

高曝光深度的表面等离子激元光刻直写头设计分析

孙旭飞^{1,2}, 岳 阳¹, 杜惊雷¹, 张志友¹

(1. 四川大学 物理科学与技术学院, 四川 成都 610064; 2. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘要: 设计了一种新的具有高曝光深度的纳米光刻直写头, 它由用薄银层制得的 V 型孔、匹配液和有机固化层组成。V 型孔被用来聚焦入射光束于 200 nm 的光斑中。直写头通过匹配液在光刻胶上移动, 而匹配液与石英基底相结合, 构成了表面等离子激元(SPP)谐振腔, 由传播波及反射波形成的驻波的传播深度将达到几百纳米。模拟证明了新的直写头可通过 F-P 效应及 SPP 多次激发增强方式实现在光刻胶中深度曝光, 当直写头与光刻胶的间距大于 90 nm 时, 不仅可避免光刻胶和直写头的相对磨损, 也有助于降低机械移动工艺的要求, 因此在纳米掩模板和纳米光子器件的制备上有较高实际应用的可能性。

关键词: SPP 直写光刻; 直写头; SPP 谐振腔

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3254-05

Design and analysis of surface plasmon lithography direct-writing head for high exposure depth

Sun Xufei^{1,2}, Yue Yang¹, Du Jinglei¹, Zhang Zhiyou¹

(1. School of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A new direct writing device was designed. It consisted of a V-shaped hole made by Ag, the matching fluid and the organic layer for high exposure depth. 200 nm light spots were obtained by V-shaped hole which focused the incident light beams. Direct-writing head moved onto the photoresist through the matching fluid, and the matching fluid combined with the quartz substrate constructed a surface plasmon polariton (SPP) coupling cavity, which amplified the intensity of the light field in it by SPP effect and resonance. The transmission depth of the standing wave formed by forward and reflected light reached hundreds of nanometers. Simulation results show that using the new direct-write head can achieve deep exposure depth in the resist by F-P effect and SPP effect (multiple excitations). When the distance between the direct-write head and resist is greater than 90 nm, it can not only avoid the relative wear between the direct-write head and resist, but also help reduce the requirement of the mechanical movement process. Therefore it has high application potential in fabrication of nano-mask and nanophotonic structures.

Key words: SPP direct-writing lithography; direct-writing head; SPP coupling cavity

收稿日期: 2013-03-06; 修订日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61078047, 11305111)

作者简介: 孙旭飞(1990-), 男, 博士生, 主要从事微纳加工技术和微纳光子学方面的研究。Email: sxfl9900203@126.com

导师简介: 杜惊雷(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳加工技术和微纳光子学方面的研究。Email: Dujl@scu.edu.cn

0 引言

无掩模光刻技术(譬如电子束直写技术)在纳米加工中有着重要的应用,但是由于昂贵的成本和较低的产出率,使其在实际应用中面临许多困难^[1-3]。2009年,Y. Kim, S. Kim 等人通过结合波带片阵列光刻(ZPAL)和表面等离子光刻的优点,发展了一种局域表面等离子(LSPP)并行直写技术^[4-5]。将 LSPP 并行直写技术用于制作掩模,不仅具有低成本省时的优点,而且还具有很高的分辨率。然而这种技术面临着一个显而易见的难点,那就是当需要的特征尺寸小于 100 nm,由于其自身的传播深度的限制对扫描曝光技术造成了一个很大的障碍。为了克服这个问题,笔者提出了一种新的非接触式高曝光深度的表面等离子光刻的方法^[6]。该方法能够有效地控制 LSPP 聚焦仪器和基底之间的距离^[5],从而避免在扫描过程中,光刻胶被破坏或者无法曝光。在文中,笔者将对该系统核心元件——直写头,作出新的设计和结构优化,并就其对聚焦效果和成像质量的影响作出分析和讨论,为直写光刻机的制备奠定基础。

1 纳米级无掩模光学光刻直写头的设计

直写头的设计如图 1 所示。它是由用特殊方法在薄银层上制得的 V 型孔和折射率与石英很相近的匹配液组成。V 型孔作为 SPP 的激发装置,它的作用在整个结构中非常重要。V 型孔的材料和结构(包括它的高度、入射与出射孔径大小等)都会对光束的聚焦造成一定影响。由于银(Ag)具有较高的 LSPP 增强特性,因此,选择 Ag 为 V 型孔制备材料。由于匹配液与石英基底折射率很相近,两者相结合,构成了 SPP 谐振腔,增强了光刻胶中光场的强度。位于 V 型孔与光刻胶之间的匹配液还可防止直写头移动过程中对器件或光刻胶表面造成损伤。该设计方案有两个优点。(1) V 型孔顶端有一个较大的孔径,它可以比其他结构,譬如小孔^[7],耦合进更多的光能,所以,它会有较高的聚焦效率。(2) 由于 V 型孔具有较大的深度,它的作用就像 F-P 谐振腔一样,可以增强输出光束的准直度。当入射光波照射到 V 型孔后,产生的聚焦光斑在匹配液与石英基底之间进行耦合^[8],这就在光刻胶中形成了一个准 F-P 谐振腔。在这个

谐振腔中,一个具有高强度和有限特征尺寸的干涉光场就被 F-P 效应和 SPP 效应多重激发出来。另外,为了更好地保护光刻胶,曝光前可在光刻胶上方涂覆一层折射率与石英基底很相近的保护层。

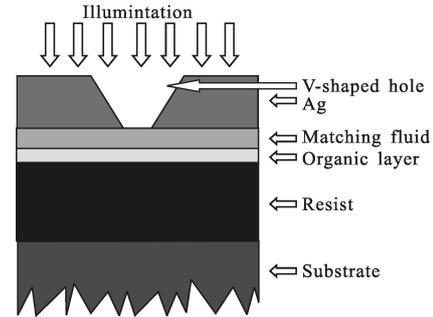


图 1 光照射薄银层上的 V 型孔,经匹配液(及有机固化层)在光刻胶上直写曝光

Fig.1 Light illuminate on the V-shaped hole made by silver, matching fluid(and organic cured layer), and then exposure on the photoresist

入射到 V 型孔的 TM 偏振光,通过金属表面等离子激元和光波的相互作用,选择合适的模式进入孔内传播。设孔内电磁模的横向波矢为 τ ,纵向波矢为 β ,出射端口处纳米孔内的等效折射率为 n_{exit} ,则电磁波应满足下面的色散方程为:

$$\tau^2 + \beta^2 = n_{\text{exit}}^2 k_0^2 \quad (1)$$

当出射端口处激发的 SPP 波矢 k_{spp} 满足 $k_{\text{spp}} = \tau$ 时,此电磁模式在 V 型金属纳米孔的出射口将激发出 SPP,将能量局域在出射口金属表面,这种局域 SPP 具有非常高的横向分辨率和场强增强特性^[9],但其穿透深度也受到极大的限制,使得曝光深度较浅,严重制约了其在光刻领域的应用。只有将此局域能量重新转化为高分辨、高准直性的传输波才能实现深曝光的纳米图形制作。将 SPP 转化为传输波需满足下面的动量匹配条件:

$$k_{\text{spp}} = k_x \pm \Delta k = k_x \pm p \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

式中: k_x 为光波在出射介质中的横向波矢; Δk 为纳米孔出口的几何结构引起的附加波矢,可用出射口有效散射几何尺寸 Λ 的倒格矢来表示(即 $\Delta k = p \frac{2\pi}{\Lambda}$)。

于是,对于垂直出射的情况, $k_x = 0$,由公式(1)、(2)可得到:

$$\left(p \frac{2\pi}{\Lambda}\right)^2 + \beta^2 = n_{\text{exit}}^2 k_0^2 \quad (3)$$

当 V 型金属纳米孔的结构参数满足公式(3)时,

可在出射介质中获得高度准直的传输光。当 $\beta=0, p=1$ 时, 出射光束具有最高分辨率, 为:

$$\Delta=2\pi/k_0\sqrt{n_{\text{exit}}}$$
 (4)

2 直写头各部分对聚焦效果的影响

初始数据: 基底为石英, 其折射率为 1.47; 光刻胶的折射率为 1.61, 厚度为 480 nm; 匹配液的折射率为 1.47, 厚度为 80 nm; V 型孔下端开口为 80 nm, V 型孔上端开口为 800 nm, V 型孔高度为 120 nm, V 型孔材质为 Ag; 曝光波长为 441 nm。

2.1 V 型孔结构参数的影响

2.1.1 V 型孔高度的影响

模拟的高度从 20nm 变化到 150nm, 每 10nm 模拟一次。模拟结果如图 2 所示, 当光波照射到 V 型孔后, 随着 V 型孔高度减小, 出射光强增大, 准直性降低, 当 V 型孔高度减小到 20nm 时, 出射光束末端发散性

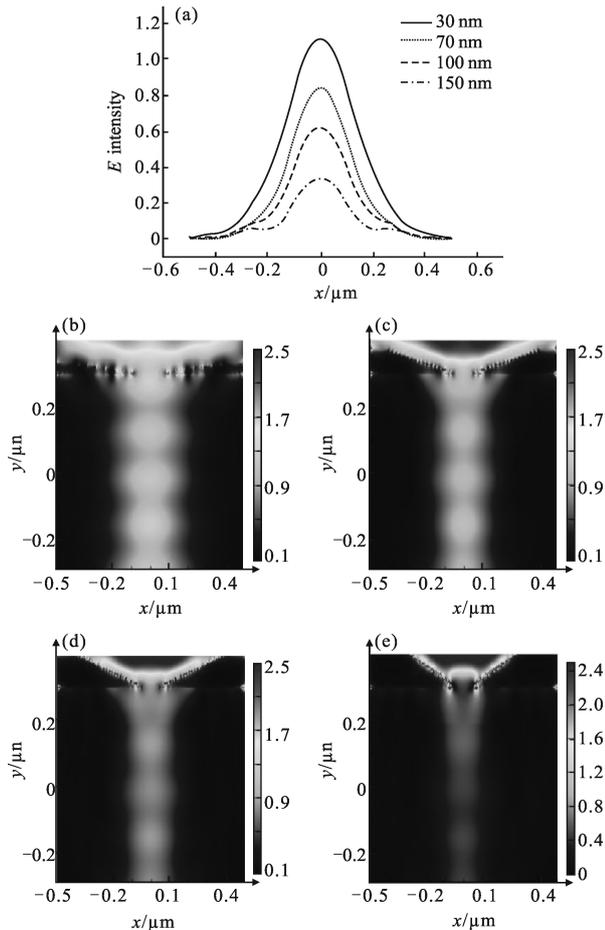


图 2 不同高度 V 型孔的电场强度分布曲线以及剖面电场分布
Fig.2 Electric field intensity distribution curves and cross section's electric field intensity distribution of V-shaped hole's cross section with different heights

极强。笔者认为这是由于随着 V 型孔高度的减小, 整个银层透光性增强, 最终导致出射光束发散性增强。图中, (a)为光波照射到不同高度(30 nm, 70 nm, 100 nm, 150 nm)的 V 型孔后, 进入光刻胶 480 nm 处所对应的电场强度分布曲线; (b)为 V 型孔高度 30 nm; (c)为 V 型孔高度 70 nm; (d)为 V 型孔高度 100 nm; (e)为 V 型孔高度 150 nm。

2.1.2 V 型孔上端开口大小的影响

入射孔径大小从 400 nm 变化到 1 μm。模拟结果如图 3 所示, 当入射孔径较小时, 出射光束强度较弱, 随着入射孔径的增大, 出射光束强度有明显增强

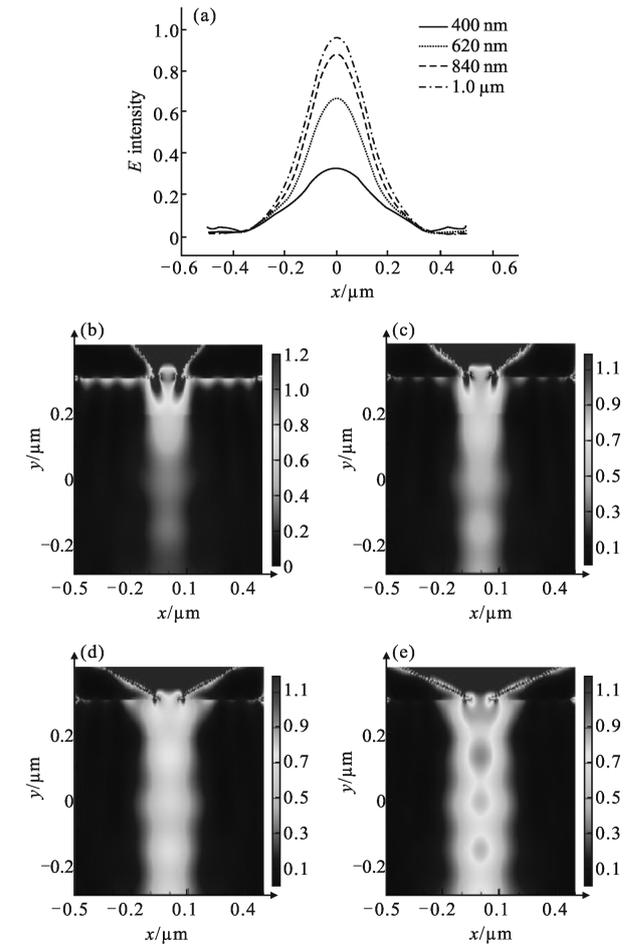


图 3 上端开口不同的 V 型孔的电场强度分布曲线以及剖面电场分布
Fig.3 Electric field intensity distribution curves and electric field intensity distribution of V-shaped hole's cross section with different entrance apertures

的趋势, 但是光强峰值所对应的半高全宽(FWHM)也随之增大。综合分析, 入射孔径大小在 680 nm 到 740 nm 之间为宜, 此时在进入光刻胶 480 nm 处,

FWHM 小于 250 nm。图中,(a)为光波照射到上端开口大小不同 (400 nm, 620 nm, 840 nm, 1 μm) 的 V 型孔后,进入光刻胶 480 nm 处所对应的电场强度分布曲线;(b)为 V 型孔上端开口 400 nm;(c)为 V 型孔上端开口 620 nm;(d)为 V 型孔上端开口 840 nm;(e)为 V 型孔上端开口 1 μm。

2.1.3 V 型孔下端开口大小的影响

模拟的 V 型孔下端开口的直径从 20nm 变化到 120 nm,每 20 nm 模拟一次。模拟结果如图 4 所示,随着出射孔径的增大,出射光强度有所增加,光强峰值所对应的 FWHM 也随之增大。当出射孔径为 120 nm 时,进入光刻胶 480 nm 处 FWHM 为 260 nm。

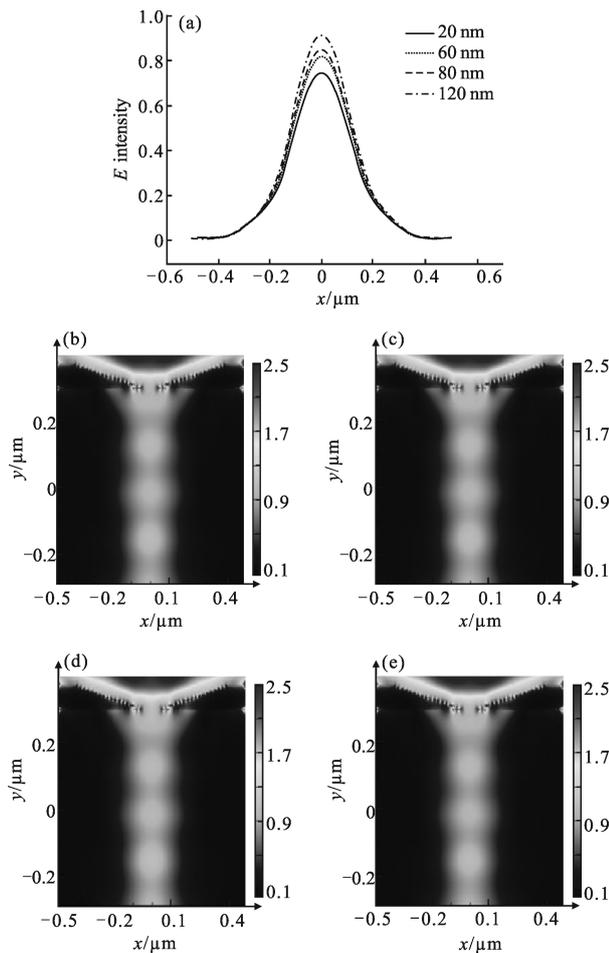


图 4 上端开口不同的 V 型孔的电场强度分布曲线以及剖面电场分布

Fig.4 Electric field intensity distribution curves and electric field intensity distribution of V-shaped hole's cross section with different exit apertures

通过对 V 型孔结构参量的模拟可以看出,出、入

射孔径的大小并不会影响 SPP 的激发,但对出射光束强度的大小以及光强峰值所对应的 FWHM 都有较大影响。而对于 V 型孔高度的选择,仅仅在高度极低时入射光会以倏逝波的形式穿透银层,增加近场光场的强度,并随着传播距离的增加不断衰减。另外,模拟结果显示,在出射光强峰值所对应的 FWHM 小于 250 nm 的情况下,出射光束在光刻胶中的传播深度接近 500 nm。图中,(a)为光波照射到下端开口大小不同 (20 nm, 60 nm, 80 nm, 120 nm) 的 V 型孔后,进入光刻胶 480 nm 处所对应的电场强度分布曲线;(b)为 V 型孔下端开口 20 nm;(c)为 V 型孔下端开口 60 nm;(d)为 V 型孔下端开口 80 nm;(e)为 V 型孔下端开口 120 nm。

2.2 匹配液及有机固化层的影响

2.2.1 匹配液厚度的影响

由于匹配液的折射率与石英基底相同,为 1.47。因此,可选择蓖麻油等为匹配液材料。

模拟的匹配液厚度从 30 nm 变化到 140 nm,模拟结果如图 5 所示,匹配液厚度较小时,光束收敛性好,准直度高。但是在整个厚度变化范围内,光束聚焦效果的变化并不十分明显。由于介质的存在总会导致光能的损耗,所以,实际运用中,在保证直写头不被磨损的前提下应使匹配液厚度最小。最后,考虑到微细加工技术的影响,匹配液厚度在 60~90 nm 为宜。

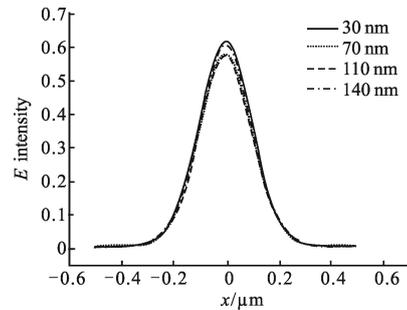


图 5 匹配液厚度不同时,进入光刻胶 480 nm 处所对应的电场强度分布曲线

Fig.5 Electric field intensity distribution curves of 480 nm depth in the resist when the matching fluid has different thickness

2.2.2 有机固化层厚度的影响

有机固化层的加入对光刻胶起到了保护作用。由于该保护层需同时兼备折射率与石英相同以及固化的特性,因此,可选择有机玻璃(PMMA)为该保护层材料。

模拟时,有机固化层厚度从 10 nm 变化到 100 nm。模拟结果如图 6 所示,当厚度在 10 nm 时,出射光场强度最大,随着保护层厚度的增加,出射光场逐渐减弱,且 FWHM 有所增加。

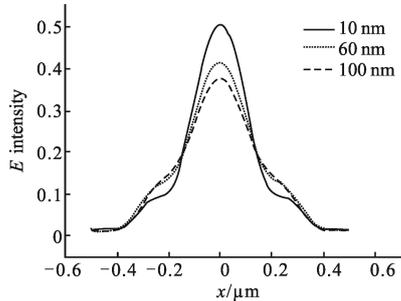


图 6 有机固化层厚度不同时,进入光刻胶 480 nm 处所对应的电场强度分布曲线

Fig.6 Electric field intensity distribution curves of 480 nm depth in the resist when the organic layer has different thickness

图 7 为直写头选取最佳参数下光刻胶中光场分布以及进入光刻胶 400 μm 处电场强度分布曲线。图中,(a)为直写头选取最佳参数下光刻胶中电场分布;(b)为进入光刻胶 400 μm 处,电场强度分布曲线。

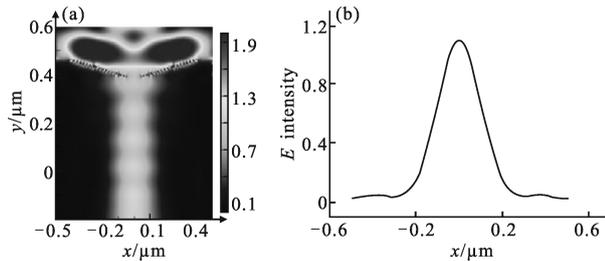


图 7 最佳参数下光刻胶中电场分布及电场分布曲线图

Fig.7 Electric field intensity distribution and electric field intensity distribution curve in the resist when selecting the best parameters of direct-writing head

3 结论

文中设计了一种全新的无掩膜表面等离子激光光刻直写头,通过对直写头各个部分的模拟计算、数据分析以及参数选择,最后选取各个部分的最佳参数,整合数据如下:基底为石英,其折射率为 1.47;光刻胶厚度为 400 nm;匹配液为蓖麻油,其折射率为 1.47,厚度为 60 nm(有机固化层为 PMMA,厚度为

30 nm);V 型孔高度为 70 nm,上端开口为 800 nm,下端开口为 80 nm,V 型孔材质为 Ag;曝光波长为 365nm。模拟结果如图 7 所示。模拟显示采用该方法可获得传播光场深度超过 500 nm,光强峰值所对应的 FWHM 小于 200 nm。模拟证明了新的直写头可通过 F-P 效应及 SPP 多次激发增强方式实现了光刻胶中深度曝光,且值得一提的是,直写头与光刻胶的间距大于 90 nm,不仅可避免光刻胶和直写头的相对磨损,也有助于降低机械移动工艺的要求,因此在纳米掩模板和纳米光子器件的制备上有较高实际应用的可能性。

参考文献:

- [1] Piner R D, Zhu J, Xu F, et al. "Dip-Pen" nanolithography [J]. *Science*, 1999, 283: 661-663.
- [2] Pease R F. Maskless lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2005, 78-79: 381-392.
- [3] Guo X W, Du J L, Guo Y K, et al. Large-area surface-plasmon polariton interference lithography [J]. *Optics Letters*, 2006, 31: 18.
- [4] Kim Y, Kim S, Jung H, et al. Plasmonic nano lithography with a high scan speed contact probe [J]. *Optics Express*, 2009, 22(17): 19476-19485.
- [5] Srituravanich W, Pan L, Wang Y, et al. Flying plasmonic lens in the near field for high-speed nanolithography [J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3: 733-737.
- [6] Shi S, Zhang Z, Du J, et al. Surface-plasmon-polaritons-assisted nanolithography with dual-wavelength illumination for high exposure depth [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 247-249.
- [7] Gramotnev D K, Pile D F P, Vogel M W, et al. Local electric field enhancement during nanofocusing of plasmons by a tapered gap [J]. *Physical Review*, 2007, 75: 035431.
- [8] Mehrotra P, Holzwarth C W, Blaikie R J. Solid-immersion Lloyd's mirror as a testbed for plasmon-enhanced ultrahigh numerical aperture lithography [C]//SPIE, 2011, 7970, DOI: 10.1117/12.879121.
- [9] Gramotnev D K, Pile D F P, Vogel M W, et al. Local electric field enhancement during nanofocusing of plasmons by a tapered gap [J]. *Phys Rev B*, 2007, 75: 035431.