

# 一种激光功率密度衰减方法的数值模拟及应用

王振宝 冯国斌 杨鹏翎 冯刚 闫燕

(西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要** 研究了一种利用材料反射特性对激光功率密度实现有效衰减的方法。利用经典的 Phong 混合反射模型,对材料表面的反射特性进行了理论分析,给出了在连续激光辐照的情况下,辐射度、观测角和功率之间的函数关系。选取了材料 Phong 混合反射模型的参数,利用 TracePro 软件数值模拟得到了该激光功率密度衰减结构的透射光场三维空间分布及透射率与测试点距离的关系曲线,并与实测结果进行了比较,具有较好的吻合度。研究结果表明,该衰减结构可以有效实现激光功率密度衰减,并可用作激光参数定量测量的一种有效衰减方法。

**关键词** 光学设计;激光功率密度;反射特性;Phong 反射模型;衰减;激光参数

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.022201

## Numerical Simulation and Applications of a Method for Attenuating Laser Power Density

Wang Zhenbao Feng Guobin Yang Pengling Feng Gang Yan Yan

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** A method for attenuating laser power density employing the reflection characteristics of material is studied. By using the classical Phong reflection model, the reflection characteristics of material are theoretically analyzed, and the function describing the relation among power, radiant intensity and observation angle is presented under continuous-wave (CW) laser irradiation. By selecting appropriate parameters of material for the Phong reflection model, the numerical simulation results for the structure for attenuating laser power density are given, such as the three-dimensional (3D) laser beam spatial profile of the structure at the output and the attenuation coefficient at different distance from the output. They are consistent with the experimental results. The research results demonstrate that the structure is suitable for attenuating laser power density and quantitatively measuring laser parameters.

**Key words** optical design; laser power density; reflection characteristic; Phong reflection model; attenuation; laser parameter

**OCIS codes** 220.4840; 240.5770; 290.5880

## 1 引言

在激光参数测量过程中,通常需要对待测的激光功率密度进行定量的衰减<sup>[1~4]</sup>,以满足所选用的测量设备或光电探测器的量程范围。理想的光学衰减方法应该与入射激光的波长、入射角度和偏振态等参数不相关,仅仅对入射激光的幅值进行相应的衰减,并且在一定范围内衰减是线性的。目前最常采用的实现激光功率密度衰减的方式是吸收型滤光片法和高反型滤光片法,但光学衰减片的衰减系数与激光入射角度、激光偏振态等有关,增加了实际应用过程中的复杂性<sup>[5]</sup>。此外,光学衰减片在使用过程中对环境要求较高,限制了其在室外的应用。

从材料的反射特性模型分析出发,通过数值模拟和实验研究相结合的方法,设计了一种能够有效实现激

收稿日期: 2012-10-18; 收到修改稿日期: 2012-10-22; 网络出版日期: 2013-01-04

基金项目: 国防预研基金(22110702,22110707)资助课题

作者简介: 王振宝(1981—),男,硕士,副研究员,主要从事激光技术及光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhenbao\_wang98@163.com

光功率密度衰减的球形腔衰减结构,在较宽的光谱范围内衰减系数与激光波长、偏振态不相关,并且通过改变该衰减结构的参数和选取不同的材料,可以获得不同的衰减系数。此结构可以作为激光参数定量测量的一种有效衰减方法。

## 2 理论分析

在现实中大多数物体表面既不是单纯的漫反射表面,也不是纯粹的镜面,而是既包含漫反射成分又包含镜面反射成分的混合反射面。混合反射面的特性一般用混合反射模型表示。图 1 所示的石墨材料表面即为一个明显的混合反射表面。

目前具有代表性的混合反射模型主要有 Phong 反射模型<sup>[6,7]</sup>、Torrance-Sparrow 模型<sup>[8,9]</sup>、Cook-Torrance 模型和 Nayar 模型。最常用的混合反射的模型是 Phong 于 1975 年提出的,该模型是最简单的混合反射模型,在大多数情况下,Phong 模型与真实的反射模型比较接近,如图 2 所示。

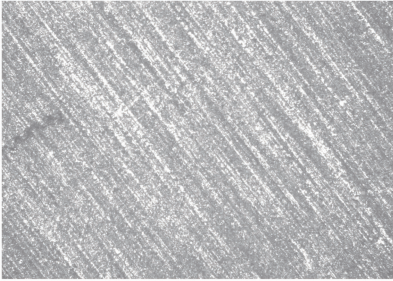


图 1 石墨材料表面微观形貌

Fig. 1 Surface microtopography of graphite

该模型认为物体表面上激光入射点的反射光强是环境光、漫反射光和镜面反射光这 3 个分量的线性组合。其中镜面反射分量可用镜面反射分量与观察方向夹角的余弦的幂函数来表示。在忽略环境光的情况下,Phong 模型用公式可表示为

$$I = I_d + I_m = k_d I_p \cos \alpha + k_m I_p \cos^n \theta, \quad (1)$$

式中  $I$  为观察者接收到总的反射光强,  $I_p$  为入射激光光强,  $I_d$  为光源沿表面法向入射时反射光的光强,  $I_m$  为镜面反射方向上的镜面反射光强,  $\theta$  为镜面反射方向与观察方向的夹角,  $\alpha$  为光源入射角,  $n$  为镜面反射光的会聚指数,其取值范围是  $[1, 2000]$ ,  $k_d$  和  $k_m$  分别为漫反射和镜面反射分量的比例系数,且  $k_d + k_m = 1$ 。

当场景中有多个光源时,最终的累积效果为

$$I = \sum_{i=1}^n I_{pi} (k_d \cos \alpha_i + k_m \cos^n \theta_i). \quad (2)$$

在实际测量中,常在观察方向采用光电探测器测量一定面积上的总辐射度即功率,光路如图 3 所示。探测器实际测量光功率的大小是与观测角有关的,因此需要建立辐射度、观测角和功率之间的函数关系。

假设材料样片表面为  $S_1$ , 面积为  $dA_1$ , 光电探测器测量平面为  $S_2$ , 面积为  $dA_2$ , 假定光源在  $S_1$  处, 其辐射度为  $L_1(S_1, \theta_1, \phi)$ , 其中  $\theta$  为  $S_1 S_2$  与面片  $dA_1$  法线的夹角,  $\phi$  为标明在以光源为坐标原点的坐标空间中的另一夹角。那么从该光源在时间间隔  $dt$  内沿  $\theta$  方向的无限小立体角区域  $d\omega$  发射的能量为

$$dE = L_1(S_1, \theta_1, \phi) \cos \theta_1 dA_1 d\omega dt, \quad (3)$$

式中  $\cos \theta_1 dA_1$  为辐射度乘以透视缩小效应后的面积,  $\cos \theta_1$  为透视缩小因子; 离开  $S_1$  朝  $S_2$  去的辐射度为  $L_1(S_1, \theta_1, \phi)$ ,  $d\omega = \cos \theta_2 dA_2 / r^2$  是  $S_1$  对应于  $S_2$  的立体角(发射到这个立体角范围内的能量到达面  $S_2$ )。

测量过程中  $\phi \gg 0$ ,  $r \gg r_{A1}$  和  $r \gg r_{A2}$ , 因此只考虑  $L(S_1, \theta, \phi)$  与  $\theta$  的关系,  $\theta$  即为观测角。设  $\lambda(\theta) = L(S_1,$

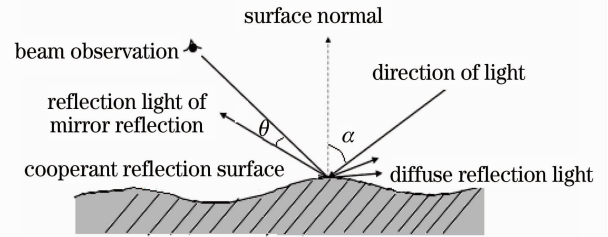


图 2 Phong 混合反射模型

Fig. 2 Cooperant reflection model of Phong

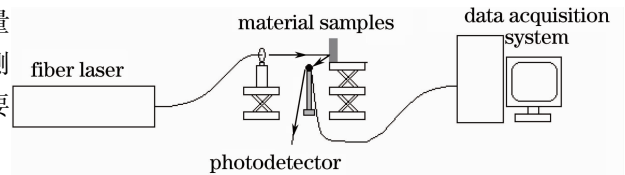


图 3 反射功率测量光路

Fig. 3 Light path for measuring reflection power

$\theta, 0$ )。当光源和受光面的位置确定,且两者均为平面时, $\theta_1, \theta_2$  均为定值,得到受光面上的总功率为

$$dE = A_1 A_2 \lambda (\theta_1) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dt, \quad (4)$$

由于测量过程中传感器的光轴始终都通过光斑的中心,则  $\theta_2$  始终为 0, 因此  $\cos \theta_2 \equiv 1$ 。同时定义  $k = \frac{A_1 A_2}{r^2}$  为比例因子, $\frac{dE}{dt}$  的含义是功率,用  $P$  表示,因此

$$P = k_1 \lambda (\theta_1) \cos \theta_1. \quad (5)$$

(5)式即为辐射度、观测角与功率之间的函数关系式。

### 3 数值模拟及应用

图 4 为该球形腔衰减结构示意图,入射激光通过入射孔进入球形腔,经过球形腔内表面多次反射及吸收,最终由出射孔射出。在整个激光衰减匀化过程中,球形腔内表面的反射特性与衰减结构输出参数(如透射光场分布、透射率和角度特性等)有着直接的关联。

利用 TracePro 软件对球形腔衰减结构的输出参数进行了数值模拟。数值模拟的条件是:球形腔尺寸为  $\Phi 8$  mm, 出入孔直径为 1.5 mm, 球形腔采用的材料为硬铝 LY12, 喷砂氧化表面, 球形腔内表面为镜面反射和漫反射的混合反射表面, 表面反射率为 70% (漫反射和镜面反射分量比例为 4:3); 模拟光源与实际光源波长为 1064 nm 均匀圆形光斑, 其尺寸可以完全覆盖球形腔衰减结构的激光入射孔。图 5 模拟了激光正入射情况下球形腔衰减结构内部的反射情况及输出光斑图像。

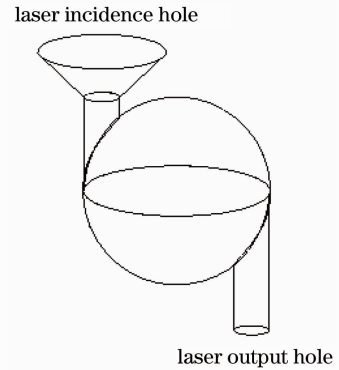


图 4 球形腔衰减结构示意图

Fig. 4 Schematic of spherical-cavity structure for attenuating laser power density

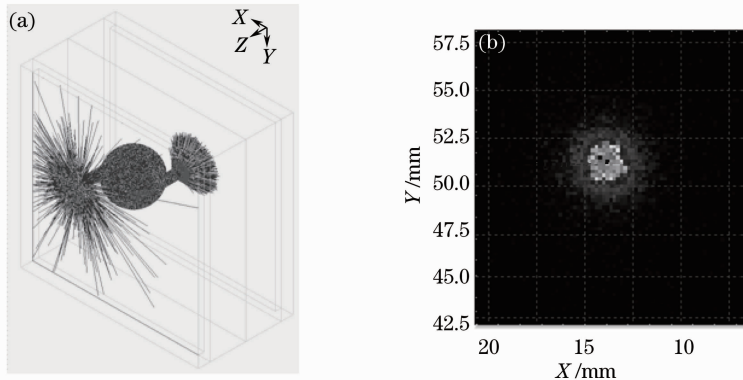


图 5 球形腔衰减结构数值模拟。(a)光线反射情况;(b)光斑图像

Fig. 5 Numerical simulation of spherical-cavity structure for attenuating laser power density. (a) Scheme of laser refraction in spherical-cavity structure; (b) power density distribution

首先数值模拟了激光正入射情况下球形腔衰减结构输出光场的三维分布情况,具体结果如图 6 所示。在实际测量过程中,在衰减结构出光孔处利用直径为 1 mm 的 InGaAs 光伏型探测器进行测量。为了便于与实际测量结果进行对比,模拟计算了在距离球形腔衰减结构激光出射口位置 3 mm 位置处,直径为 1 mm 区域内光功率,空间分辨率为 1 mm,得到了如图 6(a)、(b)中虚线所示的 X、Y 方向光场分布,同时沿着出射口方向模拟计算得到了 Z 方向的光场分布,如图 6(c)虚线所示。

可以看出,球形腔衰减结构输出光场在 X、Y 方向符合高斯分布;在 Z 方向,随着模拟激光功率收集点位置的增大, $\Phi 1$  mm 区域内的光功率急剧下降,并最终趋于平缓,其变化趋势符合指数规律。采用直径为

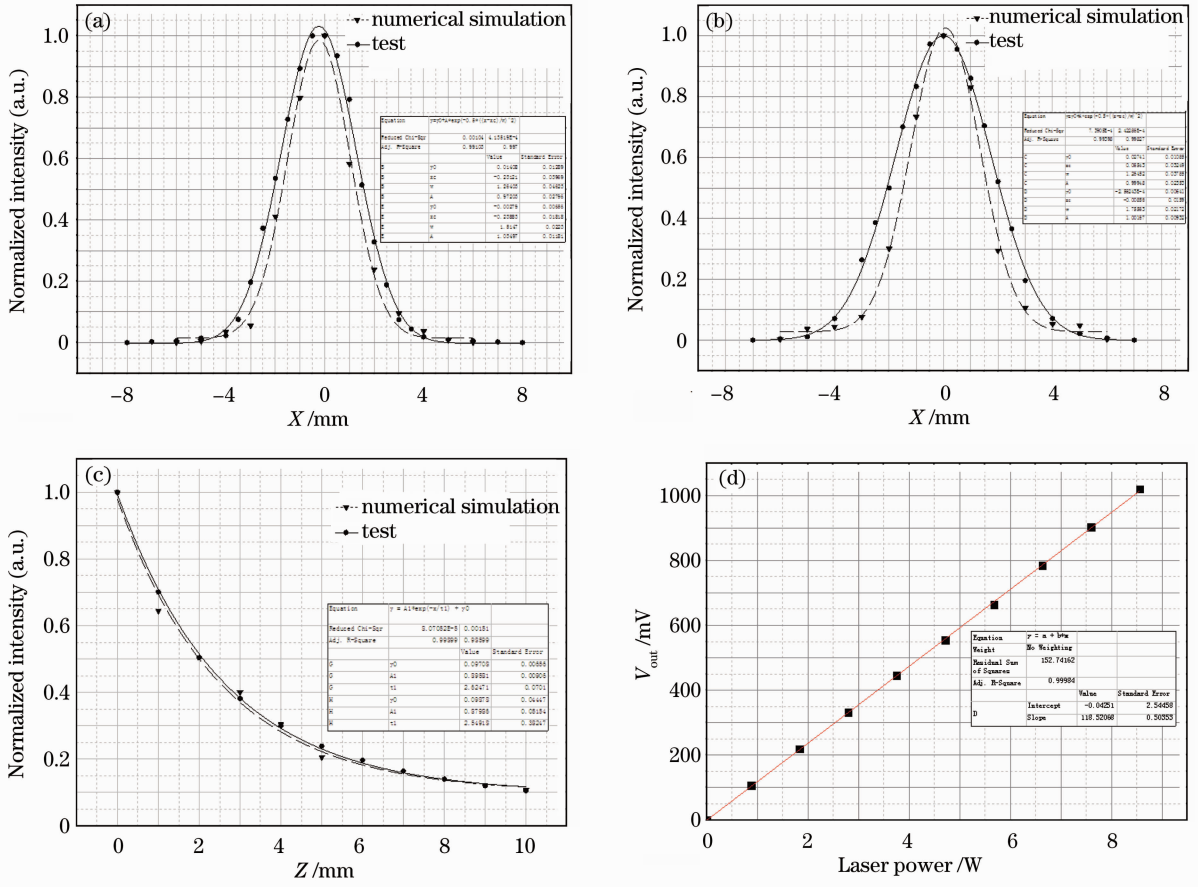


图 6 数值模拟及实际测量结果。(a) X 方向光场分布; (b) Y 方向光场分布; (c) Z 方向光场分布; (d) 线性度测量结果

Fig. 6 Numerical simulation results and experimental results. (a) Laser beam spatial profile at X axis; (b) laser beam spatial profile at Y axis; (c) laser beam spatial profile at Z axis; (d) measurement result of linearity

1 mm 的 InGaAs 光伏型探测器对球形腔衰减结构的输出光场进行了实际测量,得到了如图 6(a)~(c)实线所示的曲线。对比数值模拟的结果与实际测量的结果可以看出,二者吻合较好,说明在模拟计算所选择的球形腔表面反射特性模型是合理的。图 6(d)给出了球形腔衰减结构在不同激光功率入射情况下的输出线性度测量结果。

图 7(a)为测量点沿 Z 轴方向至激光出射口的距离变化时,球形腔衰减结构衰减系数的变化情况。由图中可以看出,随着距离的增大,衰减系数呈指数增加,且数值模拟结果与实际测量结果相吻合。图 7(b)为沿球形腔衰减结构出入孔连线方向,激光入射角度在  $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$  范围内时,透射率角度特性数值模拟结果(图

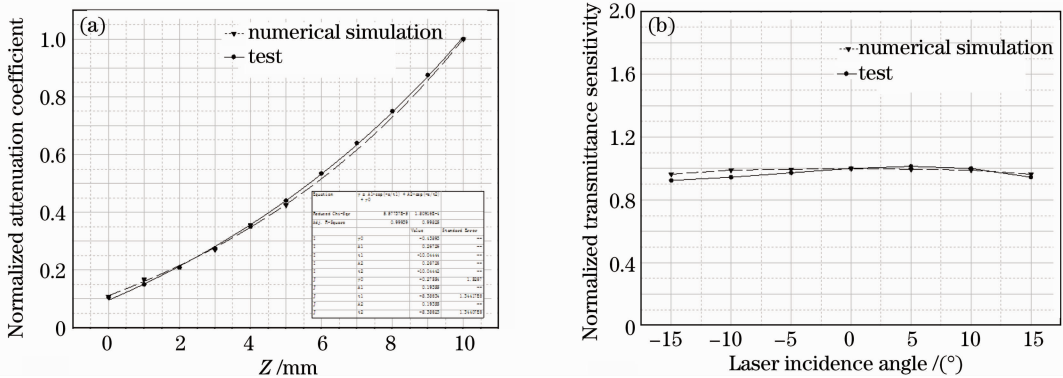


图 7 (a) 衰减系数与距离关系及 (b) 角度特性

Fig. 7 (a) Attenuation coefficient as a function of distance and (b) transmittance sensitivity to angle of incident laser

中虚线)和实际测量结果(图中实线)之比较。球形腔衰减结构在出入孔连线方向并非完全对称,由图中可以看出透射率在正负角度方向上并非完全对称,但整体上该衰减结构在 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围内具有较好的角度特性,其透射率起伏在5%以内,并且数值模拟结果与实际测量结果十分吻合。由于氧化铝在可见光至中红外范围内反射率变化不大,因此该衰减结构在较宽的光谱范围内衰减系数与激光波长不相关。

## 4 结 论

在实现激光功率密度衰减的同时,消除衰减单元对入射激光波长、入射角度及偏振态的敏感性,一直以来都是激光参数测量中的理想衰减方式。本文从材料反射特性的理论分析出发,设计了一种能够有效实现激光功率密度衰减的球形腔衰减结构,在较宽的光谱范围内衰减系数与激光波长不相关。建立了描述球形腔衰减结构混合反射特性的数值模拟模型,得到了输出光场的三维分布曲线。同时数值模拟了球形腔衰减结构衰减系数与测量点距激光出射口距离的关系以及透射率在 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围内的角度敏感性。将数值模拟结果均与实验测量结果进行了比较,二者吻合较好。

## 参 考 文 献

- 1 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004  
苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 2 Wei Jifeng, Zhang Kai, Zhou Shan *et al.*. Calibration of high energy laser calorimeter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1798~1802  
魏继锋, 张凯, 周山等. 高能激光能量计溯源问题研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(11): 1798~1802
- 3 Chen Shaowu, Wang Qunshu, Shao Bibo *et al.*. Optical attenuation design for high energy laser beam on-line diagnostic system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1645~1649  
陈绍武, 王群书, 邵碧波等. 高能激光束在线测量系统的光强衰减设计[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(11): 1645~1649
- 4 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702008  
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝等. 中红外激光光斑探测阵列[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702008
- 5 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao *et al.*. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 521~525  
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 521~525
- 6 Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901  
吴振森, 谢东辉, 谢品华等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 897~901
- 7 B. T. Phong. Illumination for computer generated pictures [J]. *Communications of the ACM*, 1975, **18**(6): 311~317
- 8 Chen Yudan, Zhang Weian, Chen Yucheng *et al.*. Laser scattering characteristic of several object samples [J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(6): 1251~1256  
陈玉丹, 张维安, 陈玉成等. 多类目标样片激光散射特性研究[J]. 应用光学, 2011, **32**(6): 1251~1256
- 9 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(3): 2097~2103  
袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. 物理学报, 2010, **59**(3): 2097~2103