

文章编号 1004-924X(2006)06-0990-08

基于 MEMS 技术的微型分光光度计

周连群^{1,2}, 吴一辉¹, 张平¹, 宣明¹, 李正刚^{1,2}, 贾宏光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:研制出了一种采用微硅片对准技术和微硅片狭缝的新型微型分光光度计。采用 MEMS 工艺制造出了体积小、精度高的微硅片对准机构和微硅片狭缝,并且对其性能进行了分析和论证。同时对影响分光光度计线性度精度的样品池的光学特性进行了分析,推导出了透射光强与样品池的折射率、被探测介质的折射率关系式,并进一步分析因折射率引起光强的变化对吸光度的影响。实验结果表明,该微型分光光度计可以分辨出介质折射率相差 0.01 介质,同时参比介质的不同仅仅对 A-C 曲线产生平移,而对相关系数和斜率无任何影响,通过对实验数据的计算得到以空气和蒸馏水两种折射率的介质为参比时的系统相关系数都大于 0.999,说明所研制的基于 MEMS 技术的微型分光光度计具有高度显著线性相关性。

关键词:微硅片对准;微硅片狭缝;微型分光光度计;微小型光纤光谱仪;微光机电系统

中图分类号:TH744.1;O433.1 **文献标识码:**A

Micro-spectrophotometer based on MEMS technology

ZHOU Lian-qun^{1,2}, WU Yi-hui¹, ZHANG Ping¹, XUAN Ming¹, LI Zheng-gang^{1,2}, JIA Hong-guang¹

(1. *State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A new mini-spectrophotometer was developed by adopting micro-silicon-slit and micro-silicon-fixer, which are based on MEMS technology. Both the micro-silicon-slit and the micro-silicon-fixer have such feature as small volume, high precision, which are laid out and analyzed later. Meanwhile, by analysis of the sample cell's optical characteristics which have some impact on the linearity of the spectrophotometer, a relation equation is put forward which is about the impact of the refractive index of the sample cell and the tested medium on the variety of the transmitted light intensity and the absorbency. When the water and the air are taken as referenced medium, the experiments demonstrate that the effect of different refractive of references doesn't influence the correlation coefficient r and the slope of the Absorbency-Concentration curve. The final results show that the new mini-spectrophotometer with micro-silicon-slit and micro-silicon-fixer is worked out, its correlation coefficient $r > 0.999$ and its refractive index resolving power is better than 0.01.

收稿日期:2006-04-08;修订日期:2006-08-23.

基金项目:国家 863MEMS 重大专题资助项目(No. 2004AA404250);中国科学院二期创新资助项目

Key words: micro-silicon-fixer; micro-silicon-slit; micro-spectrophotometer; mini-fiber-spectrometer; MOEMS

1 引言

分光光度计是一种重要的光谱分析仪器,在物理学、化学、生物学、医学、材料学、环境科学、化工、医药、环境检测、冶金、高分子等方面都有广泛的应用。该仪器集成了各学科领域的先进技术成果,尤其是伴随着 MEMS 技术的飞速发展,使得未来的仪器可以把微光学器件、微结构、微传感器、微致动器、信号处理器等集成在一起,能够对外界的各种物理、化学、生物等各种信号进行实时采集、处理、操作和控制的智能化信息系统^[1]。微型分光光度计较传统的大型的分光光度计具有体积小、携带方便、价格低,易于家庭化普及等优点,尤其 USB 接口的采用,可以充分利用计算机的资源,为微型分光光度计的远程式、网络化、无线操作、实时动态在线监测、数据的共享等提供了广阔的应用空间。在生物技术、生命科学突飞猛进的今天,大量需要快速测量的任务涌现出来,如酶动力学反应、生化过程研究等,都为微型化分光光度计的发展提出了迫切的要求。微型分光光度计研制是在保证分辨精度、波长重复性、波长准确度的情况下^[2],考虑系统的集成化、小型化,同时还需要对吸光度线性度有更高的要求。本文结合 MEMS 技术研制出了微硅片对准机构和采用微硅片狭缝微小型光谱仪,并对样品池的光学特性进行了一定的分析,通过理论分析被测介质的折射率对透射光强的影响,进一步测试和分析了折射率对透射强度、吸光度的影响。

2 系统的基本组成和关键技术分析

微型分光光度计是光、机、电、算一体化,结合 MEMS 工艺研制出的新型光电探测系统。本文中微型分光光度计采用的是后分光技术,便于全光谱实时分析和杂散光的有效抑制。由于采用微硅片狭缝具有平直性好、窄宽一致性好等特点,当强的复色信号光会聚于狭缝时,背景光弱的很多。因此,来自外界的背景光对测试结果影响很小,在进行测试时可以不需遮光,可以敞开样品室进行

开放式测量,这给测量带来了极大的方便,同时也更适用于多样品池、流动池的分析与测量^[3]。

2.1 系统的构成和基本工作原理

系统的组成如图 1 所示,可以分成四部分:第一部分是光源耦合系统,主要是把钨卤灯或氙灯光源发出的光通过透镜组,耦合到光纤中。第二部分是样品室分析系统,又称微流体分析系统,通过微透镜或自聚焦透镜把光纤传出的光进行准直,使其近似平行地透过被分析样品,之后再经过透镜耦合到光纤中。第三部分是光谱分析系统,主要是把样品池透射出来的光耦合到光谱分析系统中,并进行准直、色散分光、成像、数据处理等。系统的工作原理是基于朗伯-比尔定律(Lambert-Beer's Law),其表达式如下^[4]:

$$A = \log(I_0/I_t) = \epsilon b C, \quad (1)$$

式中, A 为吸光度, I_0 为入射辐射强度、 I_t 为透过辐射强度, b 为吸收层厚度, C 为吸收物质的摩尔浓度, ϵ 为摩尔吸光系数。

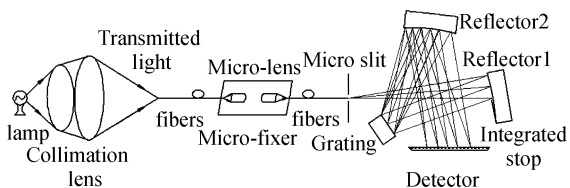


图 1 微型分光光度计的系统结构图

Fig. 1 Mini-spectrophotometer system

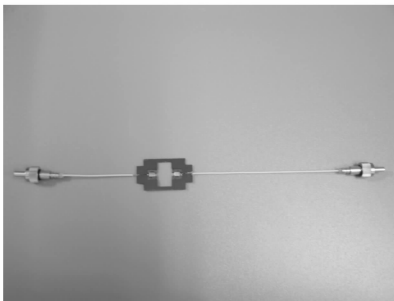
2.2 有关 MEMS 关键技术分析

2.2.1 采用 MEMS 技术的微定位器

微硅片具有体积小、精度高、易于批量化制作的特点,采用微硅片进行定位是定位技术发展新方向之一。其原理是利用 MEMS 精密加工技术在硅基底或其它材料基底上加工出定位槽。槽的形状根据实际需要而定,本系统中槽的形状为 V 型,可以限制光学元件的四个自由度,仅剩光轴方向的移动和绕光轴方向的转动两个自由度,前者可以用来调整光学元件之间的距离以达到最佳光学性能,后者因光纤和透镜为同轴光学系统,故没有任何影响。MEMS 定位器的定位精度可以达到 $0.1 \mu\text{m}$,可满足光学元件的定位要求。

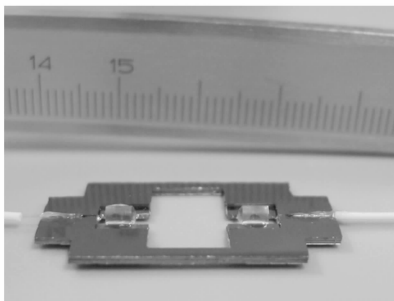
根据透射光谱的范围要求,对光纤和透镜材

料的选择有一定的要求,本系统中微透镜材料选用熔融石英,光纤选用 UV-VIS 光纤,其中前者的透射波长范围为 185 ~ 2 500 nm,后者的透过的波长范围为 180 ~ 1 150 nm。图 2 是采用 MEMS 技术的样品室光探测系统的实物图,在 (a) 图中,两端是光纤连接器,可以是 ST/FC/SMA 类型,本系统中采用是高功率传输比的 SMA905 连接器。(b) 图中可以看出微硅片定位器的尺寸为 32 mm×18 mm×1 mm,中间孔的尺寸由所采用的样品池的尺寸决定。可见采用光纤、微透镜和微硅片定位技术为核心的光探测系统为微流控芯片的发展提供了一个通用的平台,利用这个平台可以为微流控芯片提供一种非接触的可靠分析方法。



(a) 样品池光探测全体图

(a) Whole view of the optical detection system



(b) 样品池光探测局部放大图

(b) Part view of the optical detection system

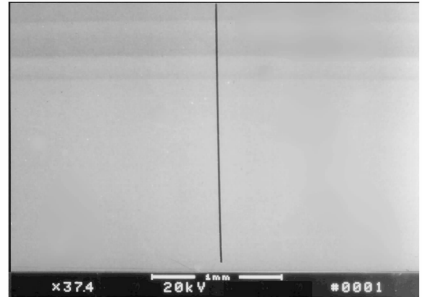
图 2 样品池光探测系统

Fig. 2 Mini sample optical detection system

2.2.2 采用 MEMS 技术的微型光纤光谱仪

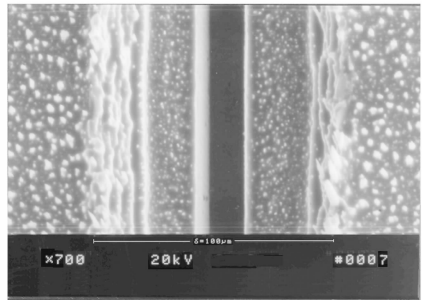
微硅片狭缝是采用 MEMS 技术加工出来的一体化超薄式狭缝^[2],结构如图 3 所示。(a) 图为微硅片狭缝的下表面图,放大倍率是 37.4 倍,看出一体化的狭缝在低倍率扫描电镜下是非常平直的缝隙;(b) 图是微硅片狭缝的正面视图,放大倍

率是 700 倍,可以看出狭缝的两个刀口的平直性和侧面很好。光谱仪的光路^[2]采用 Czerny-Turner 结构,探测器采用的是阵列式探测器。



(a) 微硅片狭缝的下表面

(a) Under-surface of the micro silicon slit



(b) 微硅片狭缝的刻蚀表面的正视图

(b) Upper-surface of the micro silicon slit

图 3 微硅片狭缝

Fig. 3 Micro silicon slit

2.2.3 样品池光探测和微型光纤光谱仪的组合

比色杯可以用传统的石英、玻璃材料,也可以采用有机塑料,例如 PMMA、PDMS^[5],本系统中采用的 PDMS 具有较高的生物兼容性和宽的波长透射范围。图 4 是样品池光探测系统和微光谱分析系统。

其中微小型光纤光谱仪是把文献^[2]提到的光谱仪和数据采集电路集成在一起,其封装尺寸为 70 mm×53 mm×32 mm,通过 USB 接口直接和计算机相连,可以充分利用计算机的资源,为微型分光光度计的远程式、网络化、无线操作、实时动态在线监测、数据的共享等提供广阔的应用空间。

3 样品池光学特性分析

造成透射光强 I_t 变化的除散射、介质的吸光,还有界面间的反射、透射损耗等,这些都会造

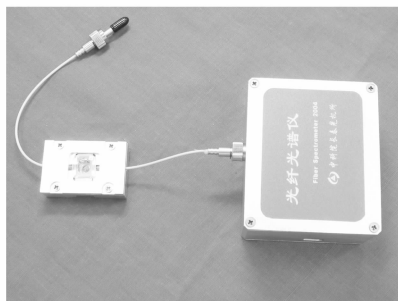


图 4 样品池光探测系统和微光谱分析系统
Fig. 4 Mini sample optical detection system and the micro optical analyzing system

成偏离朗伯-比尔定律,下面针对这些因素造成的影响进行一定的分析。

3.1 正入射光线对透射光强的影响分析

当电磁波从一种介质传播到另一种介质时,由于介质表面的物理性质不同,造成电磁场在界面上不连续^[6,7]。由菲涅耳相关理论可以得知,当入射角小于 45°时,反射比 ρ_n 几乎不变,与正入射时相近^[6],其反射比

$$\rho_n = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2, \quad (2)$$

其中 $n = n_2/n_1$,

在本设计中,透过样品池的光线几乎是正入

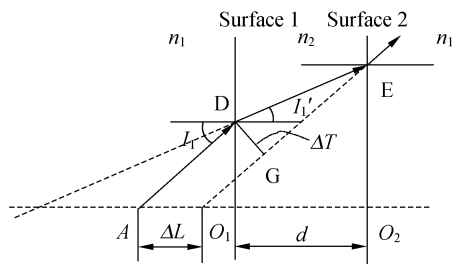


图 5 样品池的光学特性
Fig. 5 Sample cell's optical characteristics

射,入射角均小于 45°,光学特性如图 5 所示。在两界面上的反射率均为 ρ_n ,因光在界面 1 上的反射造成的入射光强变化值:

$$\Delta I_0 = I_0 \rho_n, \quad (3)$$

所占入射光强百分比

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \rho_n, \quad (4)$$

因光在界面 2 上的反射造成的透射光强变化值为:

$$\Delta I_{t1} = I_t (1 - \rho_n) \rho_n, \quad (5)$$

所占透射光强百分比

$$\frac{\Delta I_{t1}}{I_t} = (1 - \rho_n) \rho_n, \quad (6)$$

3.2 倾斜光线对透射光强的影响分析

后分光光度计对宽光谱段进行准直时,由于像差的存在,透过样品池的光线必然倾斜,下面就对倾斜光线对透射光强的影响进行分析。样品池可以看作一个平行平板,如图 5 所示。由平行板的侧向位移^[7]

$$\Delta T = DG = DE \sin(I_1 - I_1') = \frac{d}{\cos I_1} \sin(I_1 - I_1'), \quad (7)$$

同时因为

$$n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_1', \quad (8)$$

代入式(7)得

$$\Delta T = d \sin I_1 \left(1 - \frac{n_1 \cos I_1}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 I_1}} \right), \quad (9)$$

轴向位移

$$\Delta L = \frac{\Delta T}{\sin I_1} = d \left(1 - \frac{n_1 \cos I_1}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 I_1}} \right), \quad (10)$$

式中, n_1 样品池侧壁的折射率、 n_2 为待测介质的折射率、 d 是样品的沿光线传播方向的距离。

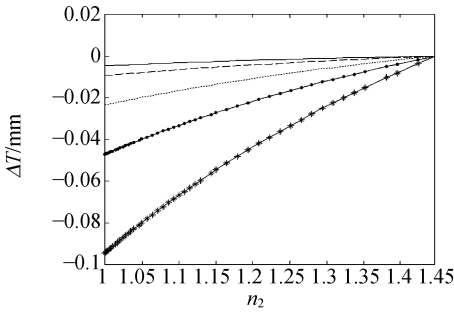
可见,对侧向位移 ΔT 和轴向位移 ΔL 有影响的参数有 n_1 、 n_2 、 I_1 和 d ,在实际的分光光度计中, d 是固定的,大多数的分光光度计的 d 为 10 mm,小型化的仪器为 6 mm 左右。对系统的光强变化有直接影响的是侧向位移 ΔT ,仅对 ΔT 的影响参数进行一定的分析。 ΔT 随着 n_2 、 I_1 的变化关系曲线如图 6 所示,其中样品池的折射率 $n_1 = 1.45$, $d = 6$ mm。

由图 6 中可以看出:

A. 当被测介质(液体或空气)的折射率 n_2 和样品池的折射率 n_1 的相差越大时,光斑的侧向位移越大。

B. 当光线倾斜角 I_1 越大,光斑的侧向位移越大。

对于一个已经制备好的分光光度计而言, I_1 已经固定,由公式(9)、(10)和图 6 看出,任何和样品池折射率不同的介质都会造成光斑的侧向位移,但是当参比介质的折射率和被测介质的折射率接近时,会使得两者的侧向位移相近,但是实际测试中很难找到两种折射率一致的物质,因此



—, $I_1(0.1^\circ)$; — —, $I_1(0.2^\circ)$; - - - , $I_1(0.5^\circ)$,
 · —, $I_1(1^\circ)$; — * —, $I_1(2^\circ)$

图 6 侧向位移 ΔT 和 I_1, n_2 的关系曲线

Fig. 6 When $n_1 = 1.45$, the relation between I_1, n_2 and ΔT

需要分析侧向位移对透射光强的影响。假设出射光斑的光照度(光强)沿径向方向是均匀分布,且本系统中近轴视场光阑和光斑的初始位置重合,如图 7 中白色光斑所示。

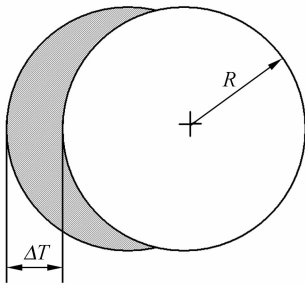


图 7 透射光斑的侧向位移原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the transmitted light displacement

当有侧向位移时,就会有部分光斑“溢出”,而造成光强的变化,“溢出”部分如图 7 中阴影部分所示,其面积经数学推导结果为

$$\Delta S = (\pi - 2\arccos \frac{\Delta T}{2R})R^2 + \Delta T \sqrt{R^2 - (\frac{\Delta T}{2})^2}, \quad (11)$$

光斑的总面积

$$S = \pi R^2, \quad (12)$$

“溢出”部分光斑势必会造成能量的变化,能量的变化率就可以简单地表示成“溢出”部分光斑面积和总面积的比值,即

$$\frac{\Delta I_{t2}}{I_t} = \frac{\Delta S}{S}, \quad (13)$$

把式(11)(12)代入上式可得

$$\frac{\Delta I_{t2}}{I_t} = \frac{(\pi - 2\arccos \frac{\Delta T}{2R})R^2 + \Delta T \sqrt{R^2 - (\frac{\Delta T}{2})^2}}{\pi R^2}, \quad (14)$$

根据上式作出透射光强的变化率和光线的侧向位移 ΔT 、光斑的半径 R 的关系图,如图 8 所示。其中 ΔT 在 $-1 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间变化, R 在 $0.2 \sim 10 \text{ mm}$ 之间变化。

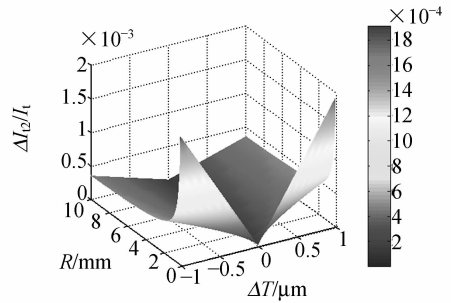


图 8 $\Delta I_{12}/I_1$ 和 $\Delta T, R$ 关系图

Fig. 8 Relation between $\Delta T, R$ and $\Delta I_{12}/I_1$

由图 8 可以看出 ΔT 越小、 R 越大则 $\Delta I_{12}/I_1$ 越小。三者之间存在制约关系,任何一个参数的选择应该综合考虑其它两个参数的变化是否在系统的承受范围之内。但是从图 8 中可以看出一系列明显的拐点,即变化的陡峭点。这些拐点是仪器的微型化与仪器光学性能之间的一个平衡点,是参数优化配置的一个重要参数。由图 8 中可以看出,当 $R=1 \text{ mm}, \Delta T=1 \mu\text{m}$ 时, $\Delta I_{12}/I_1$ 会突然变化,此点即为拐点之一。

3.3 光强变化对吸光度的影响

当入射光强 I_0 变化 ΔI_0 , 透射光强 I_t 变化 ΔI_t 时,对应的吸光度 A 变化 ΔA 时,那么朗伯-比尔方程变为

$$A + \Delta A = \log(I_0 - \Delta I_0) - \log(I_t - \Delta I_t), \quad (15)$$

对上式微小量 $\Delta I_0, \Delta A$ 求微分整理得:

$$\Delta A = -\frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta I_t}{I_t}, \quad (16)$$

其中

$$\Delta I_t = \Delta I_{t1} \pm \Delta I_{t2}, \quad (17)$$

$$\frac{\Delta I_t}{I_t} = \frac{\Delta I_{t1}}{I_t} \pm \frac{\Delta I_{t2}}{I_t}, \quad (18)$$

由上述分析可以有下推论:

(1) 由于参比溶液的折射率和被测试介质的折射率不同,必然造成吸光度和浓度之间的关系拟合曲线(A-C 曲线)不过原点,两者相差越大,与原点的距离 ΔA 越大。

(2) 仅对各个点的 A“平移式”增加, 即采用不同的参比溶液, 两者之间的平移量不同, 但是不会对线性度、A-C 曲线斜率有影响。

(3) 在入射光强相同并且被测介质一般吸收, 当被测试介质的折射率和样品池的折射率越近, 透射光强越大。当两种被测介质的透射光强相比时, 透射比是否超过 100%, 取决于两者的折射率和样品池的折射率的接近状况。

4 吸收光谱实验和分析

4.1 介质折射率不同的透射光强的测试

用所研制的微型分光光度计测试三种不同折射率的介质的光谱如图 9 所示, 其中三种介质在 $\lambda = 750 \text{ nm}$ 附近属于一般吸收。由图 9 可以看出, 三者的透射光强关系为 $I_{t\text{Air}} < I_{t\text{Water}} < I_{t\text{CoCl}_2}$, 具体数据见表 1, 随着被测试介质折射率和样品池的折射率的接近, 透射光强 I_t 也增加, 验证了 3.3 中论述和分析。此现象已经超越朗伯-比尔定律的解释范围, 但是属于正常的测试现象。同时可以利用此规律测试未知介质的折射率, 表 1 可以看出, 本系统可以测试折射率相差 0.01 的两种介质。

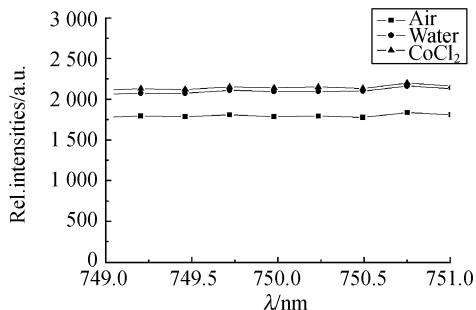


图 9 不同介质在 750 nm 附近光谱

Fig. 9 Spectrum of different medium near 750 nm

表 1 不同介质的折射率和透射光强

Tab. 1 Refractive index and the transmitted intensity of different medium

Medium	Air	Water	CoCl ₂
n_2	1	1.332 61	1.342 1
$I_t(\lambda = 750 \text{ nm})$	1 786	2 096	2 141

4.2 线性吸光度溶液的测试和分析

线性吸光度溶液采用的国家标准物质中心调

配的 CoCl_2 稀酸溶液^[8], 吸收光谱如图 10 所示, 其中参比溶液为蒸馏水。由图 10 可以看出体系的测试吸收峰值和理论值 510 nm 基本吻合。当相对浓度较大时, 溶液的吸光度也较大, 由布格朗伯-比耳定律知透过溶液的辐射强度将会很弱, 此时系统的随机噪声对系统的测试影响较大, 故图 10 中吸光度较大时吸光度的工作曲线不平滑。当选择不同参比溶液时, CoCl_2 吸光度值如表 2 所示。可见由参比的不同造成了吸光度的不同, 对 A-C 曲线的线性度影响见下面分析。

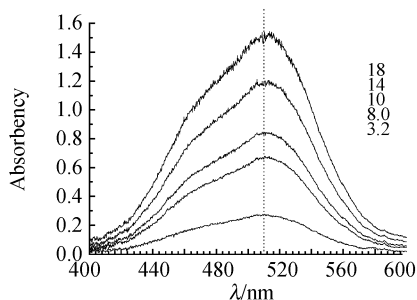


图 10 CoCl_2 吸收光谱

Fig. 10 CoCl_2 absorbing curves

表 2 CoCl_2 吸光度数据表

Tab. 2 Absorbency of CoCl_2

Relative Concentration (Water as Reference)	Absorbency (Water as Reference)	Absorbency (Air as Reference)
3.2	0.268 94	0.178 60
8.0	0.671 36	0.575 80
10	0.837 79	0.748 77
14	1.192 74	1.113 39
18	1.509 01	1.416 22

对 A-C 曲线进行一元线性回归, 令其方程式为

$$\hat{y} = a + bx, \tag{19}$$

式中 \hat{y} 为吸光度回归值, x 为相对浓度值, a 、 b 为回归系数, 其具体表达式参见文献[9]。把表 2 中的数据带入文献[9]相关公式, 计算的结果如表 3 所示, 其中 r 为相关系数, σ 为残余标准差, $N-2$ 为自由度。也可以利用 origin 软件进行相关计算和绘图, 做出的直线拟合曲线如图 11 所示。由表 3 和图 11 可以看出, 尽管以空气为参比时的吸光度整体都比水为参比时的吸光度小, 但是线性相关系数 r 和 A-C 直线斜率 b 几乎一样, 进一步说明了因被测介质折射率变化引起的透射光强的变化

对系统的吸光度 A 的影响仅仅限于 ΔA , 并且当参比介质和被测介质的折射率越接近, ΔA 越小, 如表 3 中 a 值。同时说明参比介质和被测介质的折射率越接近时, A - C 曲线将是一条过原点高度线性相关的直线, 且相应的回归残余标准差越小 ($\sigma=0.00931$)。对于一元线性回归方程而言, 当自由度为 3、显著水平为 0.001 时, 其临界值 $r(0.001; 5-2)=0.9912^{[10]}$ 。本系统中 $r > r(0.001; 5-2)$, 故系统的线性相关性为高度显著相关。

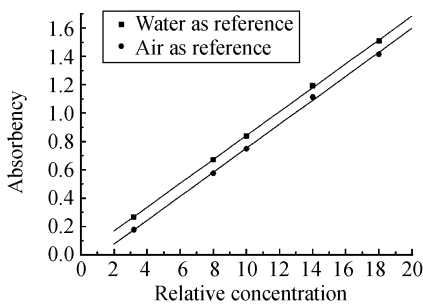


图 11 CoCl_2 工作曲线

Fig. 11 CoCl_2 working curves

表 3 CoCl_2 吸光度线性拟合表

Tab. 3 Linear fit Absorbency of CoCl_2

Parameter	Absorbency (Water as Reference)	Absorbency (Air as Reference)
a	-0.000 81	-0.092 86
b	0.084 28	0.084 53
r	0.999 86	0.999 59
σ	0.009 31	0.015 79
$N-2$	3	3

5 结 论

基于 MEMS 技术研制出了具有体积小、分辨率高、高度线性相关的微型分光光度计。采用 MEMS 技术的微硅片狭缝、微定位器, 具有体积小、精度高、易于批量化制作的特点, 克服传统机械加工的诸多缺点。通过对样品池光学特性的进行分析, 论证了被测试介质的折射率对透射光强和吸光度的影响, 为相关的实验测试提供了理论指导。最后通过对透射光强的测试结果表明, 该微型分光光度计可以分辨出折射率相差 0.01 的两种介质, 为该系统在测试分辨率方面提供了应用前景。同时通过测试以空气和蒸馏水为参比溶液时 CoCl_2 稀酸溶液的吸光度, 进一步验证了关于被测介质折射率变化对吸光度 A 的影响, 仅仅限于 ΔA , 而与 A - C 斜率无关, 并且结果显示两者的相关系数 r 都大于 0.999, 属于高度显性相关, 这为基于 MEMS 的微型生化分析仪提供了一个高度线性相关光度分析平台。尤其是光纤和 MEMS 技术的结合, 为微型分光光度计远程式、网络化、无线操作、实时动态在线监测、数据的共享等提供了广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] 全国藩, 周兆英. 仪器仪表的微小化、集成化和智能化[J]. 现代科学仪器, 2000, 3: 7-8.
JIN G F, ZHOU ZH Y. Minaturization integration and intelligence of instruments[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2000, 3: 7-8. (in Chinese)
- [2] 周连群, 吴一辉, 张平, 等. 一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 637-642.
ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, et al. A new mini-fiber-spectrometer by adopting micro-silicon-slit[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6): 637-642. (in Chinese)
- [3] 黄梅珍, 倪一, 林峰, 等. 高速紫外-可见分光光度计的研制[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(6): 938-941.
HUANG M ZH, NI Y, LIN F, et al. Development of high speed UV-Vis spectrophotometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(6): 938-941. (in Chinese)
- [4] 罗庆, 邓延倬, 蔡汝秀, 等. 分光光度分析[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

- LUO Q, DENG Y ZH, CAI R X, *et al.* *The spectrophotometer analysis* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [5] 李淑娟, 吴一辉, 宣明. 电磁式微流体动态混合器的动力学数值模拟[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):127-134.
LI SH X, WU Y H, XUAN M. Dynamic numerical simulation of an electromagnetic microfluidic active mixer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2):127-134. (in Chinese)
- [6] 王洁. 光电比色计与分光光度计[M]. 北京:中国计量出版社, 1993.
WANG J. *Electrophotometer and spectrophotometer analysis* [M]. Beijing: China Measurement Press, 1993. (in Chinese)
- [7] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 机械工业出版社, 2003.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering optics* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 吸光度线性溶液[R]. 北京:国家标准物质研究中心, 2005.
Linear absorbency liquid [R]. Beijing: National Research Center for Certified Reference Materials, 2005. (in Chinese)
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
FEI Y T. *Error theory and data processing* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 金炳陶. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
JIN B T. *Probability theory and data statistics* [M]. Beijing: High Education Press, 2000. (in Chinese)

作者简介:周连群(1981—),男,山东金乡人,应用光学国家重点实验室博士生,主要研究方向为微光机电系统和微光谱仪。E-mail:zhllq@ciomp.ac.cn 或 lianqunzhou@sohu.com.