

文章编号: 0253-2239(2005)02-246-5

# 利用傅里叶模方法分析厚层光刻胶内衍射光场\*

唐雄贵 郭永康 杜惊雷 刘世杰 高峰 高福华

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

**摘要:** 建立了描述厚层光刻胶内衍射光场形成过程的物理模型, 并利用傅里叶模方法模拟计算和分析了其内部衍射光场分布。该方法考虑了其界面反射、透射及光刻胶复折射率在空间上的缓慢变化对衍射光场的影响, 采用该方法模拟光刻胶内衍射光场具有数值计算结果准确、计算速度快的优点。对厚层光刻胶折射率在几种特殊分布情况下衍射光场分布的数值模拟表明, 衍射光场与其复折射率的空间分布有关。由于厚层光刻胶折射率在空间上呈缓慢变化的特点, 为降低其数值计算量和编程难度, 可以将厚层光刻胶近似为折射率随曝光时间变化的光栅。

**关键词:** 物理光学; 矢量衍射理论; 傅里叶模方法; 厚层光刻胶; 衍射光场; 光刻模拟

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

## Analysis of Diffractive Image Field in Thick Film Photo-Resist by Using Fourier Modal Method

Tang Xionggui Guo Yongkang Du Jinglei Liu Shijie Gao Feng Gao Fuhua

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract:** According to the lithographic characteristics of thick film photo-resist, a novel physical model is established. Then Fourier modal method, mostly applied to study the diffractive properties of gratings is adopted to analyze the diffractive image field in thick film photo-resist. The factors such as reflection and transmission at the interface, complex diffraction in the photo-resist, are taken into account. This method has higher computing precision and smaller computation cost. Numerical simulation results show that the distribution of diffractive image field is relevant to that of complex refractive index. As a result, it is reasonable to regard the thick film photo-resist as grating with variable refractive index during exposure process.

**Key words:** physical optics; vector diffraction theory; Fourier modal method; thick film photo-resist; diffractive image field; simulation of optical lithography

## 1 引言

随着微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)技术的迅速发展,厚胶光刻过程的模拟变得愈来愈重要,其中对厚层光刻胶内衍射光场的模拟计算和分析是一个十分重要的问题。目前的分析方法主要有两种:一种方法是利用标量衍射理论对光刻胶内部光场分布进行计算<sup>[1~3]</sup>;另一种则是基于电磁矢量理论的有限时域差分法、有限元法、边界元法等对光刻胶中光场分布进行严格求解<sup>[4,5]</sup>。上述方法用于模拟薄层亚微米光刻胶内部

衍射光场分布取得了很大成功,然而由于传统标量衍射分析的适用范围局限性及有限时域差分法等存在分析复杂、计算量大的缺点,将其用于厚胶光刻过程的模拟却遇到了很大的困难。本文根据厚胶光刻的特点,建立一个描述厚层光刻胶内衍射光场形成过程的物理模型,利用傅里叶模方法<sup>[6~10]</sup>来模拟计算和分析曝光过程中的厚层光刻胶内部的衍射光场分布。该方法考虑了其界面反射、透射及光刻胶复折射率在空间上的缓慢变化对衍射光场的影响,采用该方法模拟光刻胶内衍射光场具有数值计算结果

\* 国家自然科学基金(60276018)和中国科学院光电所微细加工技术国家重点实验室资助课题。

作者简介:唐雄贵(1974~),男,湖南邵阳人,四川大学博士研究生,主要从事衍射光学元件的设计与模拟研究工作。  
E-mail: txgily@sohu.com。

收稿日期:2004-01-07;收到修改稿日期:2004-06-23

准确、计算速度快的优点。该方法特点在于尽可能地保证了数值计算的准确性前提下,大大地降低理论分析复杂性和数值计算量<sup>[8]</sup>。

## 2 理论分析

在厚层光刻胶曝光过程中,由于入射光波经掩模后在光刻胶内产生非均匀光强分布,光刻胶内的光敏化合物(Photo Active Compound, PAC)吸收光能量并发生光化学反应,导致光敏化合物浓度在空间上的分布发生相应的非均匀变化;而光刻胶的介电常量与其光敏化合物浓度有关,这将导致其复折射率在空间上呈非均匀分布,这种变化又会对光刻胶内部衍射光场分布产生影响,这样循环反复,直到曝光结束或光敏化合物反应完全。因此,厚层光刻胶内衍射光场分布与光敏化合物浓度分布是一个连续的、动态的、非线性的相互影响过程,且其内部复折射率在空间上呈缓慢变化的非均匀分布,从而可将这曝光过程中的光刻胶视为一个随曝光时间发生变化的折射率调制型光栅,以便于采用傅里叶模方法来分析光波在光栅内的衍射光场分布。

傅里叶模方法的基本思路是首先对求解区域进

行水平分层,然后对每一分层求解麦克斯韦方程组,将每一分层的电磁场和介电常量按傅里叶模展开,由边界条件求出本征模的振幅系数,最后得到整个空间的电磁场分布。如图 1(a)所示,一束波长为  $\lambda$  的光波透过周期为  $T$  掩模后,入射到厚度为  $h$  的厚层光刻胶上,基底厚度为  $h_{\text{sub}}$ ,折射率为  $n_{\text{sub}}$ 。假定曝光前整个光刻胶是均匀介质,在曝光过程中光刻胶内部的复折射率因吸收光能量在空间上呈缓慢变化的非均匀分布,将光刻胶在  $z$  方向上分为  $N$  层,第  $i$  层和第  $i+1$  层的分界面位置为  $z_i$ ,第  $i$  层内复折射率分布在该曝光时间间隔内为  $n_i(x)$ ,其大小由其曝光量决定,如图 1(b)所示。另外,因其内部复折射率随曝光时间发生变化,又将整个曝光时间离散成一系列的间隔  $\Delta t$ ,并认为在一个  $\Delta t$  内光刻胶内部的复折射率在空间上的分布不发生变化,其介电常量的大小由前面所有时间段内所吸收的曝光量决定。为简单起见,这里仅分析一个时间间隔内的衍射光场分布,其他不同时间间隔  $\Delta t$  内的衍射光场可依次进行反复求解。本文以接近式曝光过程为例进行分析,其它曝光方式可进行类似分析求解。

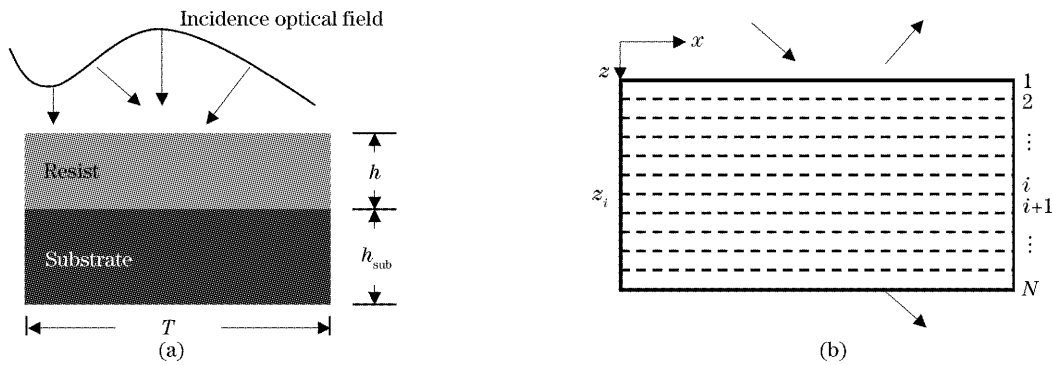


图 1 (a) 曝光原理图, (b) 厚层光刻胶横截面的多分层示意图

Fig. 1 (a) Exposure sketch, (b) virtual multilayers of thick resist cross-section

在图 1 中,假定入射面在  $xz$  平面内,透过掩模板后入射到光刻胶表面的衍射光场可表示为 TE 波与 TM 波的叠加,其 TE 波与 TM 波分别用  $E_y^i(x)$  和  $H_y^i(x)$  表示。由傅里叶光学可知,它们可分别展开为不同权重因子、不同方向的平面波的线性叠加<sup>[11]</sup>:

$$E_y^i(x) = \sum E_n \exp(jk_0 \alpha_n x) \quad (\text{TE 波}), \quad (1)$$

$$H_y^i(x) = \sum H_n \exp(jk_0 \alpha_n x) \quad (\text{TM 波}), \quad (2)$$

其中  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\alpha_n$  表示  $x$  方向的波矢分量,  $E_n$  或  $H_n$  表示复振幅系数,可通过求解  $E_y^i(x)$  或  $H_y^i(x)$  的快

速傅里叶变换容易得到。在光栅参量和入射条件均已知的情况下,利用傅里叶模方法求解每一平面波在光刻胶内的传播过程,从而可得到所有平面波在光刻胶内的衍射光场分布。

现在,讨论某一入射平面波在光刻胶内衍射光场分布。在厚层光刻胶中,每一分层内电磁场分量必须满足麦克斯韦方程组。在求解过程中,将每一层中的电磁场分量和介电常量  $\epsilon(x) = n_i(x)^2$  进行傅里叶模级数展开,另外,若分层中电磁场分量和介电常量  $\epsilon(x)$  为有限个间断点非连续函数时,利用“逆规则”傅里叶因式分解法以提高其收敛速度<sup>[12]</sup>。由于

电磁场 TE 波和 TM 波不互相耦合,可分别单独求解其电磁基本模式场。将展开后的傅里叶级数代入麦克斯韦方程组并进行整理,得到矩阵方程组<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} \text{TE 波} \\ \{ [\epsilon] - \alpha^2 \} E_y = \gamma^2 E_y, \\ H_x = \gamma E_y, \quad H_z = \alpha E_y \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \text{TM 波} \\ \{ I - \alpha[\epsilon^{-1}]\alpha \} H_y = \gamma^2 [\epsilon^{-1}] H_y, \\ E_x = \gamma [\epsilon^{-1}] H_y, \quad E_z = [\epsilon^{-1}] \alpha H_y, \end{cases} \quad (4)$$

其中

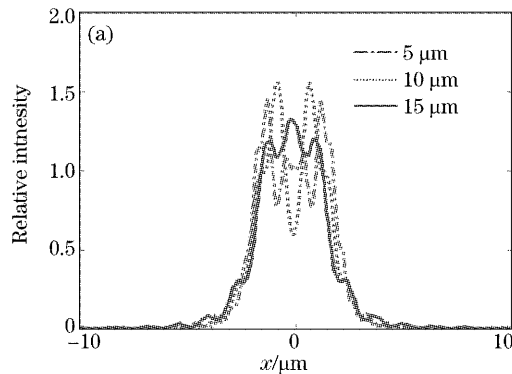
$$[\epsilon]_n = T^{-1} \int \epsilon(x) \exp[-i2\pi T^{-1}(r-s)x] dx,$$

$r, s$  为整数<sup>[8]</sup>;  $\alpha$  为  $\sin \theta + m\lambda/T$  所构成的对角矩阵,  $\gamma$  为所求的本征值构成的对角矩阵,  $\theta$  为平面波の入射角。通过求解该矩阵方程,可得到其每一分层的本征值  $\gamma_i^e, \gamma_i^h$  和本征矩阵  $e_i^e, h_i^e$ ; 该分层中的电磁场等于本征模式场的线性叠加,其振幅系数由边界条件匹配确定。为求解振幅系数,采用反射透射系数阵算法(RTCM)以提高计算速度和稳定性,该方法的详细推导与分析请参见文献[8]。同理,(1)式、(2)式所表示的不同方向的入射平面波在光刻胶内每一分层中传播过程可依次求解。

整个入射光场在第  $i$  层中产生的电磁场分布等于所有衍射平面波的叠加,即

$$E^i(x) = \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M E_{ym}^n \quad (\text{TE 波}), \quad (5)$$

$$H^i(x) = \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M H_{ym}^n \quad (\text{TM 波}), \quad (6)$$



根据光强的定义,在第  $i$  层中产生的衍射光强分布为

$$I^i(x) = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} n^i(x) |E^i(x)|^2 / 2 \quad (\text{TE 波}), \quad (7)$$

$$I^i(x) = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} n^i(x)^{-1} |H^i(x)|^2 / 2 \quad (\text{TM 波}), \quad (8)$$

其中  $n^i(x)$  表示第  $i$  层中的折射率分布函数。由(7)式、(8)式就可以求解光刻胶内部的衍射光场分布,然后求出在该时间间隔  $\Delta t$  内曝光量,接着可求出其对应的光敏化合物浓度的改变量,从而可得到下一时间间隔内各分层内的复折射率  $n^i(x)$ ,这样循环反复,直到曝光结束,从而可以得到光刻胶内部的曝光量和光敏化合物浓度在空间上的最终分布。

### 3 数值计算模拟

根据前面的理论分析,现分别利用傅里叶模方法和基尔霍夫衍射积分法对入射光场透过二元振幅型掩模板(以下均相同)在自由空间的衍射光场分布进行了模拟。设入射波长  $\lambda=365$  nm 的 TE 波垂直入射到周期  $T=20$   $\mu\text{m}$ 、缝宽  $a=5$   $\mu\text{m}$  掩模板上,衍射距离分别为  $d=5$   $\mu\text{m}$ ,  $10$   $\mu\text{m}$ ,  $15$   $\mu\text{m}$ ,模拟计算结果如图 2 所示,图中横坐标表示平行于掩模表面的水平位置坐标(以下同),纵坐标表示相对光强大小(图中点划线、虚线、实线分别表示衍射距离为  $5$   $\mu\text{m}$ 、 $10$   $\mu\text{m}$ 、 $15$   $\mu\text{m}$ )。由图 2 可以看出,利用傅里叶模方法和基尔霍夫衍射积分公式所计算的光场分布基本一致,这间接证明了傅里叶模方法的有效性。另外,两图衍射光场的微小差别是由于采用不同物理模型所致。

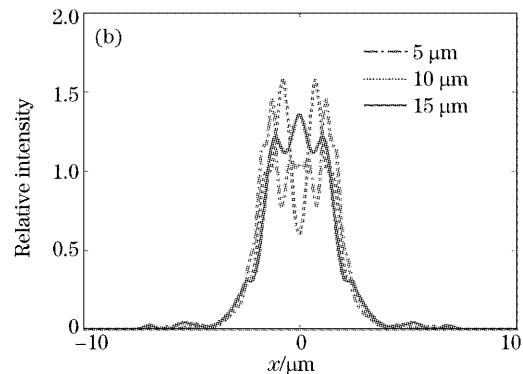


图 2 不同位置的衍射光强分布。(a) 采用傅里叶模方法,(b) 采用基尔霍夫衍射积分公式

Fig. 2 Intensity distribution at different location by (a) Using Fourier model method, (b) using Kirehloff's diffraction formula

为简单和方便起见,下面仅讨论厚层光刻胶折射率在几种特殊分布情况下的衍射光场分布:1)光刻胶折射率为均匀分布。设入射波长  $\lambda=365$  nm 的 TE 波垂直入射到周期  $T=50$   $\mu\text{m}$ 、缝宽  $a=10$   $\mu\text{m}$  掩模板

上,光刻胶表面距掩模板距离  $d=10$   $\mu\text{m}$ ,光刻胶(AZ4562)厚度为  $20$   $\mu\text{m}$ ,折射率为  $1.7048$ ,基底折射率为  $1.4560$ ,分层数为  $20$  层。计算结果如图 3 所示,图 3(a)、图 3(b)分别表示光刻胶消光系数为  $0$

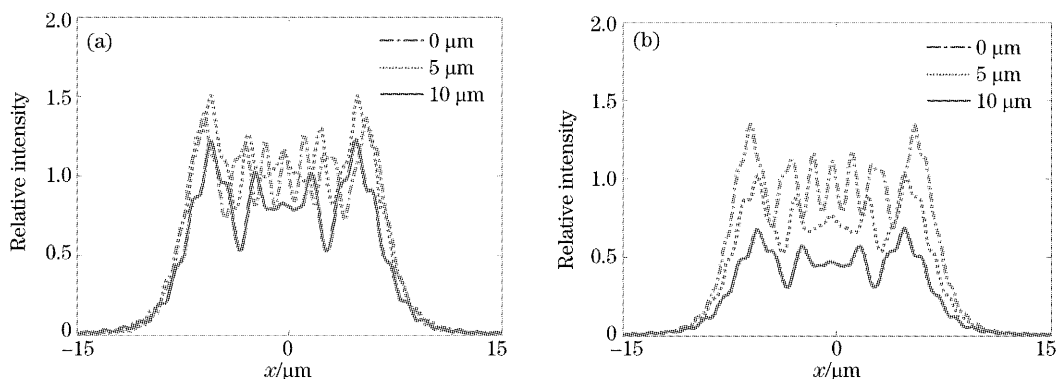


图3 光刻胶内部不同层的衍射光强分布。(a) 消光系数为0, (b) 消光系数为0.00185

Fig. 3 Intensity distribution at different location in thick film photoresist while extinction coefficient is (a) 0, and (b) 0.00185, respectively

和0.00185时其离光刻胶表面不同距离处的水平方向的相对衍射光强分布(图中点划线、虚线、实线表示离光刻胶表面距离分别为 $0\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ ,以下同)。由图可看出,光刻胶内部的吸收对衍射光场的影响很大,故在计算模拟时不能忽略它所产生的影响;2)光刻胶折射率在每一分层中为均匀介质,且在深度方向( $z$ 方向)上线性递减,从其表面到底部折射率由1.7548线性减少到1.7048,其他参量同图3(b),计算结果如图4所示;3)光刻胶折射率在深度方向( $z$ 方向)上线性递减,在每一分层的 $x$ 方向其中部折射率比两边缘大2%,从第一层到最后一层的中部高折射率所占宽度由 $0.32T$ 线性减少到零,其他参量同图4。计算结果如图5所示。

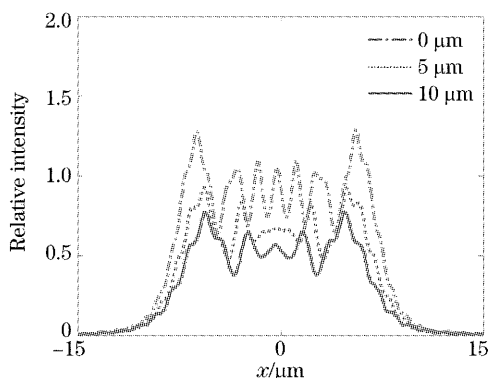


图4 光刻胶深度方向的折射率变化时不同位置的衍射光强分布

Fig. 4 Intensity distribution at different location in thick film while assuming refraction index as a function of depth into resist film

图4和图5分别表示其离光刻胶表面不同距离处水平方向的相对衍射光强分布。由图3(b)、图4、图5可以看出,离光刻胶表面为 $0\ \mu\text{m}$ 的衍射光强分布基本相同(图中点划线所示);而在离光刻胶表面

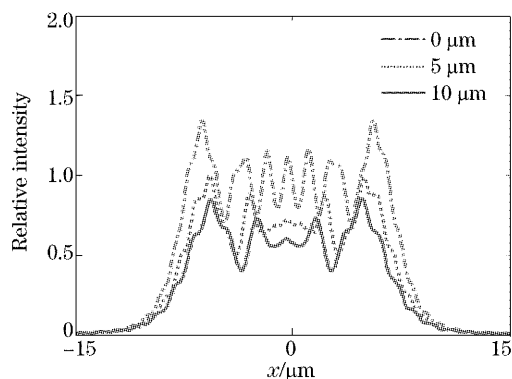


图5 光刻胶深度和水平方向的折射率变化时不同位置的衍射光强分布

Fig. 5 Intensity distribution at different location in thick film while simultaneously assuming refraction index as a function of depth into resist film and horizontal coordinate

$5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 位置处,图4和图5的衍射光强分布差别不大,但与图3(b)的差别较大(图中虚线、实线所示),这是由于光刻胶内不同位置处衍射光场分布要受到其界面反射、透射及光刻胶不同空间分布的复折射率对衍射光场不同程度调制的影响所致。一般来说,在对光刻胶内衍射光场进行模拟计算时,光刻胶复折射率空间分布越接近其实际情况,则其内部衍射光场的模拟结果越准确,但是考虑到其数值计算量、编程的难易程度以及其折射率在空间上呈缓慢变化的特点,可以将厚层光刻胶近似为折射率随曝光时间变化的光栅。

## 4 结 论

在厚胶光刻过程中,光刻胶内部因衍射效应所引起光场在空间上呈非均匀分布,以及厚层光刻胶内衍射光场分布与光敏化合物浓度分布是一个连续

的、动态的、非线性的相互影响过程,使得厚胶光刻分析与模拟变得较为复杂。本文针对厚胶光刻的这种特点,建立了描述厚层光刻胶内衍射光场形成过程的物理模型,利用傅里叶模方法来分析曝光过程中厚层光刻胶内部衍射光场的分布。该方法考虑了其界面反射、透射及光刻胶复折射率在空间上的缓慢变化对衍射光场的影响,采用该方法模拟光刻胶内衍射光场具有数值计算结果准确、计算速度快的优点。利用该方法计算了在自由空间的衍射光场分布,与基尔霍夫衍射积分公式所得结果一致,这间接证明了该方法的有效性;对厚层光刻胶内部折射率在几种特殊分布情况下的衍射光场分布的数值模拟表明,光刻胶内衍射光场分布要受到其界面反射、透射及光刻胶复折射率调制的影响。为降低其数值计算量和编程难度,可将厚层光刻胶近似为折射率随曝光时间变化的光栅。对于光刻胶折射率具有周期性分布时,利用傅里叶方法分析其衍射光场是十分方便的,而当掩模为非周期性结构时,光刻胶折射率分布也为非周期性,这时须对非周期性结构进行一定的技术处理<sup>[13]</sup>,从而对其衍射光场进行类似求解。

### 参 考 文 献

- 1 F. H. Dill. Optical lithography [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1975, **ED-22**(7): 440~444
- 2 W. W. Flack, G. Newman, D. Bernard *et al.*. Advanced simulation techniques for thick photo-resist lithography[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3049**: 789~804
- 3 Xiao Xiao, Du Jinglei, Guo Yongkang *et al.*. Study on new method of reducing standing wave effects in lithography [J]. *Microfabrication Technology*, 2002, (4): 36~44 (in Chinese)
- 肖 啸, 杜惊雷, 郭永康 等. 减小光刻中驻波效应的新方法研究[J]. *微细加工技术*, 2002, (4): 36~44
- 4 R. Gordon, C. A. Mack. Lithography simulation employing rigorous solution to Maxwell's equations[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3334**: 176~196
- 5 Thomas Vincent Pistor. Electromagnetic simulation and modeling with application in lithography [D] University of California, Berkeley, 2001
- 6 Lifeng Li. Reformulation of Fourier modal method for surface-relief gratings made with anisotropic materials[J]. *J. Mod. Opt.*, 1998, **45**(7): 1313~1334
- 7 Lifeng Li. Multilayer modal method for diffraction gratings of arbitrary profile, depth and permittivity[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1993, **10**(12): 2581~2591
- 8 Tang Xionggui, Fu Kexiang, Wang Zhiheng *et al.*. Analysis of rigorous modal theory for arbitrary dielectric gratings made with anisotropic materials [J]. *Acta Optic Sinica*, 2002, **22**(7): 774~779 (in Chinese)  
唐雄贵, 傅克祥, 王植恒 等. 任意各向异性介质光栅的严格模式理论分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 774~779 (in Chinese)
- 9 Zeng Yangsu, Tang Xionggui, Fu Kexiang *et al.*. Vector diffractive analysis for two-dimensional relief gratings made with anisotropic medium[J]. *Acta Optic Sinica*, 2003, **23**(1): 95~100 (in Chinese)  
曾阳素, 唐雄贵, 傅克祥 等. 二维各向异性浮雕型光栅的矢量衍射分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 95~100
- 10 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Jing *et al.*. Fast processing of Fourier modal method for perpendicularly crossed surface relief binary periodic grating [J]. *Acta Optic Sinica*, 2001, **21**(2): 236~241 (in Chinese)  
傅克祥, 王植恒, 张 靖 等. 对正交浮雕光栅傅里叶模方法的快速实现[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 236~241
- 11 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (7th Edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 703~716
- 12 Lifeng Li. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1996, **13**(9): 1870~1876
- 13 B. Guizal, D. Barchiesi, D. Felbacq. Electromagnetic beam diffraction by a finite lamellar structure: an aperiodic coupled-wave method. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2003, **20**(12): 2274~2280