

一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统

任 重^{1,2} 刘国栋¹ 黄 振¹

¹江西科技师范大学光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330038

²南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031

摘要 针对平面和凹面反射式光栅型光谱仪分光光路(SLP),存在像差大、谱面平直度差和衍射效率不高等不足,设计了一套基于体相位全息透射式(VPHT)光栅的分光光路。在理论探讨的基础上通过数值仿真模拟了VPHT光栅的衍射效率情况;为了充分验证所设计光路的可行性,实验中通过光谱定标验证了光路的光谱分辨率优于2 nm,通过最小二乘线性拟合算法得到定标波长与对应探测像元的校准关系式,对635 nm波长采用多次测量取平均值,测试结果表明波长绝对误差为0.37 nm,整个定标波长点的均方根误差(RMSE)为0.3 nm;另外,使用了多项式拟合算法建立了200~800 nm光谱范围内的波长偏移量与对应衍射波长的关系式,能较好地解决分光光路中波长校正的问题。

关键词 光谱学; 光谱仪; 分光系统; 光栅; 波长校准

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0608004

A Spectrometer Splitting-Light System Based on Volume Phase Holographic Transmission Grating

Ren Zhong^{1,2} Liu Guodong¹ Huang Zhen¹

¹Key Laboratory of Photo-Electronic and Communication, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang, Jiangxi 330038, China

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

Abstract To overcome some drawbacks of splitting-light path (SLP) for plane and concave grating typed spectrometer, including serious aberration, worse spectral fatness and low diffraction efficiency etc, a novel SLP based on volume phase holographic transmission (VPHT) grating is designed. For this grating, its manufacture and theories are investigated, and its diffraction efficiency is numerically simulated. In order to validate this designed SLP, the spectral scaling experiment is performed and the spectral resolution is better than 2 nm, the calibration equation between the scaling wavelength and corresponding pixels is gotten via linear least square fitting algorithm. It is proved that the wavelength absolute value is about 0.37 nm on the wavelength of 635 nm with the method of averaging multiple measurements, the root-mean-square error (RMSE) of full scaling wavelengths is 0.3 nm. In addition, for wavelengths of 200~800 nm, the relationship between wavelength biases and corresponding diffraction wavelengths is established via polynomial fitting algorithm, which can greatly solve the problem of wavelength calibration in SLP.

Key words spectroscopy; spectrometer; splitting-light system; grating; wavelength calibration

OCIS codes 120.4820; 120.6200; 220.2740; 220.4830; 230.1950

1 引 言

在现代许多测量领域,光谱仪的使用越来越受人们青睐,而分光系统的好坏直接决定了光谱仪的性能。分光系统可分为滤光片型^[1]、棱镜型^[2]、傅里叶变换型^[3]、声光可调谐型^[4]和光栅型^[5-6]等。其中光栅型分光

收稿日期: 2015-01-07; 收到修改稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61068002)、江西省自然科学基金(20114BAB215047)、江西省科技支撑计划项目(20132BBG70103)、校级创新团队项目(2013CXTD001)、青年拔尖人才自然科学基金(2014QNBjRC004)

作者简介: 任 重(1981—),男,博士,讲师,主要从事光电子学方面的研究。E-mail: renzhong0921@163.com

系统由于衍射效率、分辨率和色散率高等特点被广泛使用。虽然传统反射式光栅使用较广,但由于反射式光路光学器件较多,光谱易产生像差^[7-8]和光能损失较大。并且,传统光栅由于机械或化学等制作工艺,在光栅凹槽表面上会产生细微的裂纹,导致光路产生严重的杂散光。而体相位全息透射式(VPHT)光栅不但其一级谱比高级谱的衍射效率高,而且在满足一定条件下^[9],可以使偶级光谱完全消失,并且全息光栅的衍射光束是在与入射光成一定角度传输的,能以最佳的工作状态进行分光。同时,几乎不存在表面裂缝导致的杂散光问题,可以大大提高光谱测量的性能。

近年来,一些学者对全息光栅在光谱仪上的应用进行了研究,如:Gelsinger-Austin P J等^[10]利用全息光栅设计了一种空间谱全息成像系统,具有较宽的视场范围和分辨率。Weisberg A等^[11]利用透射式光栅设计了一种激光诱导击穿光谱仪,与反射式光谱仪相比,信噪比提高了3倍多。O'Donoghue D E等^[12]利用全息透射式光栅设计了一种球面光栅光谱仪,可以在光栅衍射效率和仪器尺寸等方面得到改善。孔鹏等^[13]提出一种双光栅切换微型平场全息光栅光谱仪的设计方法,显著地改善了仪器的通光效率和分辨率。同时,也有学者对VPHT光栅的衍射效率进行了分析研究,如:Gao Hua等^[14]对入射光波长、光栅厚度与VPHT光栅的衍射效率进行了分析,并指出其衍射效率还与光栅周期和入射狭缝宽度有关系。Li Ming等^[15]利用严格耦合波理论对VPHT光栅衍射效率进行了分析,经测试该光栅在590 nm波长处衍射效率可达85%。

虽然上述学者对全息光栅和其衍射效率等进行了研究,但是针对利用VPHT光栅来制作光谱仪及分光系统的研究较少。因此,本文使用了光致聚合物和全息技术制备的VPHT光栅作为光谱仪的分光器件,设计和制作了基于VPHT光栅的光谱仪分光装置。对VPHT光栅进行了理论探讨,并对影响光栅衍射效率的光栅厚度、入射光波长和吸收系数等参数进行了仿真。实验中,使用硅光二极管探测器捕获光谱,在汞灯光谱定标的基础上,通过实验测试表明该分光系统的光谱分辨率优于2 nm。同时分别通过线性拟合和多项式拟合算法得到了该分光系统光谱定标关系式和光谱校正偏移量关系式,这对分光系统的设计和优化具有很好的效果。

2 耦合波理论

VPHT光栅的衍射原理示意图如图1所示,当入射光满足布拉格条件,即入射光角度等于 θ_0 时,理论上衍射效率可以达到100%。布拉格衍射条件表述如下:

$$\Lambda = \lambda / 2n \sin \theta_0, \quad (1)$$

式中 Λ 为光栅周期, λ 和 n 分别是材料内的光波波长和平均折射率。

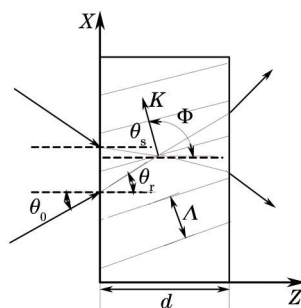


图1 VPHT光栅衍射原理示意图

Fig.1 Principle schematic diagram of diffraction for the VPHT grating

在一些文献^[16-18]中,常使用无吸收光栅的二波耦合理论来进行分析。而考虑光吸收带来的影响,定义 α 为吸收系数,利用吸收光栅的二波耦合理论^[19-20]来分析衍射效率 η :

$$\eta = \exp(-2\alpha d / \cos \theta_0) \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + (\xi/\nu)^2}, \quad (2)$$

式中

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\delta d}{2 \cos \theta_s}, \quad (4)$$

式中 Δn 为折射率幅度增量, d 为光栅厚度。(4)式中, δ 为失配因子, 表示为

$$\delta = \Delta\theta \cdot K \cdot \sin(\phi - \theta_0) - \Delta\lambda K^2 / 4\pi n, \quad (5)$$

式中 $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ 为布拉格偏离角, $K = 2\pi/\Lambda$ 为光栅常数, ϕ 为光栅倾斜角。当读出光满足布拉格条件入射时, 则 $\xi = 0$, 由(2)~(5)式, 可得此时 VPHT 光栅的衍射效率为

$$\eta = \exp(-2\alpha d / \cos \theta_0) \sin^2 \nu = \exp(-2\alpha d / \cos \theta_0) \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta_0} \right), \quad (6)$$

由(6)式可知, 对于 VPHT 光栅, 在布拉格角入射时, 衍射效率除了与光栅的吸收系数 α 有关外, 还随着光栅厚度、折射率幅度增量以正弦平方的形式变化, 其变化周期由波长、折射率和入射角决定。

3 光路设计

利用 Zemax 光学软件仿真设计了一套基于 VPHT 光栅的光谱仪光路系统, 如图 2 所示, 该系统沿光传播方向, 依次由入射狭缝、准直透镜、VPHT 光栅、成像物镜和光谱探测器构成, 其中入射狭缝、准直透镜和 VPHT 光栅构成入射光路, VPHT 光栅和成像物镜构成出射光路。

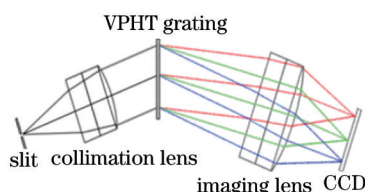


图 2 分光光路图

Fig.2 Graph of splitting-light path

如图 2 所示, 为了提高光路的光通效率, 准直透镜和成像物镜表面均为镀增透膜; VPHT 光栅是用高折射率调制光致聚合物材料合成的, 光栅两面夹表面镀增透膜的石英玻璃, 整个光栅厚度约 10 mm, 光栅线数为 1200 lines/mm, 闪耀波长 550 nm, 在波长 340 nm 和 750 nm 处的衍射效率约为 80%。成像物镜采用的是平场聚焦透镜, 其成像角度约为 31.5°。探测器采用日本东芝公司生产的线阵电荷耦合器件(CCD)(TCD1251UD), 有效像元数为 2700, 相邻像元中心距为 11 μm, 光敏区总长为: 29.70 mm, 工作频率为 2 MHz, 光电转换效率大于 92%。光路其他具体参数如表 1 所示。

表 1 基于 VPHT 光栅的分光光路参数

Table 1 Parameters of splitting-light path based on VPHT grating

Items	Parameters
Entrance slit	10 mm(length)×200 μm(width)
Exit slit	42 mm(length)×4 mm(width)
Collimation lens	K9, radius of curvature(26 mm)
Imaging lens	K9, radius of curvature(5 mm)
VPHT grating	1200 lines/mm
Distance between entrance slit and collimation lens	≈55 mm
Distance between collimation lens and VPHT grating	≈30 mm
Distance between VPHT grating and imaging lens	≈30 mm
Distance between imaging lens and detector	≈80 mm
Incident angle between grating's vertical normal and the collimated light	19.2°
Angle between incidence path and exit path	≈35°
Spectral detector	CCD, effective pixels of 2700

4 实验和分析

4.1 光栅衍射效率仿真

VPHT 光栅衍射效率仿真是在 Matlab 软件平台下编程实现的。根据(6)式, 假设布拉格角 θ_0 为 19.2°, Δn 为 0.05, 入射光波长为 550 nm, 则根据不同的吸收系数 α , 可以得到光栅厚度与衍射效率之间的关系, 如图 3(a)

所示;接着,假设布拉格角和 Δn 不变,光栅厚度 d 为 $5\ \mu\text{m}$,根据不同光栅吸收系数 α ,可以得到入射光波长与衍射效率之间的关系,如图 3(b)所示。从图 3(a)中,可以看出 VPHT 光栅的衍射效率与光栅厚度(0~10 mm)之间满足正弦函数关系,且在光栅厚度一定的情况下,衍射效率随着光栅吸收系数增大而逐渐减小。从图 3(b)中,可以看出在波长 300~1000 nm 范围内,衍射效率与波长之间近似成抛物线关系,对于无吸收的 VPHT 而言,衍射效率最大峰值波长在 550 nm 附近,随着吸收系数增加,衍射效率同样递减,且最大峰值波长点向左移,即对应的波长变小。而在无吸收情况下,衍射效率、光栅厚度和入射光波长之间关系如图 3(c)所示。

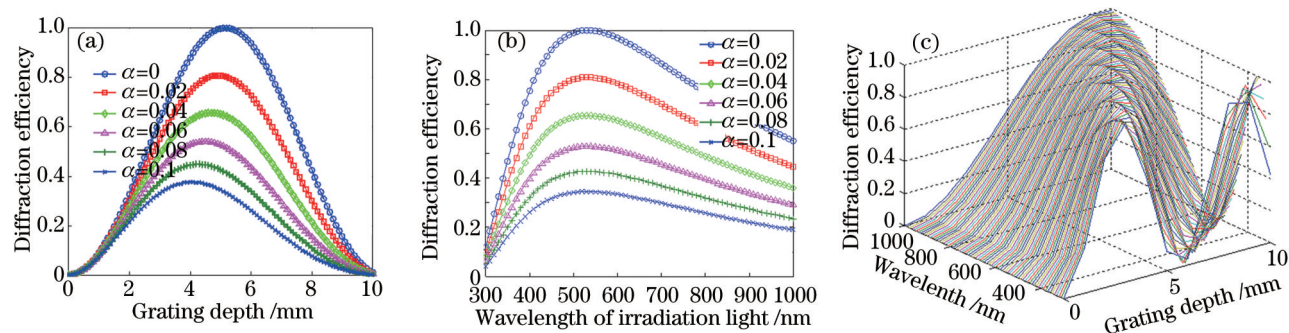


图3 VPHT光栅衍射效率仿真结果。(a) 衍射效率与光栅厚度的关系; (b) 衍射效率与入射光波长的关系; (c) 衍射效率、光栅厚度、入射光波长的三维曲线

Fig.3 Simulation results of the diffraction efficiency for VPHT grating. (a) Relationship between the diffraction efficiency and grating depth; (b) relationship between the diffraction efficiency and the irradiation wavelength; (c) 3D curves of the relationship between the diffraction efficiency, grating depth and irradiation wavelength

4.2 分光光路测试

先用 SolidWorks 软件设计了光路入射部分和衍射成像部分的几个独立装置,如图 4(a)所示,再用铝合金材料根据设计的尺寸进行分段数控机床加工制作,光学元器件采用内嵌方式固定,入射光筒和出射光筒直径约为 55 mm,整个分光装置长度约 195 mm,组合后完整的分光装置如图 4(b)所示。

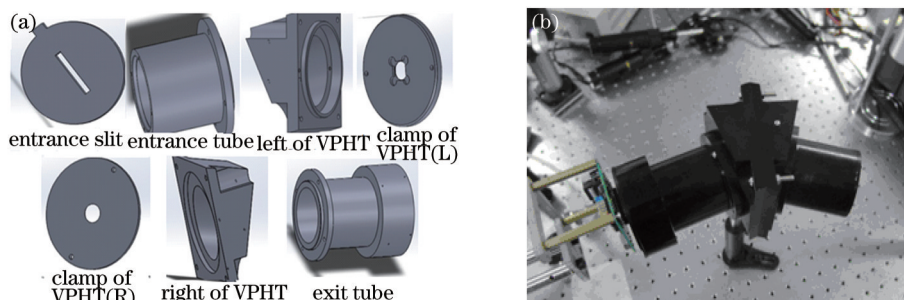


图4 分光装置图。(a) 各个部件的 SolidWorks 设计; (b) 组合后完整的分光装置

Fig.4 Devices of splitting-light device. (a) Solidworks design of all components; (b) integrated splitting-light device

为了测试设计的基于 VPHT 光栅分光光路及其装置的性能,使用天津拓普仪器有限公司的低压汞灯 (GY-4)作为光源、日本东芝公司的线阵 CCD(TCD1251UD)联合 CCD 驱动模块作为光谱探测器件和天津琦瑶科技有限公司生产的 PCI 总线数据采集卡(QY-PCI-S12H)进行光谱测试。其中,数据采集卡的动态范围达到 4 K,模拟数字转换(A/D)电路的分辨率为 12 bit,工作频率为 5 MHz。

低压汞灯发出光经入射狭缝进入分光光路,先由准直透镜准直后入射至 VPHT 光栅,透射光栅进行衍射分光后,由成像物镜将衍射光成像于焦平面的线阵 CCD 的像元上,线阵 CCD 各个像元的位置对应于分光色散后不同的波长。线阵 CCD 每个像元输出信号的大小对应应该像元所接收光的强弱,且线阵 CCD 输出信号的先后顺序是由 CCD 驱动模块提供的时序脉冲控制的,最后由数据采集卡对线阵 CCD 输出的信号进行逐位采样,采集到的低压汞灯特性光谱如图 5 所示。从图 5 中可以看出 CCD 探测器捕获的低压汞灯的几个特性光谱 365、404.7、435.8、546.1、577、579 nm 都能较好地呈现出来,并且 577 nm 和 579 nm 两个特性光谱也能较好地区分开来。

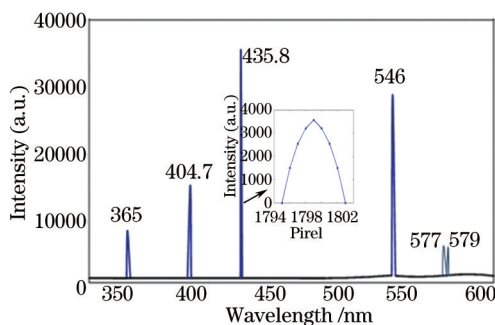


图5 低压汞灯特性光谱

Fig.5 Characteristic spectral of low pressure mercury lamp

4.3 波长定标和校正

对线阵 CCD 的光谱响应的不均匀性和非线性进行估计和校正,采用上述图 5 所示低压汞灯光谱作为标准定标光谱,得到在 CCD 各波长峰值电压的像元位置与汞灯各特性光谱波长的对应关系,如表 2 所示。

表 2 特性光谱各波长对应的像元位置

Table 2 Corresponding position of pixels with the characteristic wavelengths

Wavelength /nm	Pixel	Fitted pixel	Fitted wavelength /nm	Wavelength correction /nm
365	2104	2105.8	365.4	0.4
404.7	1933	1932.6	404.6	-0.1
435.8	1799	1796.9	435.3	-0.5
546	1317	1316	545.8	-0.2
577	1180	1180.7	577.2	0.2
579	1171	1172	579.2	0.2

以表 2 中 6 个特性波长点为定标点,由 Matlab 软件编程拟合出一条线性曲线,该线性曲线满足方程:

$$y \approx -4.364x + 3698.76 . \quad (7)$$

真实像元与线性拟合像元与对应波长之间的关系如图 6 所示,原始像元与拟合像元位置的相似度为 0.9992,故原始像元与拟合像元位置十分吻合。

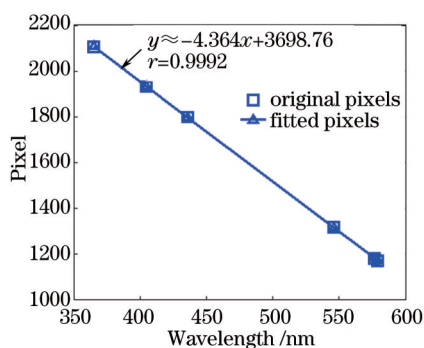


图 6 特性波长与对应像元及拟合像元之间的关系

Fig.6 Relationship between real pixels and fitted pixels of character wavelengths

从表 2 采集光谱的像元位置 and 对应波长,可知光谱采集间隔约为 $(579-365)/(2104-1771) \approx 0.23$ nm。图 5 中低压汞灯特性光谱最大特征峰值对应的波长为 435.8 nm,其峰值半宽高所占像元范围为 1796~1802,约为 6 个像元间隔,根据以上计算得到的光谱采集间隔约为 0.23 nm,可知该分光系统的光谱分辨率可达 1.4 nm。另外,为了验证用于波长定标的线性拟合方程的性能优劣,使用输出波长 635 nm 的激光器入射至 VPHT 光栅分光光路,得到 635 nm 真实的波峰对应的像元位置在 926,通过(7)式反演可以算得对应波长约为 635.37 nm,可知波长绝对误差约为: $635.37 \text{ nm} - 635 \text{ nm} = 0.37 \text{ nm}$ 。然后根据表 2 中的原始像元位置和(7)式,可以反演算出各个原始像元对应的拟合波长分别为 365.4、404.6、435.3、545.8、577.2、579.2 nm,与原始特性波长对比,波长均方根误差为 0.3 nm。虽然估计的波长误差与实际光谱采集间隔之间存在一定偏差,究其原因是由于系

统误差造成的,并且可以通过后续第光谱测量方式、光路优化和波长校正等方式来解决。从上述分析可知,设计的VPHT光栅分光光路的波长准确度较好。

另外,为了更准确地了解其他波长点的校正量的多少,将表2中原始的6个波长点的波长校正量 $\Delta\lambda$ 与对应波长 λ 之间,利用三次多项式拟合,得到拟合方程式:

$$\Delta\lambda = 0.0000000013\lambda^3 + 0.0000768\lambda^2 - 0.0744\lambda + 17.256. \quad (8)$$

图7为真实波长与对应波长修正量之间的拟合曲线。图7中,圆圈离散点为实验测得的汞灯谱线对应的修正量,平滑曲线为拟合得到的修正量与对应波长之间的关系;且从图7中,可以看出校正量的多项式与实测数据的分布趋势十分符合。因此,如果想要得到设计的基于VPHT光栅分光光路出射的波长,可以根据(8)式,求得对应的修正量,再加上这个波长修正量就可以得到出射真实波长。以上分析可知,经过波长定标后,可以通过计算修正量的方法保证本分光光路在一定光谱范围内的波长准确性。

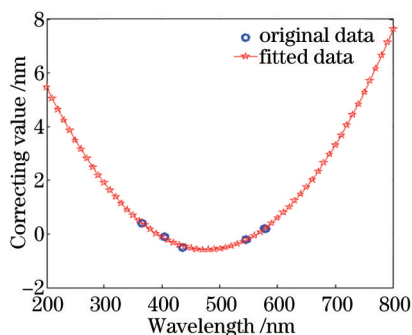


图7 真实波长与对应修正量之间拟合曲线

Fig.7 Fitted curve of real wavelengths and the corresponding correction

5 结 论

在光谱仪系统中,分光光路设计的好坏直接影响了光谱仪性能的优劣。为了克服传统平面和凹面光栅由于机械刻画和化学腐蚀等给光路带来无法避免的杂散光干扰并提高光谱仪的光通效率,对VPHT光栅的制作和衍射效率原理进行了理论研究和仿真验证。同时,在设计和制作了基于VPHT光栅分光光路及装置的基础上,通过汞灯定标实验和线性拟合校准算法验证了该光路分光性能的有效性,并采用多项式拟合算法得到了波长的偏移量与对应衍射波长的关系,能很好地保证光路分光后光谱波长的准确性。

参 考 文 献

- 1 Zhang Jun, Chen Xingdan, Piao Renguan, *et al.*. Near infrared spectrometer with double detectors for food component analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 986-992.
张 军,陈星旦,朴仁官,等.用于食品成分分析的双探测器近红外光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 986-992.
- 2 Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, *et al.*. Design of prism spectrometer with wide spectral coverage for solar spectrum measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013,33(2): 0222001.
张 浩,方 伟,叶 新,等.宽光谱棱镜型太阳光谱仪设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222001.
- 3 Chen Jianjun, Zhu Yong, Liu Bo, *et al.*. The principle and analysis of micro-Fourier transform spectrometer based on MEMS micro-mirror[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(11): 3151-3154.
陈建君,朱 永,刘 波,等.基于MEMS微镜的傅里叶变换光谱仪原理与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(11): 3151-3154.
- 4 Xiao Lifeng, Hu Hongzhang, Zhang Mei. A near-infrared spectrometer based on an integrated optical AOTF[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(3): 269-272.
肖立峰,胡鸿璋,张 梅.一种基于集成光学声光可调谐滤波器的近红外光谱仪[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 269-272.
- 5 Zheng Chaohui, Zhang Yujun, Zhou Bin, *et al.*. Development and application of spectrometer with rotated grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(2): 166-170.
郑朝晖,张玉钧,周 斌,等.旋转光栅式光谱仪的研制与应用[J]. *光子学报*, 2000, 29(2): 166-170.

- 6 Wu Jianfen, Zhao Lei, Chen Yongyan, *et al.*. Flat-filed concave holographic grating with broad spectral region and high resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0409002.
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): 0409002.
- 7 Li Chaoming, Wu Jianhong, Zhao Yanjiao, *et al.*. Development of flat field holographic concave gratings with high-resolution[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(7): 828-831.
李朝明, 吴建宏, 赵艳皎, 等. 高分辨率平场全息凹面光栅的研制[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(7): 828-831.
- 8 Xue Qingsheng, Cao Diansheng, Yu Xiangyang. Optical design of neotype Schwarzschild spectral imaging system with large relative aperture[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0116001.
薛庆生, 曹佃生, 于向阳. 新型大相对孔径 Schwarzschild 光谱成像系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0116001.
- 9 Li Yuelin, Chen Shisheng, Qian Aidi, *et al.*. Study of spectrographic properties of transmission gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(2): 105-110.
李跃林, 陈时胜, 钱爱娣, 等. 透射式光栅光谱仪摄谱性质的研究[J]. *光学学报*, 1991, 11(2): 105-110.
- 10 Gelsinger-Austin P J, Luo Yuan, Watson J M, *et al.*. Optical design for a spatial-spectral volume holographic imaging system[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(4): 043001.
- 11 Weisberg A, Craparo J, De Saro R, *et al.*. Comparison of a transmission grating spectrometer to a reflective grating spectrometer for standoff laser-induced breakdown spectroscopy measurements[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(13): C200-C210.
- 12 O'Donoghue D E, Clemens J C. Spherical grating spectrometers[C]. *SPIE*, 2014, 9147: 914748.
- 13 Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Double grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0105001.
孔 鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0105001.
- 14 Gao Hua, Ouyang Min, Wang Yu, *et al.*. Analysis on diffraction properties of the transmission phase grating[J]. *Optik*, 2007, 118(9): 452-456.
- 15 Li Ming, Tang Minxue, Xia Haohan, *et al.*. Performance of volume phase holographic transmission grating recorded in DCG for PGP [C]. *SPIE*, 2010, 7848: 784836.
- 16 Zhang Tao, Tao Shiquan, Zhai Qianli, *et al.*. Study on dark enhancement in holographic photopolymer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2227-2230.
张 韬, 陶世荃, 翟千里, 等. 全息存储用光致聚合物材料的暗增长现象研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2227-2230.
- 17 Song Wei, Tao Shiquan, Wang Dayong, *et al.*. Experimental research on the dynamics of the image quality reconstructed from holographic dual-monomers photopolymer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1209001.
宋 伟, 陶世荃, 王大勇, 等. 自由基聚合型光致聚合物中全息图像质量的动态特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1209001.
- 18 He Tianbo, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Diffraction characteristic analysis of reflection volum holography grating at non-uniform swelling or shringking[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209018.
何天博, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 非均匀膨胀与收缩下反射体全息光栅衍射特性分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209018.
- 19 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(9): 2909-2947.
- 20 Duan Jianzhu, Zhao Xiangjie, Zhang Dayong. Design of optical phased arrays amplifier stage based on volume holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0405002.
段佳著, 赵祥杰, 张大勇. 基于体全息光栅的光学相控阵放大级设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0405002.

栏目编辑: 韩 峰