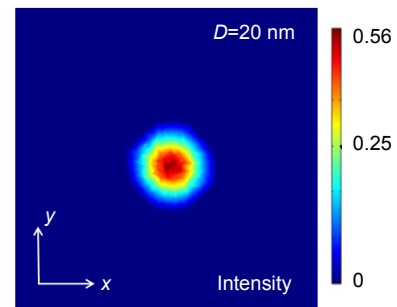




双 Bowtie 纳米光刻结构的聚焦特性研究

郑杰¹, 刘贤超^{1,2}, 黄跃容¹, 刘昀玥¹,
陈卫东¹, 李玲^{1*}

¹四川师范大学物理与电子工程学院, 成都 610101; ²电子科技大学光电信息学院, 成都 610054



摘要: Bowtie 孔径结构已被广泛用于纳米直写光刻领域来获得超衍射聚焦光斑。然而, 利用该结构获得的超衍射聚焦光斑呈椭圆形, 影响了 Bowtie 结构的进一步应用。为了获得超衍射且圆形对称的聚焦光斑, 本文提出了双 Bowtie 新型纳米光刻结构并利用 Comsol 软件仿真模拟了该结构的焦斑对称特性和电场增强特性。结果表明利用双 Bowtie 结构获得了圆形对称焦斑, 并且出射面的电场强度得到了增强, 是入射面电场强度的 22 倍。本文进一步将双 Bowtie 结构与金属/介质/金属结构相结合, 使得局域增强后的透射光的传输距离(工作距)得到了显著延长。

关键词: Bowtie 孔径结构; 纳米直写光刻; 电场增强特性; 金属/介质/金属结构

中图分类号: TN305.7; O436

文献标志码: A

The investigation of focusing characteristic based on double Bowtie nano-lithography structure

Jie Zheng¹, Xianchao Liu^{1,2}, Yuerong Huang¹, Yunyue Liu¹, Weidong Chen¹ and Ling Li^{1*}

¹College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; ²School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

Abstract: Bowtie aperture has been widely applied in the realm of nanometer direct-writing lithography for obtaining focusing spots beyond the diffraction limit. However, the obtained spot is elliptic-shape for the Bowtie case, which impacts the applications of the Bowtie structure. Double Bowtie aperture, as a novel nano-lithography structure, is proposed to attain circle-symmetric focusing spots beyond diffraction limit. The results demonstrate that circle-symmetry spots can be obtained, and the electric field intensity of transmission light is 22 times of that of incidence. By combining the double Bowtie structure with metal-insulator-metal, the propagation length of the enhanced transmission light is obviously prolonged.

Keywords: Bowtie aperture structure; nanometer direct-writing lithography; electricity enhanced characteristic; metal-insulator-metal structure

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.02.011

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(2): 216–220

1 引言

近年来, 随着表面等离激元(surface plasmons, SPs)

研究和应用的快速发展, 基于 SPs 的近场直写纳米光刻技术在突破衍射极限上显现出极大的优势。在 SPs 纳米直写光刻系统中, 高分辨率的掩模起到了关键作用, 它直接决定了纳米直写光刻图形的质量及其分辨率。1928 年, Synge^[1]首次提出利用亚波长孔径结构来

收稿日期: 2016-10-05; 收到修改稿日期: 2016-12-19

*E-mail: lingli70@aliyun.com

突破衍射极限获得超衍射光刻图形。对于传统开孔(圆形或方形)结构,透射面的光强仅为入射光强的十分之一甚至更低。为了提高光刻图形的分辨率以及获得更高的透射场强,C型^[2]、T型^[3]、I型^[4]以及Bowtie型^[5]等光刻结构相继被提出。在提升耦合效率以及分辨率上,Bowtie型结构相比于其它结构具有明显的优势^[6-7]。2006年,Xu Xianfan等人^[8]发现在紫外波段以及可见光波段Bowtie结构对入射光也具有透射增强的作用,并进一步证实了Bowtie结构的透射增强作用可以应用到纳米直写光刻中。2012年,韩国延世大学^[9]成功将Bowtie结构作为接触探针应用到纳米直写光刻技术中,得到了线宽为22 nm、曝光深度为2 nm的光刻图形。2015年,罗先刚研究组^[10-12]提出了将Bowtie型结构与共振成像光刻(金属/介质/金属(MIM))结构相结合,在实验中获得了半高全宽(full width at half maximum, FWHM)为47 nm,曝光深度为25 nm的焦斑图形,大大增加了焦斑图形的深度。但由于经过Bowtie结构获得的聚焦光斑呈椭圆形,严重影响了该孔径结构在纳米直写光刻技术中的进一步应用。

为了得到圆形对称的聚焦光斑,本文在Bowtie光刻结构的基础上提出了一种新型纳米光刻结构,即双Bowtie结构,并且仿真模拟了双Bowtie结构的焦斑对称特性以及电场增强特性。但是,通过该结构的透射光仅在小孔的下表面得到局域增强,随工作距的增加呈指数形式衰减,严格限制了该结构下的工作距范围。本文进一步将双Bowtie结构与共振成像(金属/介质/金属(MIM))结构相结合,在得到了圆形对称焦斑的同时延长了工作距,从而推进了Bowtie孔径结构在纳米直写光刻技术中的进一步应用。

2 双 Bowtie 纳米光刻结构及聚焦特性

2.1 双 Bowtie 纳米光刻结构

在纳米光刻结构中,曲率半径较小的地方电荷密度更高,能够形成更强的局域表面电磁场分布^[13]。单个Bowtie孔径结构是由两个三角形镂空区域和一个方形镂空区域组成(如图1(a)所示)。在该结构下,垂直于小孔间隙处的曲率半径较小,自由电子在入射光的激励下聚集在垂直于小孔的间隙处,电场强度仅在垂直于小孔间隙上得到局域增强。因此在单个Bowtie结构下所获得的聚焦光斑呈椭圆形。为了得到圆形对称的聚焦光斑,本文在垂直于单个Bowtie小孔间隙上再挖出两个三角形镂空区域,构成双Bowtie新型纳米光刻结构(如图1(b))。

2.2 双 Bowtie 纳米光刻结构的焦斑对称特性

本文使用COMSOL Multiphysics仿真软件中的射频(radio frequency, RF)模块,对双Bowtie结构的焦斑对称特性和电场增强特性进行研究。基于图1所示的三维模型,首先对单个Bowtie和双Bowtie两种结构下聚焦光斑对称特性进行仿真对比。由于Al具有较小的趋附深度和较高的反射率,所以选取Al作为掩模材料。从结构特性差异以及获得超衍射聚焦光斑两方面综合考虑,对单个Bowtie结构和双Bowtie结构分别采用入射光波长为365 nm线偏振光和圆偏振光作为激励光源。在该波段下,掩模材料Al的介电常数为 $\epsilon_{Al} = -19.4 + i3.6$ ^[14]。图1中所标注的外围轮廓尺寸 L 、三角形镂空尺寸 a 、小孔间隙 g 、以及掩模层厚度 t_M 的参数取值见表1。仿真结果如图2所示。

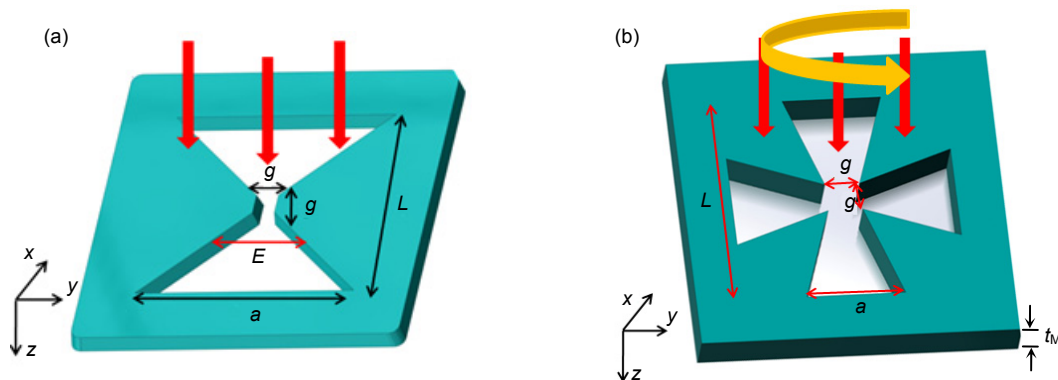


图1 纳米光刻结构示意图。(a) Bowtie型结构。(b) 双Bowtie结构。

Fig.1 Nano-lithography structure diagram. (a) Bowtie structure. (b) Double Bowtie structure.

表 1 双 Bowtie 结构参数列表.
Table 1 Parameters of double Bowtie structure.

Parameters	Parameter size/nm
L	200
a	60
g	30
t_M	30

选取两种光刻结构下,距离出射面为 20 nm 的电场强度及其焦斑形貌进行对比。如图 2(a),在 Bowtie 光刻结构下,距离出射面 20 nm 处的电场依旧得到了 2 倍增强,但是所得到的焦斑形貌呈椭圆形。这是因为,当线偏振入射光垂直照射到单个 Bowtie 金属掩模材料上时,自由电子堆积在 y 方向的两个边脊处,形成共振激发的局域表面等离子激元(localized surface

plasmons, LSPs)与避雷针效应协同作用使透射光强度仅在垂直于小孔间隙上得到局域增强,因此聚焦光斑只在该方向上得到了压缩。而在双 Bowtie 光刻结构下,虽然当距离出射面为 20 nm 时,电场的增强特性几乎消失,但是在该结构下所获得的聚焦光斑呈圆形对称。这是由于双 Bowtie 光刻结构的对称特性,电子聚集在小孔间隙的四个尖端处,激发出 LSPs 形成双偶极子振荡,使电场在 x 、 y 方向上都得到了局域限制,获得圆形对称聚焦光斑。仿真结果表明,双 Bowtie 结构在获得对称焦斑上具有很大的优势。接下来将研究双 Bowtie 光刻结构下电场强度随工作距的变化。

2.3 双 Bowtie 纳米光刻结构的电场增强特性

双 Bowtie 结构采用 365 nm 的圆偏振光作为激励光源,其它参数与 2.2 中的参数取值一致,仿真结果如图 3 所示。从图 3(a)可以明显看出,随着工作距的

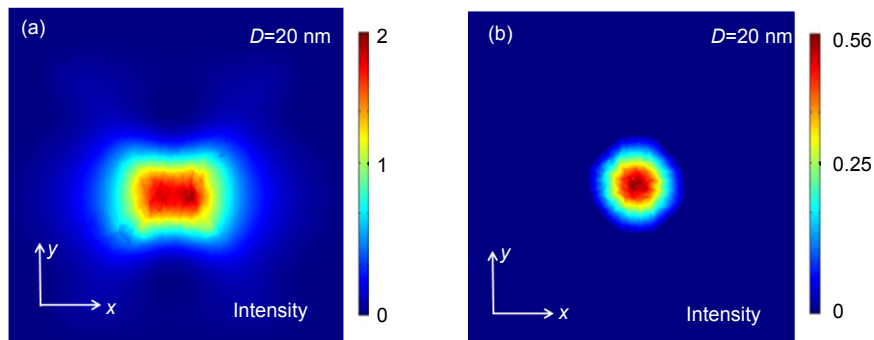


图 2 纳米光刻结构焦斑特性对比图. (a) Bowtie 结构的焦斑特性. (b) 双 Bowtie 结构的焦斑特性.
Fig. 2 Contrast diagram of focused spots in (a) Bowtie structure and (b) double Bowtie structure.

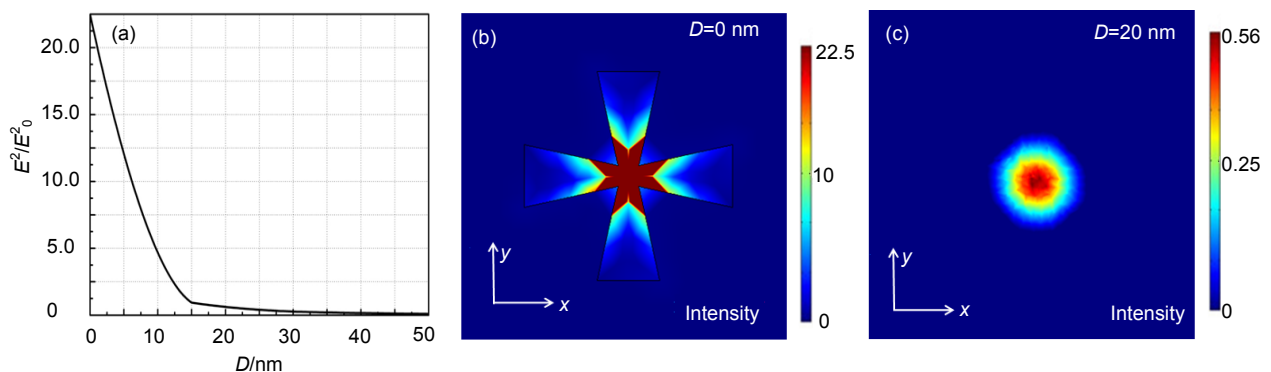


图 3 双 Bowtie 结构电场增强特性模拟结果. (a) E^2/E_0^2 随工作距(D)的变化. (b) $D=0$ 处的电场强度分布. (c) $D=20$ nm 处的电场强度分布.

Fig. 3 Characteristic of electric enhancement in double Bowtie structure with different distances. (a) The result of E^2/E_0^2 with working distance (b) $D=0$ nm, (c) $D=20$ nm.

增加,得到的光斑发生了急剧弥散,透射光强以指数形式衰减。在小孔的下表面($D=0$ nm),通过小孔间隙局域增强的透射光得到了极大增强,达到入射光强度的 22 倍。但是,当 D 为 10 nm 时,透射光增强不到 5 倍;当 D 达到 20 nm 时,双 Bowtie 小孔对光的增强特性基本消失。图 3(b)和图 3(c)分别为 $D=0$ nm 以及 $D=20$ nm 处的电场强度分布情况,从图中可以更直观地观察到电场的增强特性随着工作距的增加而急剧衰减。这一特性导致了工作距难控制的问题,从而严重影响了双 Bowtie 结构的有效应用。接下来亟待解决的问题就是,在获得圆形对称焦斑的基础上如何延长透射光的传输距离(工作距)。

3 双 Bowtie-MIM 纳米光刻结构对工作距的调控特性

对于 P 偏振光,其透射场的强度在垂直金属/介质的界面上呈指数形式衰减,但平行界面方向则存在着周期性的电磁波,呈现倏逝波的特性。倏逝波的存在将对入射光波的能量耦合到金属/介质交界面进而形成等离激元波起着至关重要的作用^[13]。银作为常用的波导结构材料能够增强放大并且传输倏逝波,可有效延长透射光的传输路径(工作距)^[15],因此本文将双 Bowtie 结构与银/光刻胶/银(Ag/Pr/Ag)结构相结合,形成新型的复合光刻结构,即双 Bowtie-MIM 纳米光刻结构。

Comsol 软件中的条件设置及其双 Bowtie 结构参数与 2.3 中的参数取值相同;而顶层银、光刻胶以及底层银的厚度分别取为 20 nm、30 nm 和 50 nm;在 365 nm 波段下,材料 Ag 和光刻胶的介电常数分别为:

$\varepsilon_{\text{Ag}} = -2.4 + i0.25$, $\varepsilon_{\text{Pr}} = 2.59$ ^[14]。图 4(a)和图 4(b)分别展示了双 Bowtie 结构在有和没有结合 MIM(Ag/Pr/Ag) 结构两种情况下的记录介质中(光刻胶)的总电场分布情况。

从图 4(a)可以明显地观察到记录介质中的电场形貌。相对于双 Bowtie-MIM 结构,双 Bowtie 结构下的记录介质中没有明显的干涉图形(如图 4(b))。这是由于银对光的传输特性取决于银层的厚度。Ag 在一定厚度范围内主要起到透射作用,经过小孔局域增强的透射光经顶层银耦合进入介质中并且场强得到了增强放大。当 Ag 的厚度大于 30 nm 时,主要起到反射作用,相当于等离子体反射镜;在介质中传输的光经底层银反射补偿被局域在记录介质中,最终形成干涉图形^[15]。由此可见,双 Bowtie 结构与 MIM 结构结合能够有效地延长透射光的传输距离。本文进一步利用 Comsol 软件模拟了该结构下的工作距延长特性,计算结果如图 5 所示。

从仿真结果可知(图 5),仅在工作距(D)变化的情况下(其它具体参数见表 1),当 D 从 0 nm 逐渐增大到 50 nm 时,光刻胶中的电场强度虽然同样呈衰减趋势,但衰减速度明显减慢,当 D 增加到 50 nm 时,光刻胶中的电场强度仍然得到了增强。在双 Bowtie-MIM 结构下,记录介质中的 FWHM 从 45 nm 展宽到 65 nm,FWHM 随工作距的增加展宽不到 1 倍。可见,双 Bowtie-MIM 光刻结构避免了随着 D 的增加 FWHM 急剧增大以及强度急剧减弱所带来的曝光图形深度过浅的问题。该结构将透射光的传输距离延长到了 50 nm,有效地促进了 Bowtie 结构在纳米直写光刻技术中的进一步应用。

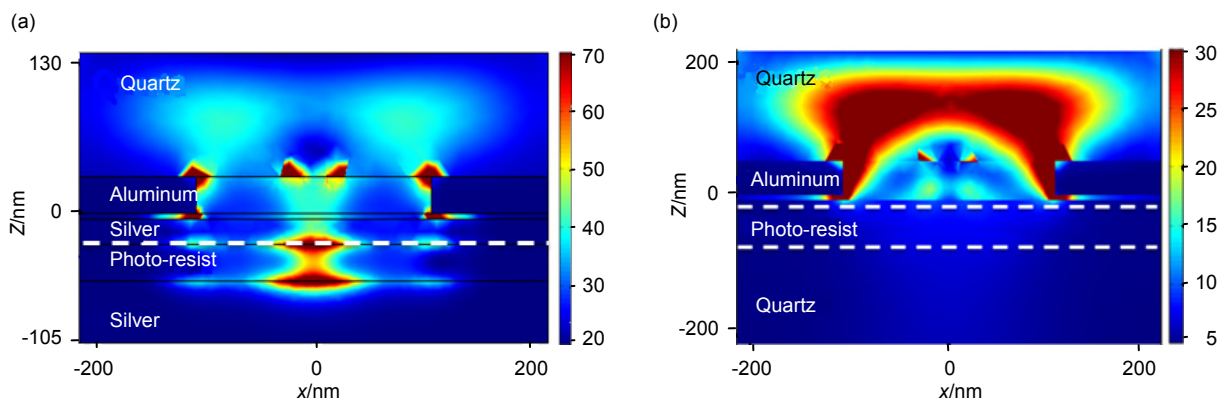


图 4 两种结构下记录介质中的总电场分布。(a) 双 Bowtie+MIM 结构。(b) 双 Bowtie 结构。

Fig. 4 Distribution of total electric field intensity in (a) double Bowtie+Ag/Pr/Ag and (b) double Bowtie structures.

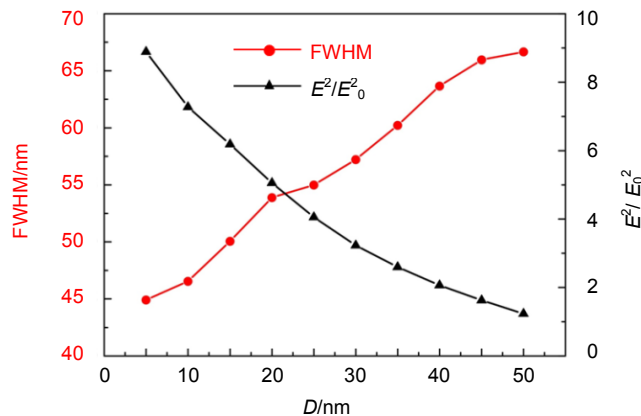


图5 光刻胶中心处的 E^2/E_0^2 和 FWHM 随工作距 (D) 的变化。

Fig. 5 Variation of E^2/E_0^2 and FWHM with the working distance (D) in the photoresist center.

4 结论

本文在 Bowtie 结构的基础上提出了一种新型的纳米光刻结构-双 Bowtie 结构, 并且理论证实了该结构在获得超衍射圆形对称焦斑上具有明显的优势, 从而解决了焦斑不对称的问题。经过双 Bowtie 结构小孔间隙局域增强的透射光在小孔的下表面得到极大增强, 其电场强度达到了入射光的 22 倍。然而, 由于倏逝波的特性, 随着工作距的增加, 透射强度呈指数形式急剧衰减, 带来了工作距控制难的问题。为此, 本文将双 Bowtie 结构与银/光刻胶/银结构相结合, 达到了延长工作距和获得圆形焦斑的目的。该结构有效地将工作距延长到了 50 nm, 进一步促进了 Bowtie 结构在纳米直写光刻技术中的发展和应用。

基金项目

四川省教育厅重点项目(16ZA0047)。

参考文献

- 1 Synge E H. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1928, **6**(35): 356–362.
- 2 Shi Xiaolei, Hesselink Lambertus. Mechanisms for enhancing power throughput from planar nano-apertures for near-field optical data storage[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, **41**(3B): 1632.
- 3 Tanaka K, Ohkubo T, Oumi M, et al. Simulation of simultaneous tracking/data signal detection using novel aperture-mounted surface recording head[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, **41**(3B): 1628.
- 4 Tanaka K, Tanaka M. Simulation of an aperture in the thick metallic screen that gives high intensity and small spot size using surface plasmon polariton[J]. *Journal of Microscopy*, 2003, **210**(3): 294–300.
- 5 Şendur K, Challener W. Near-field radiation of bow-tie antennas and apertures at optical frequencies[J]. *Journal of Microscopy*, 2003, **210**(3): 279–283.
- 6 Wang L, Xu X. Spectral resonance of nanoscale bowtie apertures in visible wavelength[J]. *Applied Physics A*, 2007, **89**(2): 293–297.
- 7 Jin Eric Xuan, Xu Xianfan. Finite-difference time-domain studies on optical transmission through planar nano-apertures in a metal film[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, **43**(1R): 407–417.
- 8 Jin Eric Xuan, Xu Xianfan. Enhanced optical near field from a bowtie aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(15): 153110–153116.
- 9 Kim S, Jung H, Kim Y, et al. Resolution limit in plasmonic lithography for practical applications beyond 2x-nm half pitch[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(44): OP337–OP344.
- 10 Wang Yaohui, Yao Na, Zhang Wei, et al. Forming sub-32-nm high-aspect plasmonic spot via bowtie aperture combined with metal-insulator-metal scheme[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(6): 1607–1613.
- 11 王耀辉. 局域表面等离子体纳米直写光刻原理与方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2015.
- 12 Wang Yaohui, He Jiayu, Wang Changtao, et al. Method investigation of direct-writing nanolithography based on enhanced local surface plasmon resonance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(1): 71–76.
- 13 王耀辉, 何家玉, 王长涛, 等. 增强型局域表面等离子体共振纳米直写光刻[J]. *光电工程*, 2016, **43**(1): 71–76.
- 14 杨志林. 金属纳米粒子的光学性质及过渡金属表面增强拉曼散射的电磁场机理研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- 15 Palik E D. Handbook of optical constants of solids[M]. San Diego: Academic Press, 1998.
- 16 Xu T, Fang L, Ma J, et al. Localizing surface plasmons with a metal-cladding superlens for projecting deep-subwavelength patterns[J]. *Applied Physics B*, 2009, **97**(1): 175–179.