

文章编号: 0253-2239(2010)01-0065-05

全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测

孔 鹏^{1,2} 巴音贺希格^{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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 两束记录光非对称入射必然造成光刻胶中潜像光栅“沟槽”的倾斜,进而影响显影后光栅沟槽的形状。特别是在凹面全息光栅的制作中,两束记录光一般都是非对称入射。为了能够从理论上分析并指导非对称全息光栅的制作,建立了非对称曝光、显影理论模型,重点分析了两束记录光从光栅表面一侧照射的情况。运用此模型模拟了光栅沟槽的形成过程,计算了全息光栅制作中非对称曝光、显影的实时监测曲线。理论计算显示,非对称曝光下,曝光实时监测曲线和显影实时监测曲线变化趋势与对称曝光时相同,只是衍射效率值不同,这与实验结果吻合;数值模拟光栅沟槽的演化发现,非线性效应特别显著时得到的沟槽为倾斜矩形,非线性效应比较显著时得到的沟槽为非对称梯形,非线性效应受到抑制时得到的沟槽为非对称性不明显的正弦形,这与实验结果一致。该模型能够有效地指导全息光栅掩模的制作,有助于为离子束刻蚀工艺提供所需的合格掩模。

关键词 全息; 光栅; 曝光模型; 显影模型; 非对称; 实时监测

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0065

Modeling and In-Situ Monitoring of the Asymmetric Exposure and Development of Holographic Grating

Kong Peng^{1,2} Bayanheshig¹ Li Wenhao¹ Tang Yuguo¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract It is asymmetric exposure that generates tilted latent image grating and then influence the shape of the groove during development. In order to simulate the formation of the grating, the asymmetric exposure and development model are introduced, with emphasis on that both the recording sources are on the same side of the substrate. The development of the groove is simulated and the in-situ monitoring curve in the fabrication of holographic grating is calculated. The results indicate that the exposure monitoring curve and development curve of asymmetric exposure are the same with that of symmetrical exposure. The groove will be tilted rectangular or asymmetric trapezoidal when the nonlinear effect is very remarkable or not so remarkable respectively. The asymmetry will be reduced when the nonlinear effect is restrained. A very good agreement between theory and experiment is obtained.

Key words holography; gratings; exposure model; development model; asymmetry; in-situ monitoring

1 引言

全息光栅是利用光刻胶记录两相干光束的干涉

条纹,然后经显影转化为浮雕轮廓制作而成。光栅沟槽的形状无论对于衍射效率还是作为离子束刻蚀

收稿日期: 2008-12-16; 收到修改稿日期: 2009-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(20070523、20086013)资助课题。

作者简介: 孔 鹏(1981—),男,博士研究生,主要从事平场全息凹面光栅设计与制作工艺等方面的研究。

导师简介: 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱技术和光谱仪器等方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

的掩模都有很大的影响,有必要在理论上进行分析进而在工艺上进行控制^[1,2]。要对全息光栅制作进行理论模拟就必须建立相应曝光显影模型,这与光刻胶的曝光显影特性有关。F. H. Dill^[3,4]曾建立过光刻胶曝光显影的理论模型,之后 Mello 等^[5]、Zanke 等^[6]、Karafyllidis 等^[7]、Mashev 等^[8]许多研究者分别提出了各自的模型。通过这些研究可知,当光刻胶厚度较小,且使用蓝紫光曝光时,可以忽略漂白作用;当基底反射率很低时,可以不考虑驻波效应。常规的全息光栅制作满足以下条件:光刻胶膜层厚度为 200~700 nm 左右;使用蓝紫光曝光;一般使用玻璃基底,反射率很低。因此,可以忽略漂白、驻波等效应的影响。鉴于此,赵劲松等^[9,10]提出了一种简单而有效的模型,可以对平面全息光栅的曝光显影工艺进行模拟,与实验结果的吻合程度很高,完全可以指导平面全息光栅的制作。

在平面全息光栅制作中,两束记录光从基底表面法线两侧对称入射,文献^[9,10]研究的是对称曝光及显影条件下的理论模拟和实时监测问题。在凹面全息光栅制作中,由于消像差的需要,记录光不再是从基底表面法线两侧对称入射,而是非对称入射,此时潜像光栅的“沟槽”发生倾斜,进而影响显影后的光栅槽形。因此,有必要对全息光栅制作中非对称曝光及显影进行理论模拟与分析。国外学者对此接近的问题曾做过研究,例如, Sheridan^[11]讨论了闪耀(即非对称槽形)全息图的制作方法及其衍射特性; Hutley^[12]利用 Sheridan 提出的方法制作了紫外闪耀全息光栅,并对其衍射特性做了研究; Breidne 等^[13]对比了几种不同的制作闪耀全息光栅的方法及其效率曲线的差异; Bulygin^[14]研究了记录光分别从基底同侧和异侧照射得到的非对称反射全息图的衍射效率; Aubrecht 等^[15]在理论分析时把闪耀全息光栅看作倾斜正弦曲线轮廓的浮雕周期,并制作了紫外闪耀全息光栅,计算了衍射效率曲线; Romanenko 等^[16]介绍了一种新的制作非对称光栅的方法,利用一束单色光或白光倾斜照射在光敏材料 As_2Se_3 制作的对称光栅上,通过反复化学刻蚀将对称槽形转化为非对称槽形,研究了其衍射效率曲线。他们的工作重点是研究非对称(也就是闪耀)全息光栅的制作方法和衍射效率特性,而没有涉及如何对非对称槽形的制作过程进行实时监测与控制的问题。然而,目前全息掩模制作的主要目的在于为离子束刻蚀做准备,并不要求高的衍射效率,关键是如何对刻槽形状进行精确控制,只有使用实时监测

技术才能够很好的解决这一问题^[9,10]。

基于全息光栅掩模制作实际,着重分析了记录光在光栅基底同侧并在基底法线两侧非对称照射下的曝光以及显影过程,将文献^[9,10]给出的曝光和显影模型推广到非对称曝光显影情形,建立非对称曝光显影模型。利用此模型模拟非对称全息光栅的槽形演化,计算曝光监测和显影监测理论模拟曲线,并进行实验验证,旨在发展全息光栅制作实时在线监测技术,以获得适合离子束刻蚀的光栅掩模。

2 非对称全息光栅曝光过程的理论模拟

2.1 非对称曝光模型

如图 1 所示,两记录光波长为 λ_0 , 分别以角度 θ_1, θ_2 入射, 折射角分别为 θ'_1, θ'_2 , 光刻胶内部两束光夹角为 2φ 。粗实线代表干涉条纹, 其方向与光刻胶内两束光夹角平分线的方向一致。 a 为干涉条纹间距, d 为光栅周期。以表面法线方向为 y 方向, 沿表面为 x 方向, 干涉场的光强分布表示为

$$I(x, y) = 2A^2 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{a} (x \cos \phi + y \sin \phi) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$a = \lambda_p / (2 \sin \varphi), \quad \phi = (\theta'_1 + \theta'_2) / 2, \quad (2)$$

其中 A 为光波振幅, λ_p 为记录光在光刻胶中的波长, ϕ 代表了干涉条纹的倾斜度。从(1)式可以看出, 干涉场在 x 方向的周期为 $\frac{a}{\cos \phi}$, 即光栅周期 $d = \frac{a}{\cos \phi}$ 。

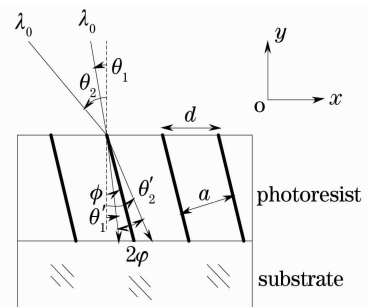


图 1 非对称曝光时的干涉条纹

Fig. 1 Interference pattern of asymmetrical exposure

将文献^[9]建立的曝光模型推广到非对称曝光情形得

$$D_e = 1 - \exp[-aE(x, y, t)], \quad (3)$$

$$E(x, y, t) = I(x, y)t + \gamma t^3, \quad (4)$$

其中 D_e 是被激发光刻胶分子的瞬时密度相对于总

分子密度的比例; E 为曝光量; α 为曝光常数, 表征感光灵敏度, 主要影响监测曲线上升区的上升速度; γ 为曝光量修正项的系数, 主要影响监测曲线下下降区的下降速度; t 为曝光时间。(1) 式、(3) 式和(4) 式就是非对称曝光模型。

实验中, $\theta_1 = 16.29^\circ$, $\theta_2 = 50.91^\circ$, 光刻胶对记录光的折射率为 1.68, 则 $\theta'_1 = 9.6^\circ$, $\theta'_2 = 27.5^\circ$ 。由(2) 式得 $\phi = 18.6^\circ$, 即潜像光栅的“沟槽”将倾斜 18.6° 。记录光源 He-Cd 激光器的发射波长为 441.6 nm, $a = \frac{\lambda_p}{(2\sin\phi)} = 0.84 \mu\text{m}$, 光栅周期 $d = \frac{a}{\cos\phi} = 0.887 \mu\text{m}$ 。图 2 为曝光后被曝光光刻胶分子浓度 D_e 空间分布的等高线图, 坐标系与图 1 一致, 此图直观地展示出潜像光栅“沟槽”的倾斜。

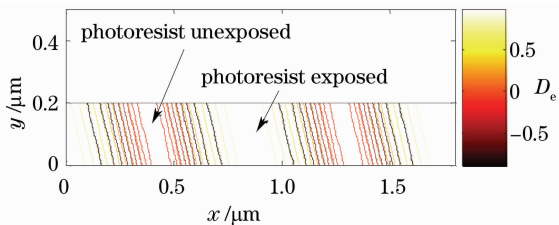


图 2 被曝光光刻胶分子浓度空间分布的等高线图

Fig. 2 Contour lines of spatial distribution of exposed photoresist

2.2 曝光实时监测曲线

假设曝光过程中光刻胶的折射率变化 Δn 与 D_e 成正比, 光刻胶的折射率可以表示为

$$n(x, y, t) = n_0 - \Delta n \{1 - \exp\{-\alpha [I(x, y)t + \gamma t^3]\}\}, \quad (5)$$

其中 Δn 是光刻胶的折射率变化最大值, n_0 是未曝光的光刻胶折射率。(5) 式为潜像光栅随时间变化的数学模型。结合此模型和光栅软件 KAPPA 计算了图 2 所示潜像光栅对监测光的反射负一级衍射效率变化。采用引入监测光的方法进行曝光监测, 计算中 $n_0 = 1.68$, $\Delta n = 0.02$, 监测光波长 632.8 nm, 偏振角 45° , 以入射角 $+20.9^\circ$ 自准直入射, 坐标系与图 1 图 2 相同, 入射角为正表示入射光在 x 轴上的投影沿 x 轴正方向。曝光模型中 $\alpha = 0.03$, $\gamma = 5 \times 10^{-8}$ 。图 3(a) 是对称曝光的理论模拟曲线, 图 3(b) 是非对称曝光的理论模拟曲线, 可以看出两者变化趋势相近, 只是效率值大小不同。图 3(c) 是实验中测得的非对称曝光监测曲线, 与图 3(b) 变化趋势一致, 实验曲线在开始时变化缓慢是由光刻胶感光响应时间引起的。由此可以得出结论, 对称曝光和非

对称曝光得到的实时监测曲线一致, 判断对称曝光终止点的方法^[9] 同样适用于非对称曝光。

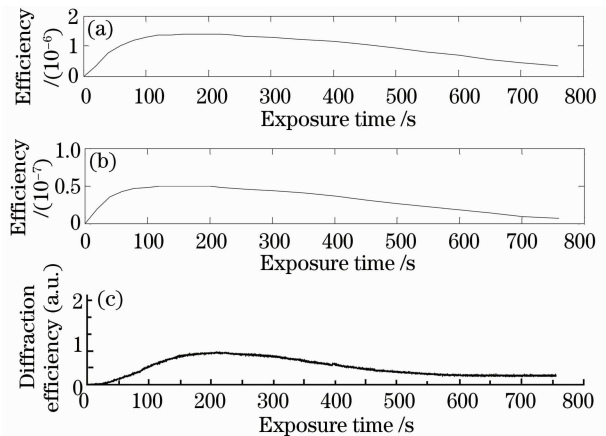


图 3 (a) 对称曝光理论模拟曲线; (b) 非对称曝光理论模拟曲线; (c) 非对称曝光实时监测曲线

Fig. 3 (a) Theoretically simulated symmetric exposure monitoring curve; (b) theoretically simulated asymmetrical exposure monitoring curve; (c) in-situ exposure monitoring curve of asymmetrical exposure

3 非对称全息光栅显影过程的理论模拟

3.1 非对称显影模型

将非对称曝光模型与文献[10]给出的显影模型结合得到非对称显影模型为

$$\begin{cases} v_x = V \sin \theta, & v_y = V \cos \theta, \\ X^{(k)} = X^{(k-1)} + v_x^{(k-1)} (X^{(k-1)}, Y^{(k-1)}) \Delta t_k, \\ Y^{(k)} = Y^{(k-1)} + v_y^{(k-1)} (X^{(k-1)}, Y^{(k-1)}) \Delta t_k, \\ V(x, y, t) = V_0 \exp[\kappa D_e(x, y, t)]. \end{cases} \quad (6)$$

其中 θ 为显影刻蚀速度方向角, V 为刻蚀速率, v_x, v_y 为刻蚀速度分量大小, V_0 是未曝光光刻胶的刻蚀速率, κ 为明暗条纹中心位置刻蚀速率之间的倍率系数的对数, X, Y 为光栅轮廓上点的坐标, D_e 由(3) 式表示。图 4 给出了非对称显影模型对光栅沟槽演化的数值模拟结果, 初始胶厚为 $0.2 \mu\text{m}$ 。大量的模拟实验表明, 当非线性效应显著即 V_0 较小 κ 较大时, 得到的槽形接近于倾斜的矩形, 如图 4(a); 当非线性效应被抑制即 V_0 较大 κ 较小时, 得到的槽形为近似对称的正弦形, 如图 4(b); 如果在上述两种情况之间, 得到的槽形为非对称梯形, 如图 4(c)。

3.2 模拟结果与实验的比较

图 5 为实验中制作的非对称全息光栅的原子力显微镜扫描图片, 图 5(a) 为非对称梯形沟槽, 栅脊左

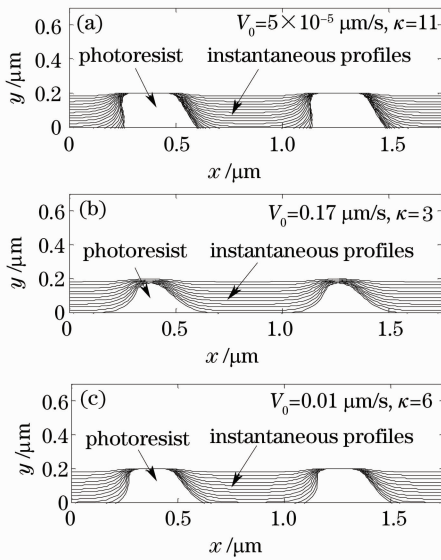


图 4 沟槽轮廓演化的数值模拟

Fig. 4 Modeling of groove profile evolution during development

右两边侧壁的陡度有明显差别,分别约为 47° 和 27° , 对应图 4(b) 非线性效应比较显著的情形;图 5(b) 为略微有些倾斜的正弦沟槽,左右两侧的陡度分别约为 33° 和 27° ,对应图 4(c) 非线性效应受到抑制的情形,此时槽深必然会有所减小,原因是 V_0 较大,显影过程中栅脊被侵蚀,较之梯形沟槽减小了 22.37 nm 。抑制非线性效应,将工艺条件控制在线性区可以降低栅脊的非对称度,但只能得到正弦槽形。

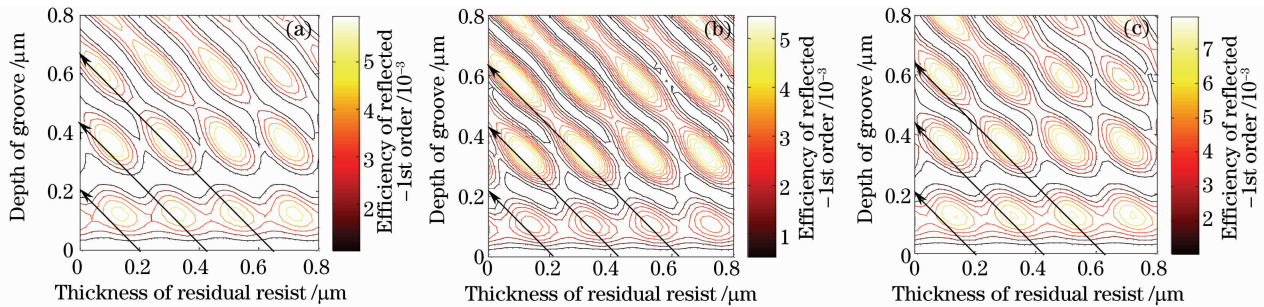


图 6 显影监测中光栅的反射负一级衍射效率

Fig. 6 Efficiency of reflected -1 st order of the grating during development monitoring

从图中看出,不同槽形的效率变化趋势一致,只是效率大小有所区别。黑色箭头线表示不同初始胶厚的显影监测曲线经历的峰的数目不同, 200 nm 胶厚监测曲线只有一个峰。图 7 为显影监测模拟曲线和实验曲线的对照, a 为模拟显影曲线, b 为实时监测曲线,两者都经历一个峰,变化趋势吻合。

4 结 论

结合凹面全息光栅掩模制作实际,将对称曝光

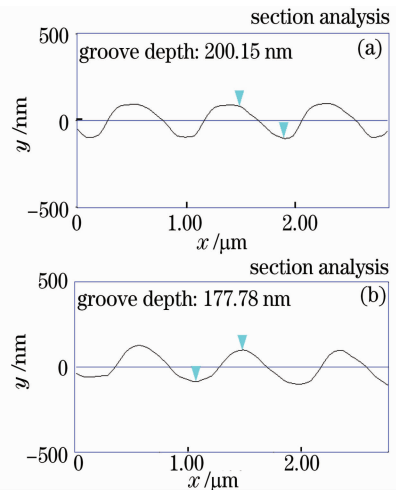


图 5 全息光栅的原子力显微镜照片

Fig. 5 Atomic-force microscope scan of the holographic gratings

3.3 显影监测曲线

显影时将一束监测光照射在显影中的光栅上以监测显影过程。图 6 为使用 KAPPA 软件计算的显影过程中反射负一级衍射效率随槽深和残胶厚度变化的二维分布图。计算中入射光波长 632.8 nm , 偏振角 45° , 以 $+20.9^\circ$ 自准直入射,入射角的符号定义与计算曝光监测曲线时相同。图 6(a) 为非对称梯形沟槽,占宽比 0.5 ,左右两底角分别为 80° 和 65° ;图 6(b) 为倾斜矩形沟槽,占宽比 0.5 ,向左倾斜 18.6° ;图 6(c) 为占宽比 0.5 的矩形沟槽。

显影模型推广到非对称曝光显影情形,建立了非对称曝光显影模型,通过理论计算与模拟得出以下结论:1) 对称曝光与非对称曝光的曝光和显影实时监测曲线的变化趋势相同,无法从监测曲线判断光栅槽形,但是,依然可以通过实时监测曲线判断曝光和显影终止点。2) 非线性效应特别显著时掩模沟槽接近倾斜的矩形;非线性效应比较显著时掩模沟槽一般为非对称梯形;非线性效应被抑制时掩模沟槽倾斜度不明显,得到正弦形轮廓,槽深有所减小。在实

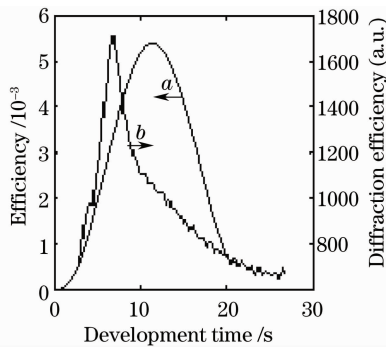


图 7 模拟显影曲线和实时监测曲线对照

Fig. 7 Comparison of the theoretically simulated development curve and the in-situ monitoring curve

验中,可以通过改变曝光量和显影液浓度来强化或抑制非线性效应。由于不同的离子束刻蚀条件需要的掩模槽形不同,因此,无论对掩模形状进行预测,还是制作过程中对槽形的控制而言,该模型都是一个有效的理论分析工具。

参 考 文 献

- 1 Meng Xiangfeng, Li Lifeng. Methods for increasing sidewall steepness of reactive-ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 189~193
孟祥峰, 李立峰. 提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 189~193
- 2 Zhu Hongchun, Bayanheshig. Analysis and simulation of diffraction characteristics of the ultraviolet ruled grating master and the second duplicate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1151~1155
朱洪春, 巴音贺希格. 紫外刻划光栅母版及二代版衍射特性的模拟与分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1151~1155
- 3 F. H. Dill. Optical lithography [J]. *IEEE. Trans. Electron Devices*, 1975, ED-**22**(7): 440~444
- 4 F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge *et al.*. Characterization of positive photoresist [J]. *IEEE. Trans. Electron Devices*, 1975, ED-**22**(7): 445~452

- 5 B. de A. Mello, I. F. da Costa, C. R. A. Lima *et al.*. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(4): 597~603
- 6 C. Zanke, A. Gombert, A. Erdmann *et al.*. Fine-tuned profile simulation of holographically exposed photoresist gratings [J]. *Opt. Comm.*, 1998, **154**(1): 109~118
- 7 I. Karafyllidis, P. I. Hagouel, A. Thanailakis *et al.*. An efficient photoresist development simulator based on cellular automata with experimental verification [J]. *IEEE. Trans. SM*, 2000, **13**(1): 61~75
- 8 L. Mashev, S. Tonchev. Formation of holographic diffraction gratings in photoresist [J]. *Appl. Phys. A*, 1981, **26**(3): 143~149
- 9 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 851~858
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅制作中的实时潜像自监测技术 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 851~858
- 10 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling of in-situ monitoring curves during development of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1146~1150
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1146~1150
- 11 N. K. Sheridan. Production of blazed holograms [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**(9): 316~318
- 12 M. C. Hutley. Blazed interference diffraction gratings for the ultra-violet [J]. *Opt. Acta.*, 1975, **22**(1): 1~13
- 13 M. Breidne, S. Johansson, L-E. Nilsson *et al.*. Blazed holographic gratings [J]. *Opt. Acta.*, 1979, **26**(11): 1427~1441
- 14 A. R. Bulygin. The production of reflection relief holograms with asymmetric shape of slits profile and the examination of their spectral characteristics [C]. *SPIE*, 1989, **1238**: 129~133
- 15 I. Aubrecht, M. Miler. Diffraction efficiency of holographic blazed diffraction gratings [J]. *Czechoslovak. J. Phys.*, 1991, **41**(12): 1231~1237
- 16 P. F. Romanenko, M. V. Sopinski, I. Z. Indutnyi. Blazed holographic diffraction grating fabrication using As_2Se_3 inorganic photoresist [C]. *SPIE*, 1998, **3573**: 457~460