

doi:10.3788/gzxb20134203.0278

近红外微弱光信号检测镜头的研制

曾水生, 王敏, 刘雅丽, 兰明强

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要:运用 ZEMAX 设计了一款大孔径、小畸变微弱光信号检测镜头,与高灵敏度近红外 CCD 图像传感器匹配,实现了对微弱单态氧¹O₂ 信号的实时、快速、高准确度的检测。检测镜头相对孔径 1 : 0.86, 半像高为 6.3 mm, 光谱范围为 1 250~1 290 nm, 放大倍率为 1X, 畸变小于 0.1%。运用 AutoCAD 设计光学系统的机械结构,采用双高斯对称式结构以降低成本,手动聚焦、直插式滤片切换机构方便实验的调节,检测镜头研制成功并在实验中采集到较好的微弱单态氧¹O₂ 信号。

关键词:近红外微弱光信号; 光学系统; 机械机构; 检测镜头; 单态氧¹O₂

中图分类号:O439; TH74 文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)03-0278-4

Developed on the Near-infrared Weak Optical Signal Detection Lens

ZENG Shui-sheng, WANG Min, LIU Ya-li, LAN Ming-qiang

(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education,
College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A weak optical signal detection lens is designed by optical design software - ZEMAX. The optical system requires small distortion and large relative aperture, which can match with the near-infrared CCD image sensor, in order to realize real-time, fast, high-precision detection of the weak singlet oxygen signal. The optical system parameters are relative aperture 1 : 0.86, semi-image high 6.3 mm, spectral range(1 250~1 290 nm), magnification 1X, distortion<0.1%, and manual focus. On the other hand, the mechanical structure of the optical system is design using the software-Auto CAD. The symmetrical structure is used to reduce costs and independent filter switching mechanism to facilitate the adjustment of the experiment. The detected lens successfully collects better weak singlet oxygen signals in the research experiments.

Key words: Near infrared weak optical signal; Optical system; Mechanical structure; Detection lens ;Singlet oxygen¹O₂

0 引言

近几十年来,在研究宏观和微观世界的过程中,科学家不断开发能把淹没在噪音中的大量有用信息检测出来的理论和方法,通过不断地系统化、完整化,从而形成了一门新的微弱信号检测技术。其中,微弱光信号检测是弱信号检测最重要的一个分支^[1]。

微弱光信号检测具有检测准确度高、非接触式测量,对检测对象不会造成任何损伤、可用于活体的实时监测、快速检测、远距离检测等优点,被广泛地

用于工业生产和科学研究等领域^[2]。比如利用近场光学大幅度提高存储密度,需对近场光盘记录中光学头读出的微弱光信号进行精确检测^[3];在光纤通讯领域,需要对传输终端的微弱光信号功率的高准确度检测^[4]。

微弱光信号检测技术在各领域的广泛运用,应用不同的检测方法,如光幕测速法中微弱光信号的边沿提取法^[5]、光子计数系统用于极微弱光信号现象的研究和某些工业精密测量^[6]、用数字示波器对光电二极管产生的微弱光信号数据采集^[7]等。

本文根据国家自然科学基金(No. 60978070)

基金项目:国家自然科学基金(No. 60978070)资助

第一作者:曾水生(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计与加工. Email:zengshuisheng@yahoo.cn

导师(通讯作者):王敏(1963—),女,高级工程师,主要研究方向为光学技术工艺及产品的研究开发. Email:mwang@fjnu.edu.cn

收稿日期:2012-09-26;录用日期:2012-11-19

“光动力学疗法的单态氧剂量学研究”项目要求,设计一款近红外微弱光信号检测镜头,实现对微弱单态氧¹O₂信号的实时、快速、高准确度的检测.

1 近红外微弱光信号检测镜头的光学设计

基于多通道计数器的单态氧(¹O₂)发光检测系统中,样品经过激光照射在样品上,产生微弱的¹O₂发光信号.¹O₂发光光子在经过一个窄带滤光片和光学传输系统后入射到光电倍增管的光阴极面上,通过光电倍增管光电转换之后,对输出的离散电信号进行综合处理^[8].其中光学系统收集和传输¹O₂光信号的质量直接影响整个检测系统,所以对光学传输系统设计指标要求很高.

1.1 光学设计指标

实验表明¹O₂的寿命主要取决于它所处的微环境,测量值在1~100 μs^[8],辐射极其微弱,衰减速度特别快,要求光学系统有大的相对孔径,以保证光学系统的进光量,提高光学系统的收集效率.同时为了保证传输信号的高质量,不引起信号失真,要求光学传输系统畸变小、像质高.另外实验环境和信号采集端光谱信号非常复杂的,¹O₂发光光子辐射极其微弱,本文对采集到得信号经过(1 270±20 nm)窄带滤光片滤光,再通过光学系统进行收集和传输,因此选取光学系统的谱线范围1 250~1 290 nm.最后综合考虑窄带滤光片的通光面积和光电倍增管光阴极的尺寸,确定物像放大倍率1X,半像高为6.3 mm.综合以上要求,¹O₂微弱光信号检测摄像镜头的光学设计指标如表1.

表1 光学系统设计指标

Table 1 Optical system design index

Designa index	Value
EFFL/mm	58
Relative aperture	≤1
Distortion/(%)	<0.1(all field)
Image height/mm	12.6
Magnification	1X
Image quality(MTF)/(lp·mm ⁻¹)	≥0.3(all field)
Spectral range/mm	1 250~1 590
Interface	M12×0.5

1.2 光学系统的优化设计

根据像高和相对孔径的目标值选取大孔径双高斯初始结构,运用ZEMAX光学设计软件进行优化设计.首先对原初始结构的镜头进行缩放,使其达到目标半像高6.3 mm;接着设置变量,建立优化函数,优化过程中除了实现光学技术指标,还要考虑到镜头的加工工艺问题^[9],比如,透镜的定心准确度、

磨边余量、半径和中心厚度不能太小、光学玻璃材料的价格和化学性质、足够的空气间隔来保证隔圈的厚度等.

1.3 光学系统的结果分析

经过优化设计,最终得到的近红外微弱光信号检测摄像镜头的各项技术指标为焦距58.31 mm,相对孔径1:0.86,半像高为6.3,光谱范围为1 250~1 290 nm,放大倍率为1X,畸变最大值0.085%,在空间频率30 lp/mm处各视场的光学传递函数MTF均大于0.3,各项性能特征参量达到或优于设计指标.

由图1可见,近红外微弱光信号检测光学系统左右结构完全对称,光阑位于光学系统中间,物像对称.这样设计的优点是慧差、畸变和倍率色差这三种垂轴像差,左右两半部分大小相等、符号相反,自动消除.

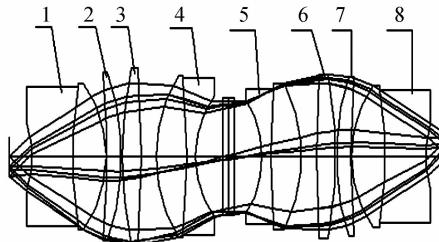


图1 光学系统

Fig. 1 Layout of optical system

图1中,主光线并未全部通过孔径光阑中心,因为系统存在光阑像差.但本系统针对微弱光信号的收集、传输,保证微弱光信息都能精确聚焦在对应的

表2 光学系统镜片材料和透过率系数

Table 2 Optical system lens material and transmittance coefficient

Lens number	Lens material	Transmittance coefficient/ (%)
1	H-ZF52A	99.53
	H-LAF3A	99.60
2	H-ZF52A	99.55
	H-LAF3A	99.52
3	H-LAF3A	99.54
	H-LAF3A	99.53
4	H-LAF3A	99.52
	H-ZF2	99.55
5	H-ZF2	99.61
	H-LAF3A	99.48
6	H-LAF3A	99.50
	H-LAF3A	99.49
7	H-ZF52A	99.53
	H-ZF52A	99.56
8	H-LAF3A	99.57
	H-ZF52A	99.50

靶面,无需成像,对于实验结果影响甚微。另外图1中从胶合组1、4、5、8以及单镜片3、4、6、7均采用成都光明玻璃库,同时在镜片与空气接触表面镀上增透膜,镜片材料和透过率系数如表2。

表2列出了各镜组与空气相接触表面的透过率系数,进行累乘,得到整个系统的透过率将近93.83%,即系统的光学效率达到90%以上。

图2表示镜头的场曲和畸变。(b)图的曲线显示各谱线在最大视场处的畸变值均小于0.1%,优于设计指标,对于一般的光学系统,在相对畸变小于3%人眼感觉不出像的变形。(a)图的曲线可以看出摄影镜头各视场的场曲、位置色差都在0.2以内,说明像面弯曲和像散都得到了很好的校正。

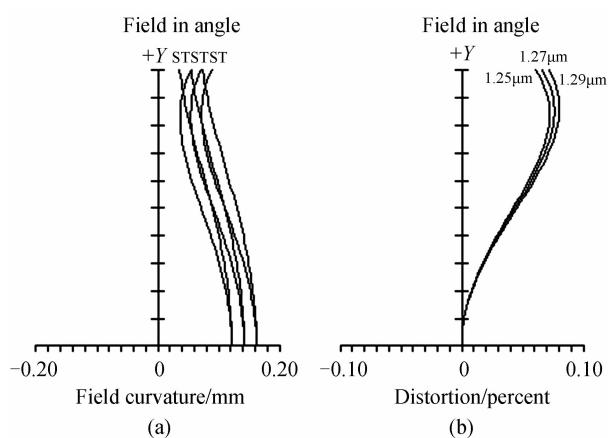


图2 场曲和畸变

Fig. 2 Curvature and distortion

图3反映出所涉及近红外检测镜头在空间频率30 lp/mm处,调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)值大于等于0.3,同时MTF曲线平直,包围面积较大,全视场范围内的成像质量符合设计指标。

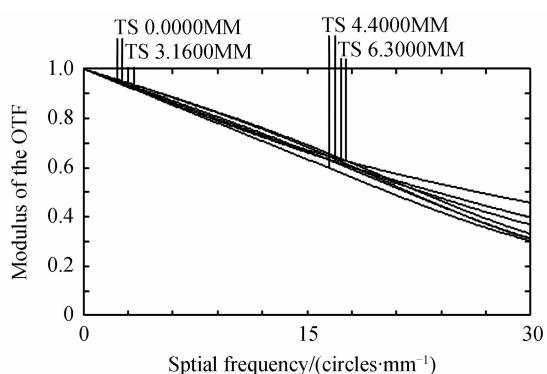


图3 MTF曲线

Fig. 3 MTF curves at different FOV

从加工工艺方面来看,各透镜的加工工艺良好,透镜直径小于50 mm,正透镜边缘厚度最小为2.15 mm,负透镜中心厚度最小为3.86 mm,各镜片的磨边定心准确度较高,弯月形透镜定心系数K均大于0.26,定心准确度好。

1.4 光学系统的容差分析

近红外微弱光信号检测镜头光学设计完成后,需要对光学系统进行容差分析。主要考虑到任何零件的加工都存在误差,需要对加工零件规定公差范围。通过ZEMAX光学设计软件对近红外微弱光信号检测光学系统的容差模拟分析,显示系统中各部分空气间隔对光学系统的影响程度相似,综合考虑生产成本、加工工艺以及光学系统的成像质量,确定±0.02 mm作为各空气间隔的公差范围。透镜的厚度公差范围控制在±0.03 mm均可达到光学系统的设计指标。

2 $^1\text{O}_2$ 微弱光信号检测光学镜头的结构设计

对于微弱光信号检测光学系统的机械结构设计,本文综合考虑了生产成本、加工工艺、成像质量、装配调试各方面的因素。

2.1 $^1\text{O}_2$ 微弱光信号检测光学系统的装配

图4为结构光信号检测光学系统的结构设计。图中,1为前镜筒,2为镜片隔圈1,3为镜片隔圈2,4为镜片隔圈3,5为压圈1,6为波片压圈2,7为波片座盖板,8为螺钉,9为波片座,10为后镜筒,11为法兰盘,12为导钉,13为手轮,14为手轮压圈,15为连接座。

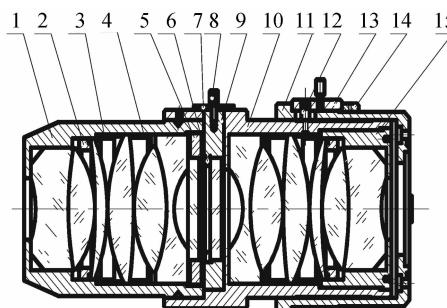


图4 光学系统的装配图

Fig. 4 The assembly drawing of the optical system

图5是研制成功的检测镜头在实验装置中的照片。图6是检测镜头在系统中采集和传输的近红外单态氧信号,图中间的亮线是一个模拟血管培养液在激发光的作用下,发出的近红外微弱信号光。



图5 检测镜头在系统中的实物

Fig. 5 Image with the detection lens in the system



图 6 检测镜头检测到的近红外微弱光信号
Fig. 6 Detected weak near-infrared optical signal by the detection lens

2.2 $^1\text{O}_2$ 微弱光信号检测光学系统结构设计特点

- 1) 镜头分前后镜组,内部结构基本对称,减少机械零件类型,减少加工成本。
- 2) 波片装置独立设计,以拔插方式与光学系统配合,方便实验中波片的更换。
- 3) 法兰盘的连接设计,便于单态氧 $^1\text{O}_2$ 微弱光信号检测光学系统与后面探测系统的连接。
- 4) 设计手轮调节装置的,实现整个光学检测镜头与后面探测系统的精确调聚和对焦。
- 5) 整个光学系统分为前后两组,独立装调,然后前后镜筒通过光滑圆柱面配合,端面定位,保证整个光学系统的装配质量和调节准确度。

2.3 近红外微弱光信号检测光学系统尺寸、配合准确度要求

为了保证光学系统的成像质量,需要对系统的机械零件和光学零件进行了准确度设计^[10-11]。光学系统的孔轴配合选用 6 级准确度,其余选用 7 级准确度。配合面的表面粗糙度选择 3.2 准确度,其它部分表面粗糙度选择 6.3 准确度。

3 结论

本文根据国家自然科学基金(No. 60978070)“光动力学疗法的单态氧剂量学研究”项目科研需求,设计并研制了一款用于 $^1\text{O}_2$ 微弱光信号检测镜头。经检测镜头各项指标:焦距 58.31 mm, 相对孔径 1:0.86, 半像高为 6.3 mm, 光谱范围为 1 250~1 290 nm, 放大倍率为 1X, 畸变最大值 0.085%, 在空间频率 30 lp/mm 处各视场的光学传递函数 MTF 均大于 0.3。目前镜头已投入科研实验使用,效果达到预期目标。

参考文献

- [1] XU Da-chao, WANG Zhi-jian, SONG Tao. The detection of weak optical signal[J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2009, **16**(3): 119-120.
徐大超,王志坚,宋涛.微弱光信号检测[J].仪器仪表用户,2009,**16**(3):119-220.
- [2] HE Ling-ling. Research on an acquisition and process system of weak photoelectric signals[D]. Hefei: Anhui University, 2010: 1-3.
何玲玲.微弱光电信号采集与处理系统的研究[D].合肥:安徽大学,2010:1-3.
- [3] XIA You-xin, PEI Xian-deng, HUANG Hao, et al. Feeble light signal examining [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, **38**(19): 28-29,50.
夏又新,裴先登,黄浩,等.微弱光信号检测[J].计算机工程与运用,2002,**38**(19):28-29,50.
- [4] CHEN Yong-tai, XU Xiao-dong. Technology precision measures for weak light signal power[J]. *Journal of WuHan University of Technology*, 2006, **28**(11): 122-124.
陈永泰,徐晓东.微弱光信号功率的高准确度测量技术[J].武汉理工大学学报,2006,**28**(11):122-124.
- [5] WANG Zhuang, CAI Huai-yu, HUANG Zhan-hua, et al. Analysis and detection of weak optical signal in light curtain velocimetry[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2012, **25**(04): 505-509.
王壮,蔡怀宇,黄战华,等.光幕测速法中微弱光信号的分析与检测[J].传感技术学报,2012,**25**(04):505-509.
- [6] WU Li-jun. Test the faint current on single photon count experimentation system[J]. *Physical Experiment of College*, 2011, **24**(03): 23-25.
吴丽君.用单光子计数系统检测微弱光信号[J].大学物理实验,2011,**24**(03):23-25.
- [7] TANG Guang-hui, WANG Rui. Measurement of weak photoelectrical by using a digital oscilloscope[J]. *Science & Technology Information*, 2010, **21**: 13-13,17.
唐光辉,王锐.数字示波器实现微弱光信号的测量[J].科学信息,2010,**21**:13-13,17.
- [8] CHEN De-fu, LIN Hui-yun, HUANG Tong-qing, et al. Detection technique for single oxygen luminescence with multichannel scaler[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, **26**(4): 54-58.
陈德福,林慧愠,黄通情,等.基于多通道计数器的单态氧发光检测技术[J].福建师范大学学报(自然科学版),2010,**26**(4):54-58.
- [9] WANG Min. Design of industrial TV micro-lens with large visual field and high resolution[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(01): 85-87.
王敏.大视场高分辨率显微工业电视镜头设计[J].光学与光电子技术,2008,**6**(01):85-87.
- [10] 裴祖荣.精密机械设计基础[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [11] 甘永立.几何量公差及检测[M].北京:机械工业出版社,2001.