

一种新型叠层光敏全息记录软片

汪国平

郭履容 陈其瑞

(武汉大学物理系, 武汉 430072) (四川联合大学信息光学研究所, 成都 610064)

摘 要 通过化学反应, 在三醋酸纤维素酯片基的正反面同时生成具有感光活性的光敏层的方法, 获得了一种具有叠层光敏性的全息记录软片: 重铬酸盐-三醋酸纤维素酯(DC-TAC)。由该软片记录的叠层体积全息光栅(SVHG), 具有迄今为止, 最高的一级实验衍射效率(54%)。本文给出了这种叠层体积全息光栅的制作方法、形成机制以及本质上完全不同于单层体积光栅的布拉格选择性的严格周期性角度响应, 并对衍射效率的实际测量值与理论值之间的差异进行了简单讨论, 指出了进一步提高其衍射效率的途径及叠层体积全息光栅潜在的应用前景。

关键词 全息记录软片, 叠层光敏性, 叠层体积全息光栅。

1 引 言

叠层体积全息光栅(SVHG)是一种由几组在空间位置上相互分离, 但空间频率、条纹取向等完全相同的薄位相光栅叠合而成的组合全息光栅。这种叠层体积全息光栅的一级衍射效率(DE)不仅比单层薄位相光栅的理论值极限 33.9%^[1]高得多(例如, 由二薄位相光栅叠合而成的双层叠层体积全息光栅的最大一级衍射效率为 67%^[2], 而由五光栅组成的叠层体积全息光栅的一级衍射效率在 95%以上^[3]), 而且还随读出光入射角的变化而表现出严格的周期性响应。这在本质上是完全不同于单层体积位相光栅的布拉格选择性的, 这使得叠层体积全息光栅在全息光学元件^[3, 4]、光计算^[5, 6]、光束整形^[7]等领域具有重大应用价值。

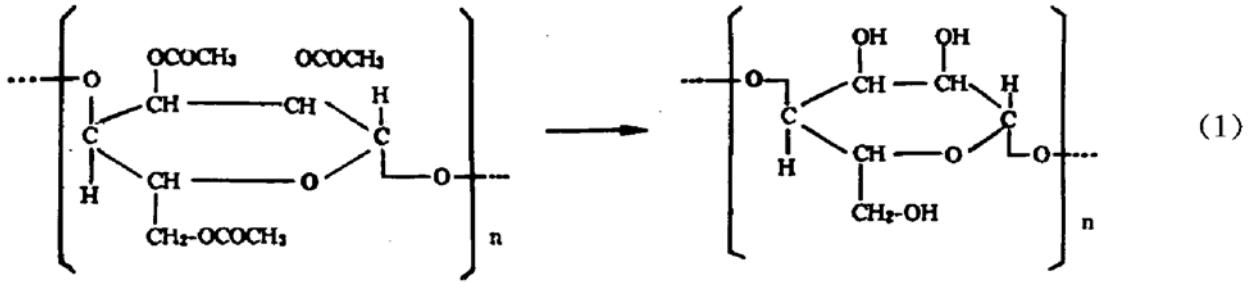
一般来说, 卤化银、重铬酸盐明胶(DCG)、光致抗蚀剂等光敏材料都可用于制作叠层体积全息光栅。但通常的方法都是涂布法, 工艺都较复杂。对于多层叠层体积全息光栅而言, 还难于在分步记录过程中, 始终保证各光栅的条纹倾角等物理参量严格一致, 叠合时也难精确对准, 导致涂布法制作的叠层体积全息光栅的一级衍射效率会降低。

本文提出的全息记录软片的光敏层完全避免了涂布过程, 它是通过化学处理而在片基表面层内生成的, 光敏层和片基融为一体, 因而和传统的涂布法相比, 具有很多优点, 如制作工艺简单、设备要求一般、光敏层和片基之间的折射率基本相同等。本文给出了用该光敏片制作的叠层体积全息光栅的微观化学机制及其衍射特征。

2 软片制作及成像机理

以普通商用三醋酸纤维素酯作为片基, 通过碱和醇的水溶液预处理, 使表面层的长链分

子发生如下取代反应：



从而生成分子结构单元具有如(1)式右边所示的结构螯合剂。经重铬酸铵水溶液敏化处理，便形成了具有一定感光活性的光敏层^[8, 9]。由于预处理和敏化过程都是一种浸湿处理过程，因而可以容易地获得具有叠层光敏性的全息记录软片：重铬酸盐-三醋酸纤维素酯。当将此软片置于记录光场中时，片基中感光层内 Cr^{6+} 经光致还原成 Cr^{3+} ， Cr^{3+} 与螯合剂分子链以配位键的形式发生交联反应，从而形成全息图。由于片基双面的光敏层都处于同一记录光场中，上述交联反应必然在两面同时进行，其结果是片基两面同时形成了全息图，从而获得了双层叠层体积全息光栅。由于重铬酸盐-三醋酸纤维素酯片基上的双面光敏层与分离二光敏层的内层未经预处理的三醋酸纤维素酯片基之间的差别，仅仅只是部分基团的差别[如(1)式，后者是羟基-OH，前者是酯基- OCOCH_3]，因此，光栅调制层的平均折射率与二光栅之间的“缓冲层”之间的折射率基本相同，有助于制作的叠层体积全息光栅的一级衍射效率的提高。

3 衍射特征

根据标量衍射理论，在旁轴近似条件下，经二薄位相光栅构成的叠层体积全息光栅衍射后的各级衍射光的振幅分布 $A_P(\zeta)$ 可写成：

$$\{A_P(\zeta)\} = \{A_M H_M\} \otimes \{A_N\}, \quad (P = M + N; M, N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

式中 \otimes 表示卷积运算， A_M 、 A_N 分别为前后二光栅各衍射级的振幅， H_M 为第一层光栅的第 M 级衍射光在中间缓冲层中(见图 1)的传播因子。

令 $P = 1$ ，则由(2)式可得叠层体积全息光栅的一级衍射光的振幅为：

$$A_1(\zeta) = A_2 H_2 A_{2,-1} + A_1 H_1 A_{1,0} + A_0 H_0 A_{0,1} + A_{-1} H_{-1} A_{-1,2} \quad (3)$$

其物理意义如图 2 所示^[10]。为简便计，图 2 和(3)式的运算中都忽略了前后光栅 ± 2 级以上的衍射光。若读出光为单位振幅的入射光， $|A_1(\zeta)|^2$ 即为叠层体积全息光栅的一级衍射效率。

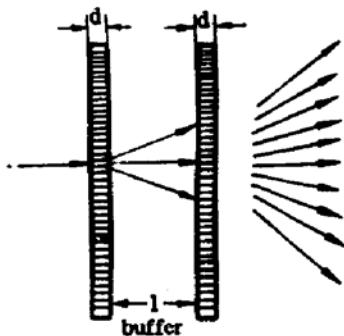


Fig. 1 Schematic illustration of diffraction process for double-layer SVHG

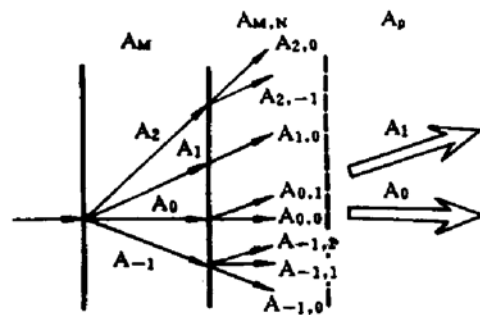


Fig. 2 Schematic illustration of physical meaning for convolution operation

理论计算表明, $|A_p(\xi)|^2$ 随读出光入射角的变化而呈现周期为 $1/f_0(l+2d)^{[4]}$ 的响应。其中 f_0 为二光栅的空间频率, $(l+2d)$ 为双层叠层体积全息光栅的总厚度(见图 1)。

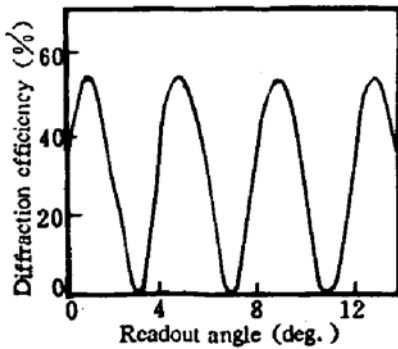


Fig. 3 Relation of the 1th-order DE and readout angle of double-layer SVHG of DC-TAC

通过接触拷贝方式,以汞灯发出的部分相干光作为记录光源,可以复制出各种性能良好的全息光学元件^[11]。由于实验条件的限制,重铬酸盐-三醋酸纤维素酯的双层叠层体积全息光栅以高压汞灯作为记录光源,通过真空吸附的拷贝方式记录,再以热定影制作完成。拷贝母板是空间频率为 100 lines/mm 的振幅型卤化银全息光栅。重铬酸盐-三醋酸纤维素酯片基的总厚度为 145 μm ,光敏层厚约 10 μm ,片基折射率为 1.48。读出光的波长为 632.8 nm。由上可见,重铬酸盐-三醋酸纤维素酯的双层叠层体积全息光栅是满足标量衍射理论的。图 3 给出了由此制作的叠层体积全息光栅的一级衍射效率与读出光入射角之间的变化关系,其一级衍射效率也表现出

严格的周期性响应,响应周期约 3.9° 。

此外,由图 3 可见,由重铬酸盐-三醋酸纤维素酯制作的双层叠层体积全息光栅的一级峰值衍射效率可达 54%,这比通过涂布法制作的重铬酸盐明胶、卤化银双层叠层体积全息光栅的一级衍射效率都要高(前者约 50%^[2],后者为 48%^[6]),但和理论值 67%相比,还较低。主要原因是,一方面,记录的薄光栅不一定是严格的正弦型纯位相光栅(这需要严格的线性记录和处理,且保证无吸收);另一方面,前后光栅没有同时达到所需要的调制强度(这取决于二光栅调制层和缓冲层对记录光强的透过率),通过红敏,选择较长波长的光作为记录光源,并在感光层的峰值吸收波长和缓冲层的峰值透过波长之间选择折衷,严格控制记录条件和后处理条件,可望进一步有效提高叠层体积全息光栅的一级衍射效率。

4 应用及讨论

通过优化记录条件,以简单的记录光路,可以通过叠层体积全息光栅容易地实现高扇出(fan-out)光束数和高输出一级衍射效率的分束器^[4]。实验中,本文以重铬酸盐-三醋酸纤维素酯的双层叠层体积全息光栅获得了扇出光束数分别为 2, 3, 4 和 7,总一级衍射效率大于 80%的分束器^[12]。这与传统的 Dammann 光栅法^[13]和复合全息图法^[14]等相比较,具有制作简便,扇出光束数高等特点。此外,利用叠层体积全息光栅一级衍射效率的周期性角度选择性,还可有效地实现高输出点阵的一维/二维阵列照明器^[5]和光学开关元件^[6]等。因而在光计算、光纤通讯、光束整形等领域具有更广阔的应用前景。

结束语 本文提出了一种制作叠层光敏全息记录材料的新方法。实验获得了具有双层光敏性的全息记录软片重铬酸盐-三醋酸纤维素酯及其双层叠层体积全息光栅。这种叠层体积全息光栅具有迄今为止最高的一级衍射效率(54%)。文中给出了其一级衍射效率的周期性角度响应曲线,提出了进一步提高其一级衍射效率的有效方法。

参 考 文 献

- [1] 于美文, 光学全息及信息处理. 北京, 国防工业出版社, 1988: 98
- [2] B. Ya, Zel'dovich, D. I. Mirovitskii, N. V. Rostovtseva, *et al.*, Characteristic of two-layer phase holograms. *Sov. J. Quantum. Electron.*, 1984, 14(3): 364~369
- [3] R. V. Johnson, A. R. Tanguay, Jr., Stratified volume holographic optical elements. *Opt. Lett.*, 1988, 13(3): 189~191
- [4] A. Granger, L. Song, R. A. Lessard, Multiple beam generation using a stratified volume holographic grating. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14): 2534~2537
- [5] G. P. Nordin, R. V. Johnson, A. R. Tanguay, Jr., Diffraction properties of stratified volume holographic optical elements. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1992, 9(12): 2206~2217
- [6] J. T. Sheridan, Stacked volume holographic gratings: part I, transmission gratings in series. *Optik*, 1993, 95(2): 73~80
- [7] N. Streibl, Beam shaping with optical array generators. *J. Mod. Opt.*, 1989, 36(12): 1559~1573
- [8] 汪国平, 陈其瑞, 郭履容, 全息记录新材料: 重铬酸盐-三醋酸纤维素酯. 光学学报, 1993, 13(10): 924~928
- [9] K. Wang, L. Guo, Q. Chen, Red sensitivity of dichromated cellulose triacetate as a holographic recording material. *Opt. Lett.*, 1994, 19(16): 1240~1242
- [10] L. Song, R. A. Lessard, Diffraction efficiency of a thin amplitude-phase holographic grating: a convolution approach. *J. Mod. Opt.*, 1990, 37(8): 1319~1328
- [11] I. Pascual, A. Belendez, A. Fimia, Holographic system for copying holograms by using partially coherent light. *Appl. Opt.*, 1992, 31(17): 3312~3319
- [12] 汪国平, 新型全息记录软片 DC-TAC 及其应用研究. 四川联合大学博士学位论文, 1994: 34~39
- [13] H. Dammann, K. Gortler, High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms. *Opt. Commun.*, 1971, 3(5): 312~315
- [14] H. Kobolla, J. Schmidt, J. T. Sheridan *et al.*, Holographic optical beam splitters in dichromated gelatin. *J. Mod. Opt.*, 1992, 39(4): 881~887

A Novel Holographic Recording Film with Stratified Sensitivity

Wang Kuoping

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

Guo Lurong Chen Qirui

(Information Optical Institute, Sichuan United University, Changdu 610064)

(Received 23 October 1994; revised 12 January 1995)

Abstract By forming simultaneously photosensitive layers on both-sides of cellulose triacetate film with chemical reaction, we obtained a holographic recording film with stratified sensitivity —— dichromated cellulose triacetate (DC-TAC). The stratified volume holographic gratings (SVHG) recorded on the film have, to our best knowledge, the highest 1th-order experimental diffraction efficiency (54%). In this paper, the making method and the micro-mechanism of forming SVHG are described. The strictly periodic selectivity of the SVHG is given. In addition, the difference of the diffraction efficiency of double-layer SVHG between the experimental value in DC-TAC and the theoretical prediction is discussed. The effective way for further improving the diffraction efficiency and the potential applications of the SVHG in some interesting fields are suggested.

Key words hohographic recording film, stratified sensitivity, stratified volume holographic grating.