

光学学报

高功率密度激光宽角度阵列探测技术研究

管雯璐^{1,2,3}, 谭逢富^{1,3*}, 侯再红^{1,2,3}, 罗杰^{1,2,3}, 秦来安^{1,3}, 何枫^{1,3}, 张巳龙^{1,3}, 吴毅^{1,2,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 为了提高探测器阵列靶的到靶激光功率密度测量范围及入射角度宽容性,从防护取样衰减结构出发,基于全反射与透射散射理论设计镀金铜基面板、光纤取样和散射片所组成的防护取样衰减结构。同时,将所设计的结构应用于探测器阵列靶系统。通过激光辐照靶面热分析、光线追迹仿真及激光逐点扫描实验,对系统抗激光损伤能力、角度特性及通道响应一致性进行分析测试。结果表明,该防护取样衰减结构可以承受高功率密度激光的长时间辐照;在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 的入射角度范围内,实测角度特性系数经余弦校正后相对于正入射偏差小于4%;各通道单元间的响应不一致性标准差均小于2%。

关键词 激光光学; 探测器阵列靶; 高功率密度; 取样衰减; 角度宽容性

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0214002

Wide Angle Array Detection Technology for High Power Density Laser

Guan Wenlu^{1,2,3}, Tan Fengfu^{1,3*}, Hou Zaihong^{1,2,3}, Luo Jie^{1,2,3}, Qin Laian^{1,3},
He Feng^{1,3}, Zhang Silong^{1,3}, Wu Yi^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract In order to improve the detector array target laser power density measurement range and incident angle tolerance, starting from the protective sampling attenuation structure, based on the theory of total reflection and transmission scattering, we design a protective sampling structure composed by gold-plated copper base panel, fiber optic sampling, and scattering attenuation. At the same time, the designed structure is applied to detector array target system. Through thermal analysis of laser irradiation target, ray tracing simulation, and laser point-by-point scanning experiment, the anti-laser damage ability, angle characteristics, and channel response consistency of the system are analyzed and tested. The results show that the protective sampling attenuation structure can withstand long time irradiation of high power density laser. When the incidence angle ranges from 0° to 30° , the deviation of measured angle characteristic coefficient with respect to normal incidence is less than 4% after cosine correction. The standard deviation of response inconsistency among channel units all less than 2%.

Key words laser optics; detector array target; high power density; sampling attenuation; angular tolerance

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-07-15; 录用日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

通信作者: *tanfengfu@163.com

1 引言

探测器阵列靶是测量激光参数的重要设备之一,通过阵列探测单元^[1]对入射激光束进行空间取样,可以将连续分布的激光光斑转化为离散点阵分布进行测量,从而得到入射激光强度时空分布、光斑质心、功率密度和环围能量^[2]等参数,这些参数能够评价激光大气传输特性及激光系统发射特性。实际应用中,阵列靶多安装在空中运动的载体上,载靶平台的运动轨迹和姿态等变化会导致激光束不能正入射,而实际到靶的激光束入射角度的改变会导致阵列探测器的响应强度发生变化,即引入了激光参数测量的不确定度^[3]。针对探测单元的响应值受入射角度影响产生测量偏差的问题,阵列靶取样衰减结构需具有一定的入射角度宽容特性,同时为了满足高功率密度激光参数的测量需求,取样衰减结构也需具备较好的抗激光损伤防护能力。

针对高功率密度激光参数的测量,杨鹏翎等^[4]设计了由锥形取样孔与光学衰减片组成的取样衰减结构,通过镀多层高反介质膜的方式来增强系统的抗激光损伤能力,镀膜取样衰减方式存在的不足主要是工作光谱范围窄且对激光偏振态及入射角度都较为敏感。Pang 等^[5]设计了由漫反射铜板、漫透射材料、传热铜板和石墨腔组成的漫散射取样衰减单元,该结构由于选用的漫透射材料本身的抗激光损伤能力有限,以及材料安装前孔翻边的薄弱环节,在更高功率密度激光参数的测量中,面板所承受的热应力易造成结构破坏,通过增长衰减腔达到所需的衰减倍率会导致系统整体结构无法实现小型化和轻量化。陈欣等^[6]针对入射光方向严重影响测量精度以及光路复杂不宜小型化和模块化等问题,提出了一种基于积分球分光的高功率激光多参数测量技术,但漫反射积分球取样衰减方式受到球腔结构的限制,无法实现更高空间分辨力的测量且角度适用范围有限。此外,随着阵列探测技术在激光参数测量领域的广泛应用,其对探测器的响应度、响应速率及光谱响应范围等需求逐渐提高。近年来,研究人员利用等离子体纳米结构、Au-Si 纳米结^[7]、有机-无机杂化纳米线^[8]和过渡金属硫化物^[9]等方式,有望实现探测器件的小型化、高集成、高光电转换效率、快速响应和宽光谱等使用需求。

本文主要从阵列探测系统的取样衰减结构设计出发,针对高功率密度激光参数的宽角度测量需求,基于全反射与透射散射理论设计了由镀金铜基面

板、取样光纤和散射片组成的防护取样衰减结构,可将其应用于探测器阵列靶测量系统。通过激光逐点扫描法对系统的响应特性进行测试实验,结果表明探测通道具有较高的响应一致性,在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的角度范围内角度特性基本符合入射角余弦规律。

2 设计方案

2.1 取样面板热分析

探测器阵列靶用于高功率密度激光参数的测量,靶面的抗损伤情况需要在设计初阶考量。阵列靶的取样面板经激光辐照后,在其受照面及厚度方向会发生瞬态热传导,根据经典傅里叶热传导方程^[10]可以得到面板的瞬态温度场分布,表达式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = (1-R)\beta I(x, y, t) \exp(-\beta z) + Q, \quad (1)$$

式中: ρ 、 c 和 k 分别为面板材料的密度、比热容和热导率; T 为温度; t 为时间; x 、 y 和 z 为三维方向; R 为面板对入射激光的反射率; β 为面板对激光的能量耦合系数; $I(x, y, t)$ 为入射激光强度时空分布; Q 为其他热量。根据靶板的使用条件,将已知的材料参数代入(1)式,得出面板内部温度场分布,实际的设计模拟常用有限元分析软件进行热分析。对于高功率密度的激光长时间辐照热分析,主要是在热载荷下产生温度、形变量与应力损坏^[11],对设计的结构进行热力学仿真,具体过程如下。首先根据靶板设计尺寸建立几何模型,设置材料属性,对模型进行网格划分,热加载方式依据系统的使用需求施加功率及时间,得到温度场分布;然后将温度载荷作为输入应力条件,添加约束得出靶面等效形变和热应力等参数;最后将所选材料的许用属性与仿真结果进行对比,分析温度、形变与应力是否满足使用条件。

探测器阵列靶取样面板常用的材料有铝合金和紫铜,运用 Ansys 仿真软件对尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的靶面以及不同厚度的铝板和铜板进行热力学仿真。模拟光斑分布的过程,在面板中心直径为 100 mm 的圆内,施加 3532.5 W 的功率,97% 的表面反射率(吸收率为 3%),得到平均功率密度为 1500 W/cm^2 ,施加时间为 20 s ,添加的约束为面板四角单面位移约束。相同热载荷下铝板和铜板的靶面中心温度、形变量和热应力与板厚的关系如图 1 所示,可以得出相同尺寸、热载荷情况下,铜板的靶面温度、形变量和热应力均小于铝板,考虑到取样面板的厚度对取样孔传光设计的影响,面板不宜太厚,

又考虑到铜的温度损伤阈值高于铝,所以对于高功率密度激光参数的测量,选取紫铜作为取样面板材料,厚度设计为 10 mm。已知铜的许用应力为 120 MPa,

对大小为 300 mm×300 mm×10 mm 的面板进行不同辐照时间的仿真,得出入射功率密度为 1500 W/cm² 的激光辐照 40 s 不会损坏面板结构。

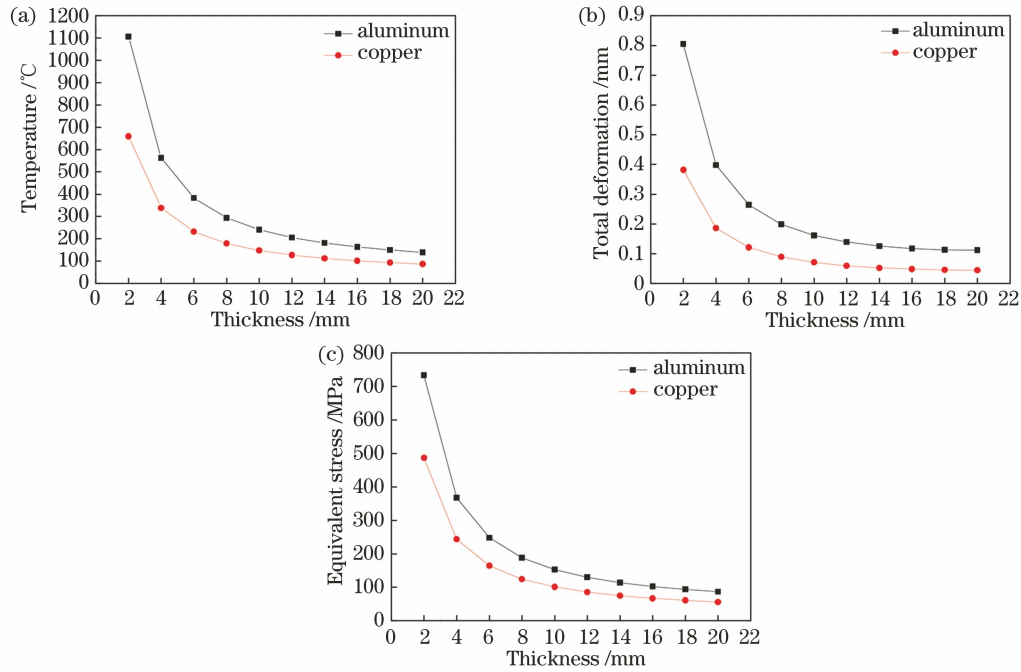


图 1 温度、形变量与热应力随面板厚度的变化曲线。(a)温度;(b)形变量;(c)热应力

Fig. 1 Curves of temperature, form variable, and thermal stress with panel thickness. (a) Temperature; (b) form variable; (c) thermal stress

2.2 取样单元

对于一定厚度的取样面板,为了满足大视场角的测量,多采用锥形小孔进行取样^[4,12],孔型设计出现的薄壁结构会导致面板抗激光损伤的能力下降,同时激光有角度入射会导致取样孔产生侧壁吸收损耗,也会引入较大的测量误差。假设一条有角度的入射光线在取样孔内反射次数为 n ,孔内壁的反射率为 r ,吸收率为 $1-r$,则该光线的功率损耗 ΔP_n 为

$$\Delta P_n = (1-r) \cdot \frac{1-(1-r)^n}{r} \quad (2)$$

由(2)式可知,当激光有角度入射使取样孔产生侧壁吸收损耗时,内壁的反射率 r 越高,反射次数 n 越少,功率损耗越小。

为了减小侧壁吸收损耗所引入的取样误差,基于全反射原理,光线由折射率为 n_1' 的光密介质射入折射率为 n_2' 的光疏介质,当入射角 I 大于临界角 I_m 时,入射光将发生全反射,表达式为

$$\sin I \geq \sin I_m = \frac{n_2'}{n_1'} \quad (3)$$

采用依据全反射原理制成的光纤进行激光光束取样^[13],对于不弯曲的等径光纤,假定光纤外环境介质折射率为 n_0 ,纤芯折射率为 n_1 ,包层折射率为 n_2 ,光纤端面入射角为 U ,折射角为 U' ,纤芯、包层分界面入射角均为 I ,则光线在光纤子午面内的传播路径如图 2 所示。

入射角 U 与折射角 U' 满足

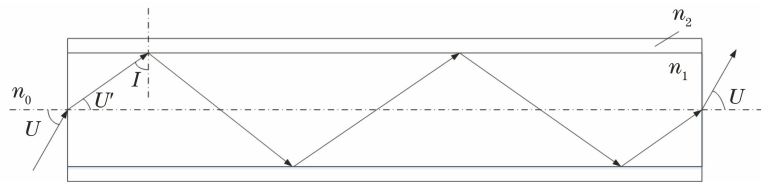


图 2 光纤的全反射传光路径

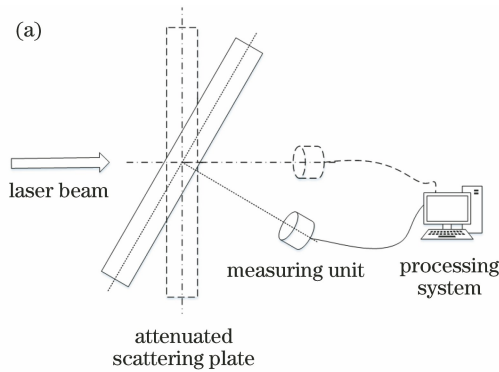
Fig. 2 Total reflection path of optical fiber

$$\sin U = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sin U' = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - I\right) = \frac{n_1}{n_0} \cdot \cos I = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 I} \quad (4)$$

结合全反射定律可得

$$\sin U \leq \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 I_m} = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (5)$$

当光纤端面上光线的最大入射角 U_m 满足 (5) 式时, 入射光线在光纤内将以全反射方式通过。定义光纤数值孔径 $NA = n_0 \sin U_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, 则位于空气中的光纤 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, NA 值是根据系统测量角度的需求决定的。当斜入射光线在光纤内全反射传播时, 出射角大小不变, 方向由反射状态决定。对于长径比满足一定系数的等径光纤, 平行光斜入射到光纤端面, 出射光会变成锥面平行光束^[14]。



假设出射距离为 L' , 光纤直径为 d , 入射角为 θ (小于临界角), 则最大出射半径为 $L' \cdot \tan \theta + d/2$ 。

2.3 衰减单元

由于探测单元的动态响应范围有限, 需要衰减单元对取样激光进行进一步衰减。当激光正入射时, 其直接通过光纤入射到衰减单元, 所选用的衰减片需具备耐受激光的能力; 激光有角度入射光纤, 在满足全反射的情况下, 出射光具有发散特性, 衰减单元要求具有对不同方向入射光的角度宽容性。本系统采用的是耐受高功率密度激光且漫散射特性较好的散射片, 在 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 的波长范围内, 透过率变化范围为 $10\% \sim 20\%$ 。漫散射特性表现为光束有角度入射材料表面, 光束被材料全部接收, 同一出射立体角的光强度基本不变, 所选材料的角度特性测试方法与结果如图 3 所示, 可以看到在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的入射范围内, 相对强度系数的标准偏差约为 1.28% , 可见材料的角度特性良好。

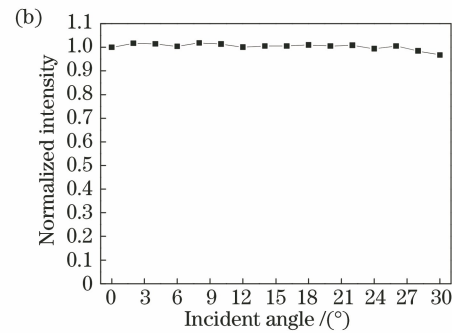


图 3 衰减材料的角度特性测试。(a) 测试方法; (b) 测试结果

Fig. 3 Test of angular properties of attenuating materials. (a) Test method; (b) test result

材料对入射光的透射散射特性可由双向透射分布函数(BTDF)表示, 定义一束光以 (θ_i, φ_i) 的要求入射到目标材料表面, 以 (θ_s, φ_s) 的要求出射, 其中 θ 为角度, φ 为相位。出射辐射亮度 dL_T 与入射辐射照度 dE_i 的比值^[15] 计算公式为

$$f_T(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_T(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (6)$$

式中: f_T 表示 BTDF 函数。

对于均匀光源正出射, 可以用入射功率 P_i 与散射功率 P 表示 f_T ^[16], 表达式为

$$f_T = \frac{\partial P}{\partial \Omega \cdot P_i} \quad (7)$$

式中: Ω 表示立体角。一定立体角散射功率 P_s 为

$$P_s = \int \frac{\partial P}{\partial \Omega} d\Omega = \int f_T P_i d\Omega \quad (8)$$

其中

$$d\Omega = \frac{ds}{L^2} \quad (9)$$

式中: ds 表示探测元面; L 为散射距离。对于均匀光源, 设入射面积为 S , 则到探测面的功率密度衰减倍率 k 为

$$k = \frac{P_i/S}{P_s/ds} = \frac{L^2}{S \cdot f_T} \quad (10)$$

对于理想漫散射, f_T 为常量, 所以其衰减倍率可以通过选取不同透过率的散射衰减材料, 以及调节受照面积和散射距离的方式, 对到探测器感光面的功率密度衰减倍率进行设计。

2.4 防护取样衰减结构设计

探测器阵列靶的单通道结构如图 4 所示。防护取样单元为表面镀金的铜基面板和取样光纤; 衰减单

元为角度响应特性良好的散射片;在消光通道孔内加工消光螺纹并进行喷砂和发黑处理,实现对透过散射

片杂散光的吸收,同时起到光阑的作用,防止各个通道间的杂散光串扰,提高探测单元的测量精度。

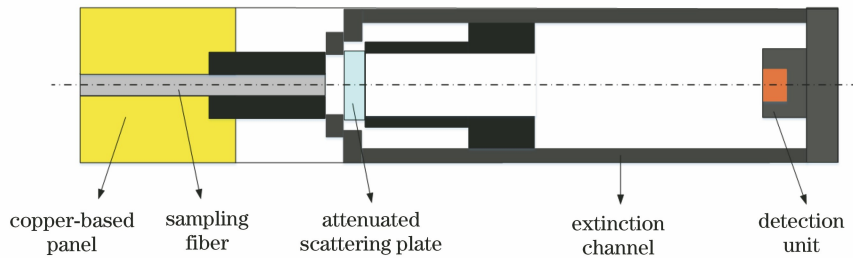


图 4 探测器阵列靶单通道结构示意图

Fig. 4 Schematic of single channel structure of detector array target

3 数值模拟

实际使用的取样光纤是短直等径的光纤棒,它的出射光不一定是多次反射的理想圆锥面,通过仿真模拟分析可以进一步对防护取样衰减结构进行参数设定。采用基于蒙特卡洛算法进行光线追迹的 TracePro 仿真软件对取样光纤及衰减散射片进行数值模拟,依据热仿真结果得出取样面板的设计厚度进而确定光纤长度,根据取样光通量设计通光孔径大小。建立仿真模型,设计选用光纤的 $NA = 0.55$,对应临界角约为 33° ,直径为 0.8 mm ,长度为 16 mm 。依据理论分析,光纤末端出射光的最大半径为 $L' \cdot \tan\theta + 0.4$,用能接收所有出射光的平面在不同距离、不同入射角度下测量光斑尺寸,接收面上最大出射半径的仿真值与计算值基本一致。

设计光纤末端出射光可全接收的散射片,保证功率传输不损耗,散射材料尺寸要大于最大出射半径。利用 TracePro 中的 AB_g 散射模型^[17]对衰减散射材料的透射散射光分布特性进行建模,散射角度参数 g 设为 0 ,即为与入射角度无关的理想漫散射。设置光源为均匀面光源,直径为 1 mm ,光纤入射端设置全吸收挡板,挡板通光孔径为 0.8 mm ,以光纤入射端面中心为圆心,转动面光源以不同角度入射。光纤末端出射光经透射散射后,在距离衰减散射片一定距离处放置与实际探测器感光面大小相同且垂直于正入射光轴的探测面,统计取样衰减后到达探测面的光通量,仿真模型及结果如图 5 所示,结果表明在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的入射角内,所设计的取样衰减结构的角特性基本符合入射角余弦规律,经余弦系数校正后,入射角与正入射的偏差在 2% 以内。

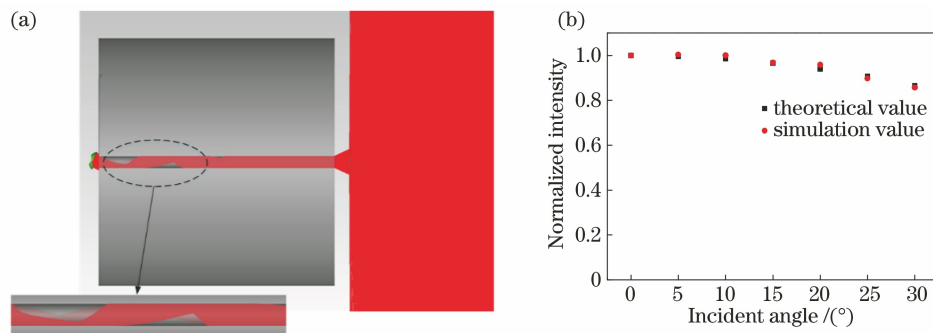


图 5 防护取样衰减结构的角特性仿真。(a) 仿真模型光线追迹;(b) 角特性仿真结果

Fig. 5 Simulation of angle characteristics of protective sampling attenuation structure. (a) Ray tracing of simulation model; (b) simulation results of angle characteristics

4 测试实验

将设计的镀金铜基面板、光纤取样和散射片所组成的防护取样衰减结构用于探测器阵列靶系统,由于阵列单元数目较多,采用激光逐点扫描的测试

方法^[18]对防护取样衰减通道进行角度响应特性测试。基于激光逐点扫描法的角特性测试示意图如图 6 所示,波长为 1064 nm 的激光器输出光依次垂直经过准直扩束器、小孔光阑和取样衰减阵列,由数据处理系统输出探测响应值。

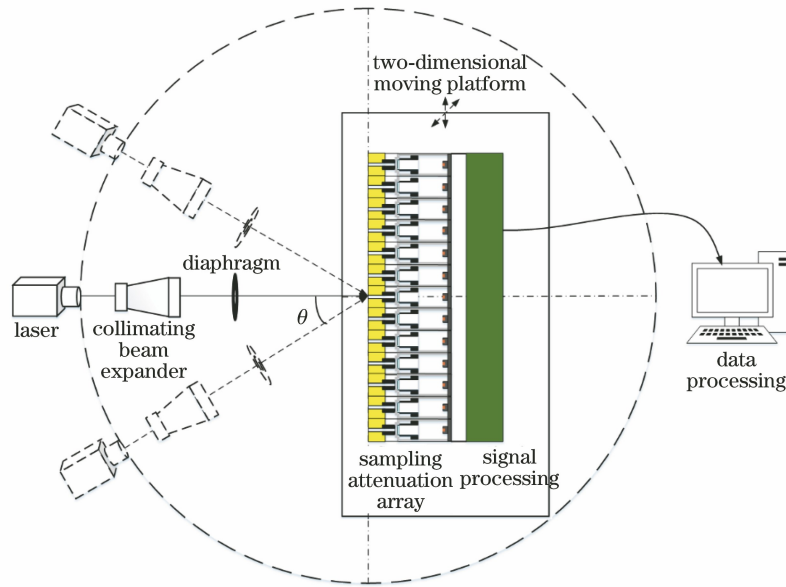


图 6 基于激光逐点扫描法的角度特性测试示意图

Fig. 6 Schematic of angle characteristic test based on laser point-by-point scanning method

激光光源在以取样面板中心竖直方向的投影为圆心、以一定测量距离为半径的圆轨迹上转动,阵列靶安装在可以沿垂直于激光正入射光轴的水平方向及竖直方向移动的二维移动载台上,在保证激光入射位置不变的情况下,改变激光入射角度,对每个取样探测单元进行逐点扫描,获取激光在不同入射角度下的探测器响应值。由于逐点扫描有一定的时间周期,所以要求测量系统的激光光源出光稳定,可以在测试装置中增加激光监测单元,以确保测量过程的准确性。为了降低安装对准等操作所引起的测量不确定度,对测试光源进行光束整形可以获得一个近似平顶光束,能够提升探测器响应输出值的准确性。对于探测器阵列靶的角度特性测试,单个探测通道的角度特性可以用入射角度相对强度系数表示,其计算公式为

$$R_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{I_0}, \quad (11)$$

式中: R_{θ} 表示光源入射角为 θ 的测量强度值 I_{θ} 与 0° 正入射的测量强度值 I_0 的比值,即单个探测通道的入射角度相对强度系数。图 7 为激光逐点扫描各探测通道的实验数据,横坐标为扫描通道样本数,纵坐标为激光在不同入射角度下的 R_{θ} 。从图 7 可以得出,在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的激光入射角度范围内,各探测单元响应的相对强度系数在 90% 以上, 25° 的激光入射角度下相对强度系数在 88% 以上, 30° 的激光入射角度下相对强度系数普遍在 83% 以上。统计在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的入射角度下各单元通道探测响应的标准

偏差,发现其值都在 2% 以下,表明系统具有较高的通道响应一致性。

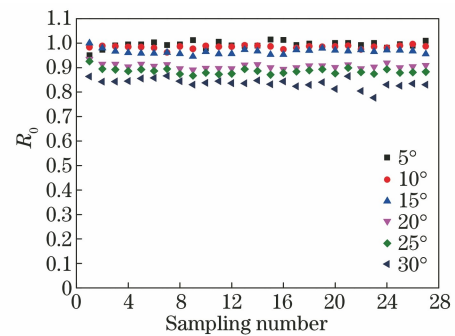


图 7 不同入射角度下各探测单通道角度响应的相对强度系数

Fig. 7 Relative intensity coefficients of angular response of each detection channel at different incident angles

探测器阵列靶系统的角度特性系数由所有阵列取样衰减单通道角度响应的相对强度系数的均值表示,计算公式为

$$k_{\theta} = \frac{1}{n^*} \sum_{i=1}^{n^*} R_{\theta_i}, \quad (12)$$

式中: k_{θ} 表示光源入射角为 θ 的阵列探测系统的角度特性系数; R_{θ_i} 为入射角为 θ 的第 i 个探测单元的相对强度系数; n^* 为总的探测单元数。表 1 为激光逐点扫描阵列系统的角度测量数据与理论余弦数据,可以得出 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的入射角度下,所设计的取样衰减结构的探测响应值经过余弦系数校正后,响应值变化在 4% 以内,表明该取样衰减结构具有良好

表 1 在不同入射角度下探测器阵列靶的角度系数对比

Table 1 Comparison of angle coefficients of detector array targets at different incidence angles

Incident angle / (°)	Theoretical value	Experimental value	Deviation / %
0	1.00000	1.00000	0
5	0.99619	0.99313	0.290
10	0.98481	0.98409	0.073
15	0.96593	0.96570	0.024
20	0.93969	0.90554	3.635
25	0.90631	0.88505	2.345
30	0.86603	0.83675	3.340

的角度宽容性。

采用实验室高功率激光器搭建测试平台,对设计的探测器阵列靶系统进行测试,测得光斑剖面图如图 8(a)所示,到靶激光功率随时间的变化曲线如图 8(b)所示。从图 8 可以看到,该系统至少可以测量的激光功率密度为 3300 W/cm^2 ,到靶功率超过 39 kW 的激光辐照时间为 14 s 。

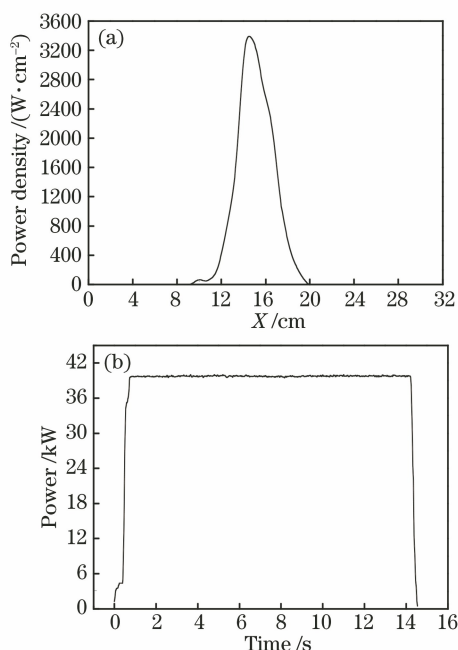


图 8 光斑的测量结果。(a)光斑剖面图;
(b)功率-时间曲线

Fig. 8 Light spot measurement results.
(a) Spot profile; (b) power-time curve

5 结 论

针对高功率密度激光宽角度阵列探测技术的研究,基于全反射与透射散射理论设计了镀金铜基板、光纤取样和散射片所组成的防护取样衰减结构,

结合热力学与光学设计仿真对设计的探测器阵列靶中通道的响应特性进行测试实验。结果表明,所设计的阵列靶防护取样衰减结构可以承受高功率密度激光的长时间辐照,在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的入射角度范围内其角度特性基本符合入射角余弦规律,经余弦校正后系统的探测响应变化值在 4% 以内,各通道的响应不一致性均低于 2% 。本文设计的防护取样衰减结构对高功率密度激光宽角度阵列的探测具有重要意义与工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Xie Y J, Ji Y F, et al. Compound detector array for measuring intensity distribution of large caliber laser beam[J]. Chinese Optics, 2012, 5(6): 658-662.
王飞, 谢永杰, 戢运峰, 等. 一种测量大面积激光束光强分布的复合阵列[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 658-662.
- [2] Gao W, Wang Y P, Li B. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 61-64.
高卫, 王云萍, 李斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 61-64.
- [3] Gao X Y, He J Z, Xie C L, et al. Laser power measurement uncertainty of array detectors under oblique incidence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1656-1662.
高学燕, 何均章, 谢川林, 等. 阵列探测器对斜入射激光的功率测量不确定度[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1656-1662.
- [4] Yang P L, Feng G B, Wang Z B, et al. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser[J]. Chinese Journal of 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.
- [5] Pang M, Rong J, Zhou S, et al. Array detector for high energy laser based on diffuse transmission sampling [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1): 013105.
- [6] Chen X, Tang S X, Hui H C, et al. High power laser multi-parameter measurement technique based on integrating sphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0804002.
陈欣, 唐顺兴, 惠宏超, 等. 基于积分球的高功率激光多参数测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0804002.
- [7] Wen L, Liang L, Yang X G, et al. Multiband and ultrahigh figure-of-merit nanoplasmonic sensing with

- direct electrical readout in Au-Si nanojunctions [J]. ACS Nano, 2019, 13(6): 6963-6972.
- [8] Yang X G, Liu Y, Lei H X, et al. An organic-inorganic broadband photodetector based on a single polyaniline nanowire doped with quantum dots [J]. Nanoscale, 2016, 8(34): 15529-15537.
- [9] Yang X G, Li B J. Monolayer MoS₂ for nanoscale photonics [J]. Nanophotonics, 2020, 9(7): 1557-1577.
- [10] Wang Z B, Wu Y, Yang P L, et al. Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2061-2065.
王振宝, 吴勇, 杨鹏翎, 等. 强激光辐照铝靶温度分布数值模拟及实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2061-2065.
- [11] Sun S W, Qi N J, Kong Y, et al. Three-dimensional stress fields of laser damaged fused silica [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0101001.
孙劭伟, 齐乃杰, 孔艳, 等. 熔石英玻璃激光损伤的三维应力场研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0101001.
- [12] Feng G B, Yang P L, Wang Z B, et al. Photoelectric-calorimetric compound beam profile detector for near-infrared high energy laser [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1417-1424.
冯国斌, 杨鹏翎, 王振宝, 等. 光电/量热复合式近红外高能激光光斑探测器 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1417-1424.
- [13] Luo J, Qin L A, Hou Z H, et al. Light-transmitting characteristics of optical fiber in laser spot distribution measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214002.
罗杰, 秦来安, 侯再红, 等. 激光光斑分布测量系统中光纤传光特性 [J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214002.
- [14] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 177-183.
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 177-183.
- [15] Sun C M, Yuan Y, Lü Q B. Modeling and verification of space-based optical scattering characteristics of space objects [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1129001.
孙成明, 袁艳, 吕群波. 天基空间目标光学散射特性建模与验证 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1129001.
- [16] Yang P Y, Zhang Z M. Bidirectional reflection of semitransparent polytetrafluoroethylene (PTFE) sheets on a silver film [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 118992.
- [17] Wang P, Yuan P, Tan W Q, et al. Measurement of surface scattering characteristics of black materials in Thomson scattering system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2129002.
王鹏, 袁鹏, 谭伟强, 等. 汤姆孙散射系统中发黑材料的表面散射特性测量 [J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2129002.
- [18] Tan F F, Huang Z G, Zhang S L, et al. Detector array target calibration system based on point-by-point scanning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 0213003.
谭逢富, 黄志刚, 张巳龙, 等. 基于逐点扫描的探测器阵列靶标定系统 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 0213003.