文章编号:1002-2082(2009)05-0823-04

双波长非水溶性光致聚合物全息光栅的研究

徐向敏， 章鹤龄， 李展华， 邵继宝， 石 磊
(首都师范大学 物理系， 北京 100048)

摘 要:介绍了一种对488 nm蓝光和632.8 nm红光均敏感的双色非水溶性光致聚合物制成的二重全息光栅。理论分析得出此光栅的分辨率>5 000 line/mm,温度变化时中心波长的漂移几乎为零。实验仪器测得光栅的衍射效率最高达到90%以上,而且该光栅具有成本低和一次成型的优点,适合制作波分复用器。与单波长的二重光栅相比,它解决了由于光的相干性出现的串扰问题,串扰更小,所以在制作光栅时两束光不但可以选择角度入射也可以选择平行入射,同时具有良好的波长选择性和角度选择性。

关键词:二重光栅;双波长非水溶性光致聚合物;衍射效率;光栅分辨率
中图分类号:TN256 **文献标志码**:A

Holographic grating made of two-wavelength water-resistant photopolymer

XU Xiang-min, ZHANG He-ling, LI Zhan-hua, SHAO Ji-bao, SHI Lei
(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The double-layer holographic grating made of a new kind of water-resisting photopolymer which is sensitive to the blue light of 488 nm and red light of 632.8 nm is introduced. Based on the experimental data and theoretical analysis, the characteristics of the material are investigated. The analysis shows that the resolution of this grating is above 5 000 line/mm and its diffraction efficiency is above 90%. The central wavelength drifting of the grating is nearly zero when temperature changes. The grating has many merits, such as one-step forming, low loss, etc. The double-layer holographic grating is suitable for fabricating the wavelength-division multiplexer. The crosstalk question caused by the light coherence has been solved by the technology, and the crosstalk is smaller in comparison with the single-wavelength double-layer grating. During the production of the grating, two incident modes of beam can be chosen arbitrarily, which is oblique incidence and parallel incidence. It has the characteristics of wavelength selection and angle selection.

Key words: double-layer holographic grating; two-wavelength water-resistant photopolymer; diffraction efficiency; resolution of grating

收稿日期:2009-01-05; **修回日期**:2009-02-20
作者简介:徐向敏(1977—)女,黑龙江五大连池人,首都师范大学物理系硕士研究生,主要从事光电信息处理领域的研究工作。E-mail:541456826@qq.com

引言

20 世纪 60 年代,随着激光技术和照相技术的发展,出现了全息光栅。全息法制作光栅的特点主要体现在以下几点:光路排布灵活,适合制作不同空间频率的光栅;光栅尺寸可做得很大;制作的效率高。正是这些优点使全息光栅在光栅的研制中独领风骚。

自从 1819 年夫琅和费制成世界上第一块光栅[1]之后,光栅制造技术经历了几次大的改进,目前有光纤布喇格光栅、Moire 光纤光栅[2]、集成阵列波导光栅等众多类型的光栅,它们各有优缺点。当今光栅的发展趋势正朝着高衍射效率、大面积、新品种的方向发展。与刻划光栅相比,全息光栅具有没有鬼线、杂散光步、分辨率高、适应光谱范围宽、有效孔径大、衍射效率高等特点,是一种重要的分光元件,近年来在光全息、光通信、光互连、光交换、光计算等方面获得了广泛的应用。

采用对 488 nm 蓝光和 632.8 nm 红光均感光的双色光致聚合物制作光栅。用2 种波长的光对同一块干版同一位置进行曝光,记录下 2 个不同的光栅,从而制得二重光栅。和单波长的二重光栅相比,文中介绍的光栅解决了由于光的相干性出现的串扰问题,所以 2 束光不但可以选择角度入射也可以选择平行入射,同时具有良好的波长选择性和角度选择性。

1　全息制栅的原理

如图1 所示,2 束准直激光 O_1 和 O_2 以一定的角度 2φ 在空间相交时,在其相交的重叠区域将干涉形成明暗交替的平行等间距条纹面,条纹的频率与双光束的夹角 2φ 和光源的波长 λ 有关,它们之间有关系式:

$$2n\Lambda\sin\theta=m\lambda \tag{1}$$

式中:Λ 为光栅的空间频率;λ 为入射光波长;θ 为记录光入射角;n 为介质的折射率。

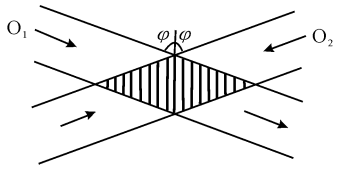

图1　全息制栅的原理

Fig. 1　Principle of photopolymer grating fabrication

对于 $m=1$ 级,有关系式:

$$2n\Lambda\sin\theta=\lambda \tag{2}$$

由(2)式知当写入光波长一定时,可以通过改变记录光的入射角 θ 制得不同空间频率 Λ 的光栅。

2　双波长全息光栅的制作

2.1　实验药品及仪器

实验所用药品如下:光敏剂Dye1 和Dye3;3-硫基-4-甲基-4 氢-1,2,4-三氮唑(MTA);聚醋酸乙烯酯;NVC;双季戊四醇五丙烯酸酯;POEA;分析纯二氯甲烷和N,N-二甲基甲酰胺(DMF);He-Ne 激光器及 Ar^+ 激光器。

2.2　材料的制备

在普通实验室条件下,按表1 的质量分数配成感光液。

表1　体系组分比例表

Table 1　Constituents of photopolymer system

组分名称	质量百分比
Dye1	0.03
Dye3	0.12
O－CL－HABI	4.50
MTA	1.50
POEA(液)	5.05
双季戊四醇五丙烯酸酯	4.80
NVC (固)	38.00
聚乙酸乙烯酯	46.00

2.3　材料的敏感特性

材料的吸收谱线如图2 所示。由图2 可见,材料有 2 个明显的吸收峰,分别在 479.5 nm 和 633 nm 波长,两者之间相距约 150 nm,没有重叠。复合光敏剂(SQ1 和 DEAW)可以同时对红光和蓝光敏

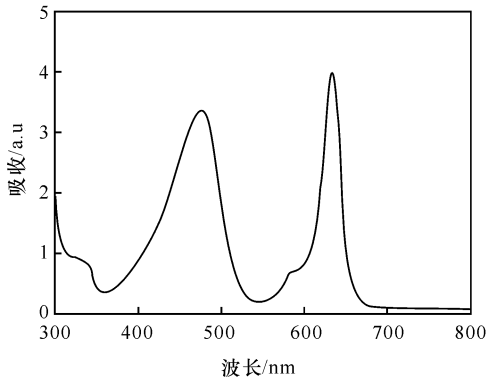

图2　红(Dye1)、蓝(Dye3)敏光致聚合物的吸收曲线

Fig. 2　Absorption spectrum of RBSP

感,即可以用红光和蓝光同时曝光,也可分别曝光,此时可用绿光作安全光。用相应吸收峰处波长的光对材料曝光时,可以引发光致聚合,因此该材料适

合双波长全息光栅。

取出适量的感光液,滴在 4 cm×4 cm 的平板玻璃上自然流平,在暗室中放置 10 min,然后将玻璃板放在温度为 50°左右烘箱里热烘 30 min。

2.4　实验光路

光源用波长为 488 nm(蓝光) Ar^+激光器和 632.8 nm(红光)的He-Ne 激光器。拍摄光路如图3所示。曝光时,先用 488 nm Ar^+激光器对干版曝光,曝光时间为 30 s,然后关闭它,再把扩束镜前的反射镜 M_3 移走,用 632.8 nmHe-Ne 激光器再次对干版进行曝光,曝光时间为 40 s。两激光的参考光和物光均以 30°角入射到干版表面,物光和参考光强度之比为 1∶1。图中光源为488 nm Ar^+激光器和 632.8 nm 的 He-Ne 激光器;M_1,M_2,M_3 为反射镜;L_1,L_2 为透镜;BS_1,BS_2 为分束镜;HG 为全息光栅。

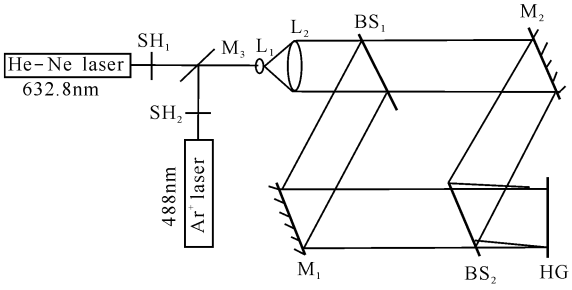

图 3　光栅的实验光路

Fig. 3　Experimental beam path in grating fabrication

2.5　材料的光聚合反应机理

当用波长为 633 nm 或 488 nm 的激光对材料曝光时,光敏剂染料(SQ1 或 DEAW)吸收光子后被激发到高能态,然后将能量传递给光引发剂生成自由基,染料自身被漂白,自由基引发样品中的单体分子聚合。光聚合反应机理如下[3]:

$$\mathrm{Dye} \xrightarrow{h\nu} \mathrm{Dye}^*,\ \mathrm{Dye}^* + \mathrm{Rm} \longrightarrow \mathrm{Rm}^* + \mathrm{Dye}$$

$$\mathrm{Rm}^* + \mathrm{M} \rightarrow \mathrm{P}$$

式中:Dye 表示光敏剂;Dye^*表示受激后的光敏剂;Rm 表示引发剂;Rm^*为受激后的引发剂;M 为单体;P 为聚合物。

3　双波长全息光栅性能的分析

3.1　光栅常数

波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器光源以 30°角入射到干版上记录光栅,中心波长为 1 550 nm 的信号以 45°角入射到记录光栅上,感光膜的厚度为 30 μm。由记录波长和两道记录光束夹角的关系[4]可得全息光栅常数为

$$\Lambda_{红} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = \frac{632.8}{2\times\sin 30°} = 0.632\ 8\ \mu\mathrm{m}$$

同样,对于用Ar^+激光器488 nm 光源,以30°角入射到干版上记录的光栅,我们取 $\lambda = 1\ 550$ nm,$f = 60$ mm,$T = 30$ μm,则有关系式:

$$\Lambda_{蓝} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = \frac{488}{2\times\sin 30°} = 488\ \mathrm{nm} = 0.488\ \mu\mathrm{m}$$

从结果可以看出,用对488 nm 的蓝光和632.8 nm 的红光均感光的双色光致聚合物制作的二重光栅,其分辨率很高。

3.2　衍射效率

全息光栅的衍射损耗和光衰减程度可以用体全息光栅的衍射效率来衡量。

对于体全息光栅,可以用 Kogelnik[5] 理论(Kogelnik 理论是从麦克斯韦方程出发)来分析光栅,根据记录介质的光学和电学常量直接求解耦合波微分方程组:

$$\begin{aligned} &\frac{\mathrm{d}E_r}{\mathrm{d}z} + \frac{\alpha}{\cos\theta_r}E_r = -\mathrm{j}\frac{k}{\cos\theta_r}E_s \\ &\frac{\mathrm{d}E_s}{\mathrm{d}z} + \frac{\alpha + \mathrm{j}\delta}{\cos\theta_\sigma}E_r = -\mathrm{j}\frac{k}{\cos\theta_s}E_r \end{aligned} \tag{3}$$

式中:α 为记录介质的吸收系数;θ_r 和 θ_s 分别为衍射光波和再现光入射角;k 为耦合常数;δ 为相位失配因子。代入透射式和反射式的边界条件,得到透射式和反射式的衍射光振幅分别为

$$\begin{aligned} &E_s(d) = \mathrm{j}\frac{k}{\cos\theta_s(r_1 - r_2)}\times \\ &\qquad [\exp(r_1 d) - \exp(r_2 \mathrm{d})] \\ &E_s(0) = -\mathrm{j}[\alpha + \mathrm{j}\delta + \cos\theta_s\cdot \\ &\qquad \frac{r_1\exp(r_2 d) - r_2\exp(r_1 d)}{\exp(r_2 d) - \exp(r_1 d)}]^{-1} \end{aligned} \tag{4}$$

考虑位相全息,可以推导出透射式位相全息光栅的衍射效率:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi n_1 T}{\lambda\cos\theta_b}\right) \tag{5}$$

式中:n_1 为折射率的变化;T 为感光层的厚度;λ 为入射光波长;θ_b 为布喇格角。

由布喇格理论知当光栅的空间频率 Λ 和读出光波长λ_2 确定后,可以通过调节读出光的入射角来使光栅对此读出光达到最大衍射效率。此光栅的衍射效率可达 90%以上。

3.3　温度稳定性的研究

当温度发生变化时,全息光栅中心波长会随之发生改变(中心波长的改变主要是因为温度变化使光栅常数发生了变化)。QiaoJie[6]等人的研究结果

表明:使用具有较大纤芯的光纤时,插入损耗随温度的变化可以忽略,受温度变化影响较大的是中心波长的漂移。

由光栅方程可得到:

$$n\Delta(\sin\theta_2+\sin\theta_1)/\sin\varphi=m\lambda,$$
$$m=0,\pm1,\pm2,\cdots \tag{6}$$

忽略温度引起的角度的变化,则有关系式:

$$\Delta\lambda=(\beta+\sigma)\lambda\Delta T \tag{7}$$

式中β为全息光栅材料的热膨胀系数,且

$$\Lambda=\Lambda_0(1+\beta\times\Delta T) \tag{8}$$

σ为该材料的热光系数,满足:

$$n=n_0(1+\sigma\times\Delta T) \tag{9}$$

σ主要决定于材料的密度的变化,与热膨胀系数在同一个数量级上,但符号相反[7]。

若取$\lambda=1\ 550$ nm,全息光栅的热膨胀系数β在10^{-6}的量级上,那么此时的$\Delta\lambda$可以在10^{-3} nm/℃的量级以上。本实验室用对488 nm蓝光和632.8 nm红光均感光的双色光致聚合物制作的光栅,定型后温度变化时中心波长的漂移几乎为零。

4　结束语

红、蓝敏双色非水溶性光致聚合物光栅是依据光栅理论制作的,此光栅具有衍射效率较高、污染小、成本低、串扰小、一次成型等优点,其分辨率>5 000 line/mm,并且在光栅的制作过程中可以根据实际需要改变组分,从而改变光栅的性能。通过对研制的双波长全息光栅特性进行分析,认为该材料适合制作波分复用器。并见还可以在变换记录光束波长的同时改变一束记录光(物光)的入射角,另一束光(参考光)的入射方向保持不变,这样就可在同一干版的同一位置上记录多重光栅,制作的波分复用器可以实现更多通道。

参考文献:

[1] 母国光.光学[M].北京:人民教育出版社,1978.
MU Guo-guang. Optics [M]. Beijing: People's Education Press, 1978. (in Chinene)

[2] 冯丹琴,盛秋琴,陈凯,等.几种常用滤波器的特性[J].光通信技术,2002(1):46-53.
FENG Dan-qin, SHENG Qiu-qin, CHEN Kai, et al. Character of several frequent filters [J]. Optical Communication Technology, 2002 (1): 46-53. (in Chinese with an English abstract)

[3] 李展华,章鹤龄,邵继宝,等. 非水溶性红敏光致聚合物全息性能的改善及其应用研究[J]. 应用光学,2009,30(4):590-595.
LI Zhan-huan, ZHANG He-ling, SHAO Ji-bao, et al. Improvement of holographic characteristics of water-resisting red-sensitive photopolymer and its application[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 590-595.

[4] Herwig Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2947.

[5] 于美文.光全息学及其应用[M].北京:北京理工大学出版社,1996:255-260.
YU Mei-wen. Optical holography and its application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996, 255-260. (in Chinese)

[6] QIAO Jie, ZHAO Feng, LIU Jian, et al. Dispersion enhanced volume hologramfor dense wavelength division demultiplexer [J]. IEEE photonics technology letters, 2000, 12(8): 1070-1072.

[7] 翟剑峰,邱玲,周家云,等.偶氮染料掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯薄膜的热光性质研究[J]. 光子学报,2001,30(1):125-128.
ZHAI Jian-feng, QIU Ling, ZHOU Jia-yun, et al. The thermal optical properties of polly methyl methacrylate solid films doped by azo dyes[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(1): 125-128. (in Chinese with an English abstract)