

文章编号 1004-924X(2015)05-1213-08

基于纳米颗粒溶液散射的激光平场系统

王秋实, 杨福桂*, 刘丁泉, 盛伟繁, 李明*

(中国科学院高能物理研究所北京同步辐射装置 X 射线光学与技术实验室, 北京 100049)

摘要: 根据对阵列探测器光电响应误差校正的要求, 基于纳米颗粒溶液漫散射效应建立了能产生高平整度参考光场的激光平场系统。介绍了激光平场装置的结构和工作原理及光学设计中涉及的若干关键技术。使用光纤将激光高效地导入溶液中, 通过优化光纤位置和腔体结构参数, 在保证一定光场均匀度的前提下, 提高系统的光能利用率, 降低界面上的背向散射损耗。基于改进过的蒙特卡洛程序, 数值计算了腔体材料反射率对系统透射率的影响。最后, 利用现有的高反射率聚四氟乙烯材料, 设计了激光平场系统。结果显示, 光纤端口的最优位置取决于腔体反射率, 对于高反射率的腔体材料, 靠近腔体背部的光纤端口可以有效增强前向散射。设计的激光平场系统能够提供的光场均匀度好于 0.3%, 可基本满足长程面形仪等高精度激光测量装置中探测器误差校正的需求。

关键词: 激光平场系统; 纳米颗粒; 溶液; 漫散射; CCD 探测器; 非均匀响应; 校正

中图分类号: O439; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1213

Laser flat-field system based on light scattering in nano-particle solution

WANG Qiu-shi, YANG Fu-gui*, LIU Ding-xiao, SHENG Wei-fan, LI Ming*

(Laboratory of X-ray Optics and Technologies, Beijing Synchrotron Radiation Facility,
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yangfg@ihep.ac.cn; lim@ihep.ac.cn

Abstract: To meet the demand of the high precision correction requirements of an array detector for photo-electronic response errors, a laser flat-field system based on diffuse scattering effect of nanoparticle solution was established to generate a reference light field with a high flatness. The structure and principle of the flat-field system were introduced and some key techniques involved in the design of optical system were also given. An optical fiber was used to deliver the laser into solution efficiently to reduce the backscattering light loss on the interface. By optimizing the fiber's position and structure parameters of the cavity, the utilization of light energy was improved with a stable light field uniformity. Using improved Monte Carlo method, the effect of diffuse reflector cavity on system transmission was studied numerically. Finally, a laser flat field system was established by using Polytetrafluoroethylene (PTFE) materials with high reflectivity. Results show that the optimal position of the fiber depends on the cavity reflectivity. For high reflectance material, the optic port of the fiber near the cavity back can effectively enhance forward scattering. The laser flat field system provides the light field with a nonuniformity better than 0.3%, which basically meets the requirements of precision instruments for detector error correction, such as a long trace profiler.

Key words: laser flat-field system; nano-particle; solution; diffusion; CCD array detector; non-uniform response; correction

收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-02-13.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. Y11139005C)

1 引言

光电耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)等阵列探测器已广泛应用在可见及红外成像及测量系统中。这类探测器普遍存在光电响应不均匀、响应非线性、读出噪声、暗噪声以及与光子噪声等误差,它们制约着光学系统的整体性能。其中,光电响应不均匀问题在高精密测量应用中尤为突出^[1-4]。以检测同步辐射光学镜面的长程面形仪为例^[5-6],Yashchuk 通过线性回归分析指出,系统实现 $0.1 \mu\text{rad RMS}$ (Root Mean Square)的测量精度要求探测器的非均匀光电响应误差低于 $0.5\% \text{ RMS}$ 。类似地,北京同步辐射装置正在研制的新型长程面形仪,则要求探测器误差低于 $0.3\% \text{ RMS}$ 。目前普通的商用探测器很难满足该要求,必须进行高精度的误差校正。

近些年,一些非均匀校正(Non-uniform Correction, NUC)技术得以发展^[7-8]。这些技术主要分为两大类:基于场景的 NUC 和基于参考平场的 NUC。基于场景的 NUC 算法通过对探测场景的信息处理,得到修正后的探测数据。该方法虽然可以解决红外探测器的温度漂移问题,但是要求分析对象能够产生一组相互之间存在运动位移的图像,这对大多数的激光测量是苛刻的;而且其校正精度也不一定满足精密测量的需求。相比之下,基于参考平场的 NUC 技术比较简单,如常用的两点校正法只需采集两个不同辐照强度的光场图像,通过简单计算即可得到每个像素光电响应的增益及偏置。获得分布非常均匀的单色光平场是 NUC 技术的一个关键难题。目前,使用腔体漫反射积分球产生平场是一种常用方法。然而,积分球存在两方面的问题:(1)价格高、体积大,不仅增加了系统研发成本,而且不能满足非均匀光电响应误差为 $0.3\% \text{ RMS}$ 的要求;(2)产品化的积分球常使用卤素灯、氙灯等光源,与长程面形仪等激光测量系统中搭载的单波长激光光谱不匹配。

本文研究了一种基于纳米颗粒散射获得激光平场系统的方法。由于激光光源的高相关性^[9-10]和溶液的复散射-吸收效应,较长的散射路径虽然削弱了激光散斑,提高了光场局域均匀度,但系统光能效率会因吸收而降低^[11]。本文系统地介绍

了系统内光散射行为的仿真计算,反射腔体的优化设计,纳米溶液的选择依据以及漫散射场的表征和测量。

2 激光平场系统的构成及其工作原理

2.1 激光平场系统的构成

图 1 为激光平场系统的原理图。它主要由激光器系统、透镜、光纤、散射腔体、纳米颗粒溶液等组成。激光器系统由激光器、温度和电流控制器构成,输出功率稳定的 633 nm 的激光。激光束经过透镜聚焦耦合到光纤中。光纤穿过漫反射腔体底部的小孔将光束导至漫反射腔体内部,腔体内部充满了一定浓度的纳米颗粒溶液。光子经过纳米溶液的复散射后出射,并经过一定传播距离后,在 XOZ 平面形成均匀光场。高反射率的腔体材料使更多的光子通过透射窗透射,提高了系统的传输效率。由于本系统中的激光散斑完全依赖于纳米颗粒布朗运动的复散射抑制,因此导光光纤既可以为单模,也可以是多模。

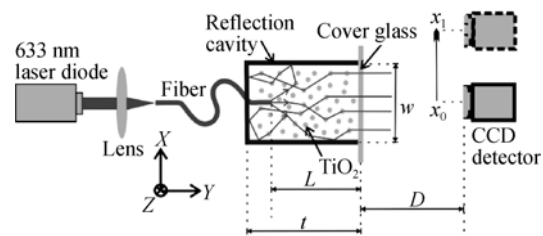


图 1 激光平场系统原理图

Fig. 1 Block diagram of uniform laser light field system

在纳米颗粒溶液中,纳米颗粒做随机的布朗运动,经过多次散射后的光子的行为可以用随机行走描述。对于无限大边界的平板模型,根据扩散光谱(DWS)理论^[11],透射光场中退相关时间是:

$$\tau_d = \tau_0 (l^*/L)^2, \quad (1)$$

其中: l^* 是透射光的透射平均自由程; L 是散射体厚度,对应本系统中光纤输出端到出射窗的深度; τ_0 是漫散射时间。为了降低散斑对比度 $C = 1/\sqrt{E/\tau_d}$, l^*/L 必须足够小,这里 E 是探测器的测量时间。

除了局部散斑,散射激光光场的均匀度还要求

在一定空间范围内光场整体分布的变化差异较小。不难得出,光场的整体变化与窗口出射光的角分布 $f(\theta)$ 、出射窗大小 W 及校正距离 D 有关。较远的距离 D 虽可以提高光场的均匀性,但是光照度会显著下降。对于大满井容量的探测器,为了满足信号饱和状态的校正,必须优化校正距离 D 。

3 Monte Carlo 数值仿真

Monte Carlo 数值仿真^[12]是研究光子在漫散射溶液内部传输及透射行为的有效途径。光学系统的设计需要了解漫反射腔和溶液对光子传输行为的影响,包括吸收效应和散射效应。本文通过 Monte Carlo 数值仿真,主要讨论所设计腔体结构中溶液的透射自由程及漫反射腔体的反射率两个关键因素。

3.1 漫反射腔体反射率

漫反射腔体的反射率是影响系统性能的关键因素。腔体侧壁将光子约束在出射窗范围内出射,腔体后壁反射背向散射的光子,分别提高光场的均匀度和光透过率。由于真实反射材料的反射率小于1,光子与腔体相互作用产生的光能损耗成为限制系统性能的重要因素。

图2是模拟不同反射率下,系统透射率 T 随着光源位置 $t-L$ 距离的变化曲线。为了研究溶液及后壁吸收的影响,这里假设腔体侧壁为全反射。在整个计算中,光源至出射窗的距离 $L=5\text{ mm}$ 为定值,以保证相同的退相关特征。溶液的平均透射自由程 $l^*=323\text{ }\mu\text{m}$ 。可以得出:在低反射率材料下,系统透射率随着光源远离反射面后壁而升高;而在高反射率材料下,透射率的变化趋势正好相反。这是因为低反射率壁面的吸收效应比较强,与壁面相互作用的光子数较少,可以增强透射;而高反射率的壁面光子转向作用占优,使得更多光子前向透射。由于溶液的吸收效应,随着距离 $t-L$ 的增加,各个曲线最终趋于一致(即忽略反射壁面的影响)。为了验证该结论,这里通过实验测试了铝反射镜($R=0.90$)、银反射镜($R=0.94$)和聚四氟乙烯板($R=0.97$)作为反射体的效果。溶液的透射自由程大致与图2的相同。从图3的测试曲线可以看出,3种曲线具有明显不同的变化趋势,该现象与数值计算结果一致。

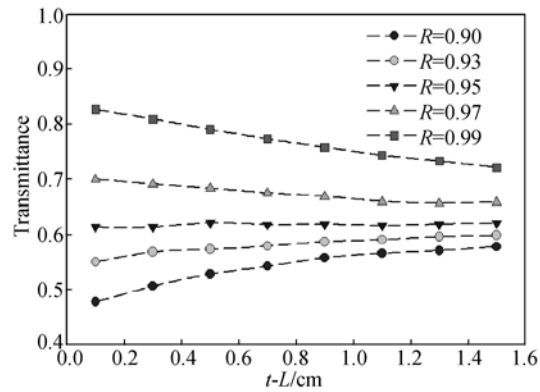


图2 系统透射率随光源位置的变化曲线

Fig. 2 Transmittance curves caused by light source position

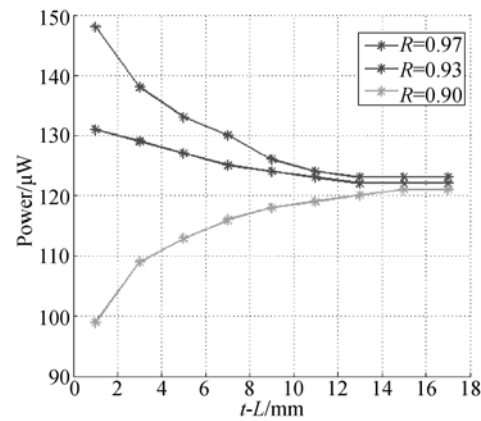


图3 实测得到的透射光场随光源位置的变化曲线

Fig. 3 Measured transmitted light distribution caused by light source position

类似地,腔体侧壁的吸收也影响着腔体宽度的选择。图4给出了透射率 T 、腔体吸收和溶液吸收随腔体宽度 W 的变化曲线,并数值计算了4种腔体反射率。这里设置光源远离后壁,因此可以忽略后壁吸收的影响。计算结果显示:理想反射腔体($R=1$)透射率与无限平板模型结果一致,透射率不受腔体宽度的影响;而对于低反射率材料,更宽的漫反射腔体可以有效减少光子在反射界面上的损耗,当腔体足够宽时,系统透射率几乎不再受腔体反射率的影响。然而,随着出射窗宽度的增加,光场的均匀性将不可避免地降低。可见,腔体宽度应在保证一定光场均匀性的前提下足够宽。而当这种方案执行比较困难时,减少系统的透射自由程变得尤为重要。

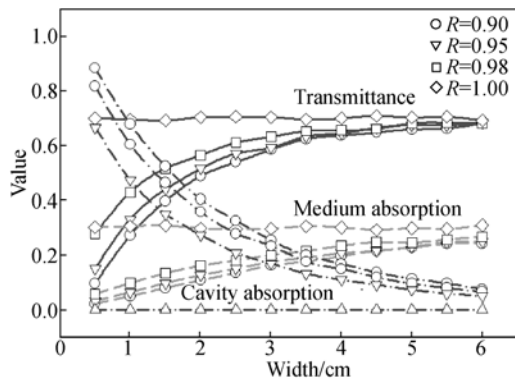


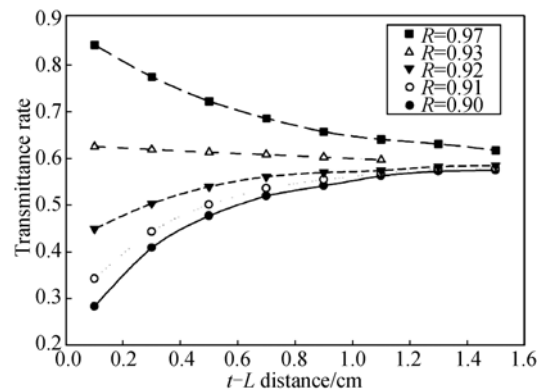
图 4 透射率(实线)、腔体吸收率(虚线)和溶液吸收率(点虚线)随腔体宽度的变化曲线

Fig. 4 Variations of transmittance (solid line), cavity absorption (dash line) and medium absorption (dot-dash line) with cavity widths

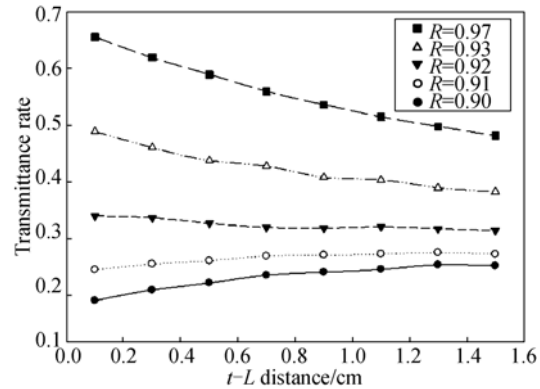
总之,腔体内壁材料的反射特性影响着内部光源位置和腔体结构的设计。从物理图像上的光子过程来理解,影响光子传播特性的透射自由程也必须优化。

3.2 透射自由程 l^* 和光纤深度 L

本文描述的激光散斑问题中,透射光的透射平均自由程 l^* 和光纤深度 L 共同决定着散斑水平。对于一定的 l^*/L ,透射自由程 l^* 或者光纤深度 L 的变化可能影响到系统透射率 T 的变化。图 5 描述了当 (l^*, L) 分别取两个典型数值 ($50 \mu\text{m}, 5 \text{mm}$) 和 ($100 \mu\text{m}, 10 \text{mm}$) 时系统的透射率曲线。整体来看,透射率 T 对腔体反射率 R 的依赖随着 (l^*, L) 的变化而变化。图 5(b)中,反射率较低($R=0.93$)的腔体也可通过减小光源与后壁距离的方法增强系统透射。其次,随着光源远离后壁,透射率趋于稳定。图 5(a)中,较小透射自由程 $(l^*, L) = (50 \mu\text{m}, 5 \text{mm})$ 对应的稳定值差异比较大透射自由程 $(l^*, L) = (100 \mu\text{m}, 10 \text{mm})$ 更小,说明在相同的 l^*/L 条件下,较小透射自由程的溶液吸收和腔体吸收所引起的光能损耗更低。结合本文 3.1 节的分析可以得出:具有较小透射自由程的溶液有利于增强系统的透射率;对于给定的透射自由程 l^* 和腔体反射率 R ,需要数值优化光源位置 L 。



(a) $(l^*, L) = (50 \mu\text{m}, 5 \text{mm})$



(b) $(l^*, L) = (100 \mu\text{m}, 10 \text{mm})$

图 5 不同自由程下透射率随光源位置的变化曲线(比值 l^*/L 相同)

Fig. 5 Transmittance curves caused by light source position for same l^*/L

4 纳米颗粒溶液

4.1 粒径和材料

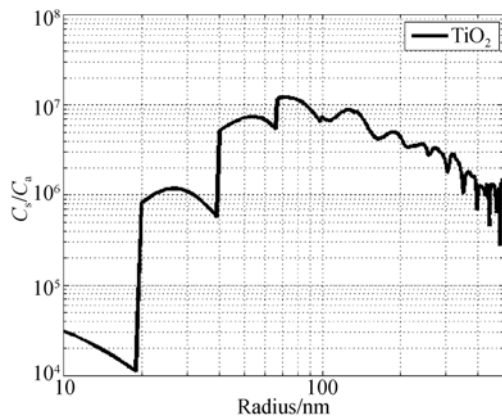
溶液的散射和吸收特性受到溶质种类和粒径的影响。图 6 计算了两种常用纳米颗粒材料: TiO_2 和 PS 小球散射吸收比随粒径的变化曲线。二者在 627nm 附近的复折射率如表 1 所示。散射截面与吸收截面的比值 C_s/C_a 用于表征溶液的吸收-散射特性,该值越高,说明颗粒的吸收效应越低,系统的透射越强。计算结果显示:PS 小球的吸收效应远大于 TiO_2 ;随着 TiO_2 半径的增加,曲线震荡上升,并在 100nm 附近吸收效应达到相对最小。然而,粒径的选择还应该考虑溶液配置问题。通过 Ostwald-Freundlich 方程可以得到粒径和溶解度的关系,即纳米颗粒越小,越容易获得更高浓度的溶液。而根据关系式 $l_s^{-1} = \mu_s =$

$\int n(r)C_s(r)dr$,其中 $n(r)$ 是粒径分布数密度。随着 $n(r)$ 的下降, l_s 上升,可能降低溶液的透射自由程 l^* 。本文根据图 6 的结果选择 TiO_2 纳米颗粒,而溶液配置参数还需要进行具体的实验研究。

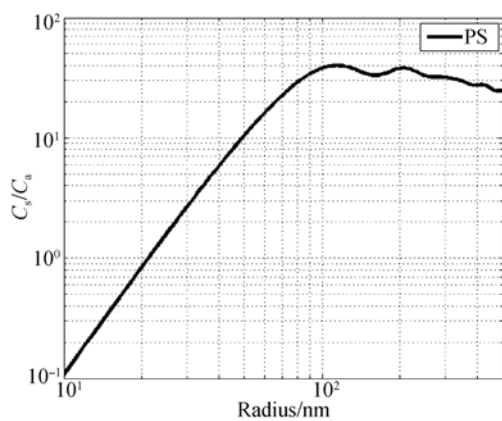
表 1 627 nm 的复折射率和溶剂吸收系数

Tab.1 Complex refractive indexes and absorption coefficients of solvent at 627 nm

	实部 m_{real}	虚部 m_{im}	μ_a/cm^{-1}
水	1.331 72	1.46×10^{-8}	2.903×10^{-3}
TiO_2	2.584 1	$1.906 41 \times 10^{-8}$	—
PS	1.582	0.00045	



(a) TiO_2



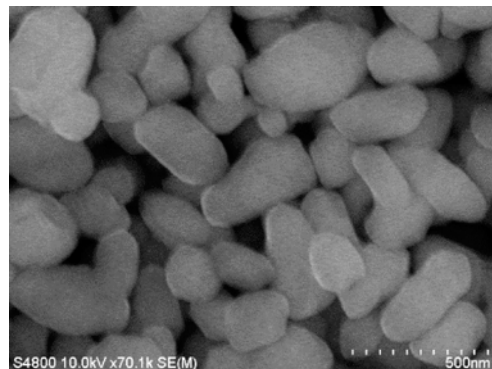
(b) PS

图 6 纳米颗粒散射截面与吸收截面比值随粒径的变化曲线

Fig. 6 Ratio of scattering coefficient to absorption coefficient versus nanoparticle radius

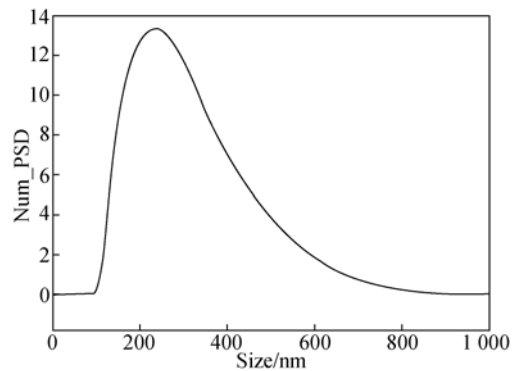
4.2 溶液配置

在本装置中,稳定分散的纳米溶液十分重要。然而,纳米颗粒的比表面积大,表面张力大,纳米颗粒之间及纳米颗粒与周围介质之间易产生吸附作用,引起团聚的发生,这将影响纳米颗粒的性能。当纳米 TiO_2 溶液浓度非常高时,其分散稳定性将因为团聚作用而严重降低。改善纳米颗粒分散特性的方法有以下 3 种:(1)改变溶液的 pH=8.0,提高体系的 Zeta 电位;(2)使用适量六偏磷酸钠(SHMP)分散剂;(3)超声波震荡。最终,配置了浓度比为 2.3×10^{-2} g/mL 的 TiO_2 溶液,其透射自由程为 25 μm 。图 7(a)是 TiO_2 纳米颗粒的电子显微镜图,平均粒径为 200 ~ 300 nm。图 7(b)为上述溶液的动态光散射测量的粒径分布图,测量结果与电镜图像结果大致吻合,说明溶液中 TiO_2 纳米颗粒的分散度较好。



(a)电子显微镜图

(a) Scanning Electron Micrograph(SEM) image



(b)粒径分布图

(b) Size distribution

图 7 纳米颗粒及溶液的测试结果

Fig. 7 Test results of nano-particle and solution

5 测量实验与结果

5.1 散射光场特征测量

散射光场的空间角分布和出射窗的尺寸 W 决定了校正匀场距离 D 。当光场均匀性要求比较高时,每个细微的变化都可能影响光场均匀性。图 8 描述了本文设计搭建的系统在出射窗处的光场角分布,图中同时对比了朗伯光源及 Monte Carlo 数值仿真结果。实验中,在出射窗位置放置一个小孔光阑,用于限制出光口的口径,保证测量光来自一个非常小的区域。结果显示,3 条曲线非常接近,微小差异可能是由光功率计测量面的指向误差,有限的出光口径等测量误差引起的。仿真结果同时指出了出光口的角分布。为简单起见,本文使用朗伯光源模型来研究出光口宽度和光场分布对光场均匀性的影响。

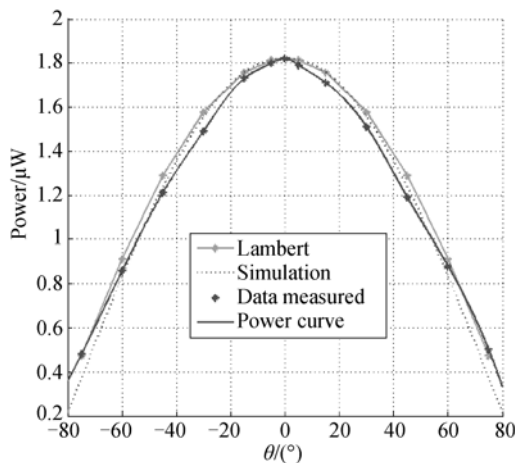


图 8 出射窗上的光场角分布

Fig. 8 Angularly resolved transmittance vs. angle on exit window

图 9 计算了两种不同的出射窗光场所产生的远场分布,包括平顶型和仿真分布($l^* = 50 \mu\text{m}$, $L=5 \text{ mm}$),考虑 $W=20 \text{ mm}$ 和 80 mm 两种不同的腔体宽度,匀场距离 $D=400 \text{ mm}$ 。计算结果显示:出射窗上光场分布和腔体宽度的影响都较小,最大差异仅为 0.1% (20 mm 匀场)。为了利用高均匀度的校正光场,待校正探测器必须放在光轴的中心。

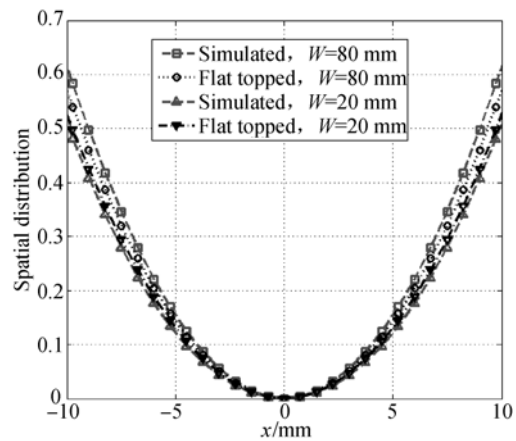


图 9 远处光场空间分布

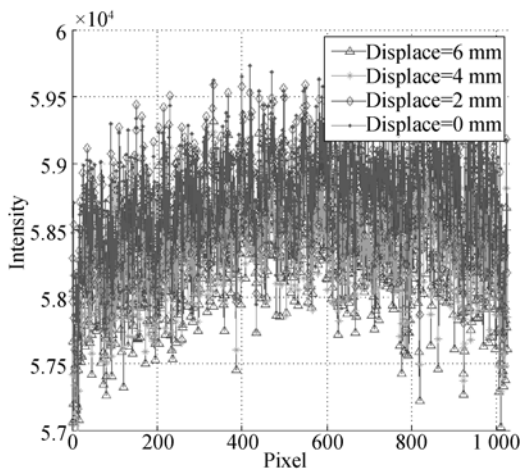
Fig. 9 Intensity distribution in far field

5.2 光场均匀性的测量

由前文分析可知,校正光场应在局部和全局两个尺度上是均匀的。激光散斑是影响局部均匀性的主要因素,可以通过改变溶液的漫散射从而降低光场相关性来抑制。对于上述实验配置, TiO_2 溶液的漫散射时间 $\tau_0 \approx 3 \text{ ms}$,当光源深度 $L=5 \text{ mm}$,透射自由程 $l^* = 25 \mu\text{m}$ 时,由公式(1)计算得到退相关时间 $\tau_d \approx 0.1 \mu\text{s}$ 。如果探测器的积分时间设置为 100 ms ,考虑退偏振效应,那么单幅图像的散斑对比度为 0.07% ,小于预期的校正目标值 0.3% 。

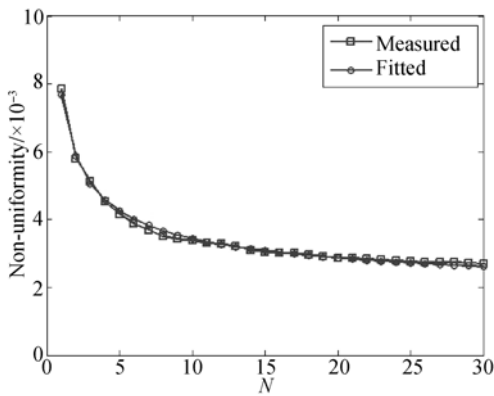
本文设计稳定激光平场的目的是为了校正 CCD 探测器的光电响应不均匀问题。探测器测量并提取激光平场均匀性信息的过程如下:首先放 CCD 探测器于中轴线 X_0 处,传感面与腔体出射窗中心正对,以保证待测试的光场处于中心最平滑的部分。由探测器 AVT GX1050 的参数列表(表 2),考虑到可能存在位置对准误差,估计出射光的角发散导致全局光场非均匀性的峰谷值为 0.075% 。图 10(a)给出了探测器在 4 个位置处的光场测试曲线,偏离中心量分别为 $0, 2, 4$ 和 6 mm 。单次测量曲线体现了比较明显的光子噪声,曲线的随机误差水平值与光子噪声理论值相同,均为 $1/\sqrt{2.0 \times 10^3} = 0.75\%$,说明影响光场均匀度的主要因素为光子噪声,激光散斑的影响基本可以忽略。为了降低光子噪声,这里对连续采集的 30 幅图进行平均处理,最终可将光子噪声

降低至 0.13% 的水平。接着,用中心位置 X_0 的数据分别校正其它 3 个位置的数据,由于位置偏移的图像之间存在明显的差异(如图 9 所示),计算多幅校正图像平均处理后的误差水平可以评估全局均匀性。图 10(b)是校正图像的非均匀性误差 U 随处理图像数 N 的变化曲线,最终得到的非均匀误差在 0.3% 的水平。



(a)强度分布

(a) Intensity distribution



(b)非均匀度曲线

(b) Non-uniformity curve

图 10 漫散射场测试

Fig. 10 Test of diffuse filed

误差源主要有:

(1)中心位置的校正数据仍存在一定量的光子噪声($\sim 0.13\%$),并被引入到被校正图像中;

(2)中心位置的校正数据中有全局空间分布误差;

(3)激光光源输出存在一定的强度抖动,很难达到 0.1% 的稳定度,使用的图像越多,该误差越明显。

上述误差源均只与测试设备与处理方法有关,与平场本身无关,因此可以认为该光场的非均匀性误差优于 0.3%。

从上述实验可以看出,探测器校正的精度并不仅仅依赖于平场的均匀度,与探测器本身的特性也密不可分。由于存在光子噪声,动态范围大的探测器的校正精度更高,适合高精密测量应用。对本文所研究的激光平场,采用多幅图像的平均处理,可降低散射光退相关时间的要求;减小光源深度 L 可以显著提高系统透射率;光照度的增加可以在更远位置获得更均匀的激光平场。

表 2 AVT GX1050 CCD 的部分指标及误差分析

Tab. 2 Specifications of AVT GX1050 CCD and uncertainty analysis

参数	数值
像素尺寸	$5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$
像素数	1024×1024
暗电流	$7 \text{ e}^- / (\text{p} \cdot \text{s})^{-1}$
读出噪声	$12 \text{ e}^- \text{ RMS}$
满井容量	$2.0 \times 10^3 \text{ e}^-$
光电响应非均匀性	$2\% \text{ RMS}$

6 结 论

本文根据阵列探测器光电响应误差精密校正的要求,提出了纳米颗粒溶液的漫散射产生激光平场的方法。首先介绍了激光平场装置的结构和工作原理。然后,使用 Monte Carlo 数值仿真方法,研究了该装置中关键器件漫反射腔的结构参数,透射自由程、光源位置的选择问题。讨论了高浓度纳米 TiO_2 颗粒溶液的配制,搭建了激光平场系统。最后给出了激光平场均匀度测试的实验方法。数据处理和分析显示:漫散射光场的均匀性较好,其不均匀度小于 0.3% RMS,基本满足了北京同步辐射装置正在建设的长程面形仪等高精度测量设备的精度要求。

参考文献:

- [1] 江效国, 祁双喜, 王婉丽, 等. 光纤锥耦合 CCD 相机图像的平场校正方法[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1361-1364.
JIANG X G, QI SH X, WANG W L, *et al.*. Flat-field-correction method for image taken by a fiber optic taper coupled CCD camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11): 1361-1364. (in Chinese)
- [2] 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.
XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese)
- [3] 程万胜, 赵杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318.
CHENG W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 314-318. (in Chinese)
- [4] FOX E C, NIXON O, DYKAAR D R, *et al.*. A high speed linear CCD sensor with pinned photodiode photosite for low lag and low noise imaging [J]. *SPIE*, 1998, 3301: 17-26.
- [5] YASHCHUK V V. Positioning errors of pencil-beam interferometers for long trace profilers [J]. *SPIE*, 2006, 6317: 63170A-63170A-12.
- [6] KIRSCHMAN J L, DOMNING E E, FRANCK K D, *et al.*. Flat-field calibration of CCD detector for long trace profiler [J]. *SPIE*, 2007, 6704: 67040J-67040J-11.
- [7] SCRIBNER D, SARKADY K, CAULFIELD J, *et al.*. Non-uniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [J]. *SPIE*, 1990, 1308: 224-233.
- [8] HARRIS J G, CHIANG Y M. Nonuniformity correction using constant-statistics constraint: analog and digital implementations [J]. *SPIE*, 1997, 3061: 895-905.
- [9] GOODMAN J W. *Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Springer, 1975: 9-15.
- [10] 常宏, 杨福桂, 董磊, 等. 激光光斑形状和尺寸对扫描显示中散斑对比度的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 4634-4639.
CHANG H, YANG F G, DONG L, *et al.*. Effect of structure and size of laser spot on speckle contrast in laser scanning display [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4634-4639. (in Chinese)
- [11] PINE D J, WEITZ D A, CHAIKIN P M, *et al.*. Diffusing wave spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 1988, 60(12): 1134-1137.
- [12] WANG L V, WU H. *Biomedical Optics: Principles and Imaging* [M]. John Wiley & Sons, 2012.

作者简介:



王秋实(1986—),男,辽宁大连人,博士研究生,2009年于华中科技大学获得学士学位,主要从事高面形精度光学元件检测装置的研究。E-mail: wangqs@ihep.ac.cn

导师简介:



盛伟繁(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,研究员,北京同步辐射装置总工程师,1984年、1987年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,1994—1996年美国阿贡国家实验室,2001—2002年加拿大光源访问学者,主要从事同步辐射光学及光束线技术的研究。E-mail: shengwf@ihep.ac.cn

通讯作者:



杨福桂(1985—),男,安徽蚌埠人,助理研究员,2007年、2012年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事传统光学成像、激光测量方法的研究。E-mail: yangfg@ihep.ac.cn



李明(1980—),男,吉林白城人,副研究员,北京同步辐射装置工程技术组组长,2003年、2008年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事同步辐射光学及高面形精度光学元件检测方法的研究。E-mail: lim@ihep.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)