

混合集成微型光纤光谱仪的设计模拟及实验*

温志渝 陈 刚 温中泉 蒋子平 黄尚廉
(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 提出了一种混合集成微型光纤光谱仪。该系统采用一种全息凹面光栅作为分光成像元件,以线阵 CMOS 图像传感器作为探测元件,实现 400~800 nm 波长范围内的光谱检测。整个系统的光学元件少、光能传输效率高、结构简单紧凑、体积小。通过结构与参量的优化设计、计算机模拟和初步实验表明这是一种较为理想的微型光谱仪。

关键词: 微型光纤光谱仪; 全息记录; 光电阵列探测器
中图分类号: TH744.1 文献标识码: A

1 引 言

光谱仪器是分析物质化学组成及含量的重要分析仪器,已在现代科学实验、生物医学、工农业生产、国防等领域得到广泛的应用。传统光谱仪器使用条件苛刻、体积庞大,因而大大地限制了其应用范围。尽管微小型化光谱仪器在分辨率等性能上无法与传统的仪器相比,然而,在许多应用领域,光谱分析系统尺寸的缩小比分辨率的提高更为重要^[1,2]。特别是在航天航空等研究领域,光谱仪器微型化的意义尤为重大。因此,光谱仪器的微小型化是现在光谱分析仪器发展的一个重要方向,并已成为研究的热点之一。20 世纪 90 年代以来,存储系统(MEMS)技术的发展为光谱分析系统小型化、微型化提供了一种有效的技术手段。国外已提出了多种光谱仪器小型化、微型化的方案^[3~9],并已有部分产品面市。然而,这些微小型光谱仪器具有加工及装调复杂、难度较大、价格高等不足。本文提出的混合集成微小型光纤光谱仪方案,通过结构与参量的优化设计、计算机模拟和初步实验,表明该系统是一个较为理想的微型光谱分析系统。

2 结构设计

2.1 关于结构的考虑

光谱仪器微小型化和集成化的基本要求是:其

相应的光学系统应具有相对简单的结构,系统中一般多采用光电阵列式探测器对光谱信号进行同时采集。光电阵列式探测器的工作面是一个平面,因此要求在工作波长范围内光谱成像尽可能地分布在一个平面上,同时为了便于光学元件与探测器的集成化,还希望光谱像面与光轴垂直,有利于探测器对光谱信号的探测。在文献^[10]中提出了一种实现混合集成微型光谱仪的方案,但由于该方案采用的是平面光栅,并采用单个成像透镜成像,为了实现谱面平直而采用了一块玻璃基底,这不但增加系统的复杂程度,同时也会造成一部分光能的损失。为此提出了一种光学结构更为简单,并且便于系统一体化混合集成的微型光谱仪方案,如图 1 所示,该光学部分仅由入射光纤、凹面光栅和平面反射镜组成。其中入射光纤取代了光谱仪器中的入射狭缝,可通过改变使用光纤的芯径来达到调节狭缝宽度的作用。采用凹面光栅具有对被测光进行分光和成像的功能,避免了采用平面光栅需要的准直透镜和成像透镜,从而大大的简化了系统结构。同时合理的设计凹面光栅可以在不采用附加光学元件的情况下实现成像谱面的平直,减小系统像差,提高系统成像质量。因此,采用凹面光栅作为系统的分光元件可使系统具

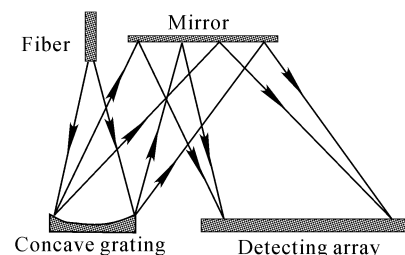


Fig. 1 Schemetical plan of micro spectrometer

* 国家自然科学基金(69836050)、教育部科学技术重点项目(99105)与国家“863”计划(2002AA431180)资助课题。

E-mail: wzy@cqu.edu.cn

收稿日期:2002-03-12; 收到修改稿日期:2002-06-17

有结构简单紧凑、光学面少、体积小、光能利用率高、便于系统的一体化混合集成等优点。

2.2 全息凹面光栅

全息凹面光栅采用全息记录的办法来获得具有一定曲率的光栅刻线,易于实现对部分像差的校正。同时采用全息记录的方法来制作凹面光栅还便于对谱面平直度和谱面位置进行调整,在微型光谱仪的设计上可以提供一定的自由度。

2.2.1 全息凹面光栅原理

全息凹面光栅的工作原理如图 2 所示,记录面为一半径为 R 的球面,其中 A 为点光源, $P(\zeta, \omega, \tau)$ 为全息凹面光栅面上的任意一点, B 为光线 AP 所对应的第 k 级衍射光线一点, C 及 D 分别为全息光栅的两个记录点。并假设记录波长为 λ' , 工作波长为 λ , 则光程函数可以表示为^[11]

$$F = r_A + r_B + \sum_{i,j,k=0}^{\infty} F_{i,j,k} \omega^i \tau^j x^k, \quad (1)$$

$$F_{i,j,k} = M_{i,j,k}(\alpha, \beta, r_A, r_B, R) + m\lambda H_{i,j,k}(\gamma, \delta, r_C, r_D, R) / \lambda', \quad (2)$$

其中 r_A, r_B, r_C 和 r_D 分别为 A, B, C 和 D 点与球面顶点 O 的连线在 yoz 平面的投影。由于(1)式中每个高阶项系数对应一种相应的像差。由(2)可知,在光源位置和像面位置一定的情况下,可以通过适当地选取记录点 C 和 D 的位置,来减小在光谱像面上某一种像差系数,从而减小在像面上的相应的像差,提高全息凹面光栅的在整个像面上的成像质量。

$$\overline{F}_{i,j,k}^2 = \int_{\beta_{\lambda_1}}^{\beta_{\lambda_2}} [F_{i,j,k}(\alpha, \beta, r_A, r_B; \gamma, \delta, r_C, r_D; R)]^2 d\beta, \quad (3)$$

在给定的 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ 波段内,使某一像差对应的系数 $F_{i,j,k}$ 在给定的像面上的积分值达到最小^[11],即要使积分值(3)式尽可能地减小。这可以通过选择适当的球面基底半径 R 及两个记录点的位置参量

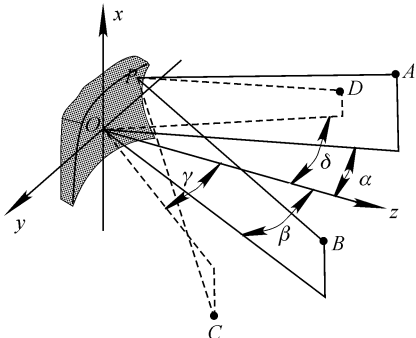


Fig. 2 The principal scheme of holographic concave grating

γ, δ, r_C, r_D 来实现。通过将记录点的坐标作为参量,将(4)式对参量求偏导,求取导数为零时的参量值作为参量的设计值。

2.2.2 全息凹面光栅设计结果

为了便于系统的集成化,希望光谱成像面 $A_{\lambda_2} - A_{\lambda_1}$ 在工作波长范围内与光轴垂直(如图 3 所示),也就是说在给定的某一垂直于光轴的平面内,在工作波段范围光谱像具有较小的像差,同时还希望所有光谱展开在 yo_x 平面内。这样便可以很容易地实现探测器阵列与全息凹面光栅的集成化。由前述可知,此时要求像面 $A_{\lambda_2} - A_{\lambda_1}$ 上的像差系数的平方的积分达到最小,从而可以减小相应的像差,这可以通过调节记录点 C 和 D 适当的位置来实现。

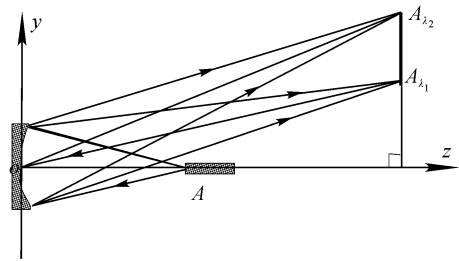


Fig. 3 Schematic graph of the imaging of the holographic concave grating

由于谱面与光栅位于两个平行面上,通过使用平面反射镜(如图 1 所示),采用折叠光路,不但可以减小光谱仪的体积,而且可使光栅与谱面位于同一平面上,从而有利于采用微组装技术和集成电路技术,实现探测器与全息光栅的混合集成。

根据系统要求设计出的全息凹面光栅的参量为:光栅球面半径 $R=35$ mm,光栅有效面半径 $r=5$ mm,两个记录点坐标(单位为 mm)分别为 $C(0, 1.3, 51.7)$ 和 $D(0, 14.7, 53.5)$,记录波长为 514.5 nm,在设计中矫正了部分像差实现了+1级光谱面的平直(谱面为一与光栅顶点切线相平行的平面),其物点到光栅顶点垂直距离 $L_1=26$ mm,准像面到光栅顶点垂直距离 $L_2=55.7$ mm。

3 计算机模拟

直接计算入射光束中大量光线在光谱仪器光学系统中的行径,考察由所有光线在准谱成像面上的落点构成的散布点(即点列图)、根据光线落点的分布情况和点群密集程度评判光学系统的成像质量是十分直观、有效且形象的方法。点列图中所有点到其质心的距离平方和的平均值表征谱线成像清晰

度,而质心本身即表征谱线的实际成像位置,同时点列图能表征光线通过光学系统后的光能量在像面上的分布^[12]。

为此在 400~800 nm 的光谱范围内,对该全息光栅进行了光线追迹,得到其点列图分布,根据点列图计算出光谱的像斑的均方根半径(在假设谱线为理想高斯谱线时,该半径内包含了像斑全部能量的 68.3%)以及焦点的位置。其结果如图 4~图 8 所示。由图 5 可见该光谱像点的空间位置与相应的光波长基本上是呈线性关系,整个光谱色散宽度约为 12 mm。由图 7 可知在输入光纤的数值孔径为 0.1 时,光谱像斑在 y 方向均方根半径的最大值为 $r_{\max} =$

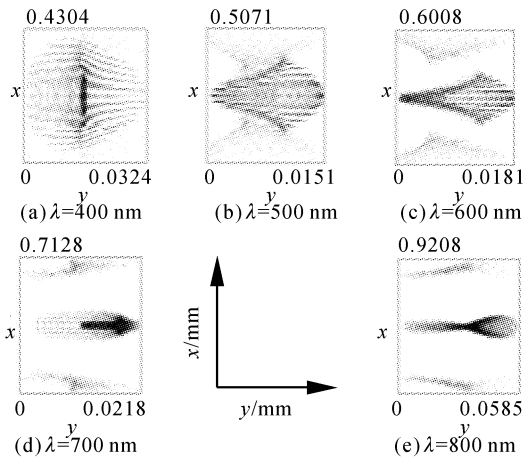


Fig. 4 Points images at different wavelength

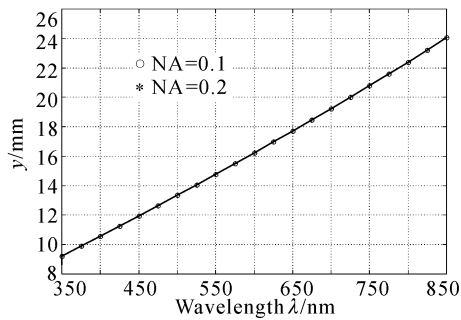


Fig. 5 Image position on the receiving plane

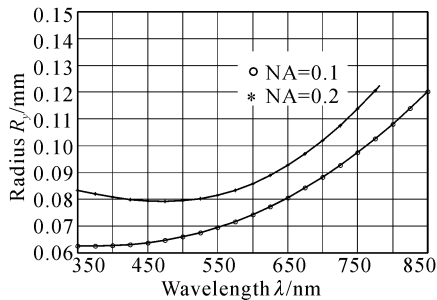


Fig. 6 Radius of spectrum images in the x direction

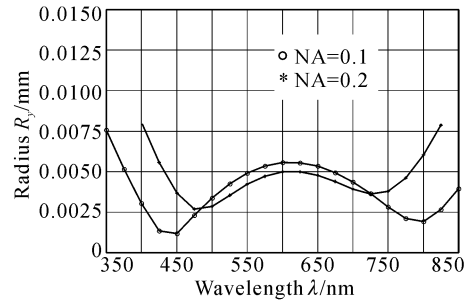


Fig. 7 Radius of spectrum images in the y direction

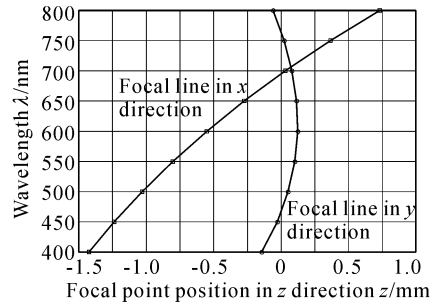


Fig. 8 The focal point position in z direction

0.0055 mm,其对应的波长约为 600 nm。由图 8(其中 $z=0$ 点为准谱面)可以看出,在 x 方向的光谱焦线倾斜很大,因此在图 6 中像斑在 x 方向上的尺寸较大。由图 8 还可以看出在 y 方向的光谱焦线基本分布在准谱面上,这是所希望的。通过使用汞灯实测,在使用芯径为 50 μm 的多模光纤时, x 方向的尺寸约为 450 μm 。实际上关心的是在 y 方向的像斑大小,因为这直接关系到光谱仪的光谱分辨率。在幅值相同的两条谱线在半宽位置交叉时刚好不能分开,如图 9 所示,设色散宽度为 L ,最大像斑半径为 R_{\max} ,则能够分辨的最小波长间隔为 $\delta\lambda = 2R_{\max}(\lambda_{800} - \lambda_{400})/L$ 。考虑到入射光纤的芯径为 $\phi = 9 \mu\text{m}$,及物像关系可知在考虑光纤孔径后的光谱像斑的均方根半径的最大值应为 $r_{\max} = r_{\text{max}} + 2\phi \times L_2/L_1 = 15 \mu\text{m}$,考虑到色散宽度为 $L = 12 \text{ mm}$,可知此时光谱分辨率约为 1 nm,此时系统入射和出射的有效相对孔径分别为 0.2 和 0.093。若使用数值孔径为 0.2

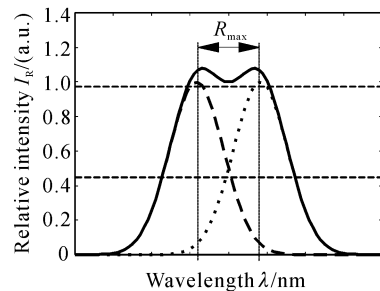


Fig. 9 The resolution limit of adjacent wavelengths

的多模光纤, 光纤的芯径为 $\phi=50\ \mu\text{m}$, 此时光谱像斑均方根半径最大值 $r_{\text{max}}=0.0115\ \text{mm}$, 相应的光谱分辨率为 $4.33\ \text{nm}$, 此时系统入射和出射的有效相对孔径分别为 0.385 和 0.180 。

4 初步实验结果及讨论

对该光谱分析系统的实际光谱分辨率进行了初步实验测试, 光源采用 $632.8\ \text{nm}$ 氦氖激光器和汞灯, 系统的有效输入光强约为 $800\ \text{nW}$, 以芯径为 $9\ \mu\text{m}$ 数值孔径为 0.1 单模光纤作为输入, 探测器采用像元中心距为 $25\ \mu\text{m}$ 的互补型金属氧化物半导体 (COMS) 光电探测器阵列 (由于集成化要求使用未封装的光电探测阵列, 因此为了方便起见采用重庆大学光电工程学院研制的光电探测阵列), 按图 3 的结构进行实验, 将探测器直接放在光谱像面上。其输出的谱图如图 10、图 11 所示, 由图 10 可知光谱的半高宽度占了 5 个像元, 也就是空间半宽为 $125\ \mu\text{m}$, 考虑到色散宽度为 $12\ \text{nm}$, 实际光谱分辨率为 $4\ \text{nm}$ 。由图 7 可知 $632.8\ \text{nm}$ 正好位于最大像斑半径附近, 因此可认为该系统实际光谱分辨率即为 $4\ \text{nm}$, 约为理论值的 4 倍。主要原因可能是实验装置的相对位置误差造成的。

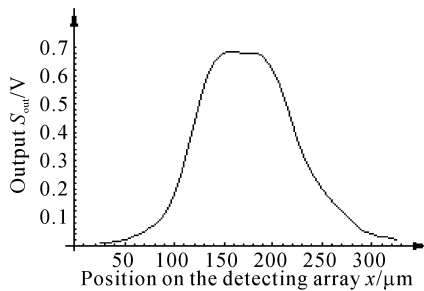


Fig. 10 Reconstructed output signal of the spectrum of He-Ne laser fiber radius $=9\ \mu\text{m}$, $\text{NA}=0.1$

为了讨论装调误差对系统分辨率的影响, 我们通过计算机模拟得到入射光纤 (数值孔径为 0.1 , 芯径为 $9\ \mu\text{m}$ 和数值孔径为 0.2 , 芯径为 $50\ \mu\text{m}$) 与全息光栅相对位置存在误差时引起的像斑均方根半径的变化, 如图 12、图 13 和图 14 所示, 如果使用光纤的数值孔径为 0.1 , 芯径为 $9\ \mu\text{m}$, 当输入光纤与凹面光栅相对位置误差在水平方向达到 $\Delta x=\pm 0.2\ \text{mm}$, 像斑的均方根半径最大值可达 $7\ \mu\text{m}$, 考虑光纤孔径后的光谱分辨率为 $1.11\ \text{nm}$; 当输入光纤与凹面光栅相对位置误差在水平方向达到 $\Delta y=\pm 0.2\ \text{mm}$, 像斑的均方根半径最大值可达 $10\ \mu\text{m}$, 考虑光纤孔

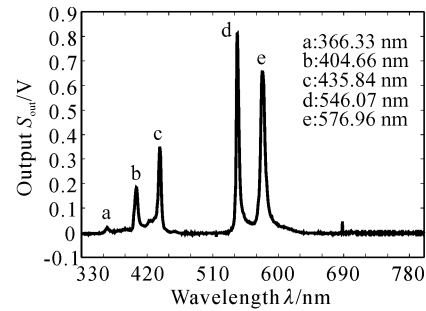


Fig. 11 Spectrum signal of Hg lamp fiber radius $=9\ \mu\text{m}$, $\text{NA}=0.1$

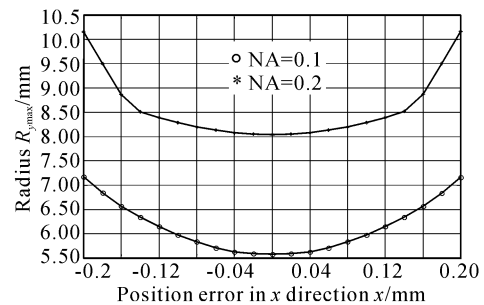


Fig. 12 The influence on the radius of the spectrum images caused by position error in x direction

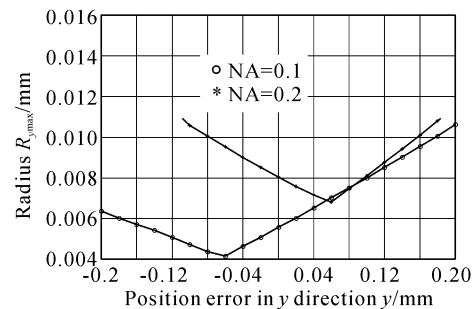


Fig. 13 The influence on the radius of the spectrum images caused by position error in y direction

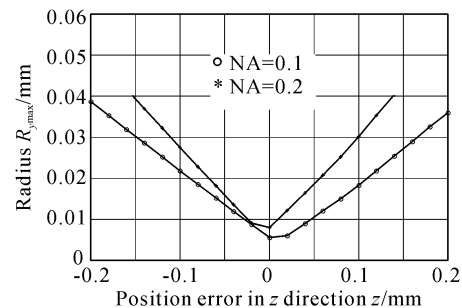


Fig. 14 The influence on the radius of the spectrum images caused by position error in z direction

径后的光谱分辨率为 $1.3\ \text{nm}$; 当输入光纤与凹面光栅相对位置误差在垂直方向达到 $\Delta z=\pm 0.2\ \text{mm}$, 像斑的均方根半径最大值可达 $40\ \mu\text{m}$, 考虑光纤孔径后的对应的光谱分辨率为 $3.3\ \text{nm}$ 。由此可知输入

光纤与凹面光栅相对位置的误差对系统分辨率的影响很大,尤其是 z 方向上的误差。这也是实验测得分辨率较理论值差的一个重要原因,因此在设计实际系统时应尽量减小装配误差,从而保证系统有较高的分辨率。

在实验中由于光谱信号的强度远大于互补型金属氧化物半导体图象传感器的噪声,因此噪声对该微型光谱仪的分辨率几乎没有影响;并且在以上的计算机模拟中只考虑了光线的点列图,而没有考虑光的干涉效应,因此实际的分辨率也应该低于理论上计算得出的结果;同时探测器的中心距也是影响光谱仪分辨率的一个因数,在初步的实验中采用的是像元中心距为 $25\ \mu\text{m}$ 的探测器线阵,在今后的设计中可以适当的减小像元中心距;然而从以上的模拟结果可以看出,位置误差对于像斑的尺寸影响很大,因此这也是影响光谱仪分辨率的一个重要原因。

结束语 本文提出了一种混合集成的微型光纤光谱仪分析系统,该系统采用全息凹面光栅减少了系统的光学元件数量,简化了系统结构,并实现了光谱像面的平直。通过光线追迹对该系统的光学结构部分进行了模拟,在采用芯径为 $9\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.1 的单模光纤时,它的理论分辨率可达 $1\ \text{nm}$,通过初步实验测得的实际分辨率约为 $4\ \text{nm}$ 。并对理论分辨率和实际分辨率之间的偏差进行了分析。由模拟结果和初步实验结果表明,这是一种较为理想的微型光谱仪设计方案。

参 考 文 献

1 Nishihara H, Haruna M, Suhara T. *Optical Integrated*

- Circuits*. New York: McGraw-Hill, 1989
- 2 Kwa T A, Wolffenbuttel R F. Integrated grating/detector array fabricated in silicon using micromachining techniques. *Sensors and Actuators (A)*, 1992, **31**:259~266
- 3 Yee G M, Maluf N I, Hing P A *et al.*. Miniature spectrometers for biochemical analysis. *Sensors and Actuators (A)*, 1997, **58**:61~66
- 4 Holm-Kennedy J, Tsang K, Sze W *et al.*. Anovel monolithic chip integrated color spectrometer. *Proc. SPIE*, 1991, **1527**:322~331
- 5 Goldman D, White P, Anheier N. Miniaturized spectrometer employing planar waveguides and grating couplers for chemical analysis. *Appl. Opt.*, 1990, **29** (31):4583~4589
- 6 Goldman D S, White P L, Anheier N C. Planar waveguide spectrometer. *Proc. SPIE*, 1990, **1338**:64~68
- 7 Jerman J H, Clift D J, Mallinson S R. A miniature Fabry-Perot Interometer with a Corrugated Diaphragm Support. *Digest IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, CA, USA, June 1990. 140~144
- 8 Jerman J H, Clift D J. Miniature Fabry-Perot interferometers micromachined in silicon for use in optical fiber WDM systems. *Digest, IEEE Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, San Francisco, CA, USA, June 23~27, 1991. 372~375
- 9 Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T. Narrow-band tunable wavelength-selective filters of Fabry-Perot interferometers with a liquid crystal intracavity. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**:213~215
- 10 Hu Song, Wen Zhiyu, Chen Weiming *et al.*. Design of a novel micro spectrometer, *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2000, **22**(6):363~366
- 11 Zhuang Juchi. Optimum design of holographic concave grating. *Appl. Opt.*, 1992, **13**(5):38~41
- 12 Lin Zhong, Fan Shifu. *Spectrum Instruments*(光谱仪器学). 1st edition, Beijing: Engineering Industry Publishing House, 1989. 260 (in Chinese)

A Hybrid Integrated Micro Fiber Spectrometer Design, Simulation and Primary Experiments

Wen Zhiyu Chen Gang Wen Zhongquan Jiang Ziping Huang Shanglian
(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044)

(Received 12 March 2002; revised 17 June 2002)

Abstract: In this paper, a hybrid integrated micro fiber spectrometer is put forward. A holographic concave grating is adopted as dispersing and imaging element, which can easily realize the flat spectrum plane. The detecting element is linear CMOS image sensor. The spectrum range of this micro spectrometer is from $400\ \text{nm}$ to $800\ \text{nm}$. The whole system has many advantages, such as a few optic elements, higher transfer efficiency, compact structure and small volume. The structure and parameter of this micro spectrometer are optimized. First experiment and computer simulation are carried out to test the design. The results has been shown that this micro fiber spectrometer has a good performance.

Key words: micro fiber spectrometer; holographic recording; electrophotonic detecting array