

· 光学设计 ·

基于四透镜光学系统的鬼像形成研究

谭乃悦, 许中杰, 王 睿

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要:通过实验研究了由四透镜组成的中红外透射光学成像系统的鬼像在像平面上的分布规律。研究表明,随着光源入射角度的变化,像平面上透射光聚焦点与鬼像中心的位置相对视场中心发生偏移,且在相同条件下,鬼像中心的偏移量与透射光聚焦点的偏移量并不相同。根据该成像规律,针对鬼像中心的偏移量比透射光聚焦点的偏移量大的透射光学系统,提出一种抑制鬼像的有效方法,即通过调整造成鬼像的核心透镜的角度,使鬼像位移出视场,并利用软件仿真验证该方法的正确性,为以后复杂光学系统的鬼像规避设计提供有益的参考。

关键词:鬼像;中红外光学系统;鬼像抑制;软件仿真;光学系统设计

中图分类号:O482.3

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-01-0001-05

Research on Ghost Image Formation Based on Four Lenses Optical System

TAN Nai-yue, XU Zhong-jie, WANG Rui

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Distribution laws of the ghost reflection at the image plane of the mid-infrared transmission optical system with four lenses are researched through experiments. Research results show that with the changing of the incident light angle, both the ghost image center and the focus of the transmission light at the image plane shift relative to the center of field of view. While under the same conditions, the ghost image shows a larger displacement than the transmission focus. According to this imaging law, an effective method is carried out to suppress the ghost image. By tilting the main lens rising to ghost image with a certain angle, the ghost image will be removed from the field. The validity of this method is also verified by software simulation. The method provides an effective way to avoid ghost image in complicated optics system.

Key words: ghost image; mid-infrared optical system; suppression of ghost; software simulation; design of optical system

鬼像是由透射光学系统中少数反射光再成像造成的。例如,在野外借助太阳光进行拍照时,由于鬼像反射的影响会在孔径光阑中看到多个像。鬼像一般在成像系统和高功率光探测系统中会产生较坏的影响。然而任何实际光学系统中都存在鬼反射,它是光学系统中的有害光束。对于大面积光源来说,杂散光的存在使得接收面上产生一个亮的背景,引起对比度下降,影响成像质量;对于诸如

一些高功率激光系统这样的小面积高亮度光源,杂散光不仅在接收面上,而且在系统中产生光能相对集中的微小区域,即鬼像或鬼点。接收面上的鬼像将对真正的成像信息造成危害,引起接收器响应失常,无法识别目标,而光学系统内部的鬼像由于其光能的集中,还会造成光学元件的永久性损伤^[1-2]。因此,鬼像的研究受到了各国科研工作者的的高度重视。近年来,经过各国科研工作者的不懈努力,关

收稿日期:2018-01-18

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室开放基础研究课题SKLLIM1402

作者简介:谭乃悦(1991-),男,硕士,主要从事激光与物质的相互作用方面的研究;王睿(1976-),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

于鬼像的研究成果层出不穷^[3-11]。而国内外激光物理学界对鬼像问题的考虑大多基于激光光学系统的物理模型,对鬼像问题的数学描述相当复杂^[12],虽然从理论上是严谨的,但并不适用于实际计算分析。

在利用实验研究四透镜中红外透射光学系统鬼反射像平面成像规律的基础上,针对视场内斜入射时鬼像中心的偏移量比透射光聚焦点的偏移量大的透射光学系统,提出一种抑制鬼像的有效方法,并利用软件进行仿真模拟,分析鬼像的来源和成因,模拟验证了抑制鬼像方法的正确性,为以后复杂光学系统的鬼像规避设计提供有益的参考。

1 实验方案

对光学系统而言,鬼反射所携带的能量很小,为了探测到焦平面上的鬼像,文中采用的是对弱光很敏感的广泛应用于热成像、气体分析、激光探测等领域的 320×256 面阵碲镉汞中红外探测器,其响应波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,工作温度为 80 K 。为了能更好地观测到像平面上的鬼像,使用具有像差小、色散小等优点的中红外聚焦透射光学成像系统来进行实验,其结构如图1所示。

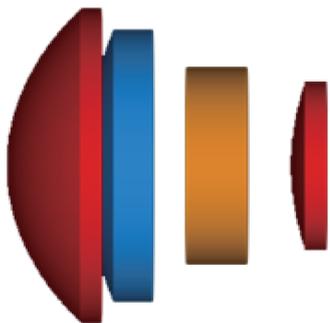


图1 四透镜系统结构图

实验光路如图2所示。

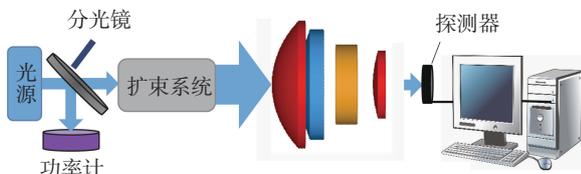


图2 实验光路示意图

激光经扩束后入射方向与光轴方向夹角由小到大满瞳入射到光学系统,经透射光学系统的传播

到达探测器表面,在其表面形成一定的光强分布,记为 $E(x,y)$ 。探测器接收这种分布的光信号,产生光电效应,将光信号转换成电信号,再经过信号处理电路的作用,转换成图像信号 $V(x,y)$ 。

实验主要关注激光在光学系统中传播时鬼反射对探测器表面上的光强分布 $E(x,y)$ 的影响。

2 实验结果与分析

图3是当辐照光源入射角为 2.3° 时,探测器焦面的成像图。该图涵盖了透射光学系统焦面成像光斑的典型特征,具体如下。为了表述和研究方便,将焦面图像划分为5个区域,如图3所示。

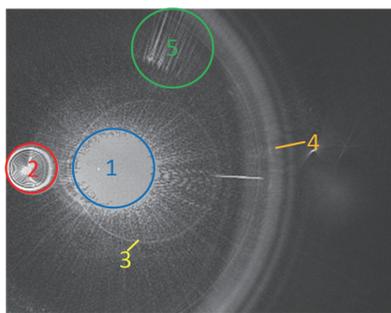


图3 典型的焦面光斑图像

由实验与仿真的过程中得知,图中区域2、3和4的光斑为鬼像,区域1内近似圆形的光斑为散射光斑,其中心与透射光在像平面处的聚焦点重合,区域5的光芒为扩束系统所带来的杂散光。虽然区域2~4同为鬼像,但3和4的光照度比2的要弱得多,约为2的5%,因此文中重点关注的是透射光聚焦点与区域2内鬼像的中心相对视场中心(激光正入射到光学系统时,透射光聚焦点正好位于视场中心)的位移量(以下简称偏移量)随入射角变化的变化规律。通过实验得到以下典型实验结果,如图4所示。

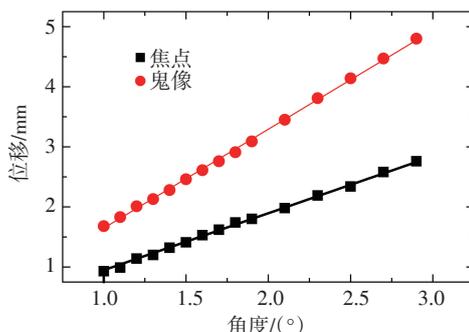


图4 透射光聚焦点与鬼像的中心偏移量随入射角度的变化曲线图

图4给出了不同入射角下,激光入射到透射光学系统时,透射光聚焦点与鬼像的中心偏移量随入射角度的变化曲线图。

通过上述实验结果,可分析得到,光源从视场内入射到透射光学系统时,随着入射角度的增大,透射光聚焦点与鬼像中心的偏移量成线性增大,其中它们的斜率分别为0.95和1.65。由此可知,当光源入射角度大到一定角度时,鬼像会移出视场外而透射光聚焦点仍然在视场内,从而抑制鬼像对光学系统成像质量的影响。然而不妨换一种角度思考,入射角的变化也可以看作是光学系统的倾斜,是否能够找到造成鬼像的核心器件(以下简称鬼像器件),只是通过倾斜该器件一定角度来达到将鬼像移出视场的效果,可以预见这种方法导致的透射光聚焦点的偏移量将比斜入射的要小得多。当然鬼像器件的倾斜会增加像差,或因移出的鬼像能量损坏或干扰其他器件的工作,所以在实际的设计中要综合考虑这些因素对光学系统成像质量的影响。

3 仿真结果与分析

使用改进的 Monte Carlo 光线追迹法对实验系统进行仿真模拟,为了减少计算时间和提高计算效率,该方法主要采用光线分裂技术和重点抽样技术。当光线入射到某光学表面时,一根光线将分成两类光线:正常传递的光线(包括反射光线和折射光线)和被吸收的光线。其中正常传递的光线的方向由反射定律和折射定律确定,而吸收光线不继续传播。分裂后的每条光线所携带的能量正比于相应的系数(反射率、透射率等)。利用这种方法,一根光线入射到光学表面后分裂出多根子代光线继续传播,每根子代光线再入射到下一个光学表面后又继续分裂出多根子代光线,以此类推,这样光线数目将成几何级数增加,而每根光线的能量逐级衰减,直到被完全吸收或其能量低于预先设定的最低能量阈值为止。重点抽样技术正是为重点考虑沿重点方向传递的能量而设计的,如文中只追迹最终能到达探测器的那一部分光线,而其余光线并不进行追迹,大大提高了计算效率。

文中重点关注的是鬼像对光学系统成像质量的影响,因此对于每个光学表面仅仅只需追迹光线经过每个光学表面后正常传递的光线(包括反射光

线和折射光线)。从理论上来说,激光在透射光学系统中的任一光学表面都会发生反射和折射,两个面之间每发生1次往返的反射都有可能在探测器上形成鬼像。通常透射光学系统由于考虑到价格和技术等问题一般镀单层膜,以文中的系统为例,镀膜后单面反射率约为0.04,经过两次反射,反射光线的能量约为原能量的16/10 000。因此在对文中的光学系统进行研究时,一般只考虑两次反射引起的鬼像对成像质量的影响。

对满足上述要求的光线进行追迹,由图1可知,透射光学系统有8个光学表面,加上探测器前的滤光片共10个光学表面,此时需要追迹的光线路径除了折射光线外还有45条鬼反射路径,分析结果如表1所示。表1中显示了透射光学系统的部分光线路径的光线历史报表数据。

表1 路径命令的输出结果

路径	光线数	总能量	百分比	碰撞次数
1	31 799	274	98.55	11
2	275	0.002 88	0	13
3	10 045	0.136	0.05	13
4	329	0.003 28	0	15
5	1 057	0.013 2	0	13
6	695	0.007 79	0	15
7	949	0.006 46	0	17
8	2 139	0.027 4	0.01	13
9	43 047	0.549	0.2	15
10	49 539	0.583	0.21	17
11	879	0.008 78	0	19
12	18 621	0.235	0.08	15
13	9 175	0.124	0.04	13
14	10 059	0.116	0.04	17

光线历史报表是一个对所有光线的完整报告,记载了有多少光线以这条光路传播,他们怎样到达最终的实体(在这个事例中是像平面)以及他们穿过了多少表面(事件计数)。在光线历史报表中光线数是指路径中的光线数,总能量是指沿路径传输所有光线总的光通量,百分比是指该路径的光通量占总光通量的比例,碰撞次数是指路径中光线与光学表面的接触次数。分别对每一个路径进行追迹,并与图3进行对比。

仿真结果表明,文中所用的四透镜系统的主要

鬼像(图3中区域2所示)是经第3透镜的前表面与第1透镜的后表面的鬼反射后在光学系统中继续传播并最终到达像平面所引起的,其光线追迹图如图5所示。模拟结果图如图6中区域2所示,最大光照度为1.38 mlux。

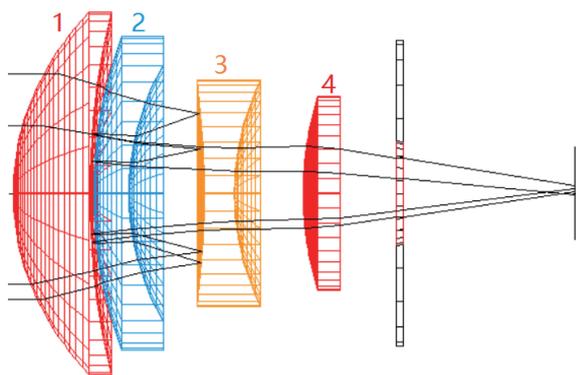


图5 图6中区域2所示的鬼像的光线追迹图,从左往右分别为第1~4透镜

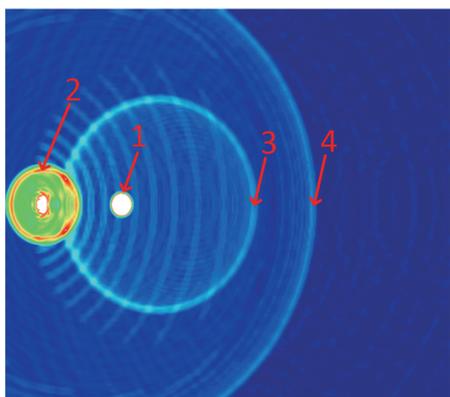
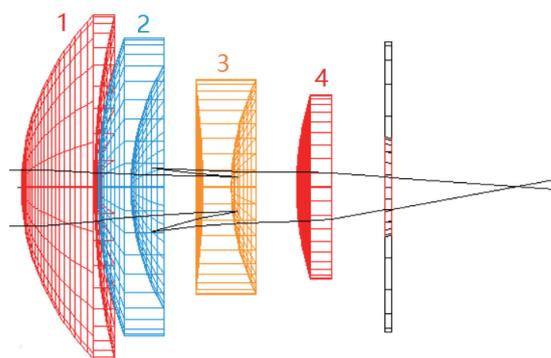
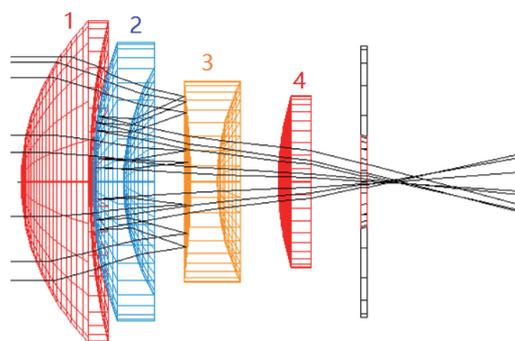


图6 入射角为 2.3° 下鬼像的模拟结果图

为了更进一步地确认鬼像对成像质量的影响以及验证该光线追迹法的正确性,还分别对形成图3中区域3和区域4所示的鬼像的光线进行追迹。其中图3中区域3所示的鬼像经第3透镜的后表面与第2透镜的后表面的鬼反射后在光学系统中继续传播并最终到达像平面所引起的,其光线追迹图如图7a所示。模拟结果图如图6中区域3所示。最大光照度为0.069 mlux,约为主要鬼像的5.0%;图3中区域4所示的鬼像经第3透镜的前表面与第2透镜的前表面的鬼反射后在光学系统中继续传播并最终到达像平面所引起的,其光线追迹图如图7b所示。模拟结果图如图6中区域4所示。最大光照度为0.054 mlux,约为主要鬼像的3.9%。



(a)图6中区域3所示的鬼像的光线追迹图



(b)图6中区域4所示的鬼像的光线追迹图

图7 图6中区域3所示的鬼像的光线追迹图及图6中区域4所示的鬼像的光线追迹图

由此可知,不管是实验结果,还是模拟结果均表明,图3中区域2所示的鬼像才是影响透射光学系统成像质量的主要鬼像。值得一提的是,在上述仿真的过程中不难发现,像平面上能观测到的鬼像基本上都与第3透镜有关,因此文中将第3透镜确定为引起像平面上的鬼像的核心器件,以下简称鬼像器件。

关于优化方面,为了简化,主要考虑的是如何减小图3中区域2的鬼像(即主要鬼像)对成像质量的影响。

从上面的分析可以看出,第3透镜的前表面与第1透镜的后表面对主要鬼像的贡献最大,故主要通过改变这两个光学表面来减少鬼像的影响。减少鬼像对像面的影响可以通过对几个产生鬼像的面进一步降低反射率来实现。现在国内透镜镜面都已镀有减反膜,由于价格和加工技术等原因,大多数透镜表面都只镀单层膜,但如果对透镜表面镀上多层膜,可以使该面的反射率降低。所以可以通过对第3透镜的前表面与第1透镜的后表

面镀多层膜,以降低反射率来减少鬼像的影响。

上述方法简单、效果明显,但会提高产品的加工成本,可以通过倾斜鬼像器件,使得主要鬼像移出视场,从而达到优化成像质量的目的。由小到大调整鬼像器件的倾斜角,并对调整后的透射光学系统进行仿真模拟。仿真结果表明,鬼像中心的偏移量随着第三透镜的倾斜角增大而增大,当鬼像器件倾斜 2.5° 时,图6中区域2所示的鬼像移出视场,仿真模拟的结果如图8所示。而鬼像器件未倾斜时的模拟结果图如图9所示。

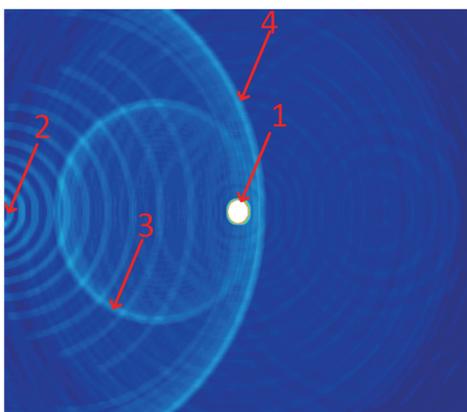


图8 倾斜鬼像器件后鬼像移出视场

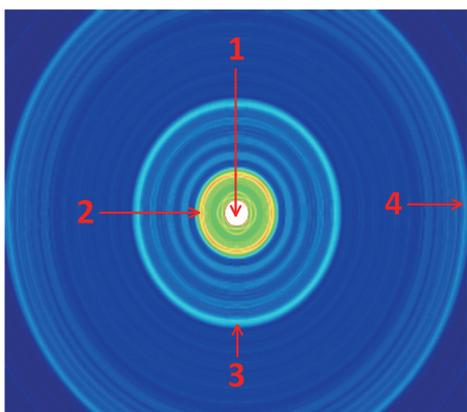


图9 鬼像器件未倾斜时的鬼像

从以上仿真结果可知,倾斜鬼像器件一定角度后,透射光聚焦点位置基本不变,而鬼像的位置发生了明显的偏移,更甚者被移出视场,这样可以有效地抑制鬼像对光学系统成像质量的影响。当然还可以继续倾斜鬼像器件使得图8中的区域3和区域4移出视场,但是这就不可避免地带来了由于倾斜鬼像器件所引起的巨大像差。因此综合考虑像差等因素,通过倾斜造成鬼像的核心透镜一定的角

度,使鬼像移出视场的这种方法主要是针对视场内斜入射时鬼像中心的偏移量比透射光聚焦点的偏移量大的透射光学系统。

4 结 论

实验研究了由四透镜组成的中红外透射光学系统中鬼反射在焦平面的成像规律,发现随着光源斜入射角度的变化,鬼像与透射光聚焦点在像平面上的位置相对视场中心发生偏移,且在相同条件下,鬼像中心的偏移量与透射光聚焦点的偏移量并不相同,其原因在于像平面上的鬼像主要是由两次鬼反射所引起的,光束经过两次鬼反射后位置和方向均发生变化,从而导致鬼像的偏移量与透射光聚焦点的偏移量并不相同,并利用改进的 Monte Carlo 光线追迹法进行仿真模拟,分析鬼像的来源和成因,找到了造成鬼像的核心器件。同时,文中针对视场内斜入射时鬼像中心的偏移量比透射光聚焦点的偏移量大的透射光学系统,提出一种抑制鬼像的有效方法,即通过倾斜造成鬼像的核心透镜一定的角度,使鬼像移出视场,并利用软件仿真验证该方法的正确性,为以后复杂光学系统的鬼像规避设计提供有益的参考。

参考文献

- [1] 冯国英,陈建国,马再如,等.高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找[J].光学学报,2003,23(5):632-635.
- [2] 马再如,刘文兵,冯国英,等.高功率激光系统的低阶鬼点位置公式[J].激光杂志,2003,23(4):55-58.
- [3] 白瑜,杨建峰,马小龙,等.红外 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的消热差设计[J].光子学报,2009,38(9).
- [4] 王方,张清泉,朱启华,等.高功率多程放大系统中鬼像的分析[J].光子学报,2006,35(12).
- [5] 邓诗涛,李晓彤,岑兆丰,等.高功率激光装置中鬼像的模拟应用实际光线追迹法[J].光学学报,2005,25(5):585-588.
- [6] MIT Lincoln Laboratory[R]. EO-1-Technology Demonstration of Silicon Carbide Polishing. 2001.
- [7] Mendenhall J A, Hearn D R, Lencioni D E. Comparison of the EO-1 advanced land imager performance with the landsat data continuity mission specification[R]. MIT Lincoln laboratory, prepared for NASA under air force contract F19628-00-C-0002, 2002.

(下转第76页)

行了压力传感性能测试及蠕变影响分析。实验表明,两种FBG传感器的压力与波长的线性拟合优度都高于0.998;使用353ND胶制作的光纤光栅传感器蠕变很小,说明合理选用合适胶水和适当的基底可以使传感器的蠕变大大降低,同时发现,使用353ND胶制成的光纤光栅传感器进行的延时(5 min内)压力测试实验中,当悬臂梁的弯曲较小时,也即压强在6-3 MPa过程中,测试偏差基本为0,当悬臂梁的弯曲较大时,即对应压强在3-0 MPa过程中偏差出现的频次大大增加,其中最大偏差为8 μm ,说明这部分偏差应该是由胶合剂引起的弯曲蠕变。与胶装封装方式相比,金属化封装方式具有明显优势,一方面这种方式制作的FBG压力传感器可以从根本上消除蠕变,另一方面还可以明显提高传感器压力灵敏度。对表2和表3的实验数据进行比较后,得到经过金属化处理后的传感器压力灵敏度是使用353ND胶制成的FBG传感器的3.4倍。

参考文献

- [1] 潘尔生,郑路遥,姜国义,等.基于光纤光栅传感器的输电线路微气象在线监测系统[J].光电技术应用,2016,31(2):11-14.
- [2] 韩悦文,陈海燕,黄春雄.光电技术在湿度传感器中的应用[J].光电技术应用,2008,23(3):33-36.
- [3] 闫俊芳,裴丽,陈志伟,等.光纤传感技术在物联网中的应用[J].光电技术应用,2012,27(1):37-40.
- [4] 闫冰,丁锋.基于光纤光栅地震检波解调系统的微弱信号检测电路设计[J].光电技术应用,2013,28(5):65-68.
- [5] 马收,李明,郭建春,等.光纤布拉格光栅(FBG)传感器在金属试件上的粘接工艺研究[J].复合材料学报,2013(s1):251-254.
- [6] 范典.光纤光栅金属化封装及传感特性试验研究[J].传感技术学报,2006,19(4):1234-1237.
- [7] 张桂花,柴敬,弥旭锋,等.光纤光栅在不同基底上的应变灵敏度研究[J].光通信技术,2013,37(7):34-36.
- [8] 吴俊,陈伟民,章鹏,等.金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J].仪器仪表学报,2012,33(12):2709-2713.
- [9] 李煦,贾丽杰,李嘉.粘贴式光纤光栅传感器胶粘剂的选择[C]//中国科协年会第11分会场:低成本、高性能复合材料发展论坛,2012.
- [10] 于秀娟,余有龙,张敏,等.铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J].光子学报,2006,35(9):1325-1328.
- [11] 周智,王倩,郝孝伟,等.考虑混凝土基体蠕变的FBG传感器应变传递研究[J].中国测试,2016,42(5):1-5.
- [12] 钟阳,尚冉冉.光纤光栅传感器的无胶化封装及蠕变规律研究[J].山西建筑,2015(14):138-139.
- [13] Xu Z, Bassam A, Jia H, et al. Fiber optic sensor reliability issues in structural health monitoring[C]//Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics, 2005: 390-404.
- [14] 余有龙,谭玲,邹李刚,等.用光纤光栅传感器研究压电陶瓷特性[J].光子学报,2011,40(7):994-997.
- [15] 徐志洪,ANSARI Farhad.用弱相干白光双干涉系统测量光纤的蠕变[J].中国科学:技术科学,2010(2):55-58.
- [16] 刘春桐,涂洪亮,李洪才,等.全金属封装光纤光栅的温度传感特性研究[J].传感器与微系统,2008,27(10):58-59.
- [17] 李小甫,姜德生,余海湖,等.石英光纤表面化学镀镍磷合金工艺[J].化工学报,2005,56(1):126-129.
- [18] 杨洋.基于边缘解调技术的光纤光栅波登管压力传感器的研制[J].光学技术,2009,35(1):53-55.

(上接第5页)

- [8] Lampton M L. SNAP telescope: an upstate[J]. Proc SPIE, 2004, 5166: 113-123.
- [9] Sholl M. SNAP secondary support diffraction[R]. Space sciences laboratory university of California at Berkeley, 2001.
- [10] Sholl M, Lampton M L, Aldering G. Snap telescope [J]. Proc SPIE, 2004, 5487: 1473-1483.
- [11] Lampton M, Sholl M. Comparison of on-axis three mirror anastigmat telescopes[J]. Proc SPIE, 2002: 5166.
- [12] 马毅勇,程祖海,张耀宁.高功率激光器窗口热变形分析的有限元方法[J].强激光与粒子束,1999,11(1):6-10.