

文章编号:1004-4213(2011)09-1381-5

基于厚金属狭缝阵列的表面等离子激元光刻

肖啸¹,肖志刚¹,许德富¹,邓迟¹,刘晓云²

(1 乐山师范学院 物理与工程学院,四川 乐山 614004)

(2 四川大学 物理科学与技术学院 纳光子技术研究所,成都 610064)

摘 要:提出一种利用厚金属狭缝阵列耦合激发表面等离子激元制作非周期图形的纳米光刻模型. 采用时域有限差分电磁场模拟仿真软件研究了厚金属狭缝阵列中表面等离子激元的激发、模式选择以及光刻胶中的光场分布. 结果表明,通过优化厚金属狭缝阵列结构参量和匹配介质参量可有效抑制表面等离子激元在光栅狭缝出口处的发散,增加表面等离子激元的穿透深度,可获得高分辨率的较大曝光深度的周期和非周期纳米图形,可为纳米激光直写技术提供有益的借鉴.

关键词:光刻;厚金属狭缝;时域有限差分法;表面等离子激元

中图分类号:O439;TN305.7

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1381

0 引言

光刻技术是当前半导体元器件加工业中广泛应用的一项技术.随着超大规模集成电路和微结构光子学元器件的迅速发展,对光刻技术的分辨本领要求越来越高.电子束直写、聚焦离子束直写等高精尖纳米加工设备和加工技术在一定程度上满足了纳米结构多样化的需求,但设备昂贵、加工成本高,无法满足科研和生产对纳米结构的大量需求.因此,发展快速、低成本、大面积的纳米加工技术成为目前研究的热点.近年来,国际上表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)研究十分活跃,SPPs有巨大的局域能量增强效应,能将电磁场的能量聚集到很小的纳米尺度空间内,可用于超分辨光学系统领域,使得可见光照明条件下实现纳米尺度的光刻成为可能^[1-4].2004年以来,国内外不少研究团队对SPPs光刻进行了较深入的研究,证明SPPs光刻能够突破传统光刻技术衍射极限的限制,被认为是传统光刻在纳米领域的优秀继承者.目前,SPPs光刻技术主要有两种:一是无掩模SPPs干涉光刻,主要借助高折射率棱镜或波导来激发相向传播的长程SPPs进行干涉光刻,可以快速、大面积制作周期性纳米图形,并克服掩模加工带来的诸多困难,但这种技术只能制作周期性图形,无法实现任意纳米结构的加工;另一种为局域SPPs光刻,通过SPPs高度能量聚集效应可获得较小纳米特征尺寸(小于50 nm)的局域场,但其纵向穿透深度较浅,通常小于局域场的横向分辨率,实验上难以获得高质量的

光刻图形,在一定程度上阻碍了该技术的进一步发展.

按照传统光学衍射理论,在不透明屏上开一小孔,该小孔的透过率^[5] $T=(d/\lambda)^{[4]}$,其中 d 为小孔直径, λ 为入射光波长.当小孔的直径远小于波长时,其光能透过率非常低.但是在1998年,Ebbesen发现亚波长金属小孔阵列有超强透射特性,曾引起了学术界不小的争论^[6-7],大多数研究者认为这种超强透射与SPPs有着密切关系.研究表明,对于不同结构,表面等离子体所起作用的方式也不相同^[8].当金属狭缝较薄时,上下表面所产生的SPPs将发生相互耦合,从而改变SPPs共振模态^[9-10].对于厚金属狭缝,其内壁激发的SPPs发生耦合,在金属狭缝内产生驻波,形成Fabry-Perot共振微腔^[11].

本文提出一种基于厚金属狭缝阵列的表面等离子激元光刻技术,该技术利用SPPs在厚金属狭缝中传输时形成的法布里-珀罗效应,有效增加SPPs的穿透深度,提高SPPs的曝光图形质量,可制作周期和非周期纳米图形.利用时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)电磁场仿真软件讨论了厚金属狭缝对SPPs模态的选择、介质匹配层的影响以及光刻胶中光能量分布情况,并对金属厚度及狭缝阵列间隔进行了优化设计.

1 厚金属狭缝阵列的优化设计

1.1 金属膜厚度的优化

厚金属单狭缝结构如图1. TM偏振光垂直入射到厚金属单缝结构.该结构的金属膜厚度为 t ,缝

基金项目:乐山师范学院科研项目资助

第一作者:肖啸(1975-),男,讲师,主要研究方向为衍射光学和微细加工技术. Email: xiao_scu@sohu.com

收稿日期:2011-04-10;修回日期:2011-06-02

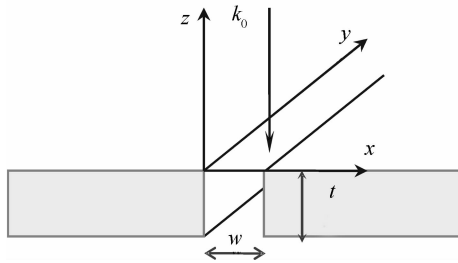


图 1 厚金属单缝结构
Fig. 1 Schematic view of a thick metallic slit

宽为 w , 狭缝的长度方向与入射光的磁场方向一致, 都沿 y 轴方向.

对于厚金属单缝, 在狭缝内产生的驻波可以用式(1)表达^[1].

$$m\lambda/\text{real}(n_{\text{eff}}) = 2t \quad (1)$$

式中, m 代表在狭缝内厚度方向形成的驻波数目, t 是金属膜厚度, λ 为入射光波长, n_{eff} 是缝内的有效折射率, $\text{real}(n_{\text{eff}})$ 是有效折射率实部. 有效折射率可由式(2)确定

$$n_{\text{eff}} \approx 1 + \frac{1}{2} \eta^2 \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{4}{\eta^2} (1 + |\eta \epsilon_{\text{metal}}|)} \right\} \quad (2)$$

式中 $\eta = 2/(k_0 w |\epsilon_{\text{metal}}|)$.

选择银为厚金属膜材料, 设银膜厚度 $t = 1.5 \mu\text{m}$, 单个空气狭缝宽度 $w = 80 \text{ nm}$, 入射光波长 $\lambda = 441.6 \text{ nm}$, 此时银的介电常量为: $\epsilon_{\text{Ag}}(441.6) = -8.9175 + 0.2231 * i$. 则根据式(1)和(2), 可得空气狭缝内的驻波数目 $m = 10$. 图 2 是采用上述数据通过 FDTD 方法得到的单缝共振透射模拟图. 图中有 10 个驻波波峰, 这与理论分析的 m 值相吻合, 证明了当金属膜的厚度达到厚膜程度时, 单缝的透射出现法布里伯罗效应.

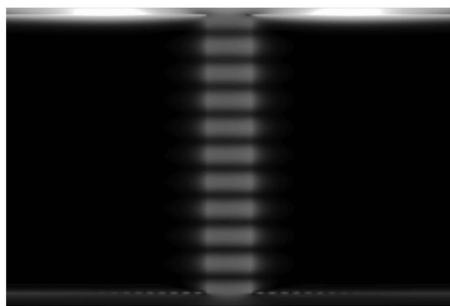


图 2 厚金属银膜的单缝共振透射
Fig. 2 Resonance transmission inner a thick silver slit

图 3 是透射光场在光刻胶中的分布情况, 其中光刻胶的折射率为 1.56. 从图 3(a)中可以看出, 光刻胶中的透射场区域与金属狭缝相比出现了较大的展宽, 强度也随深度发生了明显的衰减. 若在单缝与光刻胶之间添加一层很薄的匹配液(比如水), 厚度大约为 7~15 nm, 该单缝的透射场如图 3(b), 此时边缘效应得到了较好的消除, 但是透射场仍然存在

一定的发散, 且随着深度的增加这种发散程度加大, 这种光场的发散现象是由于小孔衍射所引起的. 由于小孔衍射将会使透射光场的线宽比狭缝的宽度大很多, 应将透射光场加以束缚. 一般采用镀一层很薄的惰性金属 Cr 或 Ti 在光刻胶的衬底上. 由于金属 Cr 或 Ti 的电荷含量很小, 不会激发出较强的表面等离子体, 从而不会对光刻胶产生再次曝光. 惰性金属层和光刻胶上方的厚金属膜构成平行板电容器, 能够束缚电场使其线宽与理想线宽基本一致. 图 3(c)就是添加了匹配液层和惰性金属 Cr 层后的模拟结果, 从该图中可以看到光场受到了约束, 边缘效应得到了消除, 光场穿透深度增加.

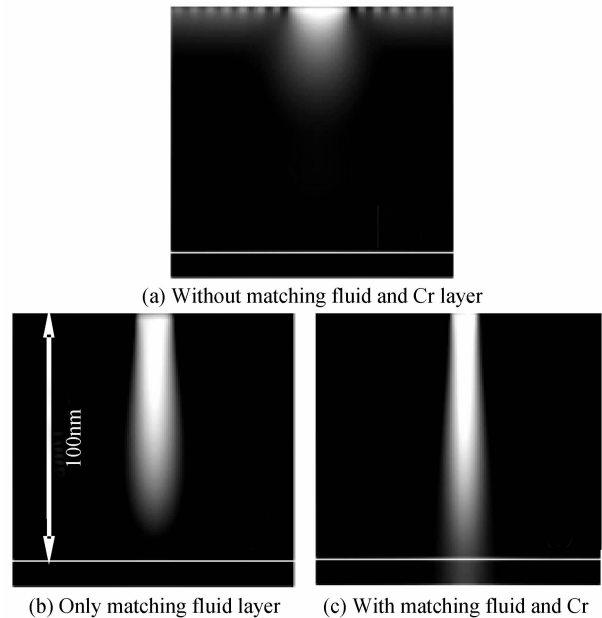


图 3 金属狭缝透射场分布
Fig. 3 Transmission field under a metallic slit

由式(1)可知, 当入射光波长和有效折射率不变时, 狭缝内的驻波数目 m 取决于金属膜厚度 t , 即不同 m 值对应着不同的膜厚 t . 图 4 是不同驻波数目 m (即不同金属膜厚度) 情况下, 透射场在离金属膜下表面 80 nm 处的归一化磁场强度 $|H|^2 / |H_0|^2$

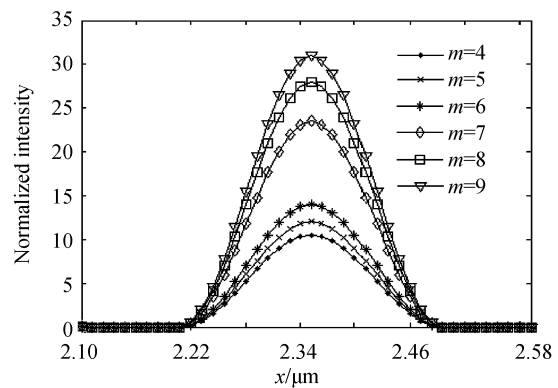


图 4 归一化强度随驻波数目 m 变化曲线
Fig. 4 Relationship between the normalized intensities and the standing wave numbers

分布. 当 $m=4$ 时, 归一化强度最大值为 31; 当 $m=9$ 时, 归一化强度最大值为 10. 由图可知, 当 m 值变大时, 即金属膜的厚度变大时, 磁场强度随之减弱, 但其增益效果仍很明显. 综合考虑加工工艺和归一化强度值, 下面选择 $m=7$ 时的金属膜厚, 即金属银膜的厚度为 $1.05 \mu\text{m}$ 以及单缝宽度 $w=80 \text{ nm}$ 进一步讨论.

加入匹配液层和 Cr 层后, 归一化强度随着曝光深度 z 的变化曲线如图 5. 图中分别给出了在离银膜下表面 $z=40 \text{ nm}$ 、 60 nm 、 80 nm 和 100 nm 处的归一化强度分布.

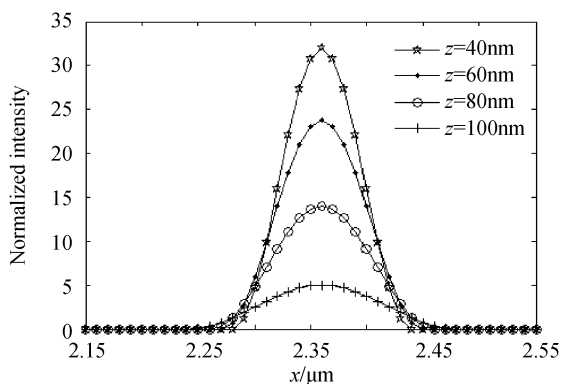


图 5 归一化强度随曝光深度变化曲线
Fig. 5 Relationship between the normalized intensity and the exposure depth

从图中可看出, 透射场强度随着曝光深度 z 的增加而逐渐减小, 在 40 nm 处的归一化强度最大值达 32, 且从图 3(c) 中也可看出该单缝下的增益非常明显. 即使当曝光深度达到 100 nm 时, 归一化强度最大值也接近 5, 增益效果也比较明显. 根据线宽的定义 (即峰值一半时的宽度), 可看出线宽在 80 nm 左右. 因此, 可以利用这种结构来制作线宽为 80 nm 左右的图形.

1.2 狭缝间距的优化

厚金属狭缝阵列共振透射模型见图 6. 在石英上镀一层厚度 $t=1.05 \mu\text{m}$ 的银膜, 然后在银膜上刻蚀出若干条宽度 $w=80 \text{ nm}$ 的空气狭缝, 构成厚金

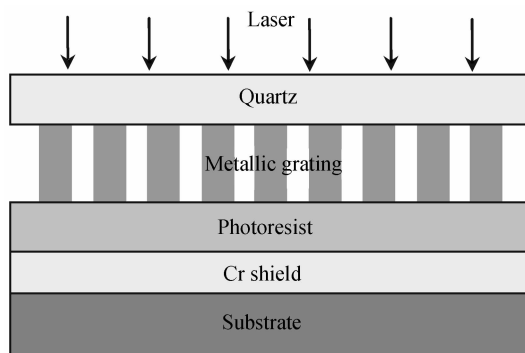


图 6 厚金属光栅共振透射示意图
Fig. 6 Transmission schematic of a thick metallic grating

属光栅; 光刻胶均匀地甩在镀了金属 Cr 的基片上, 在厚金属光栅与光刻胶之间是 8 nm 的匹配液层. 由上节的分析可知, 这样的厚金属狭缝阵列的每一条狭缝都能满足共振透射, 若每一狭缝下的光场互不干扰, 就可在每一狭缝下都制作出线宽为 80 nm 的线条. 只要使狭缝之间的距离满足一定的条件, 还可以制作非周期纳米图形.

在多缝共振透射模拟中发现, 对于 $\lambda = 441.6 \text{ nm}$, $w = 80 \text{ nm}$, 狭缝间距小于 350 nm 的情形, 狭缝下的光场将互相影响, 两缝之间出现新的条纹, 这是由于沿 x 方向传播的表面等离子体激元干涉所引起的负面效应. 图 7 是狭缝间距为 300 nm , 即狭缝光栅的周期 $d = 300 \text{ nm}$ 时, 距离狭缝下表面 $z = 40 \text{ nm}$ 处的归一化强度分布图. 从图中可以看出, 由于狭缝的间距过小, 光刻胶中的光场分布的线宽和周期与光栅不一致, 因此不能够满足光刻图形与光栅结构相一致的要求. 所以, 利用该多缝共振透射来制作图形时必须使两相邻狭缝之间的距离大于 300 nm .

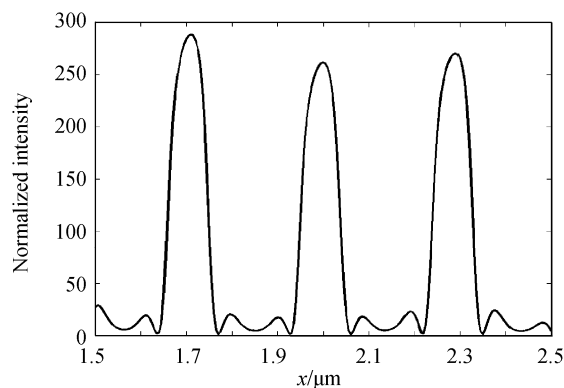


图 7 $d=300 \text{ nm}$ 时, $z=40 \text{ nm}$ 处的光场分布
Fig. 7 The intensity distribution at $z=40 \text{ nm}$ when $d=300 \text{ nm}$

入射光波长为 441.6 nm , 光栅缝宽为 80 nm , 周期 d 分别为 400 nm 、 500 nm 和 800 nm 的模拟结果如图 8. 从中可知, 光栅下方的透射光场分布与光栅结构相一致, 且边缘效应与光场的发散都得到了

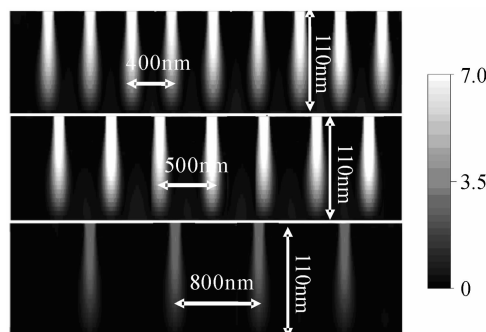


图 8 $d=400 \text{ nm}$ 、 500 nm 和 800 nm 的模拟结果
Fig. 8 Simulation results when $d=400 \text{ nm}$, 500 nm and 800 nm

有效的控制. 图9是周期 d 为400 nm和800 nm, 距离光栅下表面83 nm处的归一化强度图. 同样根据线宽的定义, 两种周期结构光栅在距离狭缝下表面83 nm处的线宽与狭缝宽度80 nm相一致. 从图中周期为400 nm结构的归一化强度最大值接近25, 而周期为800 nm结构的归一化强度最大值为11, 这说明随着金属光栅周期的增加其透过率会逐渐减小.

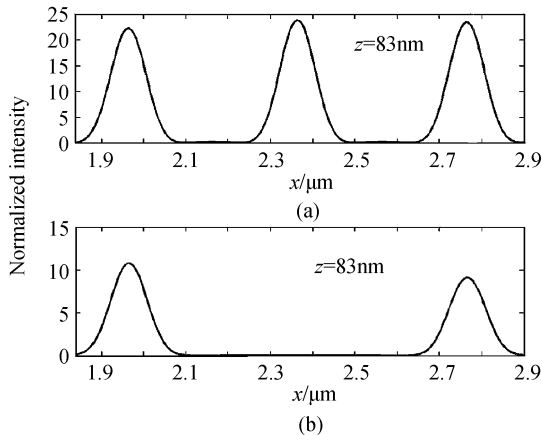


图9 $z=83$ nm 处的光场分布($d=400$ nm 和 800 nm)
Fig. 9 Intensity distribution($d=400$ nm and 800 nm)

从周期光栅的模拟结果可知, 当狭缝间距超过一定距离, 且金属光栅的厚度与狭缝宽度达到共振匹配条件时, 可在光刻胶中得到理想的周期图形. 下面将讨论非周期条件下光刻胶中的光场分布情况.

1.3 非周期光栅的共振透射

图10(a)是狭缝宽度均为80 nm, 缝间距为

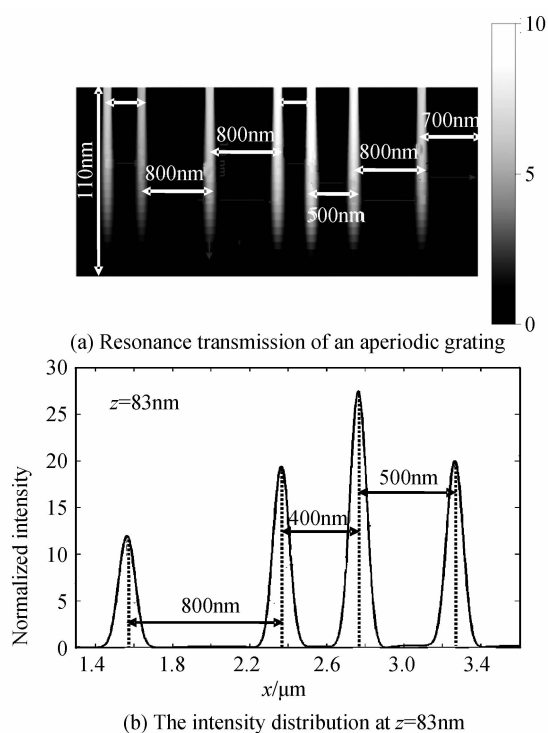


图10 非周期光栅的透射光场分布
Fig. 10 The transmitted field of aperiodic grating

400 nm, 500 nm, 700 nm 和 800 nm 相间的非周期光栅的共振透射模拟结果. 图中显示各缝之间无相互干扰, 是在各缝下产生相对应的透射, 这是由于当金属的厚度与空气缝宽满足了共振透射时, 每个狭缝只有相应模态的电场才能够通过. 图10(b)是距非周期光栅下表面83 nm处的归一化强度分布, 可以看到不同间距的狭缝都可以清楚地分辨出来. 图10表明, 这种多缝共振透射结构能够很好的实现非周期高分辨条纹的要求. 若将该结构与空间光调制器(Spatial Light Modulators, SLM)相结合, 利用SLM获得SPPs光刻所需的入射光波场, 可以实现某些结构的非周期纳米图形光刻.

2 结论

本文提出了一种基于厚金属狭缝阵列的SPPs光刻模型, 详细研究了SPPs在厚金属狭缝中的传输特性和共振模式. 通过优化金属膜厚度、匹配介质层和狭缝阵列的结构参量可在光刻胶中获得较高分辨率和较大曝光深度的光场分布. 将厚金属狭缝阵列与SLM相结合, 可以实现非周期纳米图形光刻, 为探索新的纳米激光直写技术和纳米图形加工提供了一条新途径.

参考文献

- [1] SHI S, ZHANG Z Y, HE M Y, *et al.* Analysis of surface-plasmon-polaritons-assisted interference imaging by using silver film with rough surface[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10685-10693.
- [2] HE M Y, ZHANG Z Y, SHI S, *et al.* A practical nanofabrication method: surface plasmon polaritons interference lithography based on backside-exposure technique [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 15975-15980.
- [3] WANG J Q, LIANG H M, NIU X Y, *et al.* Enhancing exposure depth for surface-plasmon polaritons interference nanolithography by waveguide modulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(1): 014308-1-3.
- [4] NIU X Y, QI Y M, WANG J Q, *et al.* Approach of enhancing exposure depth for evanescent wave interference lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, **87**(5-8): 1168-1171.
- [5] BETHE H A. Theory of diffraction by small holes [J]. *Physical Review*, 1944, **66**(7-8): 163-182.
- [6] GRUPP D E, LEZEC H J, EBBESEN T W, *et al.* Crucial role of metal surface in enhanced transmission through subwavelength apertures[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(11): 1569-1571.
- [7] CAO Q, LALANCE P. Negative role of surface plasmons in the transmission of metallic grating with very narrow slits[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(5): 056403-1-4.
- [8] DEGRON A, LEZEC H J, YAMAMOTO N. Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal[J]. *Optics Communications*, 2004, **239**(1-3): 61-66.
- [9] TAN W C, PREIST T W, SAMBLES R J. Resonant tunneling of light through thin metal films via strongly localized surface plasmons[J]. *Physical Review B*, 2000, **62**

- (16):11134-11138.
- [10] MARTIN M L, GARCIA V F J, LEZEC H J, *et al.* Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86** (6): 1114-1117.
- [11] GARCIA N, NIETO V M. Theory of electromagnetic wave transmission through metallic gratings of subwavelength slits [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, **9**(5):490.

Surface Plasmon Polaritons Lithography Based on Thick Metallic Slit Arrays

XIAO Xiao¹, XIAO Zhi-gang¹, XU De-fu¹, DENG Chi¹, LIU Xiao-yun²

(1 *College of Physics and Electronic Engineering, Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614004, China*)

(2 *Institute of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

Abstract: A surface plasmon polaritons lithography model was presented based on thick metallic slit arrays to fabricate aperiodic nanostructures. The excitation of surface plasmon polaritons, model selection in thick metallic slit arrays and the intensity distribution in photoresist were studied carefully with finite-difference time-domain method. The results show that the diffusion of surface plasmon polaritons on slits can be inhibited, and the exposure depth is enhanced by optimizing the slits structure and matching medium lay. So periodic and aperiodic nanostructures are able to be produced by this technology. This may be helpful to fabricating nanostructures by laser direct writing technology.

Key words: Lithography; Thick metallic slits; Finite-Difference Time-Domain(FDTD); Surface Plasmon Polaritons(SPP)