien 函数 (Manjumdar - Tien function, M-T):

$$Z(x, y) = F(D) G^{(D-1)} \sum_{n=n_L}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n [x + g(y)] \cos 2\pi\gamma^n [y + g(x)]}{\gamma^{(2-D)n}} \quad (9)$$

其中, $1 < D < 2$, $\gamma > 1$, $D_s = D + 1$, 其中 F 是与 D 自相关的函数, 可以表示为:

$$F(D) = \left(\frac{2 \ln(5 - 2D)(7 - 2D)E(D)}{\pi} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$E(D) = \int_0^{2\pi} \left\{ \cos^{(5-2D)} \theta - \cos^{(7-2D)} \theta \right\} d\theta \quad (11)$$

$g(a)$ 是一个使表面相位随机的函数:

$$g(a) = \frac{1}{2 \times 2^{1/2}} \frac{r^{(2-D)(n_L-1)}}{[r^{(4-2D)} - 1]^{1/2}} \sum_{n=n_L}^{\infty} \frac{\cos 2\pi r^n a}{r^{(2-D)n}} \quad (12)$$

图10(a)体现了分形维数 $D=1.3$ (对应的表面维数 $D_s=2.3$)在3-7局部放大区域的形态特征,模拟了实际表面的非周期性粗糙特征。图10(b)体现了分形维数 D_s 的影响, D_s 从2.1增大到2.9时,粗糙度增大,表面形貌越精细复杂表面越粗糙,高频成分占主导,小尺度振荡密集,振幅变化范围小但振荡频繁。以上两种函数均可用来模拟分形表面,两种函数的区别在于A-B函数用来模拟三维随机各向同性或异性表面,但需要先计算表面分形维数 D_s ,M-T函数用于模拟分形表面时,需要计算表面轮廓曲线的分形维数 D 。

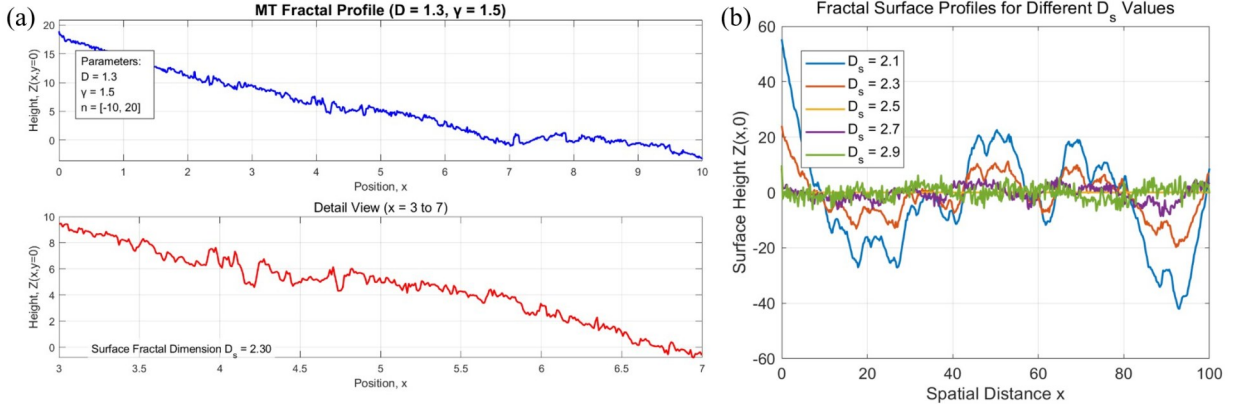


图10 M-T函数表面轮廓曲线。(a) $D=1.3$ 的表面轮廓及3-7的局部放大图;(b)不同粗糙度的分形轮廓曲线
Fig.10 Surface contour curves of M-T function. (a) Surface profile with $D = 1.3$ and partial magnification of 3-7; (b) Fractal contour curves with different roughness

3 光学元件粗糙表面对匀化的影响

3.1 粗糙表面多尺度表征及空间频率表征

如前所述,A-B函数与M-T函数等分形建模方法为描述具有自相似特征的粗糙表面提供了理论基础。为定量分析粗糙度对匀化性能的影响,本章将基于上述分形理论,特别是A-B函数,构建扩束匀化系统的三维粗糙度模型,并通过数值仿真探究其对于光场匀化作用的扰动机制。

本文基于光学元件表面粗糙度的实测结果(0.8 nm)构建三维粗糙度模型在设定分形维数时, $\gamma^{[17]}$ 定义了频率空间的比例间距,参考超精密加工表面的经典建模理论,其取值范围通常在1.3-1.7之间以确保频谱采样的充分性;本文取 $\gamma=1.5$,旨在真实还原抛光过程中多尺度磨料叠加产生的随机形貌特征。

对于曲面褶皱叠加指数 $M^{[17]}$,研究表明当 $M \geq 15$ 时,分形表面的统计特性已趋于收敛,能够构成具备物理完备性的“标准频域采样窗口”。本文选取 $M=20$,使其在横向维度上确立了约30 nm的采样分辨率,这与0.8 nm的纵向加工精度相结合,构成了典型的“亚波长级横向分辨率+纳米级纵向深度”模型。这种配置确保了模型能够精确捕捉并计算远小于激光波长(1064 nm)的微观相位起伏。

$G^{[17]}$ 是决定表面粗糙度幅值的关键因素,与 $L=10 \mu\text{m}$, $L_s=0.5 \text{ nm}$ 这些尺度相匹配,取值通过迭代校准确定,使得模型生成表面的均方根粗糙度 R_q 与0.8 nm相一致。

对分形维数的粗糙表面进行采样,采样点数为 300×300 。由于空间频率特征尺度 γ 和曲面褶皱重叠数 M 相较于分形维数对粗糙表面的建模影响较小^[18],仅改变分形维数 D 这一核心变量进行研究,不仅符合控制变量的科学原则,且能精准揭示形貌特征维度对匀化机制的影响规律,对实际1nm量级超光滑元件的工

艺调控具有明确的参考意义。鉴于经抛光、蚀刻等工艺制备的光学表面,其分形维数大多处于2.2-2.8之间,研究直接选取2.1-2.9范围作为建模参数。

用Matlab编程^[19-20],以式(8)为例,其中, $G=1e-13$; $M=20$, $D=2.1-2.9$; $\gamma=1.5$; $L=1e-5$ m; $L_s=5e-10$ m; m, n 为随机相位,取样范围为 $[0, 2\pi]$,如图11(a)所示。由此仿真各分形维数下的二维分形表面图,如图11(b)所示,计算其轮廓粗糙度值,见表2,可以看出D从2.1增大到2.9时,粗糙度增大,其表面形貌越复杂、精细。

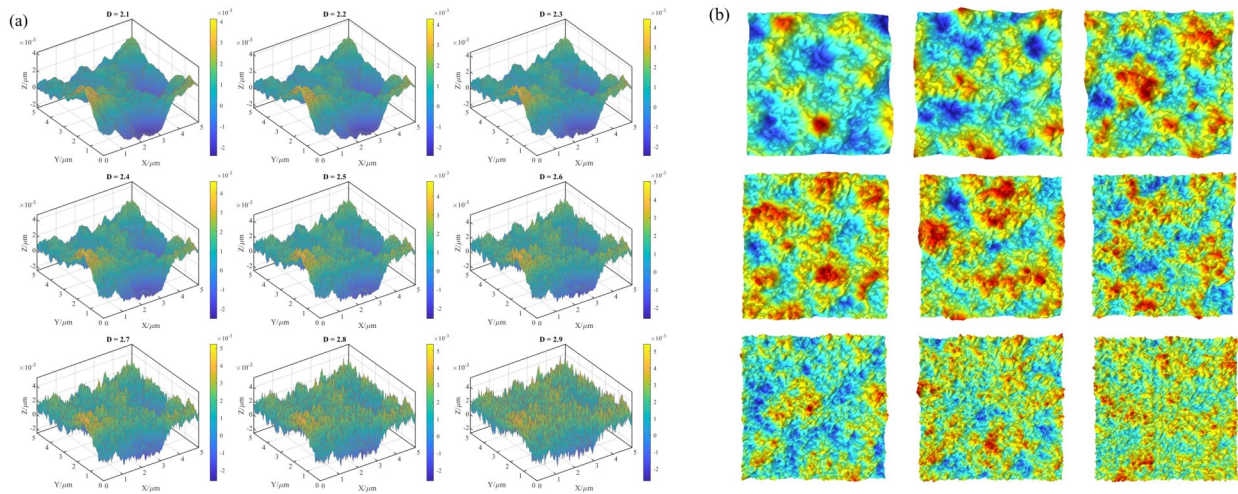


图11 D=2.1-2.9对应的分形粗糙表面。(a)Matlab三维分形粗糙表面;(b)Comsol二维分形表面

Fig.11 Fractal rough surfaces corresponding to $D=2.1-2.9$. (a) Matlab 3D fractal rough surfaces; (b) Comsol 2D fractal rough surfaces

表2 不同分形维数对应的粗糙度

Table 2 Roughness corresponding to different fractal dimensions

D	R_q/nm
2.1	1015.0053
2.2	243.6746
2.3	25.5427
2.4	4.7290
2.5	0.9112
2.6	0.1558
2.7	0.0288
2.8	0.0059
2.9	0.0009

由表2及微观形貌图11可以观察到,随着分形维数D的增加, R_q 呈显著下降趋势。从微观形貌特征来看,分形维数的变化本质上对应于表面空间频率组成的调整:当D较小时,表面以低频大尺度起伏为主,整体高度波动较大;随着D增大,高频成分逐渐增强,表面结构向多尺度细化发展,大尺度起伏减弱,从而使整体高度分布趋于平缓,导致 R_q 减小。

此外, R_q 作为空间域统计量,主要反映表面高度起伏幅值,而分形维数则决定表面在不同尺度上的结构分布特征,因此二者之间的变化关系本质上来源于表面频率结构的演化。为进一步分析粗糙表面的尺度组成及其对光学调制行为的影响,有必要引入空间频率分析方法,对表面进行频域表征。

为进一步分析不同分形维数粗糙表面的空间频率分布特征,对生成的二维粗糙表面进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),得到其二维空间频谱分布,如图12所示。可以看出,随着分形维数D的增加,表面频谱由低频主导逐渐向高频扩展,表明表面微结构由大尺度起伏向多尺度结构转变。当D较低

时(如 $D=2.1-2.3$),频谱能量主要集中在低频区域,说明表面起伏较为平缓,对光线的调制能力有限;而当 D 较高时(如 $D=2.8-2.9$),高频成分显著增强,表面结构更加复杂,容易引入过强的散射与随机性。相比之下,在 $D=2.5-2.7$ 时,频谱在低频与高频之间呈现出更加均衡且连续的分布特征,体现出典型的多尺度协同结构。这种结构既能够有效改变光线传播方向,增强横向混合,又能够避免过度随机散射,从而为光束叠加与匀化提供最优条件。

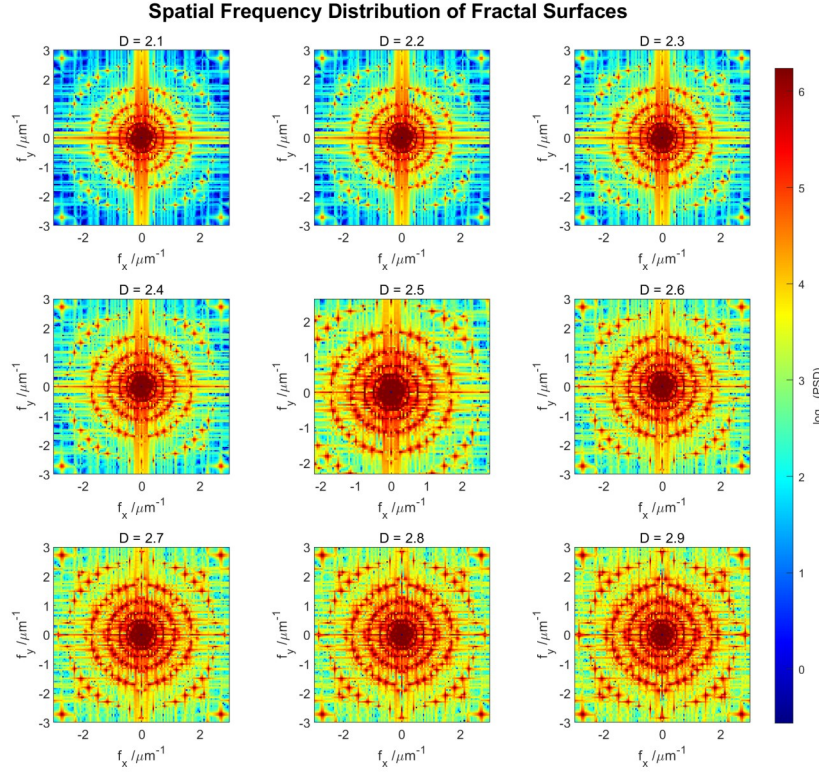


图12 分形表面的二维空间频率分布

Fig.12 2D spatial frequency distribution of fractal surfaces

3.2 相位调制与散射增强机制

由空间频率分析可知,不同分形维数对应的粗糙表面在多尺度结构组成上存在显著差异。这种结构差异将直接影响入射光在界面处的相位调制特性。具体而言,表面起伏所引起的光程差会导致反射光产生相位畸变,并进一步引发光场的去相干与散射效应。因此,有必要从相位调制与散射角度出发,分析粗糙表面对光束传播行为的影响机制。

粗糙表面的高度起伏会引入光程差,从而导致反射光产生相位调制,其相位分布可表示为:

$$\Phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y) \quad (13)$$

其中 $h(x, y)$ 为表面高度分布, λ 为入射光波长。该相位调制将进一步影响光场的相干性与散射特性。对9组不同分形维数($D=2.1-2.9$,步长0.1)进行仿真计算,为清晰展示规律,图13仅选取典型($D=2.1$ 、 $D=2.3$ 、 $D=2.6$ 、 $D=2.9$)4组进行呈现,所有结论均基于完整9组数据得出。

从相位调制强度分布图13(a)可以看出,随着分形维数的增加,相位调制概率密度分布变大。当 $D=2.1$ 时,相位扰动分布主要在低值区间,表明表面起伏较为平缓,对光线的调制能力有限;而当 $D=2.9$ 时,相位梯度分布显著展宽,说明表面高频成分占比增加,导致相位扰动过强。相比之下, $D=2.6$ 时相位调制强度处于适中范围,既能够有效改变光线传播方向,又不会引入过强的随机性,为光束均匀化提供了有利条件。

从图13(b)不同分形的散射曲线(结构函数)的变化趋势可以进一步验证上述结论。随着分形维数 D 的增加,相位去相干效应逐渐增强。当 $D=2.1$ 时,散射曲线增长平缓,表明不同位置光线之间的相位差异积累不足,难以实现充分混合;而当 $D=2.9$ 时,散射曲线虽然增长较快,但曲线波动明显,反映出过强的随机性。

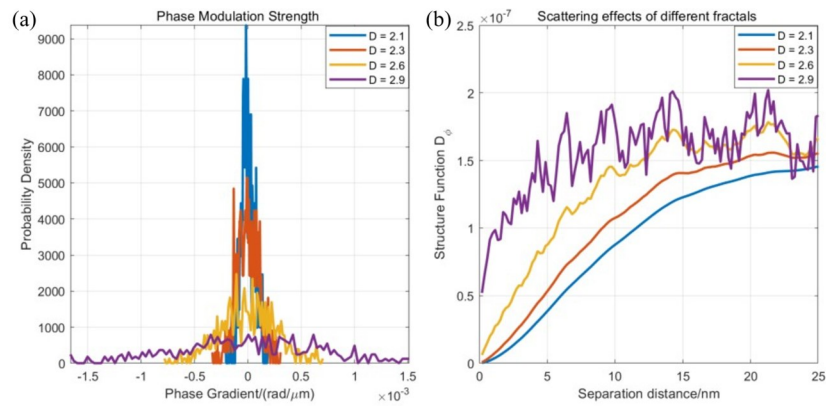


图13 不同分形的相位调制与散射机制。(a)相位调制概率密度分布图;(b)散射曲线(结构函数)
Fig.13 Phase modulation and scattering mechanisms of different fractals. (a) Probability density distribution of phase modulation; (b) Scattering curves (structure function)

相比之下, $D=2.6$ 时结构函数在较小尺度内快速增长, 并保持相对平滑, 说明其在增强散射的同时保持了较好的稳定性, 有利于实现高效且可控的光束均匀化。

综合相位调制强度分布与散射结果分析可以看出, 分形维数通过调控粗糙表面的空间频率成分, 进而影响相位扰动强度与散射过程。在 $D=2.6$ 时, 系统在散射强度与随机性之间达到最佳平衡, 从而实现最优的光束叠加与匀化效果。

3.3 光线传播与能量均匀化机制

由前述分析可知, 粗糙表面的空间频率特性会影响入射光的相位分布, 并进一步改变界面处的局部法向, 从而影响光线的反射方向。在光波导中, 光线经历多次全反射, 如 1.1 节光波导设计中图 2 所示, 相位扰动与随机散射的耦合效应不断累积, 使其传播路径逐渐发生偏转与扩散。因此, 有必要从光线传播与能量均匀化机制分析粗糙表面对光束能量分布的影响机制。

将 Matlab 生成的三维分形表面导出为数据文件, 并导入 Comsol 中作为一个插值函数生成相应的扩束元件模型和参数化曲面, 如图 14(a)、(b) 所示。

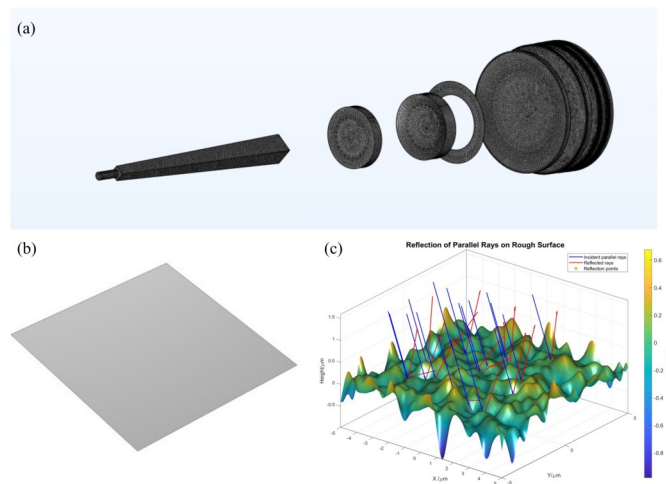


图14 光学元件实体建模及反射机制。(a)光学元件实体建模;(b)参数化表面;(c)平行光在粗糙表面上的反射
Fig.14 Optical component solid modeling and reflection mechanism. (a) Optical component solid modeling; (b) Parametric surface; (c) Reflection of parallel rays on rough surface

理想情况下, 光纤激光位于光波导输入端, 其能量分布见 1.1 节图 4(b) 所示, 激光波长为 1064 nm, 峰值功率为 10^5 W。在理想光滑界面条件下, 光线按照确定的反射规律传播, 路径较为规则, 横向混合有限, 而当在粗糙表面波导中, 入射光线在界面发生多次全反射, 使出射光线被打乱, 局部法向方向发生变化, 导致反

射角产生偏移,使光线在传播过程中逐渐偏离原有路径,如图 14(c)所示。

随着反射次数的增加,不同光线之间发生交叉与重叠,从而实现横向能量的重新分布。该过程本质上是一种多路径叠加与混合机制,使得原本集中分布的光能在空间上逐渐扩散,最终在出射端形成更加均匀的光强分布,因此在扩束匀化性能上加入图 11 的粗糙表面后,研究粗糙表面在出射端的辐照度分布,其出射端匀化结果如图 15 所示。

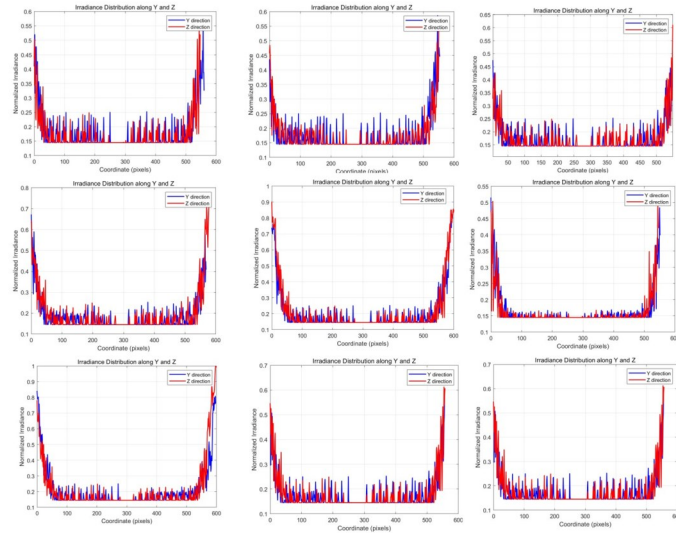


图 15 D=2.1-2.9 对应的出射端 y, z 方向上的辐照度归一化分布
Fig.15 The light intensity distribution in the y and z directions at the output to D=2.1-2.9

在扩束匀化系统表面引入分形粗糙结构后,出射端光场分布发生显著变化,为定量评估分形维数对匀化效果的影响,对图 15 中不同 D 值对应的出射辐照度分布进行了一维剖面提取与分析。结果表明,与理想光滑表面相比,具有分形粗糙度的波导(D=2.1 - 2.9)在 Y/Z 方向上的光强分布曲线均呈现不同程度的均匀分布,显示出粗糙面对光束匀化的具有一定的积极调制作用。其中,当 D=2.6 时,光强分布在接收面上最为均匀,匀化效果最优。为了比较不同粗糙面引起的光强匀化效果,采用 η :

表 3 不同分形维数对应的匀化效率
Table 3 Homogenization efficiency corresponding to different fractal dimensions

D	$E_{max}/W\cdot mm^{-2}$	$E_{min}/W\cdot mm^{-2}$	$\eta/\%$
2.1	21.23	15.29	83.79
2.2	20.12	15.46	86.91
2.3	19.97	15.39	87.05
2.4	18.45	15.33	90.77
2.5	17.66	15.29	92.81
2.6	16.69	15.27	95.56
2.7	16.25	14.50	94.39
2.8	17.13	14.60	92.03
2.9	17.84	14.71	90.39

结合相位调制最优区间、散射曲线最优值及表 3 和图 16(a)分形维数 D 与匀化效率 η 的关系可以看出,随着表面分形维数的引入,光强分布的匀化效果明显改善。光束匀化与扩束系统的整体效率是衡量其性能的关键指标,而光学元件的表面质量对此有决定性影响。本研究通过引入分形维数(D)这一参数,定量分析了光学元件表面粗糙度对光束匀化效果的作用机制。揭示了分形维数 D 与匀化效率之间 η 存在非单调的依赖关系:当表面为理想光滑表面时,匀化效率为 98.73%,这构成了系统理论上的性能上限。然而,实际加工中不可避免的表面缺陷会使性能劣化。研究发现在人为引入特定的粗糙度,即分形维数 D=2.6 时,对应

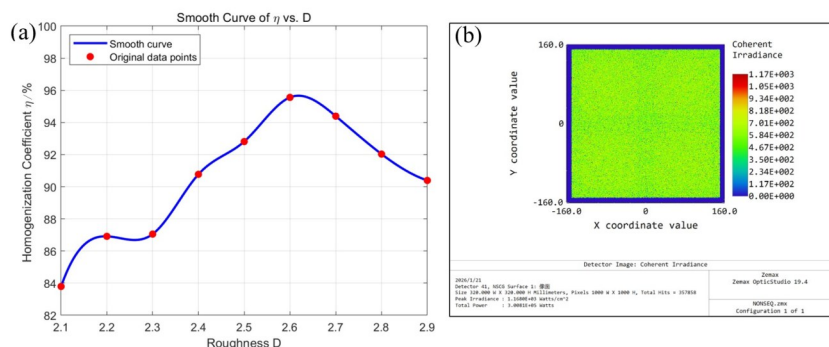


图 16 分形维数 D 对光强匀化效果的影响。(a) D 与 η 的关系;(b) $D=2.6$ 时的匀化效果图

Fig.16 The effect of fractal dimension D on the homogenization of light intensity. (a) The relationship between D and η ; (b) Homogenization effect at $D=2.6$

的粗糙度为 0.1558 nm, 匀化效率可达 95.56%。这一结果不仅显著优于普通加工表面, 而且极为逼近理想极限, 表明适度的表面粗糙度并非必然有害, 反而能通过优化设计成为一种有效的性能调控手段。相比之下, 当分形维数偏离此最优值 (如 $D=2.1$ 或 $D=2.9$) 时, 匀化效果均出现可观测的回落, 这证实了对于匀化效率而言, 粗糙度的空间频率分布存在一个关键的“最优匹配点”, 其效果远非简单的越光滑或越粗糙所能概括。需要指出的是, 本研究采用的激光参数为波长 1064 nm、脉宽 0.5 ms, 属于长脉冲激光范畴, 损伤机制以热效应为主导, 在此机制下, 光学元件的损伤阈值与表面粗糙度呈负相关, 即表面越光滑、缺陷越少, 抗损伤能力越强。当 $D=2.6$ 时, 对应的粗糙度为 0.1558 nm, 优于常规超光滑加工水平 ($R_q \approx 0.8$ nm), 属于极低粗糙度表面, 并且在当前超精密抛光工艺 (如化学机械抛光^[21]) 下是可以实现的。因此, 从抗损伤角度分析该优化表面同样具有优势。

为进一步评估该优化粗糙表面对实际复杂光学系统的适用性, 将分形维数 $D=2.6$ 的扩束匀化系统模型代入图 7(a) 所示的完整激光匀化扩束系统进行系统级仿真得到探测器结果图, 如图 16(b) 所示。经公式 (3) 计算, 其匀化效率 $\eta=92.05\%$ 。尽管此值相较于系统采用理想系统时的 95.10% 存在一定差距, 但已满足该系统对于匀化效率 (通常要求 $>90\%$) 的实际应用需求。这一结果具有重要实践意义: 它证明, 基于分形维数优化获得的特定粗糙表面 ($D=2.6$), 通过精确设计与控制且在引入实际光学系统后, 表面粗糙度不仅可以作为性能调控手段, 更能成功地与现有光学系统兼容, 产出符合预期、可供工程化应用。

4 结论

光束匀化是激光系统整体性能评价的重要指标, 而光学元件表面粗糙度对其具有关键影响。本文通过引入分形维数 D 这一表征参数, 定量分析了粗糙表面对光束匀化性能的调制机制。

(1) 结果表明, 表面微观粗糙结构通过调控空间频率组成, 改变光场的相位调制与散射行为, 从而影响光束的传播特性。

(2) 研究发现, 分形维数 D 与匀化效率 η 存在非单调依赖关系: 当 D 从 2.1 增加至 2.6 时, η 随 D 的增大逐步提升; 当 D 超过 2.6 后, η 随着 D 继续增大而回落。当 $D=2.6$ 时, 由表面粗糙度引入的附加能量损耗可被显著抑制, 使系统整体效率无限接近其理论上限, 是光学元件表面粗糙度的最优参数点。

(3) 进一步分析表明, 光学元件表面粗糙度的合理调控不仅能够提升光强分布的均匀性, 还对系统的工程应用具有重要意义。在满足系统稳定运行的前提下, 基于分形维数的表面结构优化可作为实现高效、大面积激光匀化的重要途径。

需要指出的是, 本文主要基于数值模拟, 在安全损伤阈值范围内分析了粗糙表面对光场调制及匀化性能的影响, 尚未涉及大能量激光辐照条件下的损伤阈值变化及实验验证。因此, 后续工作将结合实际加工样品与实验测试, 进一步研究不同分形维数下的光场增强效应及抗激光损伤性能, 并完善相关工程应用评价体系。

参考文献

- [1] 王等旺,徐海斌,吕泽龙,等.脉冲激光起爆光敏炸药特性[J].兵工学报,2023,44(5):1350-1357.
- [2] 冯长根,刘柳,贾文志,等.掺杂光敏物质用于降低火工药剂激光发火阈值研究进展[J].兵工学报,2020,41(11):2347-2361.
- [3] 张翔,邢颖霞,蒋应波,等.基于全光纤结构的光束匀化整形技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2022,59(15):199-215.
- [4] 郑耀杰,齐杰,王晟,等.用于高斯光束匀化整形的微透镜阵列技术研究[J].中国激光,2025,52(01):119-126.
- [5] 周源,李润泽,于湘华,等.基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J].光子学报,2021,50(11):9-40.
- [6] 朱泉锋,马浩然,陈炳旭,等.双自由曲面光束整形系统的虚拟面迭代设计法[J].红外与激光工程,2024,53(02):184-194.
- [7] HOSSEINI S, SABATYAN A, NASIRI A, et al. Design of a low-loss polymer waveguide for near-eye AR glasses applications[J]. Optics Express, 2024, 32(15): 26125-26138.
- [8] LOU Shishu, ZHU Huishi, HAN Peide, et al. Laser beam homogenizing system design for photoluminescence[J]. Applied Optics, 2014, 53(21): 4637-4644.
娄世淑,朱慧诗,韩培德,等.光致发光用激光光束匀化系统设计[J].应用光学,2014,53(21):4637-4644.
- [9] ZHENG Hao, SUN Hao, ZHANG Hao, et al. Simulation and experimental research on a beam homogenization system of a semiconductor laser[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(10): 3725.
郑浩,孙浩,张浩,等.半导体激光光束匀化系统的仿真与实验研究[J].传感器(巴塞尔),2022,22(10):3725.
- [10] Zheng Xin, Dai Shengyu, Zhao Shuai. Partially coherent laser beam shaping in a zoom homogenizer[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 18444-18453.
郑鑫,戴圣宇,赵帅.变焦匀化器中的部分相干激光光束整形[J].光学快报,2023,31(11):18444-18453.
- [11] 贺国强,于信,白秦平,等.150 mm口径大气湍流模拟系统设计[J].应用激光,2025,45(10):191-204.
- [12] YE Xin, HUANG Jin, LIU Hongjie, et al. Advanced Mitigation Process (AMP) for Improving Laser Damage Threshold of Fused Silica Optics[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31111.
叶欣,黄进,刘宏杰,等.提高熔石英光学元件激光损伤阈值的先进缓解工艺[J].Scientific Reports, 2016, 6: 31111.
- [13] ZHU Qingyong, ZHENG Jinkun, SUN Junjun. Fractal characteristics of surface roughness and their effects on laser shock waves[J]. AIP Advances, 2022, 12: 125021.
朱庆勇,郑金坤,孙俊军.表面粗糙度的分形特性及其对激光冲击波的影响[J].AIP Advances, 2022, 12: 125021.
- [14] KUMAR C, SHRIVASTAV M, ESCRIG J, et al. Impact of fractal dimension and lateral correlation length on surface plasmon resonance[J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2024, 39: 101294.
- [15] MU Xiaokai, SUN Wei, LIU Chong, et al. Study on rough surfaces: A novel method for high-precision simulation and interface contact performances analysis[J]. Precision Engineering, 2022, 73: 11-22.
穆晓凯,孙伟,刘冲,等.粗糙表面研究:一种用于高精度模拟与界面接触性能分析的新方法[J].精密工程,2022,73:11-22.
- [16] GADELMAWLA E, KOURA M, MAKSOUD T, et al. Roughness parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(1): 133-145.
- [17] MAHMOOD M, HAN C, CHU H, et al. Effects of roll pattern and reduction ratio on optical characteristics of A1008 cold-rolled steel specimens: analytical approach and experimental correlations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(7-8): 2001-2020.
- [18] BAKIRTZIS S, SARRIS C. Stochastic modeling of wave propagation in waveguides with rough surface walls[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(1): 1-12.
- [19] 刘保柱,苏彦华,张宏林.MATLAB 7.0从入门到精通:修订版[M].北京:人民邮电出版社,2010.
- [20] WANG Jian, WU Chengbao, LIU Chuansheng, et al. Fractal simulation on random rough surface[C]. Atlantis Press, 2015: 1069-1073.
王健,吴成宝,刘传胜,等.随机粗糙表面的分形模拟[C].Atlantis Press, 2015: 1069-1073.
- [21] WU Zehua, ZHANG Zhixin, JIA Yong, et al. Fused silica with sub-angstrom roughness and minimal surface defects polished by ultrafine nano-CeO₂[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106: 1766-1777.
吴泽华,张志鑫,贾勇,等.超细纳米CeO₂抛光熔石英实现亚埃级粗糙度和极低表面缺陷[J].美国陶瓷学会杂志,2023,106:1766-1777.

Study on influence of Rough Surface of Optical Elements on Irradiation

Uniformity of High-Energy Laser

MA Shanghua^{1,2}, XIE Zhengmao^{1,2}, ZHANG Yihui^{1,2}, YAN Yadong^{1,2}, HE Junhua^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119)

(2 China; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: High-energy laser irradiation with large-area uniform intensity distribution plays a crucial role in material initiation and related applications such as propulsion testing, industrial detonation, and advanced material processing. However, achieving both high energy density and uniform spatial distribution remains a significant challenge due to the inherent Gaussian profile of laser sources and the limitations of conventional beam shaping techniques under high-power conditions, such as low damage thresholds or complex fabrication requirements. This study aims to develop a high-energy laser beam expansion and homogenization system based on a tapered optical waveguide, and to systematically investigate the influence of optical surface roughness on irradiation uniformity from a microstructural perspective, providing a new approach for passive beam homogenization through surface engineering. A 2×2 arrayed laser homogenization system is designed using multiple high-power fiber lasers (1064 nm) combined with a tapered solid fused-silica waveguide and a beam-expanding objective. To quantitatively describe surface roughness at the nanometer scale, the fractal dimension (D) is introduced as a key parameter. Three-dimensional rough surfaces with different fractal characteristics are generated using the Ausloos – Berman function in MATLAB, enabling accurate representation of multi-scale surface features. These surfaces are then imported into the COMSOL Multiphysics geometric optics module to simulate the propagation behavior of Gaussian beams under multiple total internal reflections within the waveguide. The output beam profiles are processed using MATLAB, and the homogenization efficiency (η) is evaluated based on one-dimensional intensity distribution analysis. Additionally, spatial frequency analysis via Fourier transform and phase modulation modeling are conducted to reveal the underlying physical mechanisms of roughness-induced beam modulation and energy redistribution. The results indicate that surface roughness significantly affects beam homogenization through phase modulation and scattering mechanisms. The homogenization efficiency shows a non-monotonic dependence on the fractal dimension. As D increases from 2.1 to 2.6, the uniformity improves progressively due to enhanced multi-path mixing and moderate phase perturbation. The optimal performance is achieved at $D=2.6$, where the homogenization efficiency increases from 83.79% to 95.56%, approaching the theoretical limit of 98.73%. At this condition, the surface exhibits a balanced spatial frequency distribution, enabling effective lateral energy redistribution without introducing excessive random scattering. When D exceeds 2.6, excessive high-frequency components lead to over-randomization of light propagation and reduced uniformity. System-level simulations further demonstrate that the optimized rough surface maintains high performance ($\eta = 92.05\%$) in the full optical system, satisfying practical application requirements for large-area irradiation ($>90\%$). Meanwhile, the corresponding surface roughness (0.1558 nm) remains within the achievable range of ultra-precision polishing processes. This study demonstrates that optical surface roughness is not merely a detrimental factor but can be transformed into an effective design parameter for improving beam homogenization when properly controlled. By introducing fractal dimension as a quantitative descriptor, a clear relationship between surface morphology and beam uniformity is established. The optimal fractal dimension ($D = 2.6$) provides a balance between phase modulation and scattering effects, leading to near-ideal homogenization performance while maintaining system stability. These findings provide theoretical guidance and practical insights for integrating surface microstructure optimization into high-power laser systems, enabling passive and efficient beam homogenization without increasing system complexity. Future work will focus on experimental validation and further investigation of laser-induced damage behavior under different roughness conditions to support real engineering applications.

Key words: high-energy laser; optical waveguide; uniform irradiation; surface roughness; fractal surface

OCIS Codes: 140.3510; 230.7370; 220.2945; 280.6780; 050.1950

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0714006