

文章编号:1002-2082(2015)01-0046-06

基于全息光学元件的光纤光谱仪的光路设计

江丽平¹, 隋成华¹, 陈晓明²

(1. 浙江工业大学 理学院应用物理系, 浙江 杭州, 310023; 2. 杭州博源光电科技有限公司, 浙江 杭州, 310023)

摘要:基于全息光学理论分析了全息光学元件的高斯成像性质, 包括光焦度、成像位置、衍射效率以及作为光纤光谱仪光栅元件的可行性, 并以全息光栅的成像理论以及光谱仪工作原理为基础, 设计了光谱仪器光学系统的各个参数, 通过 Zemax 软件的仿真、像质评价及优化, 得出最终的参数和模拟结果。所使用的全息光栅记录波长为 575 nm, 记录光束之间的夹角为 10°, 一束为平面波, 一束为球面波, 焦距 40 mm, 使用 +1 级衍射光, 光栅孔径为 10 mm。光谱仪的工作波长范围为 400 nm~800 nm, 体积 140 mm×30 mm×40 mm, 谱面展宽 29.1 mm。通过在光学平台上搭建光路, 利用已研发完成的电路系统及光谱仪软件, 针对汞灯光谱进行了试验, 光谱分辨率优于 8 nm, 测量得到的汞灯光谱与标准汞灯光谱一致, 表明了所设计的基于全息元件的光纤光谱仪光学系统是可行的。

关键词:全息光学元件; 光纤光谱仪; Zemax 仿真; 光学设计

中图分类号: TN25

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201536.0101009

Design of optical system for fiber optic spectrometer based on holographic optical elements

Jiang Liping¹, Sui Chenghua¹, Chen Xiaoming²

(1. Department of Applied Physics, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Hangzhou Brolight Opto-electric Science and Technology Co., Ltd., Zhejiang 310014, China)

Abstract: Based on the theory of holographic optics, we analyzed the Gaussian imaging properties of holographic optical elements, including the optical focal power, position of imaging and diffraction efficiency, verified its feasibility to be a grating for the spectrometer. Based on the above theory and the spectrometer work principle, we designed the optical system, and through the simulation, image quality evaluation and optimization with Zemax, the final result was got. The parameters of holographic grating were as follows: the recording wavelength was 575 nm, the angle between the recording beams (a planar wave beam and a spherical wave beam) was 100, the focal length was 40 mm, the used diffracted light was +1 order, the aperture was 10 mm; The parameters of spectrometer were as follows: the range of work wavelength was 400 nm~800 nm, the volume was 140 mm×30 mm×40 mm, the width of spectrum was 29.1 mm. Finally, we built the light path on the optical platform, used the circuit system and the spectrometer software that were developed completely to collect mercury lamp spectrum. Testing results show the spectral resolution is better than 8 nm, the mercury spectra obtained are the same with the standard one, indicating that the optical system designed based on holographic optics is feasible.

收稿日期: 2014-08-01; 修回日期: 2014-09-19

基金项目: 浙江省科技厅重大专项资助项目(2010C11G2020039)

作者简介: 江丽平(1989—), 女, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 501712949@qq.com

导师简介: 隋成华(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感和光信息处理方面的研究。E-mail: suich@zjut.edu.cn

Key words: holographic optical elements; fiber spectrometer; Zemax simulation; optical design

引言

到目前为止,以全息术为基础制造光学元件的可能性已经完全被肯定,而全息光栅可能是最普通的商品全息元件。一般来说,一个全息光学元件是用2个点光源记录的,其中平面波可认为是点光源位于无穷远的一种特例,通过实践证明,与传统的折射和反射元件相比,全息光学元件有着其独特的优点^[1],比如:提供一个“薄膜光学系统”,这意味着大孔径光学系统可以有较轻的质量;与传统的光学元件不同,全息光学元件的功能与底板的形状基本上没有关系,而与底板上的干涉条纹结构密切相关;一个单个的全息光学元件可以提供一个系统的功能,例如,一个集分光和成像为一体的全息透射光栅,可替代普通元件透射光栅与成像透镜。这种特性不仅可以简化光路,而且无鬼线,像差小,信噪比高。但是全息光学元件成像特性对工作波长比较敏感,有密切联系,在使用宽波段光束下,色散的校正尤为重要;同时在设计结构参数时,必须考虑全息光学系统的衍射效率;如果一个光学系统包含全息光学元件,设计时必须考虑2个光学系统,即使用光学系统和记录光学系统,为了校正不对称像差,系统中还必须使用偏心和倾斜透镜,因此增加了设计和加工难度。光谱仪器是研究、测定光辐射的频率、强度特性及其变化规律的光学仪器,是分析物质组成成分以及结构、测量溶液浓度、吸收率和透射率的一种有效工具。近年来,随着全息技术的发展,为我们提供了各种功能的低成本全息光栅,使得基于全息元件的光纤光谱仪成为可能。本文主要通过研究全息光学元件的高斯成像性质,包括光焦度、成像位置以及衍射效率等参数,设计了一款适用于教学的光纤光谱仪的全息光栅,并以此光栅为光谱仪的核心元件初步设计了光谱仪的光学系统。对该光学系统利用ZEMAX软件进行优化,消除主要像差,得到最终参数。

1 设计理论

以衍射和干涉理论为基础的全息透镜是一种非常用的光学元件,可以同时具备普通透镜和棱镜的功能:首先,它像一块棱镜,可以使光轴发

生偏转;其次,可以作为透镜,对物体成像。为提高衍射效率,常用的全息光学元件均采用离轴技术制造。根据全息光学元件的基本成像理论,离轴全息光学元件的基本坐标系如图1所示。 Q 是空间中任意一点,全息底板位于 $X-Y$ 平面内, P 是全息底板上的一点。假设从 Q 到底板中心的距离是 R_q , R_q 直线在 $Y-Z$ 平面上的投影与 $X-Z$ 平面的夹角是 β_q ,与 R_q 直线的夹角是 α_q ,那么 Q 点在该坐标系中可表示为 (R_q, α_q, β_q) ,角标 R 、 O 、 C 、 I 分别表示记录参考点、记录物点、再现点和像点。注意在讨论和分析全息光学元件时,记录物点往往是一束记录光束,与成像光学系统中的物体光束没有任何关系,而角标 C 所表示的光束特征才是使用光路中实际要分析的光束,根据全息光学元件的记录和成像几何图形,可以确定全息光学元件的高斯成像性质^[1]:

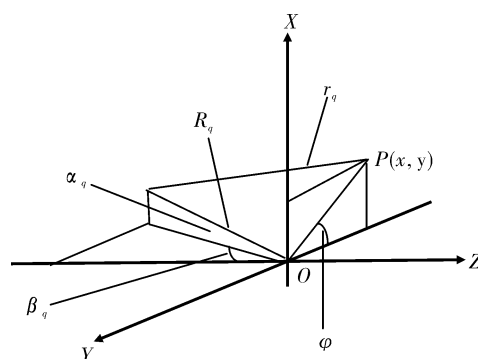


图1 离轴全息光学元件基本坐标系

Fig. 1 Basic coordinate system of off-axis holographic optical element

$$\frac{1}{R_I} = \frac{1}{R_C} \pm \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right) \quad (1)$$

$$\sin \alpha_I = \sin \alpha_C \pm \frac{\mu}{m} (\sin \alpha_O - \sin \alpha_R) \quad (2)$$

$$\sin \alpha_I \sin \beta_I = \cos \alpha_C \sin \beta_C \pm \frac{\mu}{m} (\cos \alpha_O \sin \beta_O - \cos \alpha_R \sin \beta_R) \quad (3)$$

式中: $\mu = \lambda_C / \lambda_O$ 代表再现波长与记录波长之比,称之为波长变化因子; m 是干涉条纹间隔在化学处理前后变化的比例因子,在理想状态下 $m = 1$; \pm 符号,当分析虚像时取正,分析实像时取负。如果再现光束完全是沿着记录过程中参考光束方向照射到全息光学元件上,那么,无论是透射型还是反射型全息光学元件,都会形成一个虚像,然而使用

记录参考光束的共轭光束照射全息元件, 那么再现光束方向恰好与记录参考光束的方向相反, 在这种情况下得到的是实像。由于此光栅用于光谱仪的分光和成像, 我们需要用 CCD 接收成像光束, 所以, 我们使用共轭参考光束再现。在设计光栅时, 我们将记录物点和记录参考光放在 X-Z 平面上, 且将记录物点设置在 Z 轴上, 那么 $\alpha_0 = 0, \beta_0 = 0, \beta_R = 0$, 利用(1)式和(2)式便能得到物像关系。此外我们采用的记录光束, 一束为球面波, 一束为平面波, 则 $R_R = \infty$, 因为再现光为记录参考光的共轭光, 所以 $R_C = \infty$ 。(1)式和(2)式可改写为

$$R_I = -\frac{R_O}{\mu} \quad (4)$$

$$\sin \alpha_I = \sin \alpha_C + \mu \sin \alpha_C = (1 + \mu) \sin \alpha_C \quad (5)$$

α_I 即为不同波长衍射光线在 X-Z 平面内的衍射角, 又因为衍射角较小, 所以有:

$$\alpha_I \approx \sin \alpha_I = \frac{\lambda_0 + \lambda_C}{\lambda_0} \sin \alpha_C \quad (6)$$

全息光学元件的焦距 $f_{(H)}$ 可由下式求出^[1]:

$$\frac{1}{f(H)} = \frac{\mu}{m} \left(\frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right) \quad (7)$$

当 $R_R = \infty, m = 1$ 时, $f_{(H)} = \frac{R_O}{\mu}$ 。即当记录参考光为平行光入射时, 其焦点即为记录点光源的实像, 焦距与再现光的波长有关, 对于同一个全息光学元件, 再现光的波长越长, 其焦距越小, 再现光的波长越短, 其焦距越大。 $F^\#$ 可以表示为

$$F^\# = \frac{f(H)}{D} \quad (8)$$

另一种表现形式, 空间中任意点 O, R, C, I 有如下物像关系^[1]:

$$x_I = \frac{m^2 x_C z_O z_r \pm m \mu (x_O z_C z_r - x_r z_C z_O)}{m^2 z_O z_r \pm \mu (z_C z_r - z_C z_O)} \quad (9)$$

$$y_I = \frac{m^2 y_C z_O z_r \pm m \mu (y_O z_C z_r - y_r z_C z_O)}{m^2 z_O z_r \pm \mu (z_C z_r - z_C z_O)} \quad (10)$$

$$z_I = \frac{m^2 z_C z_O z_r}{m^2 z_O z_r \pm \mu (z_C z_r - z_C z_O)} \quad (11)$$

若再现光为记录参考光的共轭光, 参考点位于无穷远, 且物点和参考点都位于 X-Z 平面上, 则 $x_C = -x_r, z_C = -z_r, m = 1$, 取负号, 那么就有如下关系式:

$$x_I = \frac{x_C z_O - \mu (x_O z_C - x_C z_O)}{z_O - \mu (z_C + z_O)} \quad (12)$$

$$z_I = \frac{z_C z_O}{z_O - \mu (z_C + z_O)} = -\frac{Z_O}{\mu} \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式便可得:

$$x_I = \frac{x_C z_O - \mu (x_O z_C - x_C z_O)}{z_O - \mu (z_C + z_O)} = \frac{x_C z_O - \mu (x_O z_C - x_C z_O)}{-\mu z_C} = -\frac{x_C z_O}{\mu z_C} + x_O - \frac{x_C z_O}{z_C} \quad (14)$$

令 $\frac{x_C}{z_C} = \tan \theta_C \approx \sin \alpha_C$, 那么:

$$x_I = z_I \tan \theta_C + x_O - z_O \tan \theta_C \quad (15)$$

$$\frac{dx_I}{dz_I} = \tan \theta_C \approx \sin \alpha_C \quad (16)$$

$$\frac{x_I}{z_I} = \frac{x_O - \tan \theta_C z_O (\lambda_C + \lambda_O \lambda_C)}{-\lambda_O / \lambda_C z_O} \quad (17)$$

因为记录物点在 Z 轴上, 所以 $x_O = 0$, 上式不同波长衍射角可表示为

$$\theta_I \approx \tan \theta_I = \frac{x_I}{z_I} = \frac{\lambda_C + \lambda_O}{\lambda_O} \tan \theta_C \quad (18)$$

(16)式说明光谱分布在与参考光平行的直线上, θ_C 角为参考光与全息光栅平面法线的夹角, 即与 z 轴的夹角:

$$L = \frac{z_{h_2} - z_{h_1}}{\cos \theta_C} \quad (19)$$

式中: L 为光谱在 CCD 接收面上的展开宽度; λ_1, λ_2 分别为工作波长中最大和最小波长。

综上所述, 在实际的光路设计中, 主要涉及的元件及其参数如表 1 所示。光谱分布示意图如图 2 所示, 其光路原理如图 3 所示。其中光源为点光源, 准直透镜设为 Paraxial, 即为近轴面—有理想特性的薄透镜, 将点光源放置在准直镜焦点上, 平行光以一定角度入射到全息光栅上, 入射的光线经过分光再聚焦在其焦平面上, 焦平面与入射光平行。

表 1 主要涉及的光学元件参数

Table 1 Main parameters of optical elements

入射狭缝	宽度/mm
准直透镜	焦距 $f(h)$ /mm
	孔径 ϕ /mm
全息光栅	记录物点坐标/mm
	记录参考光与全息底板的法线的夹角 $\theta/(^\circ)$
	记录波长 $\lambda_0/\mu\text{m}$

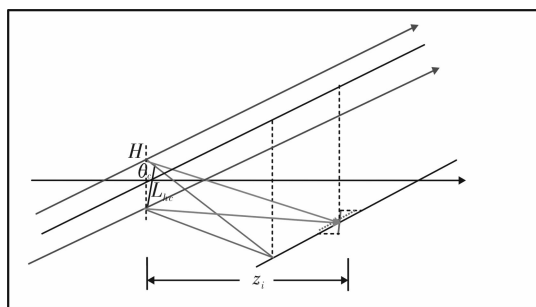


图2 光谱分布示意图

Fig. 2 Spectrum distribution diagram

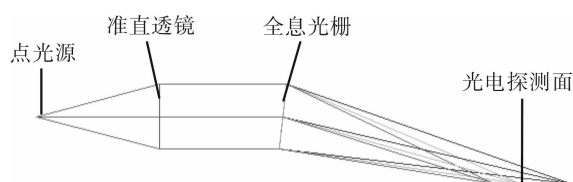


图3 Zemax 模拟基于全息元件的光纤光谱仪的光学原理图

Fig. 3 Optical schematic of fiber spectrometer based on holographic element simulated by Zemax

2 设计实例及分析

根据焦距及谱面展宽公式(7)和(19),以及光纤光谱仪整体体积所设计光栅参数:记录物点坐标 $O(0,0,40)$,记录参考点坐标 $R(0,-1.74E+5,-1.0E+6)$,点光源处于 5 m 外可视为无限远,即平行光入射,模拟时记录物点发散,记录参考光汇聚。记录波长 $\lambda_0=575$ nm,光栅孔径为 10 mm,使用+1 级衍射光。再现光即使用光路中的入射光与光栅夹角 10° ,狭缝宽 $25\ \mu\text{m}$ 。平凸型准直镜焦距 45 mm,凸面曲率半径 -24.49 mm,厚度为 3 mm。按上述参数设计出的光学系统图及像质评价图如图 4 和图 5 所示。在光学平台上搭建光路,利用已研发完成的电路系统及光谱仪软件,针对汞灯光谱进行了试验,所获得的基于全息元件的测量光谱如图 6 所示,将实验结果与标准汞灯光谱比对,基本一致。

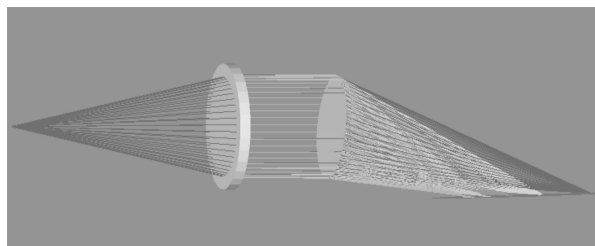


图4 光学系统渲染图

Fig. 4 Optical system rendering

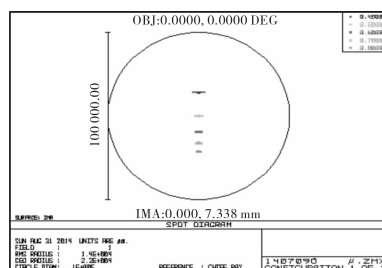


图5 光学系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of optical system

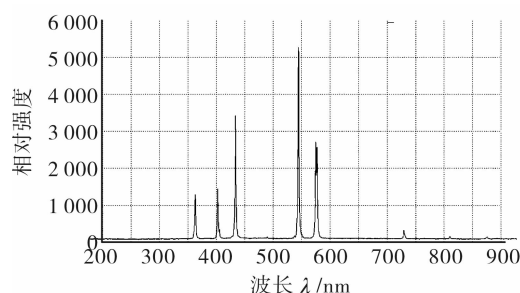


图6 汞灯光谱

Fig. 6 Spectrum of mercury lamp

分辨率的讨论:

在光谱仪光路设计中,分辨率是重要的参数。在计算中通常是通过成像弥散圆的大小来考虑的。由于分辨率的大小主要取决于光谱的展宽以及光谱在展宽方向的大小,也就是 Y 方向均方根半径的大小,并且考虑到实际入射光纤芯径的影响,理论上像斑的大小可以用点光源像斑大小加上孔径像尺寸来表示。设弥散斑最大的弥散圆半径是 $R_{\text{点}}$,光纤的芯径为 ϕ ,光栅物距 L_1 ,像距 L_2 ,则理论上的半径可表示为

$$R_{\text{theory}} = R_{\text{point}} + \phi L_2 / L_1 \quad (20)$$

在计算理论分辨率时, R_{point} 取 X 方向上半径最大的像斑,而根据光谱展宽 L 和波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 及瑞利判据,若认为形状相同的 2 条谱线在空间相隔一个空间半宽度时刚好能够分辨,则光栅能分辨的最小波长间隔^[4]可表示为

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{L / 2R_{\text{max}}} \quad (21)$$

在本设计中,采用的光纤芯径为 250 nm,物距 L_1 为无穷远,像距 L_2 为 50 mm,所以理论上的 $R_{\text{理论}} = R_{\text{点max}}$,RMS 随波长的变化关系如图 7 所示,最大 RMS 约为 400 μm ,最小值为 210 μm ,波长展宽 $L=29$ mm,那么:

$$\delta\lambda_{\text{max}} = \frac{(800-400)\text{nm} \times 2 \times 300\text{nm}}{29 \times 10^6\text{nm}} \approx 3.28\text{nm} \quad (22)$$

$$\delta\lambda_{\min} = \frac{(800-400)\text{nm} \times 2 \times 50\text{ nm}}{29 \times 10^6\text{ nm}} \approx 2.76\text{ nm} \quad (23)$$

这里所说的是理论光栅分辨率,实际中考虑到装调误差会比理论低一些。由上可知,由于受到线阵 CCD 的限制,存在波谱范围宽而光谱谱面展宽较小的矛盾,宽工作光谱的分辨率较低。

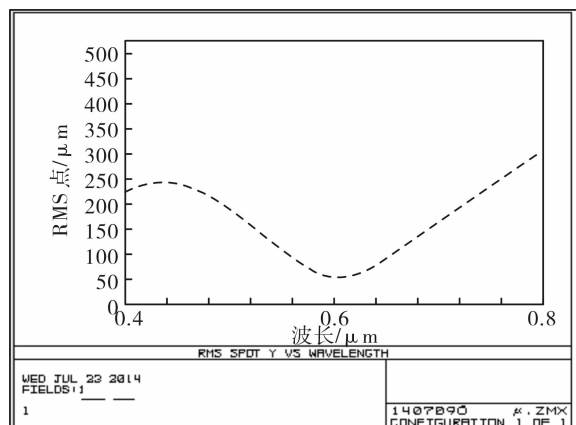


图 7 弥散斑径向 RMS 图

Fig. 7 RMS spot versus wavelength

若选用工作光谱范围 480 nm~650 nm 为了使光谱展宽为 29 mm,仍然使用 575 nm 的记录波长,则光栅焦距为 91.2 mm。根据上述方法,可计算理论分辨率:

$$\delta\lambda'_{\max} = \frac{(650-480)\text{nm} \times 2 \times 280\text{ nm}}{29 \times 10^6\text{ nm}} \approx 3.28\text{ nm} \quad (24)$$

若选用有效长度更长的线阵 CCD,比如 40 mm,此时仍使用原记录波长,工作光谱范围仍为 400 nm~800 nm,光栅焦距为 55 mm。则其光栅能分辨的最小波长:

$$\delta\lambda''_{\max} = \frac{(800-400)\text{nm} \times 2 \times 320\text{ nm}}{40 \times 10^6\text{ nm}} \approx 4.1\text{ nm} \quad (25)$$

3 结论

本文通过对全息光学元件成像原理的研究分析,设计了一种基于平面透射全息光栅的微型光纤光谱仪的光学系统,通过 ZEMAX 软件的仿真和优化,得到最终参数:全息光栅的记录波长为 575 nm,记录光束之间的夹角为 10°,一束为平面波,一束为球面波,焦距 40 mm,使用 +1 级衍射光,光栅孔径为 10 mm;光谱仪的工作波长范围为 400 nm~

800 nm,体积 140 mm×30 mm×40 mm,谱面展宽 29.1 mm。最后,在光学平台上搭建光路,利用已研发完成的电路系统及光谱仪软件,针对汞灯光谱进行了试验,光谱分辨率优于 8 nm,测量得到的汞灯光谱与标准汞灯光谱一致,表明了所设计的基于全息元件的光纤光谱仪光学系统是可行的。

但在实验中发现该光学系统仍存在以下几个问题:首先是零级衍射光较强,容易被 CCD 接收,产生干扰;其次透射平面全息光栅的 1 级衍射效率不高,使得所测汞灯的其中 3 条谱线强度较弱。

致谢: 本研究工作受到了浙江师范大学信息光学研究所王辉教授与金洪震教授的大力支持,不仅对全息元件的理论研究方面给予了指导,并提供了全息光栅元件样品。在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Holographic optical design, production and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
周海宪,程云芳. 全息光学—设计、制作和应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] Zhang Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [3] Huang Zhenyu, Sun Liqun. Miniature spectrometer based on linear CCD photometric characteristics[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28 (5): 564-568.
黄振宇,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): 564-568.
- [4] Xiang Xianyi, Wen Zhiyu. The simulation and design of near-infrared holographic concave grating for flat field spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28 (7): 1670-1673.
向贤毅,温志渝. 用于近红外光谱仪的平场凹面光栅的模拟与设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(7): 1670-1673.
- [5] Wang Gouquan, Fan Xian, Tan Shuming. Concave and flat holographic grating design principles and calculation method of making compensation gratings [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1988, 12 (3): 29-38.
王国权,范希安,谭叔明. 凹面和平面光栅设计原理及计算全息补偿法制作光栅[J]. 半导体光电, 1988, 12(3): 29-38.

- [6] Wen Zhiyu, Chen Gang. Design simulation and experimental for hybrid integrated fiber-optic spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2003,23(6):740-744.
温志渝,陈刚. 混合集成型光纤光谱仪的设计模拟及实验[J]. 光学学报,2003,23(6):740-744.
- [7] Wang Han, Li Shuifeng, Liu Xiuying. Study miniature spectrometer optical structure[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29 (2): 230-233.
王晗,李水峰,刘秀英. 微型光谱仪光学结构研究[J]. 应用光学,2008,29(2):230-233.
- [8] Yu Bin, Chen Danni, Sun Qiang, et al. Diffractive optical design and analysis of new imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica,2009,29(5):1260-1263.
于斌,陈丹妮,孙强,等. 新型衍射光学成像光谱仪的设计和分 析 [J]. 光 学 学 报,2009,29 (5):1260-1263.
- [9] Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of micro grating spectrometer optical system and the spectral resolution improve[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27 (8):1653-1656.
贾辉,姚勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(8):1653-1656.
- [10] Zhu Deshun, Sun Hong. Holographic optical lens imaging and spectral analysis processing holographic grating 4f optical system[J]. Journal of Applied Optics, 1986,7(5): 16-18.
祝德顺,孙鸿. 全息光学透镜成像及全息光栅频谱分析在 4f 光学系统中的处理[J]. 应用光学,1986,7(5):16-18.
- [11] Wu Janfen, Zhao Lei, Chen Yongyan, et al. Flat-field concave holographic grating with broad spectral region and high resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (4): 83-87.
武建芬,赵雷,陈永彦,等. 宽谱高分辨平场凹面全息光栅光谱仪设计[J]. 光学学报,2012,32(4):83-87.