

非均匀膨胀与收缩下反射体全息光栅衍射特性分析

何天博^{1,2} 巴音贺希格^{1*} 齐向东¹ 李文昊¹ 唐玉国¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过引入膨胀因子随光栅胶层厚度的变化函数来研究在非均匀膨胀和收缩情况下反射体全息光栅的衍射特性。根据 Kamiya 严格的分层计算方法, 借用 Lorentz-Lorenz 公式, 推导出了平均折射率和折射率调制度的解析表达式, 据此考察了膨胀因子以定值、线性函数、非线性函数变化时光栅 +1 级衍射光的衍射特性, 分析了平均折射率和折射率调制度在理想情况和衰减分布时对光栅角度和波长选择特性的影响程度。给出了胶层厚度及光栅周期与曝光和未曝光区域膨胀因子的函数关系, 讨论了光栅衍射效率对膨胀因子变化的响应程度。结果表明, 膨胀因子的非均匀分布令光栅衍射效率曲线出现非对称分布; 相比于折射率调制度, 光栅布拉格角度对平均折射率变化较为敏感; 曝光与未曝光区域膨胀因子会影响衍射效率峰值、光栅角带宽和波带宽。该结论对反射体全息光栅曝光后水浴膨胀与脱水收缩等工艺具有理论指导意义。

关键词 光栅; 反射体全息光栅; 衍射特性; 非均匀膨胀或收缩; 膨胀因子; 角度和波长选择性

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209018

Diffraction Characteristic Analysis of Reflection Volume Holographic Gratings at Non-Uniform Swelling or Shrinking

He Tianbo^{1,2} Bayanheshig¹ Qi Xiangdong¹ Li Wenhao¹ Tang Yuguo¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Diffraction characteristics of reflection volume holographic gratings at nonuniform swelling or shrinking by introducing a function between swelling factor and the thickness of the grating layer are investigated. By means of Kamiya's rigorous delamination-calculation method and Lorentz-Lorenz formula, the analytical expressions of the average refractive index and the modulation are derived. Accordingly, the diffraction efficiency curves of the 1st-order reflection are given when the swelling factors are constant, linear function and nonlinear function. The influences of the average refractive index and the modulation for an ideal grating or decay distribution for the nonideal grating on the angular and wavelength selectivity are analyzed. The diffraction characteristics of the grating are given when the swelling factors are unequal at the exposure area and the unexposed area, and the response degree of diffraction efficiency of the grating to the change of swelling factor is discussed. The results show that nonuniform

收稿日期: 2013-08-19; **收到修改稿日期**: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(61108032)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)、吉林省科技发展计划项目(20126012)

作者简介: 何天博(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事体位相位全息光栅理论设计与制作工艺等方面的研究。

E-mail: hetianbo163@163.com

导师简介: 唐玉国(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光谱仪器及医用光谱技术方面的研究。

E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

* **通信联系人**。E-mail: bayin888@sina.com

distribution of the swelling factor causes a diffraction efficiency curve in the asymmetric profile; compared with the modulation of refractive index, the Bragg angle of grating is highly sensitive to the change of average refractive index; the swelling factors at the exposure area and the unexposed area affect the peak efficiency, the angular band range and the spectral bandwidth. The results have theoretical guiding sense for the swelling and shrinking process of the reflection volume holographic gratings.

Key words gratings; reflection volume holographic gratings; diffraction characteristics; nonuniform swelling or shrinking; swelling factor; angular and wavelength selectivity

OCIS codes 050.1960; 090.2890; 090.7330

1 引 言

反射型体光栅是利用两束相干光在记录材料两侧入射,记录干涉条纹,经化学处理后,形成布拉格面平行于光栅表面的折射率调制位相光栅。与透射型相比,反射型体光栅具有波长选择性强的特点,被应用于光信息处理^[1-2]、光束整形^[3-4]、脉冲展宽与压缩^[5-6]及全息波导显示系统^[7-8]等领域。

重铬酸盐明胶(DCG)因具有较高的折射率调制度值,被认为是最好的记录材料之一。而这较高的折射率调制度主要源自于DCG的化学处理过程:吸水膨胀(一般为去离子水)和脱水收缩(如异丙醇)。经过化学处理过程的DCG膜,调制轮廓浮现,衍射光强增大。在大多数情况下,化学处理前后DCG膜层的厚度和折射率等因素将会因膨胀或收缩发生一定的改变,而这种改变一般是不均匀的,因此,所形成的光栅大都偏离理想状态。对于非理想光栅的建模与分析,已有很多针对性的研究与报道,如化学处理前后膜厚和折射率不一致^[9]、布拉格面的旋转与弯曲^[10-11]、剪切效应^[12]及表面浮雕轮廓^[13]等。对于反射体全息光栅来说,这种不均匀的膨胀或收缩会产生膜层内部布拉格面的不均匀分布,光栅结构发生变化,形成变间距反射光栅。Schutte等^[14-16]通过具体的实验探索得到膨胀和缩水过程直接影响反射体光栅的带宽。关于这种非均匀体光栅效率计算方法,也有众多研究,如Au等^[17]在Kogelnik近似理论基础上,通过建立转换矩阵,将各层透射和衍射波联立起来,虽然计算过程比较简单,但前提条件是各层的膜厚需满足薄厚全息图的Q值条件;Kamiya^[18]基于Moharam等^[19]的RCWA提出分层计算方法,计算方法严格没有近似,不足之处在于未解决平均折射率在膜厚方向的分布问题;Neipp等^[20]等利用薄矩阵分解法(TMDM)分析了反射光栅的衍射特性,虽然是一种严格的方法,但是对于不同的薄层,需要变换膜层矩阵才能用于非均匀膜层。

鉴于此,以Kamiya分层体全息光栅衍射效率

计算方法为基础,借用Lorentz-Lorenz公式,从膨胀和缩水处理过程极易出现的问题和现象出发,构建平均折射率和折射率调制度在膜厚方向分布模型,着重分析重铬酸盐明胶反射型体光栅的非均匀膨胀或收缩对其衍射特性的影响,给出膨胀因子线性与非线性分布相对应的光栅角度和波长选择特性,论述曝光与未曝光区域的膨胀因子不同时光栅的衍射特性。利用这种方法可以有效分析变间距、非均匀调制结构反射型体光栅的衍射特性,为化学处理工艺提供理论指导。

2 理论建模

2.1 光学参量变化

当曝光后的DCG经水浴膨胀与异丙醇浴收缩过程后,其内部结构往往会发生变化,图1为反射式体全息光栅经膨胀和收缩后的示意图。图1(a)中区域1与3认为是K9玻璃,区域2为调制区域,经化学处理后膜层出现非均匀分布,图1(b)是将第g层放大后的示意图,粗线条代表曝光后的暗条纹。一般情况下,DCG膜层厚度在微米量级,并且粘附在玻璃或其他光学介质的基底上,因此在模拟膨胀与收缩时仅考虑其发生在膜厚方向。

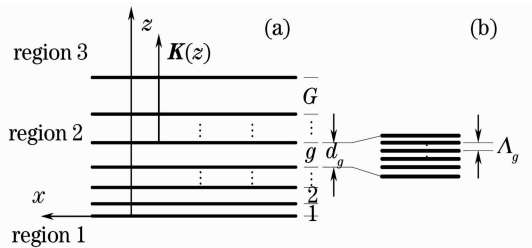


图1 光栅内部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grating's inner structure

对于反射体全息光栅来说,布拉格面倾角 ϕ_0 无限接近于零,即对于理想和非理想光栅的光栅矢量 \mathbf{K}_0 保持不变。对于理想光栅,将膜层均分为G个区域,设每一层光栅膜层厚度为 d_0 ,总膜厚 $D_0 = G \cdot d_0$,光栅周期为 Λ_0 。在经过实际的膨胀和收缩后,光栅周期、光栅的膜厚、平均折射率及折射率调制度等

参数会发生一定的改变,不可能完全符合理想光栅的设计参数,出现偏差是不可避免的,因光栅周期是变化的,通常也被称为变间距反射体光栅。那么,将此时每个子区域的膜层厚度设为 d_g ,总膜厚 $D_2 = \sum_{g=1}^G d_g$,光栅周期为 Λ_g ,为讨论方便,引入膨胀因子来描述经膨胀和收缩过程各参数与理想光栅参数的变化关系,将膨胀因子定义为 z 的函数,假设第 g 层内膨胀和收缩是均匀的,记膨胀因子为 $\alpha_g(z)$,将其记为多项式的形式,即

$$\alpha_g(z) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot z + \alpha_2 \cdot z^2 + \dots, \quad (1)$$

式中 $\alpha_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ 为多项式因子。因对于反射体光栅而言,条纹平面平行于光栅表面,如图 1,若将理想光栅的第 g 层膜厚 d_0 均分成两份,即曝光区域与未曝光区域总膜厚 d_{e0} 与 d_{u0} ,近似看成 $d_{e0} = d_{u0} = \frac{d_0}{2}$,经一系列化学处理后,假设第 g 层乳胶内部曝光区域与未曝光区域的膨胀因子相同,为 $\alpha_g(z)$,则有

$$d_g = \alpha_g(z)d_{e0} + \alpha_g(z)d_{u0} = \alpha_g(z)d_0. \quad (2)$$

那么由 $\phi_0 = 0$ 可以得到 $\Lambda_g = \alpha_g(z)\Lambda_0$, z 为从膜层与基底界面到第 g 层的膜层厚度,此时可以将膨胀因子简单理解成实际制作的体光栅与理想光栅的膜层厚度之比。

2.2 平均折射率和折射率调制度随膨胀因子的变化关系

记录材料经曝光后,其内部的折射率分布轮廓与记录时干涉条纹的光强分布一致^[21],此处不考虑曝光量及干涉条纹对比度等因素的影响,那么设为正弦周期调制。将第 g 区域的折射率表示成

$$n_g(z) = \bar{n}_g(z) + \Delta n_g(z) \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x \sin \phi_g + z \cos \phi_g)\right], \quad (3)$$

式中 $\bar{n}_g(z)$ 为第 g 层的平均折射率, $\Delta n_g(z)$ 为这一层的折射率调制度, ϕ_g 为第 g 层的布拉格面倾角,此处有 $\phi_g = \phi_0 = 0$ 成立。Kamiya^[18]并没有将平均折射率与折射率调制度沿膜厚方向的变化计算在内,计算过程中如若真实模拟实际光栅,则需借用 Lorentz-Lorenz 公式^[14-15, 22],将这一区域的平均折射率近似表示成此处记录材料密度的函数,设膨胀前后曝光与未曝光区域记录材料的密度分别为 ρ_{e0} 、 ρ_{u0} 、 ρ_{eg} 、 ρ_{ug} ,对于第 g 层内的曝光区域

$$\begin{cases} \frac{n_{e0}^2 - 1}{n_{e0}^2 + 2} \approx \rho_{e0} \\ \rho_{e0} d_{e0} = \rho_{eg} d_{eg} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 d_{eg} 为化学处理后曝光区域薄层厚度,由(2)式和(4)式,可以得到曝光区域膨胀后的折射率值

$$n_{eg}(z) = \sqrt{\frac{\alpha_g(z) + 2 \cdot (n_{e0}^2 - 1)/(n_{e0}^2 + 2)}{\alpha_g(z) - (n_{e0}^2 - 1)/(n_{e0}^2 + 2)}}. \quad (5)$$

同理可得到这一层内未曝光区域的折射率值

$$n_{ug}(z) = \sqrt{\frac{\alpha_g(z) + 2 \cdot (n_{u0}^2 - 1)/(n_{u0}^2 + 2)}{\alpha_g(z) - (n_{u0}^2 - 1)/(n_{u0}^2 + 2)}}. \quad (6)$$

那么平均折射率和折射率调制度可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{n}_g(z) &= \frac{n_{eg}(z) + n_{ug}(z)}{2}, \\ \Delta n_g(z) &= n_{eg}(z) - n_{ug}(z). \end{aligned} \quad (7)$$

从图 2 可以看出,随着膨胀因子的增大,平均折射率与折射率调制度值近似线性衰减。

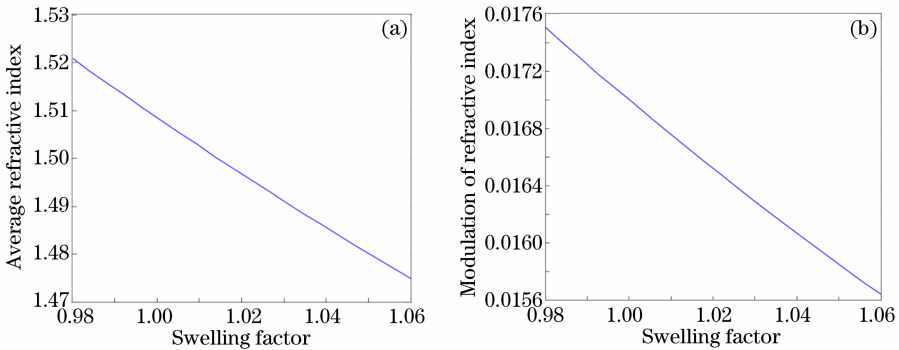


图 2 (a)平均折射率和(b)折射率调制度随膨胀因子变化关系

Fig. 2 Relationships between swelling factor and (a) average refractive index and (b) modulation of refractive index

3 结果与讨论

以图 3 所示光栅结构为例,根据(2)式和(7)式,

将各参量的计算结果代入 Kamiya^[18]的分层计算方法中,编程计算并分析反射体光栅角度和波长选择

特性及折射率随膨胀因子的变化规律。图 3 所示为经化学处理前后光栅膜厚不发生改变的理想体全息光栅,即 $\alpha_g(z) = \alpha_0 = 1$, 记录材料的平均折射率设为 $\bar{n} = 1.5$, 曝光显影后的折射率调制度取为 $0.0167^{[16,18]}$, 胶膜两侧附着玻璃基片, 其折射率为 $n_{\text{glass}} = 1.52$, 计算得到的衍射效率随入射角度和入射光波长的变化关系分别如图 4(a)和(b)所示。一般有 $\bar{\epsilon}_g = \bar{n}_g^2, \Delta\epsilon_g = 2\bar{n}_g \Delta n_g^{[23]}$ 。

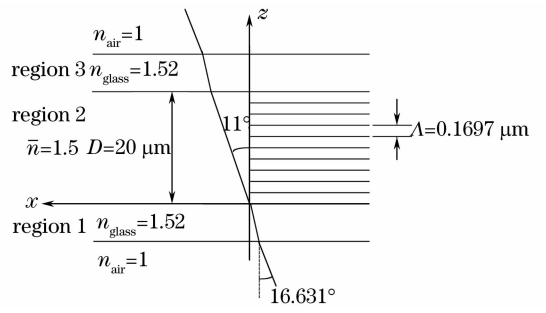


图 3 理想光栅再现结构示意图

Fig. 3 Reconstruction diagram of ideal grating

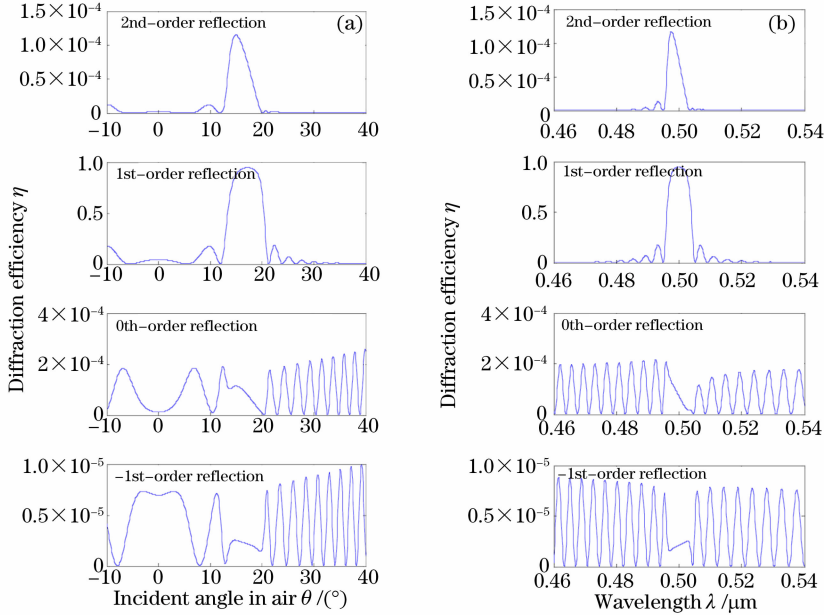


图 4 理想体全息光栅(a)角度和(b)波长选择性曲线

Fig. 4 Curves of (a) angular and (b) wavelength selectivity for ideal grating

为研究膨胀因子对光栅衍射特性的影响,首先将其取为定值,即经膨胀与收缩后各层区域膜厚相同,将 $\alpha_g(z) = \alpha_0$ 取为 0.98 和 1.02^[16,18], 为原始膜厚的 0.98 和 1.02 倍,其+1 级衍射效率随入射角度和波长变化曲线如图 5(a)和(b)所示。由图 5(a)可知,光栅衍射效率峰值不发生变化,只是布拉格角

度产生漂移,当膨胀因子增大时,布拉格角度右移,反之左移,并且光栅的角宽度稍有增大,其与相移因子有关,详见文献[24]。值得注意的是,当 α_0 为 0.98 时,在 -10° 处会出现另一效率峰值,这是再现光自光栅法线另一侧入射的情况。在不同膨胀因子下,光栅波长选择性曲线的变化趋势是与角度选择

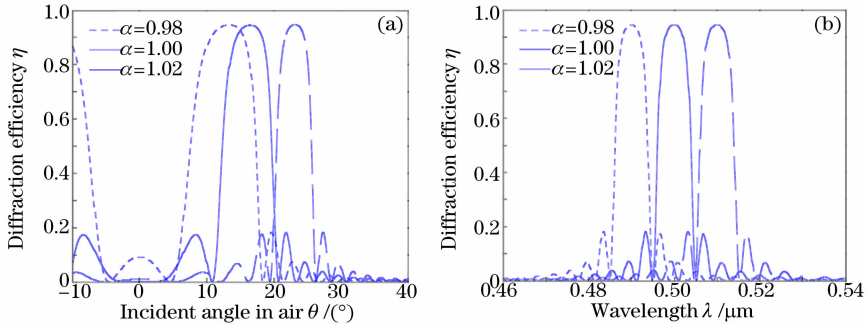


图 5 不同膨胀因子的+1 级衍射效率与(a)入射角度和(b)波长关系曲线

Fig. 5 Diffraction efficiency curves of 1st-order at different swelling factors versus (a) incident angle and (b) wavelength

性曲线一致的,如图 5(b)所示。

3.1 膨胀因子线性变化对光栅衍射特性的影响

理论计算时,反射型体光栅胶层的平均折射率和折射率调制度经常当成常数处理^[18],但在实际化学处理过程中实现各层平均折射率和折射率调制度的均匀分布是相当困难的^[14-16,25],也没有方法实时监测其胶层内部折射率分布情况,故从理论上分析其非均匀分布对衍射特性的影响是必要的。若假设膨胀因子在膜厚方向线性变化,如图 6(a)所示,那么平均折射率、折射率调制度、角度及波长选择性与+1级衍射效率关系曲线随线性膨胀因子的变化关系如图 6(b)~(e)所示。图 6(a)中 α 为 z 的一次函数,取三条斜率不同的直线,其中函数中的系数取值可参照文献^[16,18],只为考察反射体光栅各参数的变化情况和衍射特性。平均折射率和折射率调制度在膜厚方向的变化情况如图 6(b)和(c)所示,经计

算得到的效率曲线如图 6(d)和(e)所示,只取反射+1级效率曲线,图中实线表示膨胀因子为 1.00 时理想体光栅的效率曲线。可以看出,随着膨胀因子的斜率增大,效率曲线偏离理想状态越严重,峰值下降速度较为缓慢,旁瓣效率值上升速度较快,适当地增大了角带宽,从图 6(d)中可以明显看出峰值两侧呈现不对称分布,而布拉格波长向短波移动如图 6(e)所示。与理想光栅效率曲线相比,当平均折射率和折射率调制度呈衰减分布时,光栅的入射角度和波长向小角度和短波方向移动,且对角度选择性曲线影响较大,曲线的变形程度与衰减程度密切相关,对于这种光栅在使用时需要通过调节入射角度和波长来寻找效率峰值。故在模拟计算经实际化学处理后的光栅衍射效率时,平均折射率和折射率调制度的取值是导致效率峰值点变化的重要因素,需重点考虑。

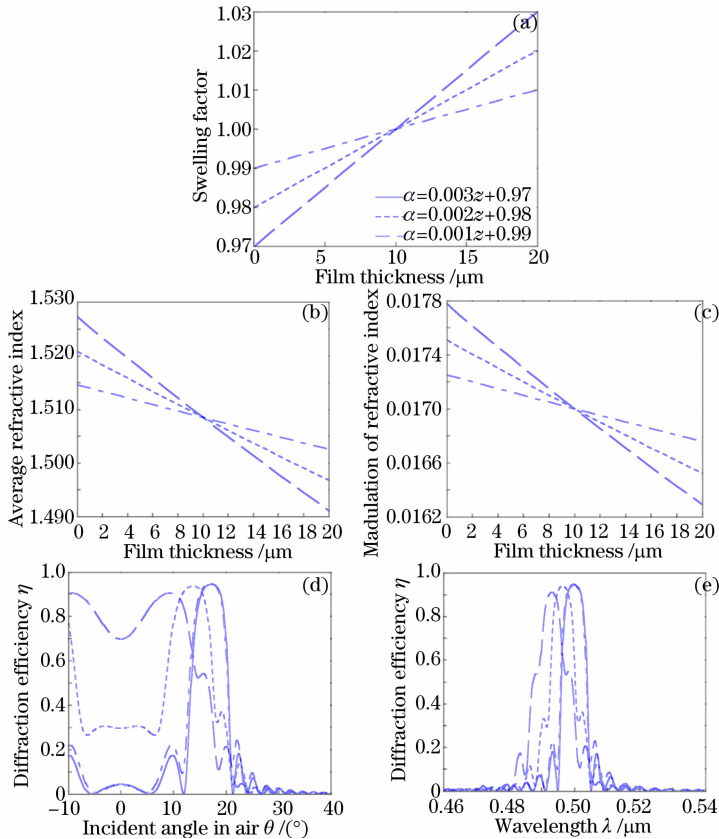


图 6 线性膨胀下各参量变化情况。(a)膨胀因子,(b)平均折射率和(c)折射率调制度与膜层厚度的变化关系;(d)角度和(e)波长选择性曲线

Fig. 6 Variation of parameters while swelling factor is expressed as a linear function. Relationships between (a) Swelling factor, (b) average refractive index, (c) modulation of refractive index and the thickness; curves of (d) angular and (e) wavelength selectivity

3.2 膨胀因子非线性变化对光栅衍射特性的影响

对于如图 1 所示的非均匀结构光栅,当各层的

膨胀因子以图 7(a)所示沿膜层厚度方向的变化为非线性函数时,取两条增长速度不同的曲线,一条满

足膨胀因子多项式形式,设 α 是 z 的二次函数^[16,18], 另一条取其沿直线 $\alpha=0.001z+0.99$ 的对称曲线, 那么相应的平均折射率、各层的折射率调制度及效率曲线如图 7(b)~(e)所示。可见效率曲线形状改变不大,对于由区域 1 到区域 3,膨胀因子的增长速

度先快后慢的情况,+1 级效率曲线右移。对于不同曲率的非线性关系如图 8(a)所示,相对应的效率分布如图 8(b)和(c)所示,波长选择曲线变化较小,而角选择曲线随着曲率的增大,旁瓣效率增大,不对称分布的情况愈发明显。

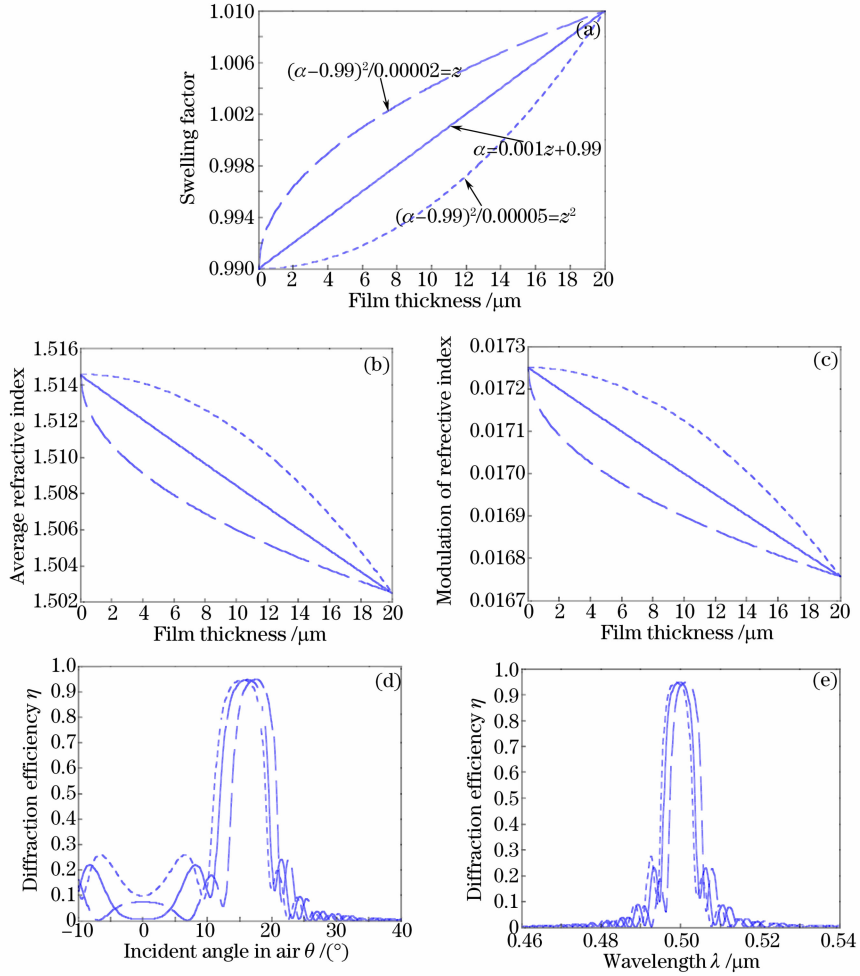


图 7 非线性膨胀下各参量变化情况。(a)膨胀因子,(b)平均折射率和(c)折射率调制度与膜层厚度的变化关系; (d)角度和(e)波长选择性曲线

Fig. 7 Variation of parameters while swelling factor is expressed as a nonlinear function. Relations between (a) Swelling factor, (b) average refractive index, (c) modulation of refractive index and the thickness; curves of (d) angular and (e) wavelength selectivity

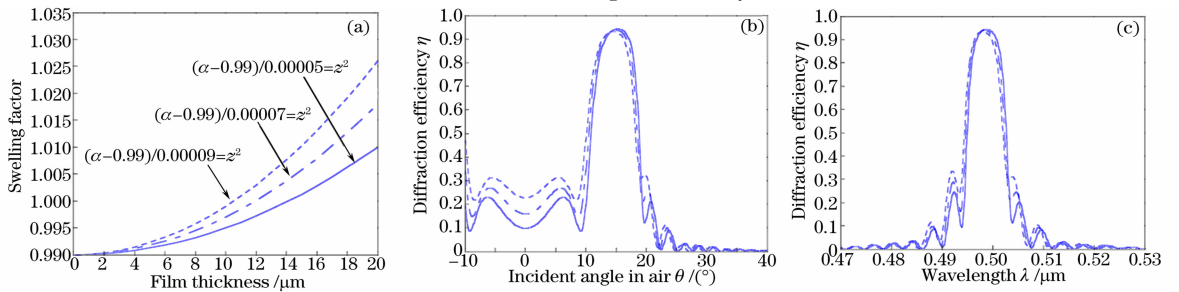


图 8 不同曲率下各参量变化情况。(a)膨胀因子与膜层厚度的变化关系;(b)角度和(c)波长选择性曲线

Fig. 8 Variation of parameters under different curvatures. (a) Relations between swelling factor and the thickness; curves of (b) angular and (c) wavelength selectivity

3.3 曝光与未曝光区域的膨胀因子不同对光栅衍射特性的影响

以上分析建立在曝光与未曝光膨胀因子相同的基础上,但在光栅实际制作中,往往会出现膨胀因子不等的情况,因为在 DCG 的光化学反应过程中,相比于未曝光区域,曝光区域乳胶硬度较大,在化学处理中较难膨胀或收缩^[26-27]。对于对称记录的透射全息光栅而言,较易出现浮雕轮廓,但对其角度选择特性影响较小^[13];对于对称记录的反射体全息光栅,常出现变周期的情况,对效率曲线影响较大。为讨论此时光栅的衍射特性,设曝光与未曝光区域膨胀因子分别为 α_{eg} 和 α_{ug} ,则有

$$d_g = d_{eg} + d_{ug} = \alpha_{eg}(z)d_{e0} + \alpha_{ug}(z)d_{u0} =$$

$$\frac{1}{2}[\alpha_{eg}(z) + \alpha_{ug}(z)]d_0. \quad (8)$$

同理可得光栅周期

$$\Lambda_g = \frac{1}{2}[\alpha_{eg}(z) + \alpha_{ug}(z)]\Lambda_0. \quad (9)$$

以膨胀因子取定值为例,代入计算程序可得图 9 的光栅衍射特性曲线。因与未曝光区域相比,曝光区域的胶层经膨胀与收缩后硬度较大,设其膨胀因子值保持不变,为 1.00。将未曝光区域膨胀因子做微量调整后,发现光栅角度和波长选择曲线变化趋势一致,且随着膨胀因子的增加,各级次的衍射效率有所增加,对于衍射 +1 级,其峰值效率无限接近于 1,并且角带宽和光谱带宽明显增大。

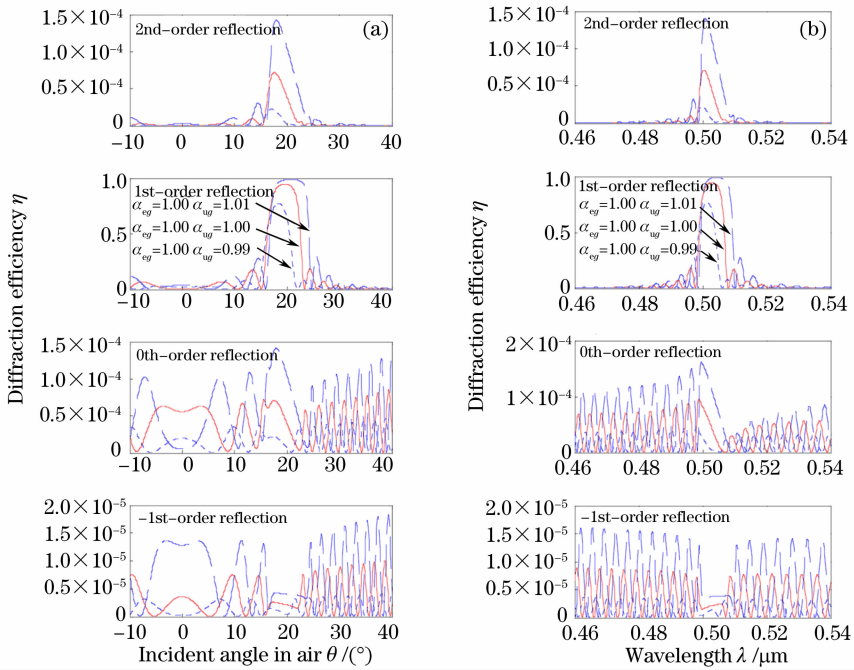


图 9 曝光与未曝光区域膨胀因子不同对(a)角度和(b)波长选择性的影响

Fig. 9 Influence of different swelling factors in the area of exposed and unexposed on (a) angular and (b) wavelength selectivity

以图 9(a)中 +1 级反射曲线为例,说明膨胀因子不同衍射效率曲线产生巨大差异的原因:设曝光区域的膨胀因子为 1.00,当未曝光区域的膨胀因子小于 1 时,计算发现膜层厚度和折射率调制度减小,衍射效率峰值相应降低,而当未曝光的膨胀因子大于 1,且逐渐增大时,膜层厚度和折射率调制度也相应增大,效率峰值逐渐接近于 1。在经历膨胀和缩水过程后,DCG 的膜厚和折射率调制度会发生一定的变化,而且这些变化往往会偏离设计的理想光栅参数,膨胀或收缩程度较大时,甚至会导致胶层内部出现撕裂以至于损坏光栅,因此在实际制作中,光栅

制作者往往会在 DCG 中或水浴之前的定影液中加入硬化剂,来稳定光栅内部结构,抑制由膨胀和收缩产生乳胶内部压力的增加。可以根据上述分析结果来确定具体的膨胀和收缩量,这样光栅膜厚等参量不会过度增大或减小,衍射效率曲线也不会出现巨大变动。

4 结 论

利用 Lorentz-Lorenz 公式给出平均折射率和折射率调制度随膨胀因子变化关系,根据 Kamiya 分层计算方法编制程序,分析了膨胀因子为线性和

非线性分布及曝光与未曝光区域不同膨胀因子对光栅衍射特性的影响,由此得出结论:1)光栅衍射效率曲线随膨胀因子的线性或非线性变化呈非对称分布,膨胀因子变化越大,说明实际制作光栅偏离理想光栅越远,若想得到预期设计的光栅参数,需要严格控制膨胀和缩水过程中的各个参量;2)相比于波长选择特性,光栅角度选择性曲线对平均折射率和折射率调制度的变化较为敏感,两者沿膜厚方向的衰减分布令布拉格角度和波长产生移动,故光栅在使用时需要进行适当地调整才能得到效率峰值点的位置;3)在曝光与未曝光区域的膨胀因子不等的情况下,随着未曝光区域膨胀因子的增加,光栅峰值效率增大,角带宽和波带宽增加,如实际制作中膨胀或收缩有度,可以作为提升其衍射效率的一种手段。上述工作对反射体全息光栅曝光后水浴膨胀与脱水收缩等工艺具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- N V Kukhtareva, T V Kukhtareva, R D Jones, *et al.*. Real time holography for optical processing using photorefractive crystals [C]. SPIE, 1999, 3793: 90-102.
- S Orlic, S Ulm, H J Eicher. 3D bit-oriented optical storage in photopolymers[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2001, 3(1): 72-81.
- Wang Hao, Yuan Xiao, Zhan Xiang, *et al.*. Influence of volume Bragg grating reflectivity on spectrum of external cavity laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602004.
王浩,袁孝,张翔,等.体布拉格光栅反射率对外腔半导体激光阵列输出光谱的影响[J].中国激光,2012,39(6): 0602004.
- P Jelger, F Laurell. Efficient narrow-linewidth volume-Bragg grating locked Nd: fiber laser[J]. Opt Express, 2007, 15(18): 11336-11340.
- C Moser, F Havemeyer. Distortion free pulse stretching and compression by chirped volume holographic gratings[C]. SPIE, 2010, 7581: 75810E.
- Matthew Rever, Guoqing Chang, Vadim Smimov, *et al.*. Temporal reciprocity of chirped volume Bragg grating pulse compressors[C]. San Jose: Confererue on Lasers and Electro-Optics, 2010. CthA3.
- 索尼株式会社. 光学装置以及虚像显示装置: 日本, 200580000315[P]. [2013-09-16]. <http://211.157.1048.87:8080/sipo/zljs/hyjs-yx-new.jsp?recid=200580000315>.
- Hiroshi Mukawa, Katsuyuki Akutsu, Ikuo Matsumura, *et al.*. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. J Soc Inf Display, 2009, 17(3): 185-193.
- A Belendez, I V Pascual, A Fimia. Experimental results in thickness and index variations to the analysis of holographic aberrations[C]. SPIE, 1990, 1319: 305.
- A Belendez, I Pascual, A Fimia. Model for analyzing the effects of processing on recording material in thick holograms[J]. J Opt Soc Am A, 1992, 9(7): 1214-1223.
- T Kubota. The bending of interference fringes inside a hologram [J]. Opt Acta, 1979, 26(6): 731-743.
- A Beléndez, I Pascual, A Fimia. Efficiency of thick phase holograms in the presence of shear-type effects due to processing [J]. J Mod Opt, 1992, 39(4): 889-899.
- N Kamiya. Rigorous coupled-wave analysis for practical planar dielectric gratings; 2. Diffraction by a surface-eroded hologram layer[J]. Appl Opt, 1998, 37(25): 5854-5863.
- H Schutte, V Dederichs, C G Stojanoff. Methods for influencing the optical properties of dichromated gelatin films[C]. SPIE, 1994, 2262: 284-295.
- H Schutte, C G Stojanoff. Effects of process control and exposure energy upon the inner structure and the optical properties of volume holograms in dichromated gelatin films[C]. SPIE, 1997, 3011: 255-266.
- C G Stojanoff. The effects of the film manufacturing techniques, of the exposure procedures and of the development and post-treatment thermo chemical processes on the holographic properties of HOEs in DCG[C]. SPIE, 2006, 6252: 62521V.
- L B Au, J C W Newell, L Solymar. Non-uniformities in thick dichromated gelatin transmission gratings[J]. J Mod Opt, 1987, 34(9): 1211-1215.
- N Kamiya. Rigorous coupled-wave analysis for practical planar dielectric gratings; 1. Thickness-changed holograms and some characteristics of diffraction efficiency[J]. Appl Opt, 1998, 37(25): 5843-5853.
- M G Moharam, T K Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. J Opt Soc Am, 1981, 71(7): 811-818.
- C Neipp, Jorge Frances, Manuel Perez-Molina, *et al.*. Transference matrix method for non-slanted holographic reflection gratings[C]. SPIE, 2010, 7717: 771706.
- Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Profile evolution of the grating masks according to the exposure dose and interference fringe contrast in the fabrication of holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0305001.
韩建,巴音贺希格,李文昊,等.全息光栅制作中光栅掩模形状随曝光量及干涉场条纹对比度的变化规律[J].光学学报, 2012, 32(3): 0305001.
- I Aubrecht, M Miler, I Koudela. Recording of holographic diffraction gratings in photopolymers: theoretical modeling and real-time monitoring of grating growth[J]. J Mod Opt, 1998, 45(7): 1465-1477.
- C Neipp, M L Alvarez, S Gallego, *et al.*. Comparison between a thin matrix decomposition method and the rigorous coupled wave theory applied to volume diffraction gratings[J]. Optik, 2003, 114(12): 529-534.
- H Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. Bell Syst Techn J, 1969, 48(9): 2909-2947.
- S Gallego, M Ortuño, C Neipp, *et al.*. Physical and effective optical thickness of holographic diffraction gratings recorded in photopolymers[J]. Opt Express, 2005, 13(6): 1939-1947.
- B J Chang, C D Leonard. Dichromated gelatin for the fabrication of holographic optical elements[J]. Appl Opt, 1979, 18(14): 2407-2417.
- Xiong Liangwen, Liu Shihong, Peng Bixian. Mechanism of hologram formation in dichromated gelatin with X-ray photoelectron spectroscopy[J]. Appl Opt, 1998, 37(17): 3678-3684.

栏目编辑:何卓铭