

单模共振干涉光刻曝光显影模拟研究

杨 正 张志友* 李淑红 高福华 杜惊雷

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 针对纳米光栅的加工需求, 提出一种以柱形光栅耦合结构为基础的单模共振干涉光刻方法。该方法以柱形光栅耦合结构为掩模, 结合光刻胶和基底层形成介质波导, 入射光经过光栅衍射后以特定衍射级次(± 1 级)进入光刻胶形成干涉条纹, 光刻胶作为波导层, 可将入射光光强增强 25~50 倍, 从而大大提高了光能利用率。采用 441 nm 的入射光, 通过模拟计算, 可以得到周期小于 $\lambda/3$ 、凹槽宽度为 42~88 nm($\lambda/10 \sim \lambda/5$) 的纳米结构。

关键词 光栅; 介质波导; 单模共振干涉; 光刻

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0505001

Exposure Developing Simulation Study of Single-Mode-Resonance Interference Lithography

Yang Zheng Zhang Zhiyou Li Shuhong Gao Fuhua Du Jinglei

(School of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract A lithography method based on the single-mode-resonance (SMR) interference in the resist by employing the cylinder grating (CG) coupled structure is proposed. The CG coupled structure is used as a mask, and then the dielectric waveguide can be formed by combining CG with resist layer and substrate. Interference pattern will be generated in the resist using the specific diffraction order (± 1) from the CG diffraction. The resist layer plays the role of waveguide which can enhance the light field intensity 25~50 times stronger and greatly improve the light energy utilization ratio. Through simulation, the nanostructure with period smaller than $\lambda/3$ and groove width ranging of 42~88 nm ($\lambda/10 \sim \lambda/5$) can be obtained with incident light wavelength of 441 nm.

Key words gratings; dielectric waveguide; single-mode-resonance interference; lithography

OCIS codes 050.6624; 050.1950; 220.3740; 310.2785

1 引 言

纳米光栅有着很多潜在的应用, 如远场超分辨率成像^[1]、偏振分束器^[2]和光学开关等。目前高精尖的纳米加工技术如聚焦离子束光刻^[3]、电子束直写技术^[4]等, 可以精确地加工一维或者二维纳米光栅, 但它们都有加工效率低、成本高的缺点。倏逝波干涉光刻 (EIL)^[5~8]和表面等离子体干涉光刻 (SPPIIL)^[9~18]均有较高的光刻分辨率, 可用于纳米光栅加工, 但是前者的曝光光强很弱, 传播长度很短, 对比度很低, 曝光工艺控制较为困难; 后者通过

激发表面等离子体激光 (SPP) 来增强倏逝波强度, 从而改善了光刻质量, 但干涉条纹强度仍然会随着传播距离的增加而快速减小, 导致光刻图形的均匀性较差。为此, 本文提出了一种基于柱形光栅 (CG) 耦合结构的单模共振干涉光刻方法 (SMRIL), 通过优化光栅和光刻胶 (PR) 的结构, 使绝大部分入射光能量耦合到光刻胶中形成单模共振干涉, 在光刻胶内获得高强度和高对比度的纳米干涉条纹。基于时域有限差分法 (FDTD) 和曝光、显影模型详细讨论了柱形光栅耦合结构的 SMRIL, 获得了周期小于

收稿日期: 2012-12-20; **收到修改稿日期**: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金 (61078047) 资助课题。

作者简介: 杨 正 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事表面等离子体技术方面的研究。E-mail: cqyangking@163.com

导师简介: 杜惊雷 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学、微光学、微电子光学和光电子器件等方面的研究。

E-mail: dujl@scu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: zhi-youzhang@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

$\lambda/3$ 、凹槽宽度为 42~88 nm 的光刻图形。研究表明,SMRIL 可实现高深度的纳米光栅加工,在纳米光子器件特别是纳米光栅制作方面可发挥很好的作用。

2 单模共振干涉的结构设计和理论分析

单模共振干涉是指几乎所有的入射光能量都被 CG 耦合到特定的衍射级次进入光刻胶波导层,激发单模并相向传播,形成干涉。图 1(a)是单模共振

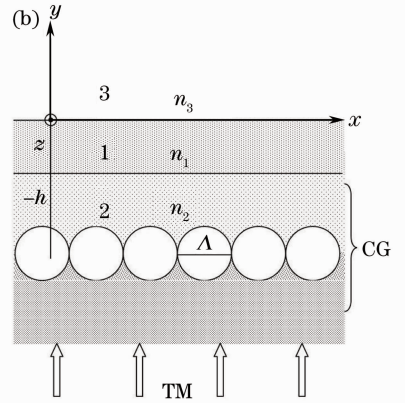
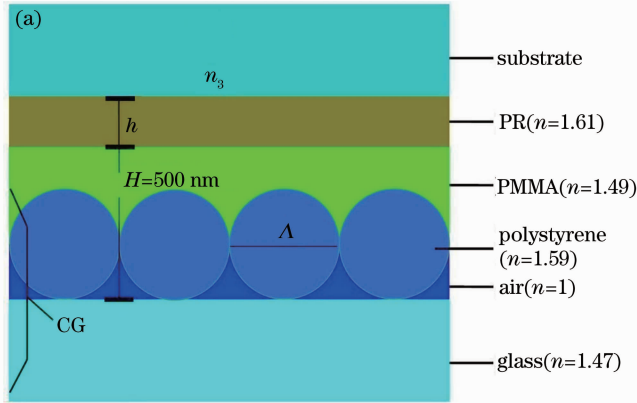


图 1 (a) SMRIL 结构示意图和(b)模型理论分析结构图

Fig. 1 (a) Schematic of SMRIL and (b) illustration of theoretical analysis

图 1(b)是模型理论分析结构图。在图 1(b)中,与图 1(a)相对应,区域 1 是光刻胶,厚度为 h ;区域 2 是耦合结构,周期为 Λ ;区域 3 是基底,折射率为 n_3 ;入射光为横模(TM)光,三个区域内光波的传播常数分别为 k_1, k_2, k_3 , x 轴方向光波的传播常数均相等且为 β , y 轴方向光波的传播常数分别为 $T, i\tau_2, i\tau_3$ 。入射光经过耦合结构衍射后进入波导层,由于耦合结构的周期为亚波长量级,当满足单模共振条件时,能够进入光刻胶并形成干涉条纹的只有 ± 1 级两束衍射光。

为了实现单模共振干涉,耦合结构和波导层内光波的横向传播常数需满足波矢匹配条件,因此需要对耦合结构和波导层内的色散关系作进一步讨论,之后确定入射波长和各结构参数之间的关系,以此进行 SMRIL 的结构设计。

耦合结构的色散方程(考虑 $+1$ 级衍射的情况):

$$k_0 \sin \varphi + \frac{2\pi}{\Lambda} = k_1 \sin \theta = k_0 n_1 \sin \theta = \beta, \quad (1)$$

式中 k_0 为自由空间的传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, Λ 为耦合结构周期, φ, θ 为 k_0, k_1 与 y 轴的夹角。

对于垂直入射的 TM 光, $\varphi=0$, (1)式简化为

干涉光刻结构的示意图,由底部、中间部分和顶部三个部分组成。底部为 CG 耦合结构,由底层基底、柱形光栅和匹配层组成,所用材料分别为玻璃、聚苯乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率分别为 1.47、1.59 和 1.49;中间部分是光刻胶波导层,其折射率为 1.61,厚度为 h ;顶部是基底,其折射率为 n_3 。该结构中 PMMA 不仅提供匹配折射率,还可以保护柱形光栅耦合结构,以便作为掩模时重复使用。

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = k_1 \sin \theta = k_0 n_1 \sin \theta = \beta. \quad (2)$$

经过耦合结构的衍射光进入光刻胶波导层内,用介质波导的相关理论进行分析,确定波导内单模传播时的入射波长。

图 1(b)内,区域 1、2、3 的各传播常数关系为

$$\begin{cases} \beta^2 + T^2 = k_1^2 = k_0^2 n_1^2 \\ \beta^2 - \tau_2^2 = k_2^2 = k_0^2 n_2^2 \\ \beta^2 - \tau_3^2 = k_3^2 = k_0^2 n_3^2 \end{cases}, \quad (3)$$

可以得到

$$(Th)^2 + (\tau_2 h)^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2), \quad (4)$$

$$(Th)^2 + (\tau_3 h)^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_3^2). \quad (5)$$

对于 TM 光,非对称平面介质波导 TM 模的色散方程为

$$\tan(Th - m\pi) = \frac{n_1^2 T (n_3^2 \tau_2 + n_2^2 \tau_3)}{n_2^2 n_3^2 T^2 - n_1^2 \tau_2 \tau_3}, \quad (6)$$

式中 m 为偶数或者 0,代表偶模; m 为奇数代表奇模。

通过(1)~(4)式即可得到通过耦合结构进入光刻胶波导层内形成单模共振干涉时对应的入射波长,在这里将该入射波长定义为共振波长。

3 数值计算和分析

在 SMRIL 装置里,CG 耦合结构的材料参数都是已知的,所以在数值分析时只考虑柱形光栅周期 Δ 、基底折射率 n_3 和光刻胶厚度 h 这三个参数对共振波长的影响,进一步了解共振波长随各参数的变化特性,并按照需求设计出适合于不同波长的 SMRIL 结构。

需要分析的三个参数(光栅周期 Δ 、光刻胶厚度 h

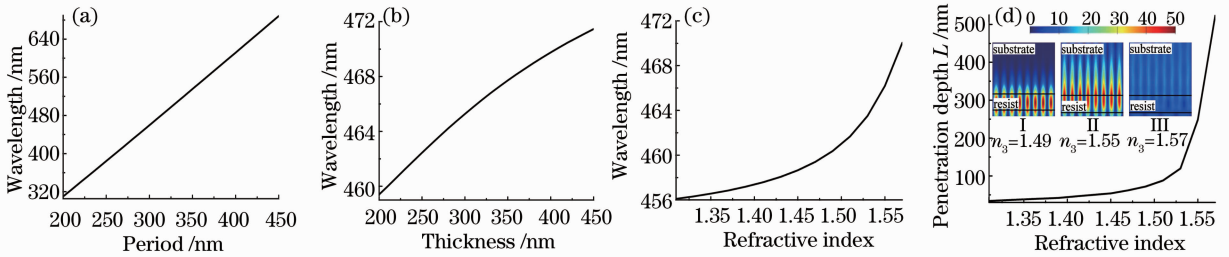


图 2 (a)共振波长-周期曲线; (b)共振波长-光刻胶厚度曲线; (c)共振波长-基底折射率曲线; (d)穿透深度-基底折射率曲线

Fig. 2 (a) Resonant wavelength versus period curve; (b) resonant wavelength versus resist layer thickness;

(c) resonant wavelength versus substrate refractive index; (d) penetration depth versus substrate refractive index

图 2(a)是共振波长随光栅周期 Δ 的变化曲线。从曲线可以看出共振波长随着耦合结构周期 Δ 的增大几乎呈单调递增线性变化,当 Δ 在 200~450 nm 间变化时,共振波长在 300~700 nm 之间连续变化,该波段涵盖了常用光刻所用的绝大部分波长。因此通过调节光栅周期,可以在 300~700 nm 波长范围内实现共振波长的粗调。图 2(b)中光刻胶厚度 h 为变量,在 200~450 nm 间变化,对应的共振波长变化范围是 459~472 nm,这一范围比图 2(a)中的结果小得多。因此调节光刻胶厚度可以实现共振波长的微调。图 2(c)是共振波长随基底折射率 n_3 的变化曲线。此时的共振波长变化范围和图 2(b)的结果类似。当 n_3 在 1.31~1.52 变化时,波长变化较为平缓,1.52 以后波长变化加剧,超过 1.57 之后共振干涉条纹几乎消失不见。

用从光刻胶波导层透射到基底内光的穿透深度来表征波导对光的局域能力,定义穿透深度为透射光强从最大值降低至其一半时的传播距离,并用 L 表示。如图 2(d)所示,当 $n_3 < 1.52$ 时,穿透深度 $L < 100$ nm,说明此时大部分能量局域在波导层内[如图 2(d) I 所示];当 $n_3 > 1.52$ 后, L 急剧变大,此时大部分能量泄露出波导层[如图 2(d) II 所示]; $n_3 > 1.57$ 后,单模共振干涉条纹逐渐消失[如图 2(d) III 所示]。因此,在 1.31~1.52 内调节基底折射率 n_3 ,也可以实现共振波长的微调。

综上所述,对于特定工作波长的 SMRIL,光栅

和基底折射率 n_3)的初始值根据需要分别设为 300 nm、200 nm 和 1.47,对应的共振波长为 459.4 nm。光栅周期 Δ 和光刻胶厚度 h 的变化范围为 200~450 nm, Δ 和 h 的步长设为 10 nm; n_3 的变化范围是 1.31~1.57,步长为 0.2。上述数值计算的结果如图 2 所示。图 2(d)中 I、II、III 分别是 n_3 为 1.49、1.55、1.57 时的电场强度分布。

周期 Δ 、光刻胶厚度 h 和基底折射率 n_3 的设计非常重要。通过优化设计 Δ 、 h 和 n_3 ,可以得到适用于可调波长范围内(300~700 nm)任何波长的 SMRIL 结构。

4 曝光显影的模拟和分析

根据前面分析的结果,以入射波长 441 nm 为例,分别设 $\Delta = 285$ nm, $h = 237$ nm, $n_3 = 1.51$ 。对该条件下的 SMRIL 进行具体分析,并对该波长下的曝光和显影过程进行了详细讨论。

由图 3 可见,绝大部分的光能被耦合进入了光

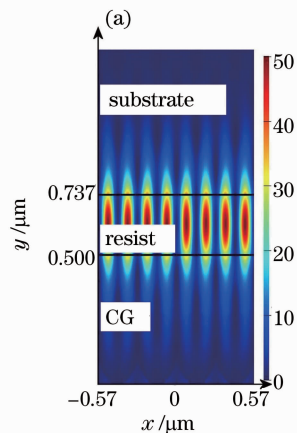


图 3 441 nm 波长 TM 光入射时二维模拟下的电场强度分布

Fig. 3 Electric field distribution of SMRIL with 441nm TM light illuminating

刻胶内,并且形成了分布均匀的干涉条纹,条纹周期142 nm(小于 $\lambda/3$)。

图4中的蓝色曲线是光刻胶内归一化光强随传播距离的变化曲线,该光强是入射光强的25~50倍。当传播距离为0~120 nm时,归一化光强从25增加到50,距离超过120 nm后,光强从50逐渐减小,一直到光刻胶顶部(距离为237 nm),光强减小到30。由此可知,干涉光强在光刻胶中间位置强度最强,往两边逐渐变弱。图4中的红色曲线是光刻胶内干涉条纹对比度随传播距离的变化曲线,条纹对比度为 $(|E|_{\max}^2 - |E|_{\min}^2) / (|E|_{\max}^2 + |E|_{\min}^2)$,在0.9~1.0之间变化。

图5是光刻胶内传播距离为10 nm(黑线)、

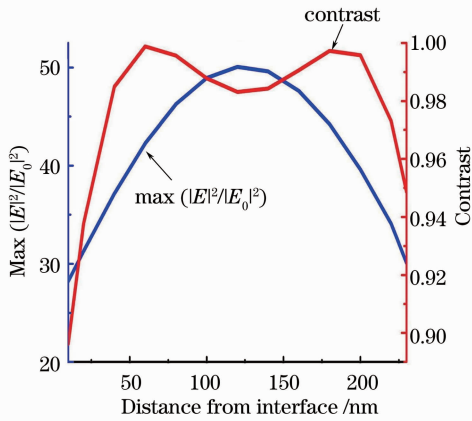


图4 光刻胶内干涉条纹强度最大值和条纹对比度随传播距离的变化曲线

Fig. 4 Relationship between normalized intensity at the interference maxima, contrast of patterns and distances from interface of CG and resist

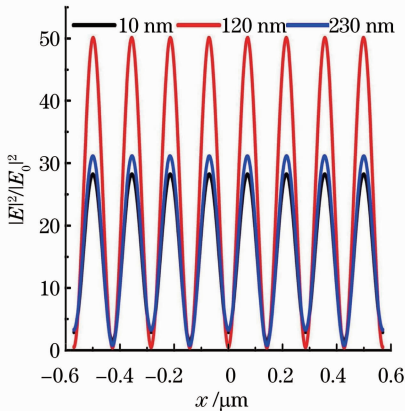


图5 对应的光刻胶内不同距离处的电场强度分布
Fig. 5 Curves of normalized intensity in x direction of different distances from interface

120 nm(红线)和230 nm(蓝线)时 x 轴方向归一化电场强度分布。传播距离为120 nm时,电场强度和对比度最大,距离为10 nm和230 nm时对应的强度和对比度相对较小,但是强度和对比度的取值分别在25~50和0.9~1.0之间。干涉条纹的半峰全宽为70 nm(小于 $\lambda/6$)时,可以较好地实现结构凹槽宽度约为70 nm的光刻。

对三维结构模型进行计算,结构参数设定和二维模型一样,模拟结果如图6~8所示。图6是 $x-y$ 平面内的电场强度分布,三维模型和二维模型的计算结果一样。图7是光刻胶内距离为100 nm时的 $x-z$ 平面电场强度分布。把耦合结构用作掩模,可以用套刻工艺实现二维图形的加工,图8是 90° 套刻下的电场强度分布,得到了直径约为70 nm的点阵列分布。

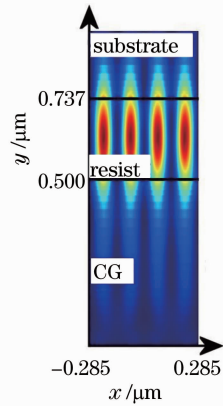


图6 $x-y$ 平面内的电场强度分布

Fig. 6 Electric field intensity distribution in the $x-y$ plane

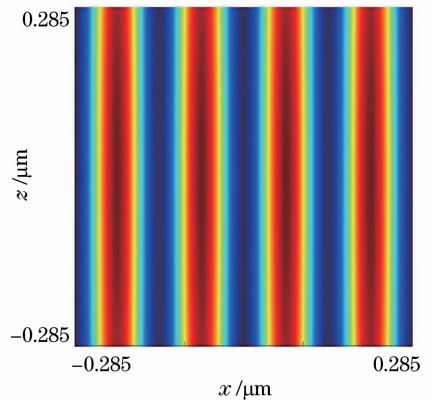


图7 传播距离为100 nm时的 $x-z$ 平面电场强度分布
Fig. 7 Electric field intensity distribution in the $x-z$ plane with distance of 100 nm

为了验证该光刻方法是否可以获得高质量的光刻胶图形,利用二维模型下光刻胶内的单模共振干涉场分布,进一步分析显影的过程。采用Dill曝

光模型和 Mack 显影模型^[19]进行计算,并且假定曝光过程中光刻胶内光强是基本恒定的,通过计算,得到了不同显影时间下的光刻胶轮廓分布。

图 9 是不同显影时间下的光刻胶轮廓图(一个图形周期对应一个显影时间)。从中可以明显看到显影后的光刻胶图形拥有良好的陡直度。当显影时间为 10 s 时,凹槽宽度为 42 nm,深宽比约为 1:1;当显影时间为 28 s 时,光刻胶完全显影,凹槽宽度为 88 nm,深宽比约为 2.5:1.0。从图 10 中的曲线可以看出,在 10~28 s 内调节显影时间,可以得到凹槽宽度在 42~88 nm 间变化、深度在 38~221 nm 间变化的纳米结构。

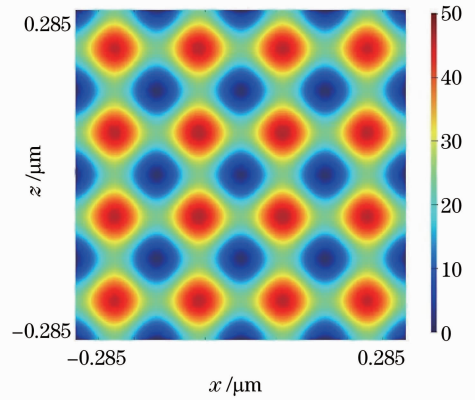


图 8 90°套刻时的 $x-z$ 平面电场强度分布
Fig. 8 Electric field distribution in the $x-z$ plane for a double-exposure of 90°

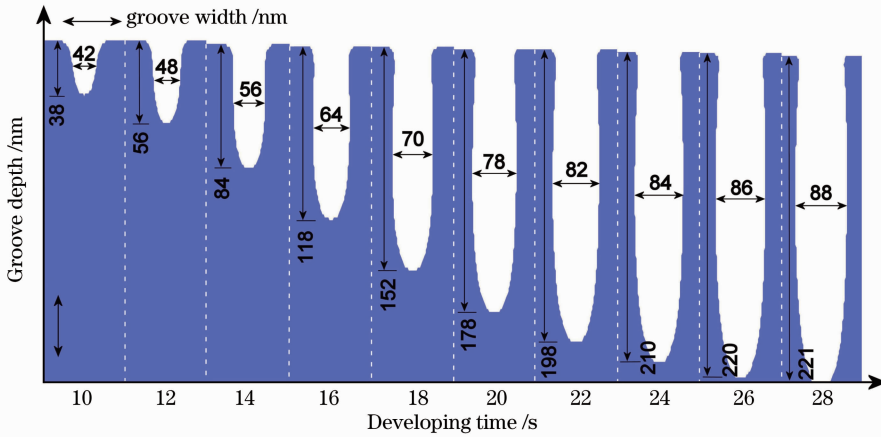


图 9 不同显影时间下的光刻胶轮廓分布
Fig. 9 Profile of resist with different developing time

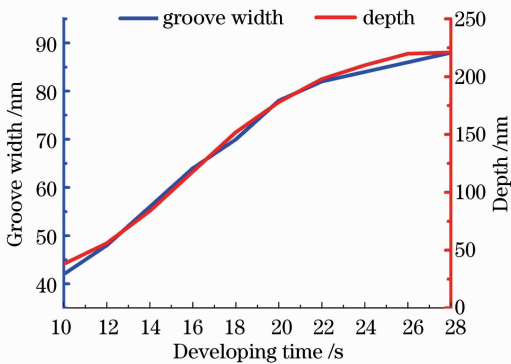


图 10 结构凹槽宽度和显影深度随显影时间的变化曲线
Fig. 10 Groove width and developing depth versus developing time

综上所述,通过使用 SMRIL 方法,可以在整个光刻胶波导层内获得高强度和高对比度的纳米干涉条纹,干涉条纹周期小于 $\lambda/3$,干涉光强在光刻胶内随传播距离增加没有明显衰减,其强度至少是入射光强度的 25 倍,与 EIL 和 SPPIL 相比,SMRIL 大

大提高了曝光深度;通过显影计算,得到了周期小于 $\lambda/3$ 、凹槽宽度为 42~88 nm($\lambda/10 \sim \lambda/5$)的纳米结构。

5 结 论

提出基于 CG 耦合结构的单模共振干涉光刻方法,克服了传统干涉光刻分辨率低和倏逝波干涉光刻、表面等离子体干涉光刻曝光深度浅的问题。模拟结果表明,SMRIL 的干涉场均匀分布于整个光刻胶内,干涉条纹周期小于 $\lambda/3$,干涉光强至少是入射光强度的 25 倍,得到的光刻图形凹槽宽度为 42~88 nm($\lambda/10 \sim \lambda/5$),该研究结果为实验制作纳米光栅工作的开展提供了指导。

参 考 文 献

1 Z. W. Liu, S. Durant, H. Lee *et al.*. Experimental studies of far-field superlens for sub-diffractive optical imaging [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6947~6954

- 2 L. Pajewski, R. Borghi, G. Schettini *et al.*. Design of binary grating with subwavelength features that acts as a polarizing beam splitter [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(32): 5898~5905
- 3 H. D. Wanzenboeck, S. Waid, E. Bertagnolli. Nanoimprint lithography stamp modification utilizing focused ion beams [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2009, **27**(6): 2679~2685
- 4 A. L. Bross, G. Lafyatis, R. Ayachitula *et al.*. Robust, efficient grating couplers for planar optical waveguides using no-photoacid generator SU-8 electron beam lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2009, **27**(6): 2602~2605
- 5 R. J. Blaikie, S. J. McNab. Evanescent interferometric lithography [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(10): 1692~1698
- 6 V. M. Murukeshan, J. K. Chua, S. K. Tan *et al.*. Nano-scale three dimensional surface relief features using single exposure counter propagating multiple evanescent waves interference phenomenon [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13857~13870
- 7 J. K. Chua, V. M. Murukeshan, S. K. Tan *et al.*. Four beams evanescent waves interference lithography for patterning of two dimensional features [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3437~3451
- 8 E. A. Bezus, L. L. Doskolovich, N. L. Kazanskiy. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings [J]. *Microelectron. Eng.*, 2011, **88**(2): 170~174
- 9 Z. W. Liu, Q. H. Wei, X. Zhang. Surface plasmon interference nanolithography [J]. *Nano. Lett.*, 2005, **5**(5): 957~961
- 10 S. Shi, Z. Y. Zhang, M. Y. He. Analysis of surface-plasmon-polaritons-assisted interference imaging by using silver film with rough surface [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10685~10693
- 11 X. P. Li, S. Shi, Z. Y. Zhang. Experimental analysis of solid immersion interference lithography based on backside exposure technique [J]. *Microelectron. Eng.*, 2011, **88**(8): 1931~1934
- 12 X. W. Guo, J. L. Du, Y. K. Guo *et al.*. Large-area surface plasmon polariton interference lithography [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2613~2615
- 13 J. Q. Wang, H. M. Liang, X. Y. Niu *et al.*. Enhancing exposure depth for surface-plasmon polaritons interference nanolithography by waveguide modulation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **18**(1): 014308
- 14 B. B. Zeng, X. F. Yang, C. T. Wang *et al.*. Plasmonic interference nanolithography with a double-layer planar silver lens structure [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 16783~16791
- 15 M. Y. He, Z. Y. Zhang, S. Shi *et al.*. A practical nanofabrication method: surface plasmon polaritons interference lithography based on backside-exposure technique [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15975~15980
- 16 Jin Fengze, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Photonic crystal fabrication based on surface plasmon polaritons interference nanolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1075~1078
- 金凤泽, 方亮, 张志友等. 表面等离子体干涉制备纳米光子晶体的模拟分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1075~1078
- 17 Xiao Xiao, Zhang Zhiyou, He Mingyang *et al.*. Optimized design of silver superlens for the surface plasmon polaritons interference lithography based on backside-exposure technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222007
- 肖 啸, 张志友, 何明阳等. 背向曝光表面等离子体激元干涉光刻系统中银层超透镜的优化设计 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222007
- 18 B. Wang, A. B. Chew, J. H. Teng *et al.*. Subwavelength lithography by waveguide mode interference [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**(15): 151106
- 19 Zheng Yu, Wang Jingquan, Li Min *et al.*. Resist exposure developing simulation study of SPPs lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 792~796
- 郑 宇, 王景全, 李 敏等. SPPs光刻曝光显影模拟研究 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 792~796

栏目编辑: 李文喆