

激光与光电子学进展

样品连续旋转的高阶导模干涉刻写
多层亚波长圆光栅

苏盈文, 陈振宇, 徐月奇, 王向贤*

兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050

摘要 提出了一种基于样品连续旋转的高阶导模干涉刻写多层亚波长圆光栅的方法。利用有限元法模拟导模干涉场,以及坐标旋转矩阵和数值模拟方法研究对样品实施连续旋转曝光后的总光场。选取 442 nm 波长激光作为激发光,以 TE_5 和 TM_{51} 为例,研究了高阶导模干涉刻写制备多层亚波长圆光栅的光场分布。通过光场分布分析了多层亚波长圆光栅在 X - Y 平面的周期以及 Z 轴的周期和层数,这些参数可通过改变光刻胶厚度和干涉曝光的导波模式来调节。同一厚度光刻胶条件下存在着多种高阶导模,且同阶导模对应的激发角可以通过改变光刻胶的厚度进行有效调控。因此,通过选择不同厚度的光刻胶,选取曝光所用的高阶导模,可以刻写各种不同参数的多层亚波长圆光栅。该方法是制备多层亚波长圆光栅的一种简单而有效的方法,在微纳光学领域具有一定的应用前景。

关键词 光学设计与制造; 微纳光刻; 高阶导模干涉; 多层亚波长圆光栅

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1122001

Multi-Layer Subwavelength Circular Grating Fabricated by High-Order
Waveguide Mode Interference and Continuous Sample Rotation

Su Yingwen, Chen Zhenyu, Xu Yueqi, Wang Xiangxian*

School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China

Abstract A method of fabricating the multi-layer subwavelength circular gratings is proposed, which is based on the high-order waveguide mode interference and continuous sample rotation. The waveguide mode interference field is simulated by the finite element method, and the coordinate rotation matrix and the numerical simulation method are used to study the total optical field after performing continuous rotating exposure to the sample. A 442-nm laser is selected as the excitation light and TE_5 and TM_{51} are taken as the examples to study the optical field distribution of the multi-layer subwavelength circular gratings fabricated by the high-order waveguide mode interference. By the optical field distribution, the period of the X - Y plane and the period and layers of the Z -axis of the multi-layer subwavelength circular gratings are analyzed, which can be adjusted by changing the thicknesses of the photoresists and the waveguide modes for interference exposure. Under the condition of the same thickness of photoresist, there are many high-order waveguide modes and the excitation angle corresponding to the same high-order waveguide mode can be effectively controlled by changing the thicknesses of photoresists. As a result, the multi-layer circular gratings with different parameters can be fabricated by selecting the photoresists of different thicknesses and the high-order waveguide modes used in exposure. The proposed method is a simple and effective way to fabricate the multi-layer subwavelength circular gratings and has a certain application prospect in the field of micro-nano optics.

收稿日期: 2021-06-19; 修回日期: 2021-07-06; 录用日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61865008)、甘肃省大学生创新创业训练计划(DC2020184)

通信作者: *wangxx869@lut.edu.cn

Key words optical design and fabrication; micro-nano lithography; high-order waveguide mode interference; multi-layer subwavelength circular grating

1 引言

由于亚波长结构在光催化^[1-3]、传感^[4-6]、表面增强拉曼散射^[7-9]、吸收器^[10-12]、法诺(Fano)共振^[13-14]等方面的广泛应用,制备各种亚波长结构具有重要意义。其中,亚波长圆光栅因其在红外光电探测器^[15]、染料反馈激光器^[16]、滤波器^[17]等光学器件中的潜在应用而备受关注。亚波长圆光栅的制备方法很多,其中包括电子束光刻^[18]、金刚石铣削^[19]和纳米压印^[16]。尽管这些方法已经实现了亚波长圆光栅的制备,但它们操作复杂、成本高,这在一定程度上限制了它们的使用。表面等离子体^[20-22](SPs)干涉光刻技术是制作周期性亚波长光栅的一种简单、经济、有效的方法,具有速度快、加工面积大等优点。Fang等^[23]提出了镀金属层的棱镜衰减全内反射结构无掩模SPs干涉光刻。Sreekanth等^[24]实现了基于棱镜衰减全内反射结构的周期性156 nm的光栅条纹刻写,并用4束SPs干涉,刻写制备了二维点阵结构^[25],但其只刻写了一维光栅及二维点阵结构,并没有对如何刻写圆光栅进行研究。2019年,Wang等^[26]研究发现通过SPs干涉连续曝光的办法可刻写亚波长圆光栅。但是,用此方法刻写的亚波长圆光栅的周期由金属薄膜和光刻胶折射率唯一确定。由于SPs的穿透深度非常小,因此其所使用的光刻胶只能很薄。另外,SPs模式只能通过横磁(TM)偏振光激发。这些不足,使得刻写制备各种不同周期、较大深宽比的亚波长圆光栅在很大程度上受到了限制。王向贤等^[27-28]提出了导模干涉亚波长光刻技术,利用442 nm激光激发导模干涉场,成功制备了特征尺寸约94 nm的亚波长光栅,且通过光刻胶厚度的变化实现了不同周期亚波长光栅的刻写。Wang等^[29]通过两个金属纳米狭缝激发横电(TE)导模干涉,实现了亚波长光栅的刻写。Pang等^[30]研究了零阶导模干涉结合样品连续旋转曝光刻写亚波长圆光栅,利用此方法刻写的亚波长圆光栅虽然结构参数可调,但只能刻写单层圆光栅,而不能实现多层圆光栅的刻写。

为了刻写制备多层亚波长圆光栅,本文从理论上提出了一种基于样品连续旋转的高阶导模干涉亚波长光刻技术。该技术可通过恰当选择光刻胶

厚度、高阶导波模式来实现具有各种不同参数的多层亚波长圆光栅的刻写制备。

2 理论分析

图1是基于样品连续旋转的高阶导模干涉光刻的原理图,该结构从上到下分别由棱镜、匹配油、玻璃基底、银膜和光刻胶组成,光刻胶下层为空气,其中,空气、光刻胶和银膜构成非对称金属包覆介质波导,导波模式由棱镜耦合激发。匹配油将棱镜与玻璃基底连接起来且它们三者具有相同的折射率,因此,在理论计算中可将其视为一个整体。定义银膜/光刻胶界面为XOY平面,Z轴正方向指向银膜。在实验操作时,先在玻璃基底上通过电子束蒸发蒸镀银膜,再通过匀胶法在银膜表面旋涂一定厚度的光刻胶,接着用折射率匹配油将棱镜和玻璃基底连接在一起,形成如图1所示的光刻结构。这种结构在实际的光刻中具有以下优势:1)用匹配油将棱镜与玻璃基底连接起来,可以实现棱镜的重复利用,可在实际光刻中提高效率;2)刻写的光栅在银膜上;3)充分利用了空气,避免了折射率匹配油对光刻胶的污染。

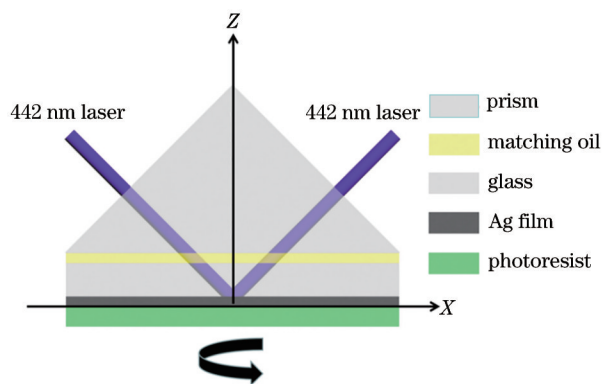


图1 基于样品连续旋转的高阶导模干涉光刻的原理图
Fig. 1 Schematic of high-order waveguide mode interference lithography by continuously rotating sample

TE和TM偏振光激发的TE和TM导模的模式本征方程^[31]分别为

$$\sqrt{A} d = m\pi + \arctan \sqrt{\frac{C}{A}} + \arctan \sqrt{\frac{B}{A}}, \quad (1)$$

$$\sqrt{A} d = m\pi + \arctan \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_{\text{air}}} \sqrt{\frac{C}{A}} \right) + \arctan \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_{\text{Ag}}} \sqrt{\frac{C}{A}} \right), \quad (2)$$

式中: d 为光刻胶厚度; m 为模式数; ϵ_{Ag} 、 ϵ_{p} 和 ϵ_{air} 分别为银、光刻胶和空气的介电常数; A 、 B 和 C 分别表示为

$$\begin{cases} A = k_0^2 \epsilon_{\text{p}} - \beta_m^2 \\ B = \beta_m^2 - k_0^2 \epsilon_{\text{Ag}}, \\ C = \beta_m^2 - k_0^2 \epsilon_{\text{air}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: β_m 是导模的传播常数; k_0 是真空中光波矢大小。

曝光过程中高阶导模的干涉场不变, 通过样品连续旋转来改变光刻样品上的曝光位置, 旋转某一角度曝光后的光场分布可以用旋转矩阵来计算。旋转矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} X_n & Y_n & Z_n & I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & Y & Z & I_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_n & \sin \alpha_n & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: I_1 为第 1 次曝光时的光场强度分布; I_n 为第 n 次曝光时的光场强度分布; α_n 为对样品实施的旋转角度。实验操作时, 在保证光场不变的情况下, 通过步进电机对样品连续旋转 180° 。在数值计算中, 高阶导模干涉场的分布 I 用有限元法进行计算, 用 Matlab 软件和旋转矩阵计算旋转后的光场分布, 实际的数值模拟中采用每旋转 1° 曝光 1 次的方法, 最后对光场进行求和, 可得样品被曝光后的总光场分布为

$$I(X, Y, Z) = \sum_{n=1}^N I_n(X_n, Y_n, Z_n, \alpha_n). \quad (5)$$

通过对总光场分布的分析研究, 即可得到刻写的多层亚波长圆光栅在 X - Y 平面的周期、 Z 轴方向的周期和层数等相关参数。

3 数值模拟结果

采用 442 nm 激光作为激发光, 棱镜折射率取 1.8824, 光刻胶折射率取 $1.53^{[32]}$, 优化后的银膜厚度为 40 nm。下面分别以 TE_5 和 TM_{51} 为例研究刻写多层亚波长圆光栅的结果。在光刻胶厚度为 1200 nm 的条件下, 可得 TE_5 导模的激发角为 37.32° ; 在光刻胶厚度为 9650 nm 的条件下, 可得 TM_{51} 导模的激发角为 32.72° 。

图 2 为光刻胶厚度为 1200 nm, 用 TE_5 导模干涉光刻时, 光刻胶中的光场分布。光场在 Z 轴方向和 X 轴方向均呈规则的周期性分布, Z 轴方向的周期数与导模的模式数有关, 而 X 轴方向的周期数与曝

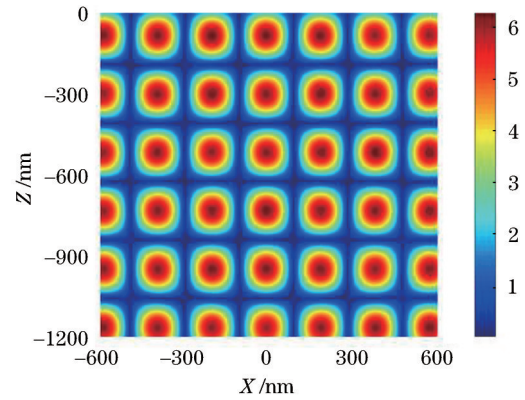


图 2 光刻胶厚度 1200 nm 时激发 TE_5 导模干涉的光场分布
Fig. 2 Simulated optical field distribution of TE_5 waveguide mode interference for 1200-nm thickness photoresist

光面积有关。从计算结果可得, 光栅在 X 轴方向的周期为 195 nm, Z 轴方向的周期为 215 nm。光刻胶为 9650 nm 时, 激发 TM_{51} 导模干涉光刻的光场分布与 TE_5 的类似, 在此不再赘述。

图 3(a) 为用 TE_5 干涉场对样品进行连续旋转曝光后所得到的光刻胶中的三维光场分布, 图中 Z 轴的范围从 -1200 nm 到 0 nm, X 轴的范围从 -600 nm 到 600 nm。图 3(b) 进一步给出了将结构从 $Y=0$ nm 的面处切开的三维光场分布。为了分析亚波长圆光栅在 X - Y 平面的周期, 图 3(c) 给出了 $Z=-300$ nm 时 X - Y 平面的光场分布。为了分析多层亚波长圆光栅在 Z 轴方向的周期, 图 3(d) 给出了 $Y=0$ nm 时 X - Z 平面的光场分布。图 3(e) 给出了 $Y=0$ nm, $Z=-300$ nm 时, 沿 X 轴从 -600 nm 到 600 nm 的光场强度分布。 X - Y 平面圆光栅之间的间隔基本相等, 周期约为 195 nm。图 3(f) 为 X 、 Y 均为 0 nm 时, 沿 Z 轴从 -1200 nm 到 0 nm 的光场强度分布。通过分析图 3(d) 和 3(f) 可得多层亚波长圆光栅沿 Z 轴方向的层数为 6 层, 周期为 215 nm。

图 4(a) 为用 TM_{51} 干涉场对样品进行连续旋转曝光后所得到的光刻胶中的三维光场分布, 图中 Z 轴范围为 -9650 nm 到 0 nm, X 轴范围为 -1000 nm 到 1000 nm。同样地, 图 4(b) 中给出了沿 $Y=0$ nm 的面处切开的三维光场分布。图 4(c) 为 $Z=0$ nm 时, X - Y 平面上的光场分布。图 4(d) 给出了 $Y=0$ nm 时, X - Z 平面上的光场分布。图 4(e) 为 Y 、 Z 均为 0 nm 时, 沿 X 轴从 -1000 nm 到 1000 nm 的光场强度分布, 可得 X - Y 平面圆光栅之间的间隔基本相等, 周期约为 217 nm。图 4(f) 为 X 、 Y 均为 0 nm 时,

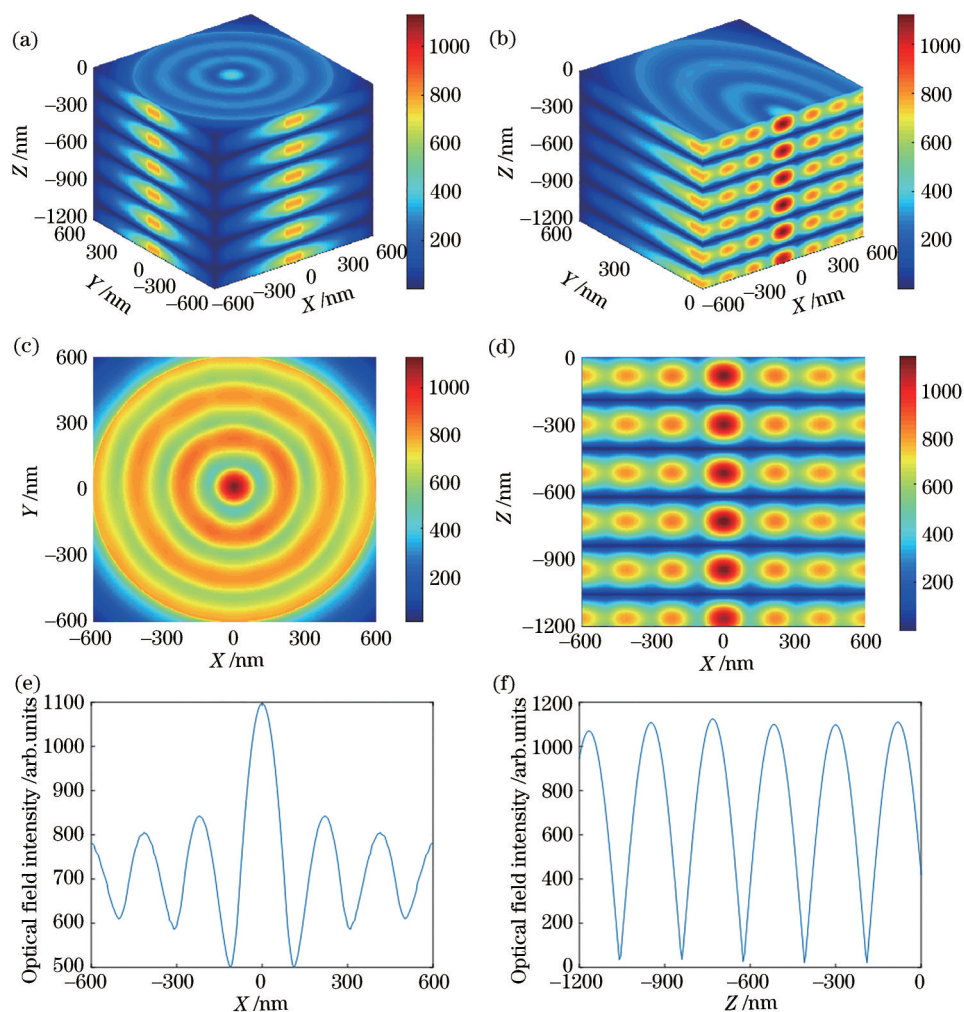


图3 用TE₅干涉场对样品进行连续旋转曝光后所得到的光刻胶中的光场分布。(a) 三维光场分布;(b) 从Y=0 nm的面处切开的三维光场分布;(c) 图3(a)中Z=-300 nm时X-Y平面的光场分布;(d) 图3(a)中Y=0 nm时X-Z平面的光场分布;(e) 图3(c)中Y=0 nm,Z=-300 nm时沿X轴的光场强度分布;(f) 图3(d)中X=0 nm,Y=0 nm时沿Z轴从-1200 nm到0 nm光场强度分布

Fig. 3 Optical field distribution in photoresist after continuously rotating and exposing sample by interference field of TE₅. (a) Three-dimensional optical field distribution; (b) optical field distribution corresponding to Fig. 3(a) cutting from plane Y = 0 nm; (c) optical field distribution of X-Y plane with Z = -300 nm in Fig. 3(a); (d) optical field distribution of X-Z plane with Y = 0 nm in Fig. 3(a); (e) optical field intensity distribution along X-axis from -600 to 600 nm with Y = 0 nm and Z = -300 nm in Fig. 3(c); (f) optical field intensity distribution along Z-axis from -1200 to 0 nm with X = 0 nm and Y = 0 nm in Fig. 3(d)

沿Z轴从-2000 nm到0 nm的光场强度分布。通过分析图4(d)和4(f)可得多层亚波长圆光栅沿Z轴方向的层数为52层,周期为195 nm。

以上仅以TE₅和TM₅₁为例讨论了用高阶导模干涉场对样品实施连续旋转曝光时刻写的多层亚波长圆光栅。厚光刻胶条件下存在着多种高阶导模,且光刻胶的厚度决定了能够激发的最高阶导模的模式数,光刻胶越薄,能够激发的导模的最高阶数就越低。TM和TE偏振光均可激发高阶导

模,多层亚波长圆光栅在X-Y平面的周期由高阶导模所对应的激发角决定,而在Z轴方向的周期和层数则由光刻胶的厚度和高阶导模的模式数共同决定。因此,在实际的光刻实验中,同一光刻胶厚度条件下,选择相同偏振、不同阶数的高阶导模干涉场对样品连续旋转曝光,可刻写不同层数和不同周期的亚波长圆光栅;也可以选择不同偏振、相同阶数的高阶导模,刻写得到相同层数和不同周期的亚波长圆光栅。通过改变光刻胶的厚度,

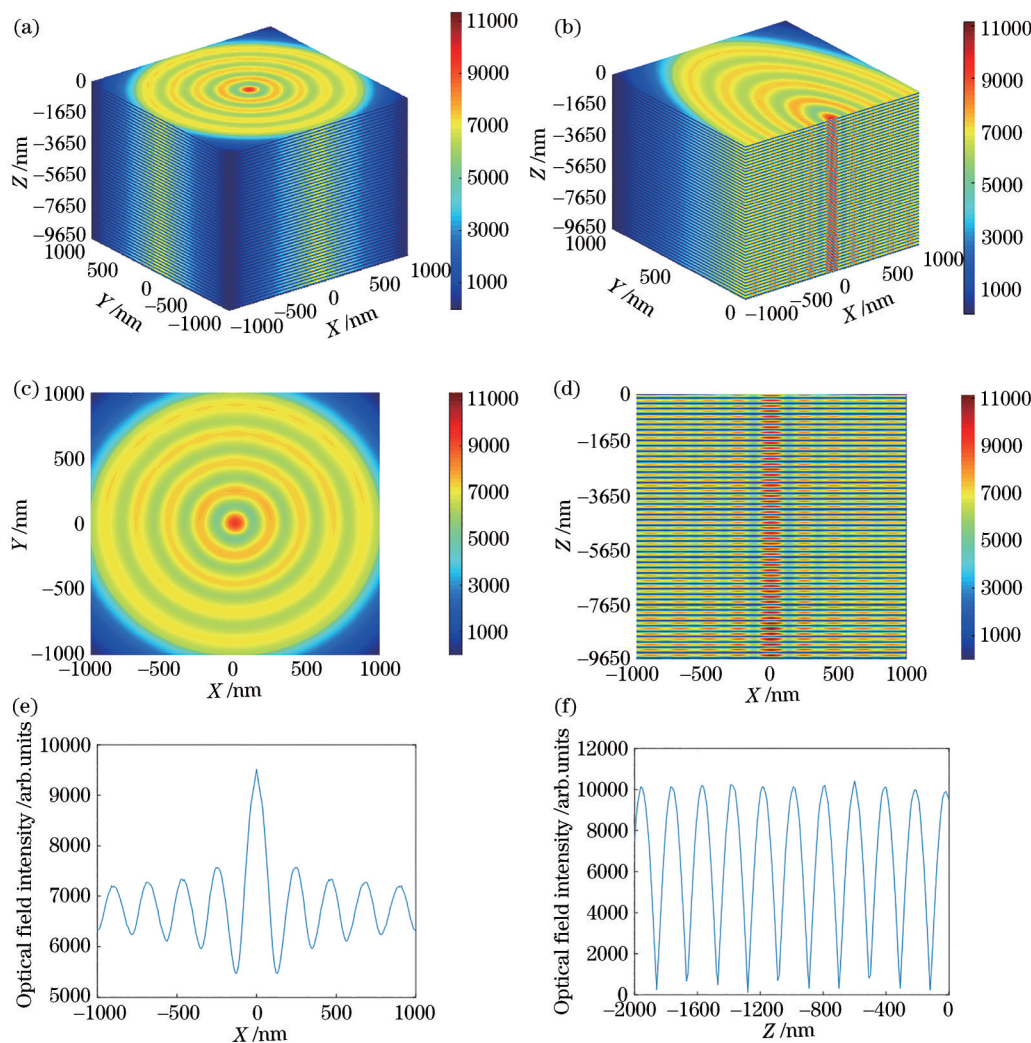


图 4 用 TM_{51} 干涉场对样品进行连续旋转曝光后得到的光刻胶中的光场分布。(a) 三维光场分布;(b) 从 $Y=0\text{ nm}$ 的面处切开的三维光场分布;(c) 图 4(a) 中 $Z=0\text{ nm}$ 时 X - Y 平面的光场分布;(d) 图 4(a) 中 $Y=0\text{ nm}$ 时 X - Z 平面的光场分布;(e) 图 4(c) 中 $Y=0\text{ nm}$, $Z=0\text{ nm}$ 时沿 X 轴从 -1000 nm 到 1000 nm 的光场强度分布;(f) 图 4(d) 中 $X=0\text{ nm}$, $Y=0\text{ nm}$ 时沿 Z 轴从 -2000 nm 到 0 nm 的光场强度分布

Fig. 4 Optical field distribution in photoresist after continuously rotating and exposing sample by interference field of TM_{51} . (a) Three-dimensional optical field distribution; (b) optical field distribution corresponding to Fig. 4(a) cutting from plane $Y=0\text{ nm}$; (c) optical field distribution of X - Y plane with $Z=0\text{ nm}$ in Fig. 4 (a); (d) optical field distribution of X - Z plane with $Y=0\text{ nm}$ in Fig. 4 (a); (e) optical field intensity distribution along X -axis from -1000 to 1000 nm with $Y=0\text{ nm}$ and $Z=0\text{ nm}$ in Fig. 4 (c); (f) optical field intensity distribution along Z -axis from -2000 to 0 nm with $X=0\text{ nm}$ and $Y=0\text{ nm}$ in Fig. 4(d)

还可以实现 X - Y 平面周期相同、 Z 轴周期不同或相同、层数不同或相同的多层亚波长圆光栅的刻写制备。总之,通过选取曝光所用的高阶导模,特别是通过光刻胶厚度的变化,就可以很容易地实现所需参数的多层亚波长圆光栅的刻写。另外,本文仅以 442 nm 激光为例进行了研究,实际的光刻中也可以使用 405 、 325 nm 等其他波长的激光作为激发光源。

4 结 论

提出了一种基于样品连续旋转的高阶导模干涉刻写多层亚波长圆光栅的方法。 TE 和 TM 两种偏振光都可以激发高阶导波模式。在光刻胶厚度分别为 1200 nm 和 9650 nm 的条件下,以 TE_5 和 TM_{51} 为例,通过数值模拟研究了高阶导模干涉刻写多层亚波长圆光栅的光场分布,可得刻写的多层亚

波长圆光栅在 X - Y 平面的周期分别为 195 nm 和 217 nm, Z 轴方向的周期分别为 215 nm 和 195 nm。通过调控光刻胶的厚度和选取干涉曝光的高阶导波模式, 可实现各种所需参数的多层亚波长圆光栅的刻写。提出的亚波长光刻技术是一种结构简单、成本低廉的多层亚波长圆光栅制备技术, 有望在微纳光刻领域得到实际的应用。

参 考 文 献

- [1] Gao H J, Zhao X X, Zhang H M, et al. Construction of 2D/0D/2D face-to-face contact $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Au}@\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ heterojunction photocatalysts for degradation of rhodamine B[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(9): 5248-5259.
- [2] Guan S T, Li R S, Sun X F, et al. Construction of novel ternary $\text{Au}/\text{LaFeO}_3/\text{Cu}_2\text{O}$ composite photocatalysts for RhB degradation via photo-Fenton catalysis[J]. *Materials Technology*, 2021, 36(10): 603-615.
- [3] Duan Q Q, Ji J Y, Hong X, et al. Design of hole-transport-material free $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CsSnI}_3$ all-perovskite heterojunction efficient solar cells by device simulation[J]. *Solar Energy*, 2020, 201: 555-560.
- [4] Qi Y P, Wang Y, Zhang X W, et al. A theoretical study of optically enhanced transmission characteristics of subwavelength metal Y-shaped arrays and its application on refractive index sensor[J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102495.
- [5] Wang X X, Zhu J K, Xu Y Q, et al. A novel plasmonic refractive index sensor based on gold/silicon complementary grating structure[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(2): 024207.
- [6] 王梦梦, 韵力宇, 王一飞, 等. 基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052401.
Wang M M, Yun L Y, Wang Y F, et al. Plasma refractive index nanosensor based on Fano resonance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052401.
- [7] Wu Y, Wang X X, Wen X L, et al. Surface-enhanced Raman scattering based on hybrid surface plasmon excited by Au nanodisk and Au film coupling structure[J]. *Physics Letters A*, 2020, 384(23): 126544.
- [8] Liu G Q, Liu Y, Tang L, et al. Semiconductor-enhanced Raman scattering sensors via quasi-three-dimensional $\text{Au}/\text{Si}/\text{Au}$ structures[J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1095-1107.
- [9] 辛坤, 史晓凤, 张旭, 等. 基于光热效应实现金纳米粒子的聚集及其 SERS 应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1930001.
Xin K, Shi X F, Zhang X, et al. Aggregation of gold nanoparticles based on photothermal effect and its application in surface-enhanced Raman scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1930001.
- [10] Zhang Y B, Yi Z, Wang X Y, et al. Dual band visible metamaterial absorbers based on four identical ring patches[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, 127: 114526.
- [11] Yu P Q, Yang H, Chen X F, et al. Ultra-wideband solar absorber based on refractory titanium metal[J]. *Renewable Energy*, 2020, 158: 227-235.
- [12] Liu Z Q, Tang P, Liu X S, et al. Truncated titanium/semiconductor cones for wide-band solar absorbers[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(30): 305203.
- [13] Yang L, Wang J C, Yang L Z, et al. Characteristics of multiple Fano resonances in waveguide-coupled surface plasmon resonance sensors based on waveguide theory[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2560.
- [14] 陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0413001.
Chen Y, Zhou X D, Zhou J, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal hybrid structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0413001.
- [15] Bhat R D, Panoiu N C, Brueck S R, et al. Enhancing the signal-to-noise ratio of an infrared photodetector with a circular metal grating[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4588-4596.
- [16] Chen Y, Li Z Y, Zhang Z Y, et al. Nanoimprinted circular grating distributed feedback dye laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(5): 051109.
- [17] Wang Y J, Qin C, Gao X M, et al. Circular grating filters with multiple resonant peaks[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 3056-3062.
- [18] Wang Y J, Hu F R, Sameshima H, et al. Fabrication and characterization of freestanding circular GaN gratings[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 773-779.
- [19] Yen K, Ratnam M. In-plane displacement sensing from circular grating moiré fringes using graphical analysis approach[J]. *Sensor Review*, 2011, 31(4): 358-367.
- [20] Kim E S, Kim Y M, Choi K C. Surface plasmon-assisted nano-lithography with a perfect contact aluminum mask of a hexagonal dot array[J]. *Plasmonics*,

- 2016, 11(5): 1337-1342.
- [21] Liu L Q, Luo Y F, Zhao Z Y, et al. Large area and deep sub-wavelength interference lithography employing odd surface plasmon modes[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30450.
- [22] Luo X G, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(23): 4780-4782.
- [23] Fang L, Du J L, Guo X W, et al. The theoretic analysis of maskless surface plasmon resonant interference lithography by prism coupling[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(7): 2499-2503.
- [24] Sreekanth K V, Murukeshan V M. Single-exposure maskless plasmonic lithography for patterning of periodic nanoscale grating features[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2010, 9(2): 023007.
- [25] Sreekanth K V, Murukeshan V M. Four beams surface plasmon interference nanoscale lithography for patterning of two-dimensional periodic features[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, 28(1): 128-130.
- [26] Wang X X, Pang Z Y, Yang H, et al. Theoretical study of subwavelength circular grating fabrication based on continuously exposed surface plasmon interference lithography[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102446.
- [27] 王向贤, 张斗国, 陈漪恺, 等. 一种基于导模干涉的超分辨直写光刻机: CN202230299U[P]. 2012-05-23. Wang X X, Zhang D G, Chen Y K, et al. A super-resolution direct writing lithography machine based on guided mode interference: CN202230299U[P]. 2012-05-23.
- [28] Wang X X, Zhang D G, Chen Y K, et al. Large area sub-wavelength azo-polymer gratings by waveguide modes interference lithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(3): 031103.
- [29] Wang B, Chew A B, Teng J H, et al. Subwavelength lithography by waveguide mode interference[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(15): 151106.
- [30] Pang Z Y, Tong H, Wu X X, et al. Theoretical study of multiexposure zeroth-order waveguide mode interference lithography[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(9): 1-9.
- [31] 曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. Cao Z Q. *Guided wave optics*[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [32] Tong H, Xu Y Q, Su Y W, et al. Theoretical study for fabricating elliptical subwavelength nanohole arrays by higher-order waveguide-mode interference [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102460.