

大气痕量硫荧光采集光路设计与仿真

苏杭, 王桂梅*, 杨立洁

河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038

摘要 大气中二氧化硫(SO₂)浓度很低,发出的荧光信号很弱,直接影响了 SO₂ 浓度的检测精度,并且传统荧光采集光路长,这阻碍了仪器的微型化发展。为提高荧光信号的采集效率以及仪器的检测精度,缩短传统光路,针对荧光随机性发散分布特征,利用 ZEMAX 软件进行痕量 SO₂ 荧光信号采集光路的设计,并与传统荧光采集光路进行对比仿真分析。仿真结果表明:优化后的荧光采集光路对荧光的采集效率约为 22.6%,比传统荧光采集光路的采集效率高 4 倍,透镜组的像方主点到最佳采集点的距离减少了 29.17%。优化后的光路有利于进一步实现已有大气痕量硫检测仪器的小型化改进与检测精度的提高。

关键词 测量; 痕量二氧化硫气体; 荧光采集光路; ZEMAX 软件仿真; 效率

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.051203

Design and Simulation of Fluorescence Acquisition Light Path for Atmospheric Trace Sulfur

Su Hang, Wang Guimei*, Yang Lijie

College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

Abstract The concentration of SO₂ gas in the atmosphere is very low, and therefore, the emitted fluorescent signal is weak, directly impacting the detection accuracy of SO₂ gas concentration. Owing to these issues, the optical path for traditional fluorescence collection is long, hindering the development of the miniaturization of instrument. To improve the collection efficiency of fluorescence signals and the detection accuracy of the instrument by shortening the traditional optical path, we used the ZEMAX software to design an optimized trace SO₂ fluorescence signal collection optical path for a random divergent distribution of fluorescence. We then compared the results from this path with those from the traditional fluorescence collection optical path. Simulation results show that the collection efficiency of optimized fluorescence collection optical path is approximately 22.6%, which is 4 times that of the traditional fluorescence collection optical path. The distance from the image-based main point of the lens group to the optimal collection point is reduced by 29.17%. The optimized optical path in this paper is beneficial for further improvements in the miniaturization and detection accuracy of the existing atmospheric trace sulfur detection instrument.

Key words measurement; trace SO₂ gas; fluorescence collection light path; ZEMAX software simulation; efficiency

OCIS codes 120.4640; 170.6280; 010.1120

1 引言

目前,大气痕量硫^[1]浓度的检测方法主要有电导法、极谱法、电化学法、紫外荧光法等,其中紫外荧光法具有抗干扰能力强、分辨率高、选择性好、检测

速度快、无需化学消耗品的优点,因而应用广泛。

大气 SO₂ 紫外荧光法的检测基于斯托克斯发光机理,用波长较短的光可激发出波长较长的光,从而可以激发出能量低的光子^[2-4]。但大气中 SO₂ 浓度较低,且 SO₂ 分子被特定波长的紫外光激发后,

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-07-28; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 紫外荧光法大气微型站 SO₂ 分析模块研发

* E-mail: shyzq9111@163.com

产生的荧光光子是向各个方向发散传播的,以致部分荧光光子会被反应室壁吸收或因发生淬灭等现象消耗掉,只有较少的荧光通过透镜会聚,使得荧光信号采集率较低,这成为限制仪器精确度提高的关键因素。

目前多以提高紫外光强度的方法,同时采用高灵敏度的光电倍增管(PMT)提高对 SO_2 浓度的检测精度。这样使得市场上出现的检测仪器存在采集光路长、仪器体积大、成本高等不足,不利于实现紫外荧光法检测大气 SO_2 浓度仪器的小型化和低成本化,因此利用 ZEMAX 软件设计大气痕量硫的荧光采集光路,并进行收集效率的仿真,可为已有大气痕量硫检测仪器的小型化改进以及检测精度的提高提供技术参考。

2 痕量硫分子荧光 ZEMAX 模型

ZEMAX 软件在光学组建设计和照明系统的照度分析中具有较广的应用,同时也是一款利用光线追迹法模拟折射、反射、衍射等各种序列、非序列(NSC)光学系统的-optical design and simulation software^[5]。基于 ZEMAX 软件建立大气痕量硫(SO_2 分子能吸收紫外光的最佳波段约为 214 nm,对应的荧光在 330 nm 左右时较强^[6])的分子荧光发光模型,模拟荧光信号的特点。图 1 为荧光物质模型和光线追迹情况,其中荧光物质半径为 0.05 mm 的球体作为荧

光物质,平行激发光(波长为 214 nm)从左侧照射。为方便分析,光源发出的光线选用 Sobol 抽样法^[7],该方法能更有效地生成符合“最佳随机”统计学的光线分布。设置圆形光源发光区域的 X 轴半宽(X-half-width)值为 0.1 mm, Y 轴半宽(Y-half-width)值为 0.1 mm,分析光束 10 万条,功率为 2 W。痕量硫分子被激发产生的荧光仿真模型如图 1 所示。

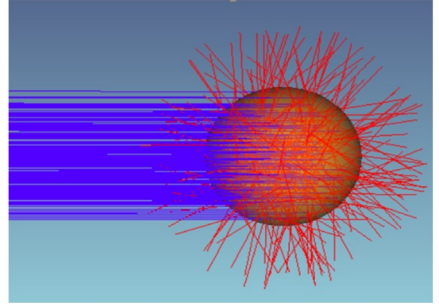


图 1 荧光物质模型和光线追迹情况

Fig. 1 Fluorescence material model and situation of light tracing

采用 ZEMAX 软件中分析能力较为强大的矩形探测器,设定探测器材料为吸收型, X、Y 轴半宽均为 1 mm,像素为 2048×2048 。由探测器分析结果得出:当以功率为 2 W 的特定波长的平行光照射时,荧光物质被激发后产生的荧光的峰值辐照度约为 $7.0871 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$,总功率约为 $2.1029 \times 10^{-1} \text{ W}$,如图 2 所示。

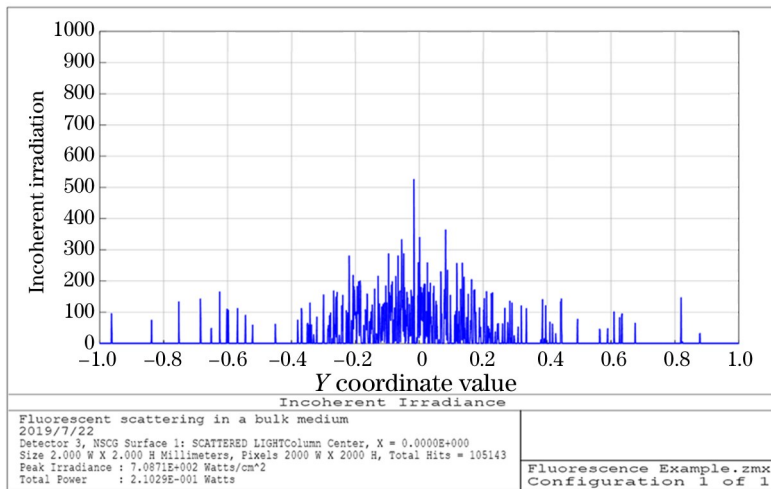


图 2 荧光信号探测结果

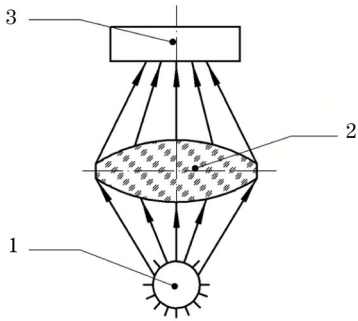
Fig. 2 Result of fluorescence signal detection

3 荧光采集光路的设计与仿真

SO_2 分子被特定波长的紫外光激发,产生的荧光散射方向随机性强。为了收集更多的荧光,将荧

光会聚到探测器,同时降低背景噪声,这是提高 SO_2 气体分析检测精度的关键。若从仪器微型化的方面考虑,可将整体荧光采集光路缩短,这不仅不影响分析设备的精度,更有利于仪器小型化的改进。目前,

美国 API 公司、国内先河环保科技股份有限公司的痕量 SO₂ 分析仪的荧光采集均采用单一双凸透镜收集荧光的方式^[8],如图 3 所示。



1: fluorescent photon; 2: double convex lens; 3: photodetector

图 3 传统荧光采集光路示意图

Fig. 3 Schematic of traditional fluorescence collection light path

大气痕量 SO₂ 分子产生的荧光光线发散角大、随机性强,而传统的荧光采集光路在采用单一双凸透镜时存在像差大、荧光采集效率低、光路长等不足。为了能够更多地会聚光线,改善荧光光线发散角大的问题,选用抛物面反射镜改变光线方向的方法^[9],以提高对大发散角荧光的采集效率。对痕量 SO₂ 反应室尺寸进行分析,并对比市场上抛物面反射镜的销售情况,选取直径为 25.4 mm、曲率为 50 mm、焦距为 25 mm、中心厚度为 3 mm 的抛物面反射镜。图 4 中 a 为荧光模型,置于抛物面反射镜 b 的焦点处。为了更真实地对其进行仿真,将 a 设置为球体光源,经光线追迹得到的结果如图 5 所示,可以看出,抛物面反射镜能够将大发散角的光线改变成近似平行的光线,能起到很好的对大发散角光线的准直会聚效果。

为了解决传统荧光采集光路存在的像差较

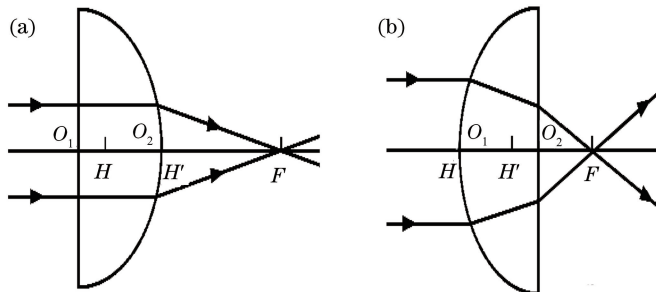
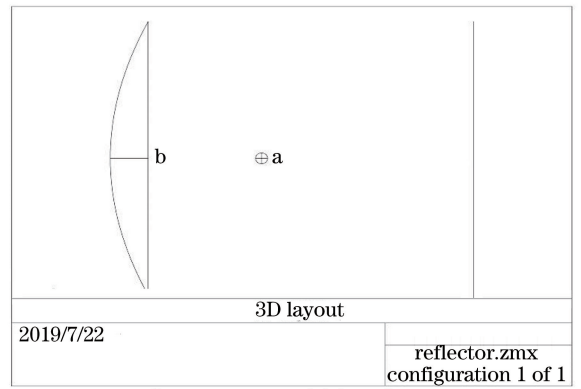


图 6 平凸透镜基点图。(a)右凸;(b)左凸

Fig. 6 Base point diagrams of plano-convex lens. (a) Right-convex; (b) left-convex

图 6(a)为右凸透镜,其左侧曲率半径 r_1 取无穷大,左侧曲率半径为 r_2 ,则由焦距公式可得

$$f = \frac{nr_2}{n-1} \quad (1)$$



a: fluorescence model; b: reflector

图 4 反射镜与荧光物质 NSC 三维(3D)模型

Fig. 4 Reflector and fluorescence NSC three-dimensional (3D) model

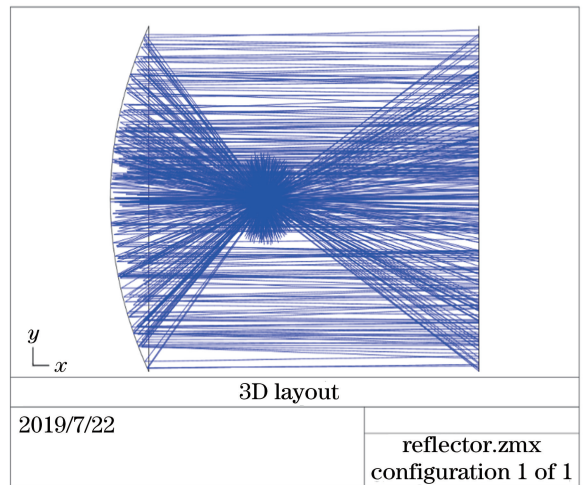


图 5 抛物面反光镜对大发散角光线作用的 NSC 3D 仿真

Fig. 5 NSC 3D simulation of parabolic reflector on light with large divergence angle

大、光路较长的问题,拟采用平凸透镜组进行光路优化设计。平凸透镜具有方向性,对其的具体分析如下^[10-12]。

图 6(b)为左凸透镜,其右侧曲率半径 r_2 取无穷大,则由焦距公式可得

$$f = \frac{nr_1}{n-1}, \quad (2)$$

式中: n 为透镜的折射率; f 为透镜的焦距。

根据图 6,并通过计算发现,对于平凸透镜的像方主点 H' 到焦点 F 的距离,右凸透镜大于左凸透镜。若将平凸透镜以图 7 所示的平凸透镜组合后,当光通过左侧透镜后,再经右侧透镜时能够实现光线的再次会聚,也能够缩小单个平凸透镜的会聚点、扩大视场角、减小像差、增加荧光采集区域。为方便

ZEMAX 软件建模仿真,选取市场上较为常见且紫外透过率较好的 SiO_2 材质,一种是直径为 25.4 mm、有效焦距为 40 mm、曲率半径为 20.17 mm、中心厚度为 10 mm 的平凸透镜,另一种是直径为 25.4 mm、有效焦距为 44 mm、曲率半径为 22.63 mm、中心厚度为 10 mm 的双凸透镜。此时,若双平凸透镜组与单双凸透镜的有效焦距一样,则仿真结果如图 7 所示,矩形探测器成像分析结果如图 8 所示。结果表明:单双凸透镜探测器的成像点较为分散,像差较大;双平凸透镜组探测器成像点较为集中,呈较为规整的圆形,这能有效降低光路的像差影响。

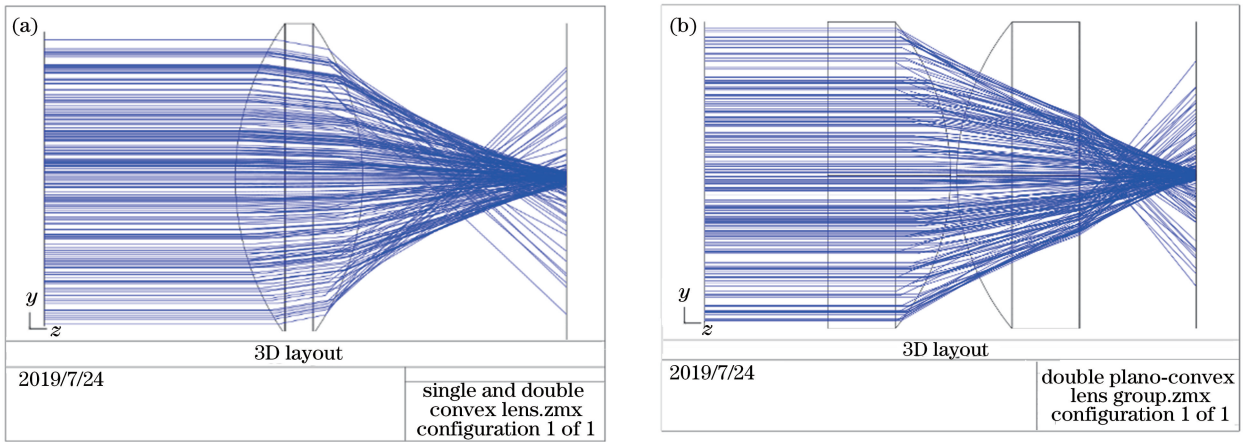


图 7 等效焦距 NSC 3D 仿真。(a) 单双凸透镜;(b) 双平凸透镜组

Fig. 7 NSC 3D simulation with equivalent focal length. (a) Single and double convex lens; (b) double plano-convex lens group

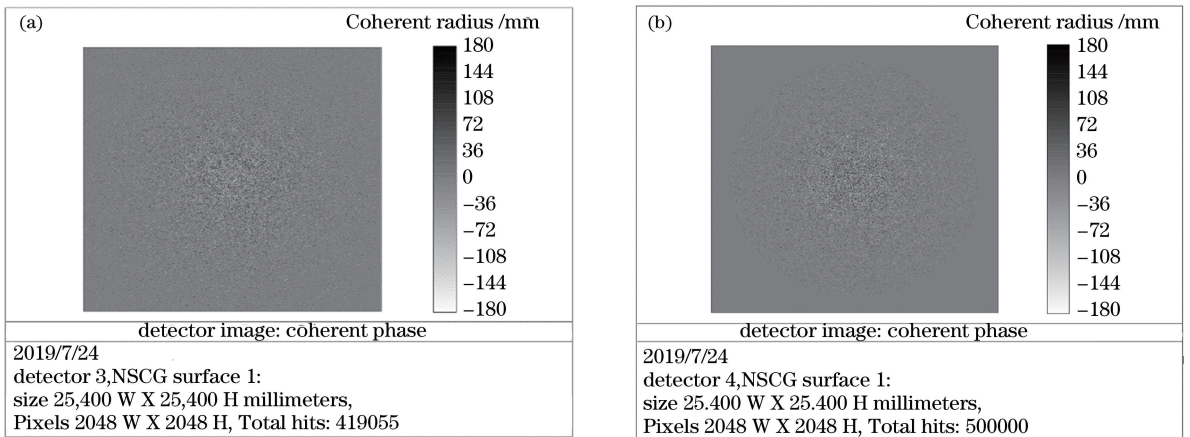


图 8 矩形探测器成像分析图。(a) 单双凸透镜;(b) 双平凸透镜组

Fig. 8 Analysis diagrams of rectangular detector imaging. (a) Single and double convex lens; (b) double plano-convex lens group

当采用焦距均为 44 mm 的单双凸透镜与双平凸透镜组时,仿真结果如图 9 所示。经 ZEMAX 软件坐标测量得出:单双凸透镜的像方主点与最佳采集点的距离为 24 mm;双平凸透镜后像方主点与最佳采集点的距离为 17 mm;通过对比分析可得,优

化后的双平凸组合透镜的像方主点到最佳荧光采集点的距离比传统单双凸透镜小 7 mm,减小了 29.17%。通过多方面分析可得,抛物线反射镜与平凸透镜组合的方法较符合荧光采集光路会聚与减小反应室结构尺寸的要求。

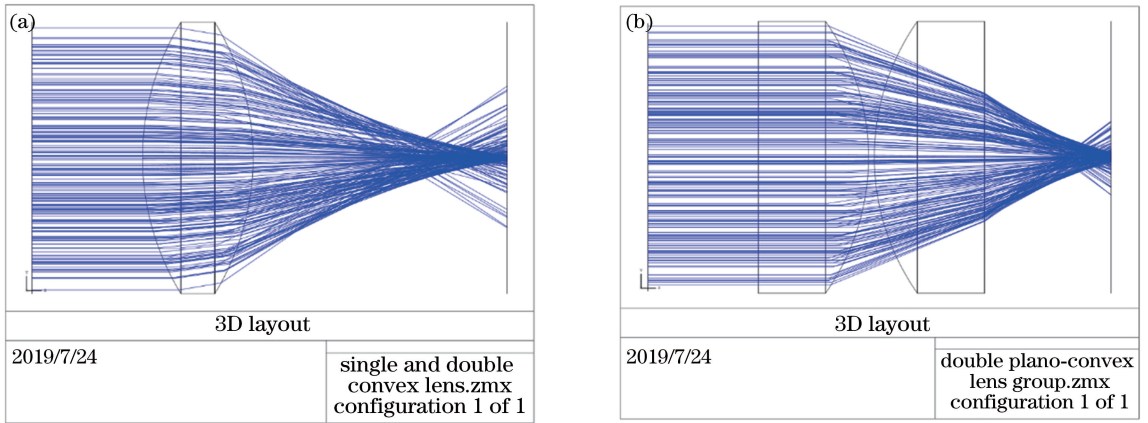


图9 等焦距透镜 NSC 3D 仿真。(a)单双凸透镜;(b)双平凸透镜组

Fig. 9 NSC 3D simulation with parfocal lenses. (a) Single and double convex lens; (b) double plano-convex lens group

实际上荧光物质属于离轴光源,应以获取的轴线上的荧光物质为代表进行整体荧光采集光路的仿真,并对比分析该优化光路的效果。传统荧光采集光路与该优化设计光路的 NSC 阴影模型如图 10 所示。为更好地分析所设计的荧光采集光路的特点,采用分子功率为 2.1029×10^{-1} W 的荧光,并结合传统荧光采集光路进行矩形探测器仿真对比分析,其

效果如图 11 所示。图 11(a)为用传统荧光采集光路进行仿真后,利用矩形探测器检测的结果,其总荧光功率约为 1.0470×10^{-2} W,荧光采集效率约为 5%。图 11(b)为优化后的荧光采集光路的仿真检测结果,其总荧光功率约为 4.3979×10^{-2} W,荧光采集效率约为 22.6%,比传统荧光采集光路的采集效率高 4 倍。

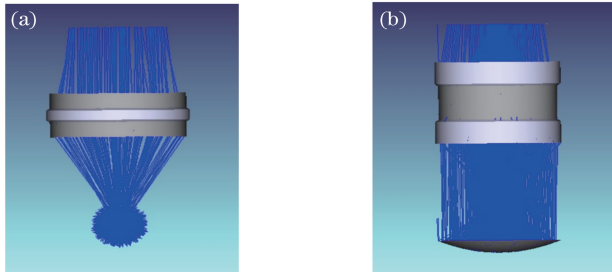


图 10 NSC 阴影模型图对比。(a)传统荧光采集光路;(b)优化后的荧光采集光路

Fig. 10 Comparison of NSC shadow model diagrams. (a) Traditional fluorescent collection light path; (b) optimized fluorescent collection light path

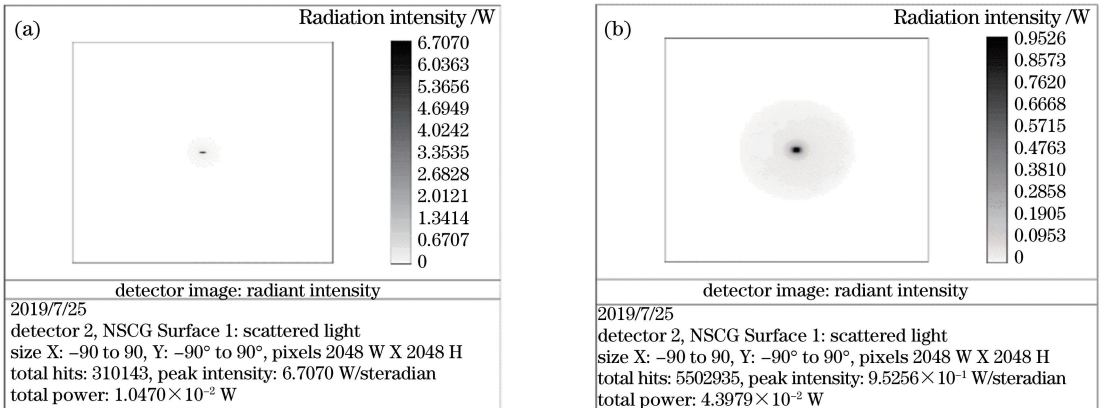


图 11 矩形探测器对比分析图。(a)传统荧光采集光路;(b)优化后的荧光采集光路

Fig. 11 Comparative analysis diagram of rectangular detector. (a) Traditional fluorescent collection light path; (b) optimized fluorescent collection light path

4 结 论

通过分析痕量硫检测中荧光信号的特点以及影响荧光采集效率的因素,发现大发散角的荧光和较长的荧光采集光路是制约检测仪精度和微型化的关键。为此采用抛物面反射镜会聚大发散角荧光的方式,以提高荧光采集效率,拓展双平凸透镜组的应用,缩短光路,并结合 ZEMAX 软件完成了整个大气痕量硫荧光采集光路的设计建模与仿真。仿真结果表明:优化后的荧光采集光路对荧光的采集效率约为 22.6%,比传统荧光采集光路的采集效率高 4 倍,其透镜组的像方主点到最佳采集点的距离减少了 29.17%,这可为已有大气痕量硫检测仪器的小型化改进、检测精度的提高提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] Zhao Q C, Yang Y, Li Y F, et al. Development status and trends of atmospheric trace gas remote sensing instruments [J]. Chinese Optics, 2013, 6(2): 156-162.
赵其昌, 杨勇, 李叶飞, 等. 大气痕量气体遥感探测仪发展现状和趋势[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 156-162.
- [2] Yang C P. Theories and technique studies on ultraviolet fluorescence detection of sulfur dioxide in air at the parts per billion level [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2002.
杨初平. ppb 级大气二氧化硫紫外荧光检测理论与实现技术研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2002.
- [3] Yang C P, He Z J, Yang G L, et al. Study on the optical performance of cell for the detection of sulfur dioxide in air [J]. Optical Technique, 2003, 29(1): 39-41.
杨初平, 何振江, 杨冠玲, 等. 大气二氧化硫检测反应室的光学特性研究[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 39-41.
- [4] Bai X M. Design of atmospheric trace sulfur detector based on ARM11 [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
白雪美. 基于 ARM11 的大气痕量硫检测仪的研制[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017
- [5] Lin X Y. Super learning manual for ZEMAX optical design [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 286-390.
林晓阳. ZEMAX 光学设计超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 286-390.
- [6] Wang G M, Li S C. Optimal design of light source system for sulfur dioxide detector [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011203.
王桂梅, 李世超. 二氧化硫检测仪光源系统的优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011203.
- [7] Huang S D. ZEMAX user manual in Chinese [M]. Nanjing: Wavelab Scientific, 2010.
黄胜弟. ZEMAX 中文使用手册 [M]. 南京: 光研科技, 2010.
- [8] Wang Q, Duan Z L, Zheng L Y, et al. Fluorescence reaction detector and the sulfur dioxide automatic monitoring device using the reaction detector: 201310670090. 0 [P]. 2014-03-26.
王强, 段兆丽, 郑雷玉, 等. 一种荧光反应检测器以及使用该反应检测器的二氧化硫自动监测装置: 201310670090. 0 [P]. 2014-03-26.
- [9] Wang Y, Chen P, Gong C, et al. Design and simulation of optical path for collecting fluorescence signal based on TracePro software [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1117001.
王岩, 陈平, 龚诚, 等. 基于 TracePro 软件的荧光信号光收集光路的设计与仿真[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1117001.
- [10] Yang F, He C, Zhang X S. Design and analysis of a primary-secondary system for LED collimating illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082201.
杨帆, 何川, 张旭升. 一种主次镜组合 LED 准直照明系统设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082201.
- [11] Lu J, Han L, Qu Y J. Measurement of the base point of a plano-convex lens with a shifting microscope [J]. Physics Experiment, 2014, 34(10): 8-11.
卢杰, 韩力, 曲延吉. 用移测显微镜测量平凸透镜的基点[J]. 物理实验, 2014, 34(10): 8-11.
- [12] Chen Z, Ni M. Measurement and research on focal length of planoconvex lens [J]. Physics Bulletin, 2018(4): 71-75, 78.
陈舟, 倪敏. 平凸透镜焦距的测量与研究[J]. 物理通报, 2018(4): 71-75, 78.