

高分辨折反式红外探测系统光学设计

朱 钧¹, 朱景雷¹, 冯 辰², 魏继卿¹, 侯 威¹

- (1. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084;
2. 清华大学 清华-富士康纳米科技研究中心, 北京 100084)

摘要: 在红外探测中, 传统红外焦平面阵列以及单像元扫描式探测器的像元难以分辨更精细的红外光强分布, 为了提高红外探测的分辨能力, 采用灵敏度高且可以将红外光分布转化为可见光分布的碳纳米管薄膜作为红外激光的接收器, 把红外光探测转化为可见光探测, 并以此为基础设计了一个折返式的光学成像系统进行红外光高分辨探测。优化并使用柯克式镜组降低了因球面反射镜曲率半径引起的大场曲, 从而提高了系统成像质量和分辨率。通过光学设计优化得到了具有高传递函数值(MTF)、低场曲的折反式系统, 从而使高分辨率的红外探测系统成为可能。

关键词: 高分辨红外探测系统; 折反式系统; 柯克式镜组; 消场曲; 碳纳米管薄膜

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1280-05

Design of refracting reflecting infrared detection optical system with high spatial resolution

Zhu Jun¹, Zhu Jinglei¹, Feng Chen², Wei Jiqing¹, Hou Wei¹

- (1. Department of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: It's difficult for both a single pixel scanning detector and a pixel array detector to test minutely in infrared region. An infrared laser receptor was adopted to increase the spatial resolution of infrared laser detection. The receptor consisted of a high infrared sensitive material Carbon Nanotube film which could convert infrared light into visible light. A refracting reflecting optical system was designed to detect the visible light converted by the receptor which can increase the spatial resolution compared with the infrared system. The Cooke Triplet lenses were used to reduce the system field curvature. The refracting reflecting optical system was finally optimized to have high value of MTF and low field curvature, which make the high resolution infrared detection possible.

Key words: high resolution infrared detection system; refracting reflecting optical system; cooke triplet lenses; field curvature elimination; carbon nanotube films

收稿日期: 2012-09-20; 修订日期: 2012-10-23

作者简介: 朱钧(1971-), 男, 副研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事自由曲面、光学设计、纳米光学等方面的研究。

Email: j_zhu@tsinghua.edu.cn

0 引言

对于波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 红外激光光束, 测量其光束特征的传统方法有两种: 狭缝扫描法以及直接采用红外焦平面阵列^[1]的方法。狭缝扫描法是将测量数据通过计算得到光束的形状, 因此会丢失光束中非常微小的细节。另外, 由于光阑的直径不能做到足够小, 也难以实现更高精度的检测。红外焦平面阵列法是利用红外敏感材料检测红外光束。由于现有技术的限制, 存在诸多不足: 一是分辨率较低。红外焦平面阵列器件的像元尺寸一般在 $30\ \mu\text{m}$ 左右, 像素数一般在百万以下, 所以探测的分辨率比较低, 难以满足激光横模细节的测量, 而且一般需要液氮制冷(非制冷型^[2]除外), 给探测带来许多不便, 另外价格也比较昂贵。这些因素限制了红外激光光束测量的精度和适用性, 如果要分辨 $30\ \mu\text{m}$ 以下的细节分布就需要一种分辨率高、适用性好的探测方法。

1 折反式红外探测系统

1.1 碳纳米管薄膜用作红外激光接收器

文中针对 CO_2 激光器的激光探测提出了一种折反式红外探测系统。采用碳纳米管薄膜^[3-5](简称碳管膜)来检测 CO_2 激光模态。碳管膜微观状态下为中空管状结构, 长径比很大, 轴向导热性好, 横向导热性差, 导热的各向异性非常显著。碳管膜可近似为黑体, 具有黑体的吸收和辐射特性。当 CO_2 激光照射到碳管膜表面, 光能转化为热能并被碳管膜吸收, 在碳管膜表面形成与激光光强成正比温度场分布, 同时按黑体辐射的特性向外辐射。用 CCD 对辐射中的可见光成像, 即可探测激光光束的能量分布。应用于可见光波段的 CCD 的像元可达到 $10\ \mu\text{m}$ 以下, 因此能够在很大程度上提高红外探测的分辨率。

1.2 反射式红外探测系统的提出

为了实现探测, 需要以碳管膜的特点为基础设计一个光学系统, 把碳管膜表面激光束的能量分布转换为可见光后成像在 CCD 上, 最终实现高分辨率的激光束测量。由于碳管膜一般都以硅作基底^[6], 对可见光是不透明的, 只能对碳管膜被激光照射的表面进行成像, 这就要求光学系统的前端必须为反射式。文中根据需求提出如图 1 所示的光学系统。

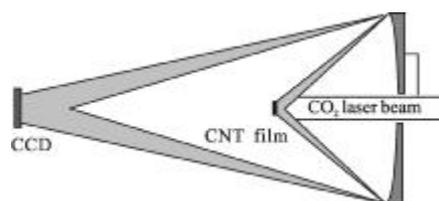


图1 反射式红外探测系统示意图

Fig.1 Reflecting infrared detection system

反射镜对碳管膜辐射的光线进行汇聚, 使其通过后续的反射镜或折射镜成像。根据需要测量的 CO_2 激光束束腰位置光斑的大小, 碳管膜的直径设为 $6\ \text{mm}$ 即可满足 CO_2 激光光束测量, 所以前端反射镜中心需要打开至少 $6\ \text{mm}$ 的口径。由于激光束直接入射到碳管膜上, 系统又没有额外的激光准直系统, 为了使激光束更容易照射到碳管膜表面, 碳管膜到反射镜之间的距离在不影响整个系统像差的前提下应小于 $80\ \text{mm}$ 。

为了获取更多的能量, 保证探测的灵敏度, 反射镜的曲率半径不能很大, 同时碳管膜应尽量靠近反射镜以获得较大的物方孔径角。反射镜在大孔径成像时会带来较大的场曲, 需要通过后续的透镜系统来补偿该场曲, 因此消场曲是整个光学系统设计过程中重要的环节。除场曲要校正外, 其他的像差(如畸变等)也要得到控制才能达到良好的成像质量。为了满足高分辨率的指标, 要求系统具有优秀的光学传递函数。

总之, 根据实际需求对折反式红外探测光学系统的总体目标要求为: 系统要具有较大的物方孔径角, 物方孔径角 U 不小于 22.5° (全孔径角大于 45°), 数值孔径 NA 大于 0.38 。碳管膜半径 y 为 $3\ \text{mm}$, 碳管膜到反射镜的距离 l 小于 $80\ \text{mm}$, CCD 大小为 $1/3\ \text{in}$ ($1\ \text{in}=2.54\ \text{cm}$), 所以像高 y' 为 $3.8\ \text{mm}$ 。该系统应该要求至少能够分辨 $10\ \mu\text{m}$ 的细节, 所以系统场曲小于 $0.01\ \text{mm}$, 像面弥散斑直径小于 $0.01\ \text{mm}$, 0.7 视场畸变不大于 1% , 对 $50\ \text{lp/mm}$ 的光学传递函数要在 0.8 以上。

2 系统优化

2.1 单反射镜系统

对于图 1 的单反射镜成像系统, 由系统的设计目标可知系统横向放大率 β 为 1.267 , 取物距 $l=80\ \text{mm}$, 可得像距 $l'=101\ \text{mm}$, 由物像关系 $1/l' - 1/l = 1/f'$ 可得系统的焦距为 $44\ \text{mm}$, 由于该系统为单反射镜系统, 可

知反射镜的曲率半径为 88 mm，如果数值孔径取 0.38，系统入瞳 D 为 61.65 mm，则该系统的场曲和畸变、球差、MTF、点列图分别如图 2~图 5 所示。

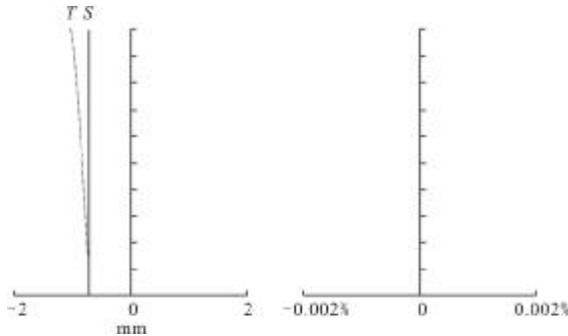


图 2 单反射镜系统的场曲和畸变

Fig.2 Filed curvature and distortion of single-reflector-imaging system

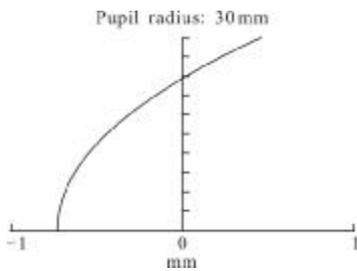


图 3 单反射镜系统的球差

Fig.3 Longitudinal aberration of single-reflector-imaging system

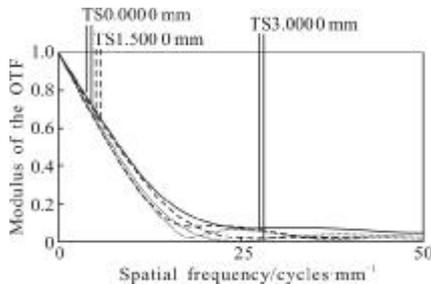


图 4 单反射镜系统的 MTF

Fig.4 MTF of single-reflector-imaging system

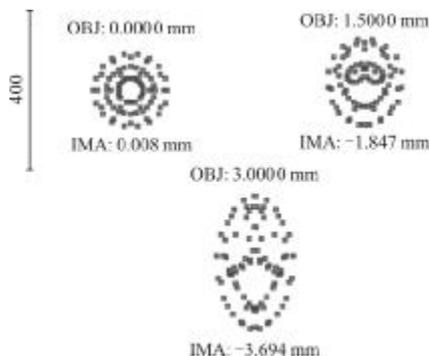


图 5 单反射镜系统点列图

Fig.5 Spot diagram of single-reflector-imaging system

可以看出,在单反射镜成像系统中,场曲为 0.3mm,球差为 1.3 mm,50 lp/mm 的 MTF 值以及弥散斑远低于系统要求的目标。反射镜承担了整个系统的光焦度,带来很大的场曲^[7]。

2.2 折反式成像系统

为了解决单反射镜成像系统的问题,引入柯克式^[8]三片镜组作为系统的后镜。柯克式镜组可以将整个系统的光焦度重新分配,从而在很大程度上降低系统场曲,同时这样的结构也有利于球差、色差等像差的矫正。因此,提出如图 6 所示的折反式成像系统。使用 CODEV 软件对该系统优化后得到的系统参数见表 1。其中光阑为反射镜面,其他表面均为折射面,透镜 1 的材料为 BK7,透镜 2 的材料为 ZF1,透镜 3 的材料为 BK7。

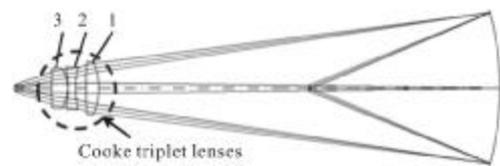


图 6 加入柯克式镜组后的结构

Fig.6 System with the Cooke Triplet lenses

表 1 加入柯克式镜组后的优化结构数据

Tab.1 Optimized structure parameters with the Cooke Triplet lenses

Surface #	Y radius	Thickness	Y semi-aperture
Object	Infinity	280.000 0	-
Stop	-332.822 1	-302.421 8	95.049 6
2	-80.464 1	-12.087 98	27.475 9
3	-112.649 5	-52.651 48	24.732 1
4	72.149 2	-23.219 78	9.949 18
5	-183.087 7	-0.100 0	7.109 8
6	-46.750 7	-10.752 56	7.025 8
7	65.532 0	-5.000 0	5.384 9
Image	Infinity	0.000 0	3.802 0

优化后系统的主要像差、MTF、点列图分别如图 7~图 9 所示。经过初次优化后的折反式成像系统的球差小于 0.02 mm,场曲也在 0.005 mm 以内,畸变几乎为 0,50 lp/mm 的 MTF 值在 0.9 以上,同时系统的弥散斑也是极小。这个系统具有优秀的成像质量,

如果不考虑其他因素将能够实现高分辨率的红外激光探测。但是在优化过程中发现,碳管膜到反射镜之间的距离即系统的物距 l 很难优化至设计目标 (80 mm 以下), 而上述系统中等于 280 mm, 减小 l 会明显增大系统的像差。为了解决这个问题, 将球面反射镜换做非球面反射镜, 其他三块透镜的材料不变, 以 l 为主要目标进行进一步优化, 最终得到如图 10 所示的结构。

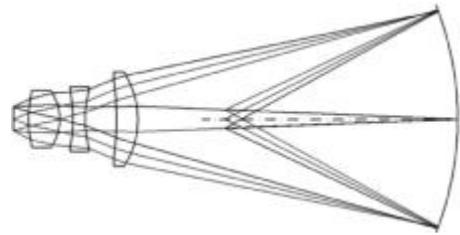


图 10 最终的折反式系统结构

Fig.10 Final optimized system structure

系统的主要参数见表 2。

表 2 最终的折反式系统结构参数

Tab.2 Final optimized system structure parameters

Surface #	Y radius	Thickness	Y semi-aperture
Object	Infinity	75.000 0	-
Stop	-100.792 5	-103.223 2	35.2381
2	-28.615 2	-6.885 6	14.2608
3	-91.693 1	-10.046 1	12.9628
4	37.587 7	-4.000 0	9.5898
5	-45.505 9	-4.239 3	8.8252
6	-16.228 0	-10.000 0	8.3759
7	43.675 3	-5.000 0	6.5985
Image	Infinity	0.000 0	3.809 9

最终凹面反射镜到碳管膜的距离为 75 mm, 曲率半径为 100.8 mm, 已经达到设计目标。最终系统的主要像差如图 11 所示。

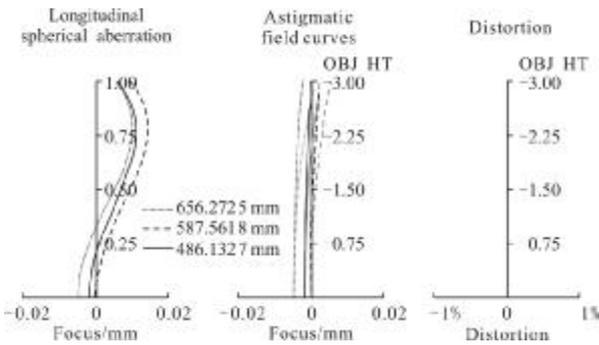


图 7 折反射系统球差、场曲和畸变

Fig.7 Longitudinal aberration, field curvature and distortion of refracting reflecting system

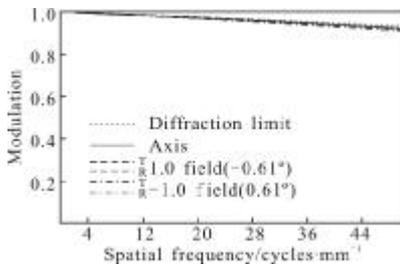


图 8 折反射系统的 MTF

Fig.8 MTF of refracting reflecting system

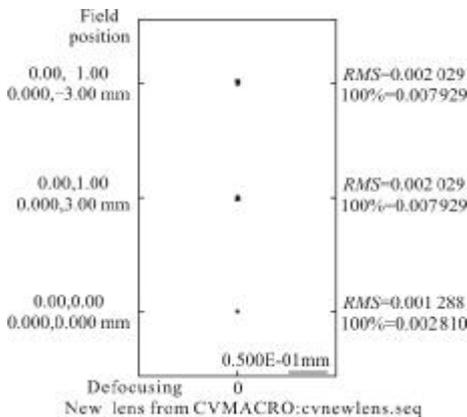


图 9 折反射系统的点列图

Fig.9 Spot diagram of refracting reflecting system

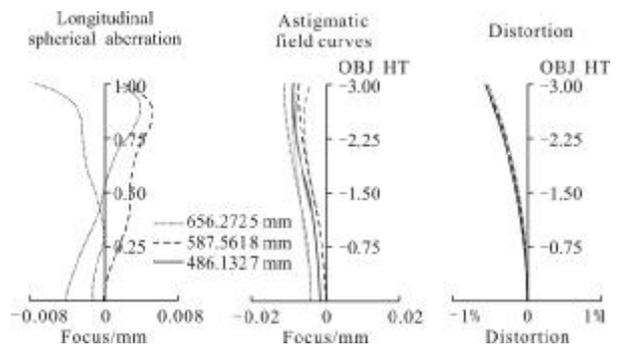


图 11 最终的折反式系统的球差、场面和畸变

Fig.11 Longitudinal aberration, field curvature and distortion of final system

最终球差减小至 0.004 mm, 场曲小于 0.01 mm, 畸变控制在 1% 以下, 满足系统设计目标。但系统的 MTF 值在减小凹面反射镜和碳管膜之间距离经过优化后降低至 0.8 (图 12), 而从图 13 可以看出, 系统

的弥散斑也有一定的增大,但仍在要求的目标内,对分辨率影响很小,而且系统的数值孔径为 0.46,远高于设计目标。最终折反式成像系统满足了系统设计目标,能够实现对碳纳米管薄膜辐射可见光的高分辨成像,同时也缩短了碳纳米管薄膜与系统入瞳之间的距离,有利于使用过程中激光光束的对准。

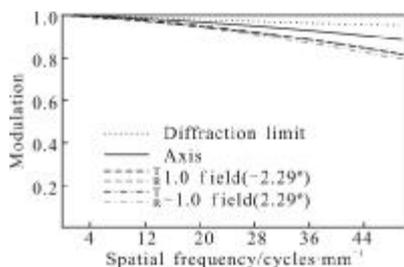


图 12 最终的折反式系统的 MTF 值

Fig.12 MTF of final system

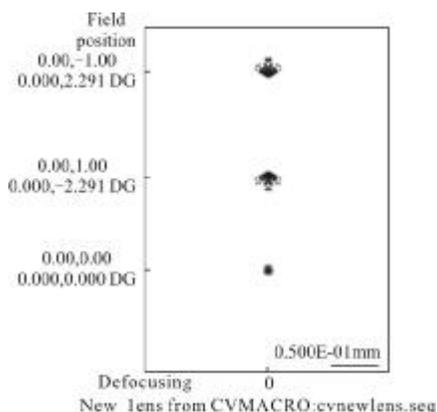


图 13 最终的折反式系统的点列图

Fig.13 Spot diagram of final system

3 结 论

文中提出了一种基于碳纳米管膜的高分辨折反式成像系统,以达到对红外激光器输出光束光强分布的高分辨探测。碳纳米管薄膜的高灵敏度和高分辨能力使之能够应用于红外高能激光束的探测中。

为降低整个系统的场曲,采用了柯克式三片镜组成功地控制了系统的场曲和其他像差。采用非球面的反射镜在保证系统像差和成像质量的前提下缩小了碳纳米管膜与系统入瞳之间的距离,有利于激光光束测量中的调整。折反式红外探测系统的提出为红外高分辨探测提供了新的思路,也扩大了新材料的使用范围。

参考文献:

- [1] Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 7-11. (in Chinese)
陈伟力, 王霞, 金伟其, 等. 采用中红外偏振成像的目标探测实验[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 7-11.
- [2] Xing Suxia, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 441-444. (in Chinese)
邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 441-444.
- [3] Hongjie Dai. Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties [J]. *Acc Chem Res*, 2002, 35: 1035-1044.
- [4] Dresselhaus M S, Dresselhaus G, Avouris (Eds) Ph. Carbon nanotubes [J]. *Topics Appl Phys*, 2001, 80: 29-53.
- [5] Dresselhaus M S, Dresselhaus G, Eklund P C. Science of fullerenes and Carbon Nanotubes[M]. US: Academic Press, 1996.
- [6] Mu R, Ueda A, Wu M H, et al. Experimental and theoretical demonstration of the interfacial interaction potential between an adsorbed film and a smooth substrate [J]. *J Phys Chem B*, 2000, 104: 105-109.
- [7] Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [8] Wen Shingsun, Chang Horng, Sun Chingcherng, et al. Design of a Cooke triplet by optimization technique [C]//SPIE, 2001, 4442: 135-145.