

doi: 10.3788/gzxb20134201.0074

面阵 CMOS 光纤光谱仪研制

孙小小, 黄梅珍, 汪洋

(上海交通大学 物理系 光科学与工程研究中心, 上海 200240)

摘 要: 研制了一种以非对称交叉 Czerny-Turner 光路为结构的互补金属氧化物半导体小型光纤光谱仪样机, 探讨了以面阵互补金属氧化物半导体图像传感器作为光电探测器的光度测量准确性和线性问题, 分析了杂散光对吸光度测量的影响. 结论是: 通过光强定标和非线性修正后, 互补金属氧化物半导体小型光纤光谱仪可以满足一般的应用要求, 其光谱测量范围为 380~800 nm, 光谱带宽约 6 nm, 积分时间 1~500 ms, 波长准确度 ± 1 nm, 光度准确度 ± 0.03 AU. 该光谱仪具有小型化、低成本、速度快等优点.

关键词: 互补金属氧化物半导体; 吸光度; 光强定标

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0074-5

Development of Miniature CMOS Fiber Optic Spectrometer

SUN Xiao-xiao, HUANG Mei-zhen, WANG Yang

(Optical Science & Engineering Research Center, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The biggest advantage of a CMOS area array sensor is that it is less expensive than a CCD sensor. A miniature spectrometer use an area array CMOS sensor MT9M001C12STM as detector was developed. The prototype uses an asymmetric cross Czerny-Turner optical structure. Its photometric accuracy and linearity were investigated, and the photometric deviation arise from stray light was analyzed. The elementary performance was tested as follows: wavelength range 380~800 nm, the integration time can be selected from 1 ms to 500 ms according to the light intensity, spectral bandwidth 6 nm, wavelength accuracy ± 1 nm, photometric accuracy ± 0.03 AU. Results showed that after calibration and nonlinear correction, this CMOS spectrometer is capable for routine fast analysis.

Key words: CMOS; Absorbance; Intensity calibration

0 引言

光谱仪器是光学仪器的重要组成部分,它是应用光学技术及光谱技术原理,对物质结构和成分进行观测、分析和处理的基本设备,具有分析准确度高、测量范围大和样品用量少等特点.目前,国内生产光谱仪的企业还采用电荷耦合器件 CCD (Charge-Coupled Device, CCD) 线阵传感器作为探

测器的方法,而国外一些公司已经开发出了基于互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)线阵传感器的便携式微型光纤光谱仪,比如荷兰的 Avantes 公司已经开发出的 AvaSpec-1024 光纤光谱仪,和美国海洋光学开发出的 STS 微型光纤光谱仪.空间分光型的光谱仪器从结构上主要分为扫描式和阵列式.扫描式的光谱仪器通常采用步进电机加丝杆的结构,通过转动光

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2012YQ180132)资助

第一作者:孙小小(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为光检测. Email: sun1100729015@sjtu.edu.cn

导师(通讯作者):黄梅珍(1966-),女,副教授,博士,主要研究方向为光检测和生物医学光学. Email: mzhuang@sjtu.edu.cn

收稿日期:2012-07-13;录用日期:2012-08-13

栅分时获得不同波长光谱的信息,探测器通常采用光电倍增管,扫描式的光谱仪测量准确度高、分辨率高、动态范围大、信噪比高等特点,但测量速度较慢,全谱扫描时间一般为数分钟.而阵列式的光谱仪器采用固定光路系统结构,无需机械运动和扫描,运用阵列型探测器进行快速的电信号扫描与测量,其最大的优势是结构简单牢固,测量速度很快,非常适于做成便携式和微型化光谱仪器.阵列式光谱仪大多采用 CCD 阵列探测器或者光电二极管阵列(Photodiode Array, PDA)探测器.

CCD 传感器具有高灵敏度、低暗电流和低噪音等优点,缺点是 CCD 传感器的系统功耗大,很难实现单片系统集成,CCD 光敏单元阵列难于与驱动电路及信号处理电路单片集成,不易处理一些模拟和数字功能,这些功能包括模/数转换器、精密放大器、存储器、运算单元等元件的功能;CCD 阵列驱动脉冲复杂,需要使用相对高的工作电压^[1-2].

采用标准的 CMOS 技术能够将图像传感器阵列、驱动和控制电路、信号处理电路、模/数转换器、全数字接口电路等完全集成在一起,可以实现单芯片系统.因此,CMOS 传感器与 CCD 传感器相比,具有功耗低、系统尺寸小、可将信号处理电路与传感器集成在一个芯片上等优点,但其暗电流和噪音较大,灵敏度较低.由于具有上述特点,CMOS 传感器适合大规模批量生产,适用于要求小尺寸、低价格、摄像质量无过高要求的应用,如保安用小型/微型相机、手机、计算机网络视频会议系统、无线手持式视频会议系统、条形码扫描器、传真机、玩具、生物显微计数、某些车用摄像系统等大量商用领域^[3].

与美国海洋光学开发的基于 CMOS 线阵传感器的 STS 微型光纤光谱仪相比,本文探讨了将 CMOS 面阵图像传感器用于光谱测量的可行性问题,并建立了一种 CMOS 光谱仪的实验样机,实验研究了 CMOS 光谱仪光度测量的非线性等问题.

1 实验系统与装置

为了研究面阵 CMOS 传感探测器应用于光谱探测的可行性,我们建立了一种验证实验装置样机,光路示意图如图 1 所示,光路采用非对称交叉 Czerny-Turner 光学结构^[4-5],这种结构彗差小,成像质量好.光源辐射出的光经光纤探头 S 进入光学系统,由球面反射镜 M_1 准直成平行光,平行光经平面光栅 G 衍射分光,衍射光谱经球面反射镜 M_2 成像在面阵 CMOS 上.

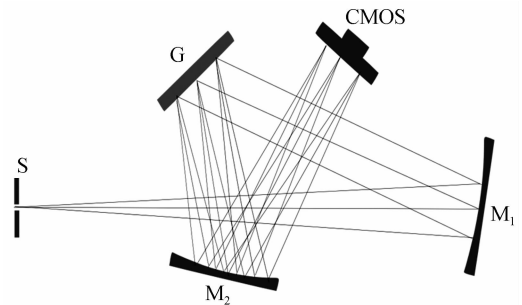


图 1 CMOS 光谱仪光路

Fig. 1 CMOS spectrometer

本文实验采用的面阵 CMOS 是 Digi-Key Corporation 生产的芯片,型号为 MT9M001C12STM,像素大小为 $5.2 \times 5.2 \mu\text{m}^2$,共 1280×1024 个像素,灵敏度 $2.1 \text{ V/lux}\cdot\text{sec} @ 550 \text{ nm}$,动态范围 62 dB,逐行扫描,采样速率 $15 \text{ f/s} (@ 1280 \times 1024)$,A/D 为 10 位,USB 输出 8 位数据.光源选用 20 W 钨灯,光栅选择 300 刻线/mm 的平面光栅.会聚球面反射镜 M_0 焦距为 $f=5 \text{ cm}$,准直球面反射镜 M_1 焦距为 $f=10 \text{ cm}$,聚焦球面反射镜 M_2 焦距为 $f=5 \text{ cm}$.该实验装置的光谱测量范围为 $380 \sim 800 \text{ nm}$,光谱带宽约 6 nm.

1.1 波长定标

CMOS 光谱仪样机把对应波长的该列像素值相加作为该处的相对光强值,利用低压汞灯进行定标的谱图与利用晶飞科技生产的型号为 FLA4000 的微型 CCD 光纤光谱仪扫描低压汞的谱图进行比较如图 2 所示.

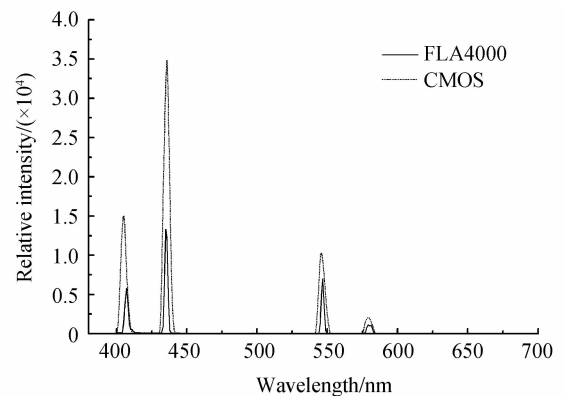


图 2 CMOS 光谱仪测得的低压汞灯谱图

Fig. 2 Low pressure mercury lamp spectrum measured by CMOS spectrometer

1.2 光谱宽度测量

利用 CMOS 光谱仪样机对不同单色光进行扫描,即可得到样机的光谱宽度.本文利用样机分别扫描波长为 532 nm、650 nm、785 nm 三个激光器的光谱,如图 3 所示,三个波段的光谱宽度均在 6 nm 之内.

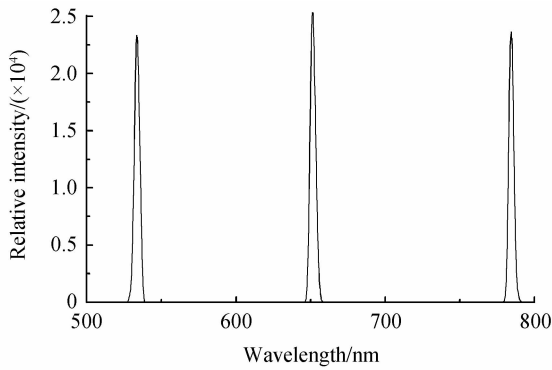


图3 CMOS光谱仪测得的激光谱图

Fig. 3 Laser spectrum measured by CMOS spectrometer

2 CMOS光谱仪光度准确性问题

2.1 光度准确性测量

由朗伯比尔定律可知吸光度的定义为

$$A = -\log \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (1)$$

式中 A 为吸光度, I_{out} 为透射光强, I_{in} 为入射光强.

为了检验 CMOS 光谱仪装置测量光度的准确度^[6]和线性度,选用三片具有不同吸光度的中性标准灰片,先用 TU-1901 双光束紫外可见光光度计测出每片灰片在两种不同波长(415 nm 和 632 nm)下的吸光度,如表 1. 然后再用本文搭建的实验装置分别测量各灰片的吸光度并进行比较,发现误差较大,说明该 CMOS 光谱仪装置的光度测量准确度无法达到测量要求. 主要原因是 CMOS 对光强响应存在非线性^[7], 因此应该对 CMOS 传感探测器的每一个像元进行光强定标和非线性修正.

表 1 由 TU1901 测得的三片中性灰片在波长 415 nm 和 633 nm 处的吸光度(测量三次取平均)

Table 1 The absorbance of three filters measured by TU1901 under 415 nm and 633 nm (take three times average)

	Filter ₁	Filter ₂	Filter ₃
415 nm	0.983	0.794	0.535
633 nm	1.093	0.707	0.558

2.2 CMOS 光强定标与修正

进行光强定标^[8]的实验光路图如图 4 所示,实验中用 650 nm 半导体激光作为校准光源,用 PM-2 型光度计测量光强值. 激光光束经过衰减器后由分束镜分成两束光,一束光投射到光度计上,另一束光投射到得 CMOS 探测器上,通过调节衰减器改变光强大小使 CMOS 读数在 0~255 之间变化,记录对应光度计上的读数,然后以光度计上的读数为纵坐标和 CMOS 的读数为横坐标进行多项式拟合. 在 650 nm 下的光强定标的拟合曲线图如图 5 所示.

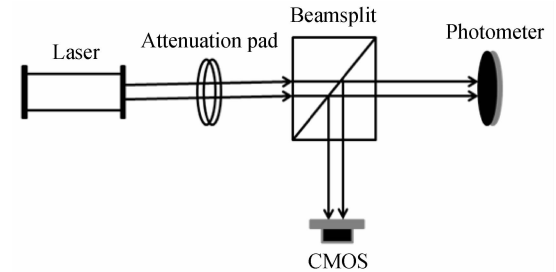


图4 CMOS光强定标光路图

Fig. 4 Layout of intensity calibration for CMOS detector

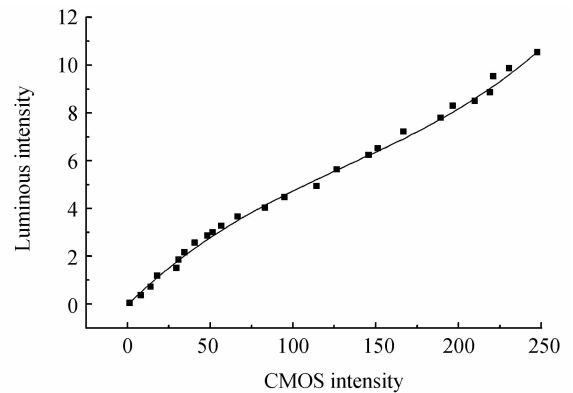


图5 CMOS光强定标曲线

Fig. 5 The calibration fitting curve of CMOS output intensity and light intensity

从 CMOS 传感探测器的 datasheet 中,能够得到其光谱响应曲线如图 6. 所以对 CMOS 定标时只需在单色光下进行光强定标,然后利用光谱响应关系即可算得在 380~800 nm 下的光强定标关系.

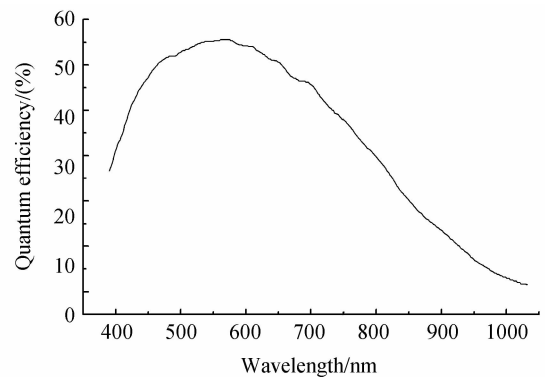


图6 CMOS芯片的光谱响应曲线

Fig. 6 Spectral response curve of CMOS detector

在单色光下, CMOS 第 i 行 j 列像素光强修正因子为 $D(\lambda, I)_{ij}$, 写成矩阵形式, 则 D 为

$$D = \begin{bmatrix} D(\lambda, I)_{11} & D(\lambda, I)_{12} & \cdots & D(\lambda, I)_{1n} \\ D(\lambda, I)_{21} & D(\lambda, I)_{22} & \cdots & D(\lambda, I)_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D(\lambda, I)_{m1} & D(\lambda, I)_{m2} & \cdots & D(\lambda, I)_{mn} \end{bmatrix}$$

实际应用中在允许的准确度范围内,可忽略每个像素对光强响应的微小差异,即 $D(\lambda, I)_{ij} = D(\lambda, I)_{lp}$,

其中 $1 \leq l \leq m, 1 \leq p \leq n$ 与 $l \neq i, p \neq j$. 校正 CMOS 值后的光强值为 $I'_{ij} = D(\lambda, I)I_{ij}$, 进而对测量吸光度表达式式(1)修正为

$$A_j = \log \frac{\sum_{k=1}^{k=n} D_{kj}(\lambda, I) I_{in,k,j}}{\sum_{k=1}^{k=n} D_{kj}(\lambda, I) I_{out,k,j}} \quad (2)$$

利用式(2)以及吸光度定义算得的吸光度如表 2 所示.

表 2 由校正后的 CMOS 光谱仪测得的吸光度及相对误差
Table 2 The absorbance of three filters and relative error measured by CMOS spectrometer after intensity calibration

	Filter ₁	Filter ₂	Filter ₃
415 nm	0.995	0.769	0.521
Er	1%	3%	2%
633 nm	1.060	0.722	0.561
Er	3%	2%	1%

2.3 采用变积分时间法提高 CMOS 光度测量准确度

本文进一步测量了同一光强照射下 CMOS 探测器输出值与曝光时间的关系,如图 7 所示,线性度达到 0.999,即可认为成线性关系.当样品吸光度较高时,在弱光下,参考光测准的情况下,透过样品后的光强由于太弱测量误差较大,可通过延长曝光时间测量透射光,利用图 7 线性关系换算到同一曝光时间下的光强,算出吸光度.同样的道理,在强光下,透射光容易测准,参考光由于太强出现饱和而测不出,可做类似的处理,即参考光和样品透射光在不同的积分时间下进行测量,应用积分时间与光强的线性关系进行换算,计算在同一个积分时间下的吸光度,这样可以提高测量的准确性,扩大线性范围.

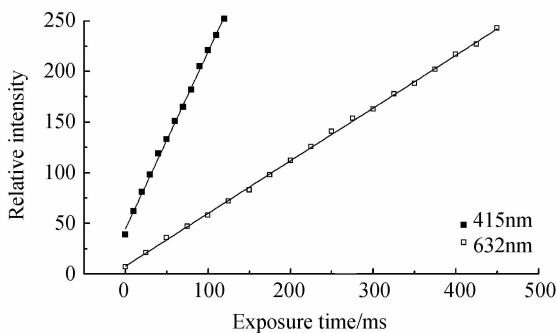


图 7 CMOS 曝光时间线性关系

Fig. 7 The linear fitting of exposure time and relative intensity of CMOS detector

表 3 是灰片 1 在 633 nm 处用不同的光强照射测得的吸光度与 TU1901 测量值之间的相对误差,在光强中等的情况下,参考光和样品透射光在同一个积分时间下测量,吸光度相对误差为 3%,在光强较强和光强较弱的情况下,通过改变积分时间的方法,吸光度相对误差分别为 0.1% 和 1%,说明测量的准确度得到提高,线性范围也扩大了.

表 3 灰片 1 在 633 nm 处改变积分时间与不改变积分时间测得的吸光度的相对误差

Table 3 The relative error of absorbance of filter 1 by changed exposure time and unchanged exposure time under 633 nm

Measure condition	Changed (intensity strong)	Unchanged (intensity moderate)	Changed (intensity weak)
Er(Exposure time)	0.1%	3%	1%

2.4 杂散光对光度测量的影响

采用线阵 CCD 的光谱仪,波长与像素一一对应,即某一波长对应于 CCD 某个像素,被测样品吸光度为该像素测得的吸光度,而本文中采用的 CMOS 探测器为面阵 CMOS,在波长定标后,某一特定波长对应于一列像素,通常将该列像素测量值累加起来作为该波长总的透射光强或参考光强,然后求得吸光度.吸光度 A 与透射率 T 的关系为 $A = \log(1/T)$,为了方便讨论杂散光对吸光度的影响只需讨论透射率的倒数即可,令 $\Gamma = 1/T = I_{in}/I_{out}$. 杂散光对透射率倒数 Γ 的影响可直接反应出杂散光对吸光度的影响^[9-10].

由于杂散光的引入,每个像素测量计算的结果都会引入偏差,对 i 行, j 列像元,透射率倒数为

$$\Gamma'_{i,j} = \frac{I_{in,i,j} - \Delta_{in}}{I_{out,i,j} - \Delta_{out}} \quad (3)$$

式中 Δ_{out} 为透射光中的杂散光,为 Δ_{in} 入射光中的杂散光, $\Gamma_{i,j}$ 为 MOS 第 i 行第 j 列像元测量计算对应的透射率倒数.其中入射杂散光与透射杂散光之间的差异很小,可近似看作 $\Delta_{out} = \Delta_{in}$,并令 $\Delta = \Delta_{out} = \Delta_{in}$.对(2)式可进一步变形得

$$\Gamma'_{k,j} = \frac{I_{in,k,j} - \Delta}{I_{out,k,j} - \Delta} = \frac{I_{out,k,j} - \Delta}{I_{out,k,j}} \frac{1}{1 - \frac{\Delta}{I_{out,k,j}}}$$

在对上式做进一步处理时,略去 Δ^2 以及更高次项以及根据式(1)可得到

$$\Gamma'_{k,j} = \Gamma_{k,j} - \frac{\Delta}{I_{out,k,j}} (\Gamma_{k,j} - 1) \quad (4)$$

式中 $\Gamma_{k,j}$ 为无杂散光的透过率倒数,且 $\Gamma_{k,j} > 1, \Delta > 0$

从式(4)可看出,当存在杂散光时, $\Gamma'_{k,j} < \Gamma_{k,j}$ 算得吸光度将会小于实际值.

对每列像素测得的值作累加后计算透射率倒数为

$$\Gamma'_j = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} I_{in,k,j} - n\Delta}{\sum_{k=1}^{k=n} I_{out,k,j} - n\Delta}$$

同样做上面类似的推导可得,每列算得的透射率倒数为

$$\Gamma'_j = \Gamma_j - \frac{\Delta}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} I_{out,k,j}} (\Gamma_{k,j} - 1) \quad (5)$$

比较式(4)与式(5)可看出,考虑杂散光影响时,若杂散光分布不均匀,由面阵 CMOS 整列像素算得的吸光度误差小于单个像素算得的吸光度误差,而且当存在杂散光时,吸光度测量值将小于其实际值。

3 结论

本文构建了一种以面阵 CMOS 图像传感器为探测器的小型光纤光谱仪样机,该光谱仪具有小型化、低成本、速度快等优点,其光谱测量范围为 380~800 nm,光谱带宽约 6 nm. 探讨了以面阵 CMOS 图像传感器作为光电探测器的光度测量非线性问题,应用搭建的 CMOS 小型光纤光谱仪样机测量三片不同透过率的中性滤光片的吸光度值,与用 TU-1901 紫外可见分光光度计测量的吸光度值进行比较,发现偏差较大,通过光强定标和非线性修正后,光度准确性得到提高,可以满足一般的应用要求. 此外,还分析了杂散光对面阵 CMOS 探测器测量吸光的影响。

参考文献

- [1] SHI Dong-xin, FU Xin-ning, ZHANG Yuan. Functions and HD applications comparison of CMOS and CCD [J]. *Communications Technology*, 2010, **43**(12): 174-175.
石东新,傅新宁,张远. CMOS 与 CCD 性能及高清应用比较[J]. *通信技术*, 2010, **43**(12): 174-175.
- [2] XIONG Ping. Comparison of CCD and CMOS image sensors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(1): 1-3.
熊平. CCD 与 CMOS 图像传感器特点比较[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(1): 1-3.
- [3] CHENG Kai-fu. CMOS image sensor and its applications[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(3): 26-27.
程开富. CMO 图像传感器及应用[J]. *半导体光电*, 2000, **21**(3): 26-27.
- [4] CHEN Tan-xuan, YANG Huai-dong, CHEN Ke-xin, et al. Coma and resolution in wide spectral region czerny-turner spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1692-1694.
陈潭轩,杨怀栋,陈科新,等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的慧差与分辨率[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1692-1694.
- [5] WEN Zhi-yu, CHEN Gang, WEN Zhong-quan. A hybrid intergrated micro fiber spectrometer design, simulation and primary experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 743-744.
温志渝,陈刚,温中泉. 混合集成微型光纤光谱仪的设计模拟实验[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 743-744.
- [6] HUANG Zhen-ning, SUN Li-qun. Photometric performance of miniature spectrometer-based on linear CCD[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(5): 565-566.
黄振宁,孙利群. 基于线阵 CCD 的小型光谱仪光度特性研究[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 565-566.
- [7] 张传武. 采用新型 CMOS 的光散射法颗粒测量研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- [8] CHEN Ying-juan, ZHANG Zhi-jiang, ZHANG Zhi-qiang. Correction of CCD pixel nonuniformity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(2): 217-218.
陈迎娟,张之江,张志强. CCD 响应不均匀性的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(2): 217-218.
- [9] ZHONG Xing, ZHANG Lei, JIN Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 316-318.
钟兴,张雷,金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(2): 316-318.
- [10] LI Chang-hou, SUN Yin-qiu. Study on relationship among stray light, absorbance error and absorbance true value[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, **22**(1): 54-55.
李昌厚,孙吟秋. 杂散光与吸光度误差和吸光度真值关系的研究[J]. *仪器仪表报*, 2001, **22**(1): 54-55.