

文章编号: 1001-3806(2013)01-0028-04

## 多束表面等离子体干涉场的模拟研究

郑 宇<sup>1</sup>, 杜惊雷<sup>2\*</sup>

(1. 武警警官学院 数学与物理学系, 成都 610213; 2. 四川大学 物理科学与技术学院, 成都 610064)

**摘要:** 为了找出多束表面等离子体激元干涉的分布情况, 采用严格的解析推导方式, 建立了多束表面等离子体激元干涉场的理论模型, 在此基础上数值模拟了多束表面等离子体激元干涉产生的 2 维及 3 维点阵结构的特性。结果表明, 干涉场分辨率可达到  $1/6$  波长, 并与普通激光多光束干涉场在光场的形状上一致。该研究有助于多束表面离子体激元光刻的进一步研究和阵列型纳米级光学器件的制造。

**关键词:** 光学器件; 光场分布; 模拟; 多束表面等离子体激元; 干涉

中图分类号: O436.1 文献标识码: A doi: 10.7510/jjgs.issn.1001-3806.2013.01.007

## Simulation of interference field of multi-beam surface plasma polaritons

ZHENG Yu<sup>1</sup>, DU Jing-lei<sup>2</sup>

(1. Institute of Mathematics and Physics, Officers College of Chinese Armed Police of China, Chengdu 610213, China; 2. Institute of Physics Science and Technology, Sichuan University of China, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In order to find out the interference field of multi-beam surface plasma polaritons (SPPs), the theoretical interference model of multi-beam SPPs was deduced according to strict analytical expressions. The 2-D and 3-D lattice structure characteristics of SPPs interference were simulated and the resolution reached  $1/6$  wavelength. Its profile was the same as that of the ordinary laser beam interference field. It's very important for the multi-beam SPP lithography and manufacture of nano-scale optical devices.

**Key words:** optical devices; light field distribution; simulation; multi-beam surface plasma polaritons; interference

### 引 言

目前, 利用表面等离子体激元 (surface plasma polaritons, SPPs) 干涉光刻, 从而获得高对比度的纳米尺度阵列图形, 已成为国内外研究热点<sup>[1-8]</sup>, 但由于现有的商用模拟软件只能模拟出较少数量的 SPPs 干涉情况, 且多束实验研究的难度很大、成本高昂<sup>[9-10]</sup>。为了找出多束 SPPs 干涉的分布情况, 从 SPPs 干涉场的激励方式入手, 建立了多束 SPPs 干涉场的理论模型, 在此基础上模拟了多束轴对称 SPPs 干涉产生的 2 维及 3 维点阵结构的特性。结果表明, 干涉场分辨率可达到  $1/6$  波长, 并与普通激光多光束干涉场在光场的形状上一致, 有助于多束 SPPs 光刻的进一步研究和阵列型纳米级光学器件的制造。

### 1 多束 SPPs 干涉场的产生

光激励 SPPs 干涉场主要有两种途径产生, 分别

作者简介: 郑 宇 (1981-) 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为微纳光学器件的设计和制作。

\* 通讯联系人。E-mail: dujl@scu.edu.cn

收稿日期: 2012-04-26; 收到修改稿日期: 2012-05-31

是光栅耦合和多棱锥镜耦合<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。其中, 光栅耦合方式必须要有金属光栅 (常常在之上加入石英玻璃), 光栅周期必须满足 SPPs 共振条件, 产生的干涉场位于金属光栅层下方, 若用此干涉场实现干涉光刻, 则只需在干涉场区域放上已有光刻胶的基底即可, 此方式的最大缺点在于用于产生 SPPs 金属光栅加工难度大、成本较高。而多棱锥镜耦合方式加工相对容易、成本低廉, 所以有学者提出采用此种激励方式<sup>[3]</sup>, 主要用多棱锥镜代替石英玻璃, 用金属膜代替金属光栅, 用于激励的横磁偏振光分别从棱锥的各个锥面入射到锥底中心, 其入射角必须满足 SPPs 共振条件, 各束光所产生的 SPPs 在金属膜下表面相互干涉, 产生周期状的 2 维和 3 维的点阵结构。

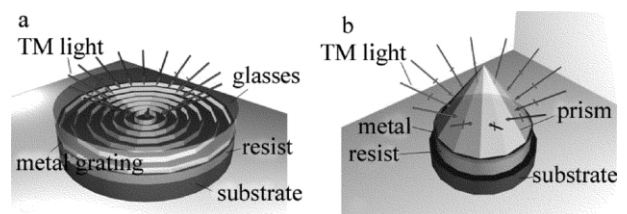


Fig. 1 Multi-pyramid coupling SPP symmetrical interference  
a—grating b—prism

## 2 多束 SPPs 干涉场分布模型

以多棱锥镜耦合方式进行讨论,首先考虑单束光激励的情况,将棱镜耦合下的 SPPs 干涉光刻系统考虑为 3 层介质堆积的结构(如图 2 所示)<sup>[8]</sup>,region 0 表示棱镜,region 1 表示金属膜,region 2 表示干涉成像区域。设入射单束光的光场为  $E_0$ ,通过对入射和出射磁场强度的计算,简化得到单束 SPPs 电场分量为<sup>[1]</sup>:

$$E_{z2} = C_z T_{ez} A \exp [ik_0(x \cos \varphi + y \sin \varphi)] \exp [iz(k_2^2 - k_0^2)^{1/2}] = C_z T_{ez} \exp [iz \{ (k_2^2 - k_0^2)^{1/2} - k \cos \theta \}] \cdot E_0 \quad (1)$$

$$E_{x2} = C_x T_{ex} A \exp [ik_0(x \cos \varphi + y \sin \varphi)] \exp [iz(k_2^2 - k_0^2)^{1/2}] = C_x T_{ex} \exp [iz \{ (k_2^2 - k_0^2)^{1/2} - k \cos \theta \}] \cdot E_0 \quad (2)$$

式中  $\theta$  为入射等离子体共振角  $\varphi$  为  $x$  轴和传播方向的夹角,  $T_{ez}$  为 3 层结构的电场  $E_z$  透射系数,由介质的物性所决定,  $k_0$  和  $k_2$  分别表示区域 0 和区域 2 中的波矢  $k$  为波数,  $C$  为常数。所以,可得  $n$  束 SPPs 的干涉光场分布为:

$$I \propto \left( \sum_{i=1}^n E_{zi} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n E_{zi}^* \right) + \left( \sum_{i=1}^n E_{xi} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n E_{xi}^* \right) \quad (3)$$

式中, \* 表共轭。

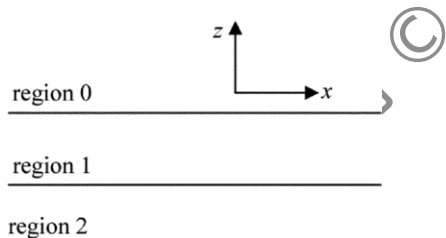


Fig. 2 Three-tier structure of media

## 3 多束 SPPs 干涉场的模拟

### 3.1 多束 SPPs 完全对称入射

由于两种激励方式的干涉场形态一致,所以仅针对第 2 种方式进行数值模拟,其本参量为:激励光: G 线,波长 436nm;多棱锥镜:重镉火石玻璃,折射率 1.85;抗蚀剂型号:AR3170 型,抗蚀剂折射率 1.62;金属:银,膜厚度 50nm。4 个方向的径向偏振光对称入射的激励光产生此 4 个方向的 SPPs,形成干涉,如图 3a 所示,其模拟结果如图 3b 和图 3c 所示。

可见 SPPs 的纵向传播深度仅为 150nm 左右,在  $x$ - $y$  平面可形成直径为 125nm 的圆形光斑,分辨率为 75nm 左右,已突破传统干涉光刻的衍射极限,此结

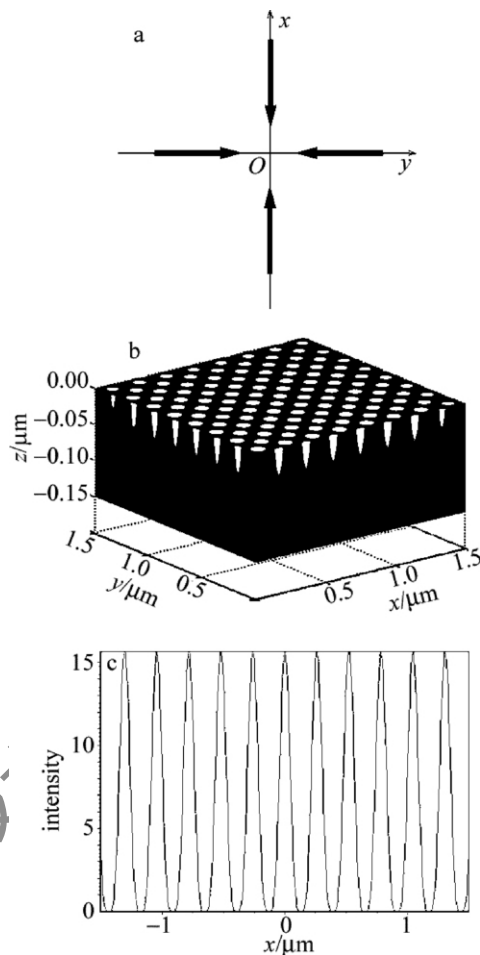


Fig. 3 Interference pattern of 4-beam symmetrical SPPs

a—incident direction of 4-beam SPPs b—light field division c—light field division curve

果与参考文献 [2] 中所得出的结论相吻合,通过光强曲线可见明暗区域对比度较高,光斑中心点的强度是入射激励光强的 15 倍以上,完全可以满足光刻曝光要求,若用宽光束激励 SPPs,曝光视场可达到几十个微米,这对于阵列型纳米结构的制作有着较好的应用前景。

激励光波长、棱锥镜折射率等基本参量不变,选择对称的 8 束 SPPs 干涉后的电场分布,入射方向如图 4a 所示,使 8 束 SPPs 波相互之间的夹角为  $45^\circ$ ,产生如图 4b 所示的较复杂的光斑,光斑主要有圆形和三角形两种,其分辨率也达到 75nm 左右,干涉平面的中心光强很高,其强度为入射激光强度的 60 倍。并在中心处形成了一个半径约为 150nm 的圆环,整个 SPPs 干涉图样传播深度仍为 150nm。

还可以得到 18 束和 36 束光束对称激发 SPPs 干涉后的电场分布,如图 5 所示。发现其分辨率仍能达到  $1/6$  波长  $\sim 1/7$  波长,在  $x$ - $y$  干涉平面的中心  $1\mu\text{m}$  的范围内,干涉场会变为同心圆结构,18 束时有 5 级条纹,36 束共有 10 级条纹,对比 8 束时的 2 个级纹,说明参与的 SPPs 越多,在中心产生同心圆的条纹数就越多。

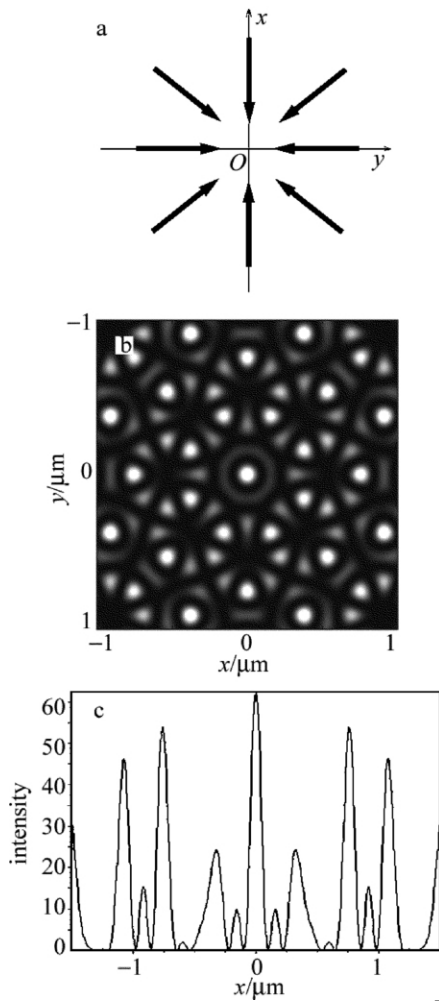


Fig. 4 Interference pattern of 8-beam symmetrical SPPs  
a—incident direction of 8-beam SPPs b— $x$ - $y$  plane light field division  
c—light field division curve

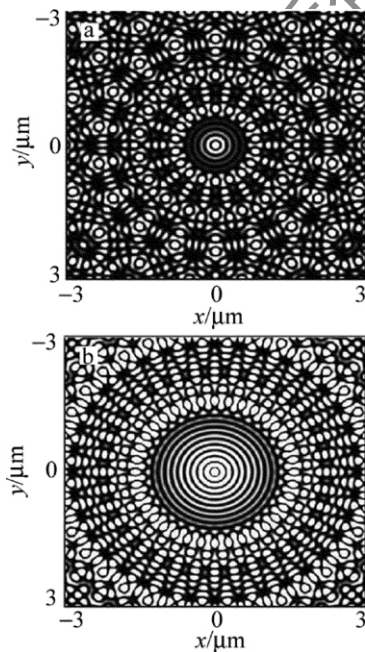


Fig. 5 Interference pattern of 18-beam and 36-beam symmetrical SPPs  
a—18-beam  $x$ - $y$  plane light field division b—36-beam  $x$ - $y$  plane light field division

### 3.2 非完全对称入射

基本参量同上不变,选择8个不对称方向的SPPs干涉,所得结果如图6所示,产生了两种不同形状的光斑,分辨率为75nm左右,两种光斑分别形成特定组,不同形状光斑的组与组之间相互嵌套,形成特异的光强周期性分布阵列,此种方式可一次性产生两种不同形状、不同阵列的纳米周期性结构,可考虑实现两种纳米光子晶体的同时制作。随着参与干涉的SPPs的增加,光场形成花瓣状花,干涉场变化将十分复杂。

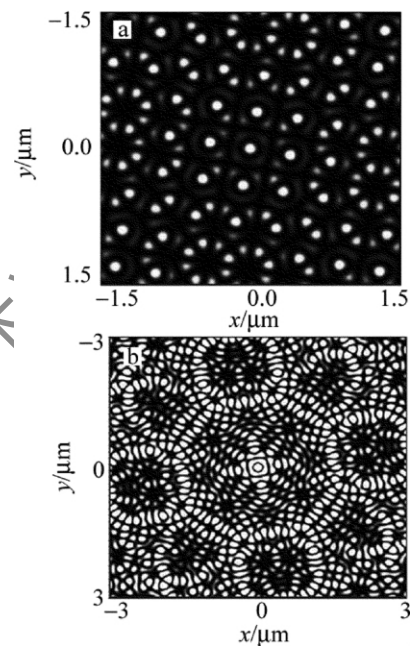


Fig. 6 Interference pattern of not completely symmetrically incident SPPs  
a—8-beam interference division b—24-beam interference division

### 3.3 与普通光场干涉的对比

当前,普通多束光干涉场已有较成形的理论,也通过了实验结果的验证<sup>[11-12]</sup>,而多束SPPs干涉实验难度较大,目前还难以实现,为了便于对SPPs干涉场的全面掌握,有必要关注SPPs干涉场与普通光的干涉场之间联系。由于SPPs都来源于与之对应的一束激励光,入射激励光的方向即为SPPs在 $x$ - $y$ 平面内的入射方向,且由于单束SPPs并没有强度的周期性变化,所以两种干涉的光场分布应是很相似的。选择9束SPPs对称入射的情况与9束普通激光干涉进行对比,如图7所示,可见模拟结果与预想一致,SPPs干涉的光场分布与普通光场的完全一致,但要小很多,约为普通光场的1/60。所以,得到重要结论:可由普通光干涉的光场分布得到SPPs的干涉光场分布,SPPs干涉光场分布约为普通光场的1/60。

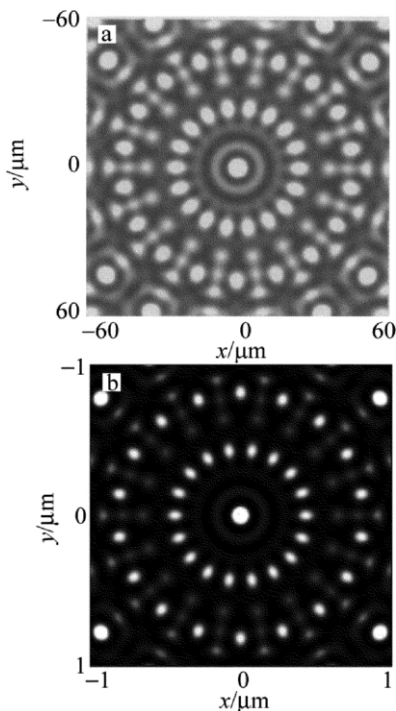


Fig. 7 Comparison between the interference pattern of SPPs and that of ordinary light  
a—9-beam light field division of light b—9-beam light field division of SPPs

#### 4 结论

分析了产生多束 SPPs 干涉场的两种主要方式,建立了多束 SPPs 干涉场的理论模型,在此基础上数值模拟和分析了多束轴对称 SPPs 干涉产生的 2 维及 3 维点阵结构的特性,发现分辨率可达到  $1/6$  波长  $\sim 1/7$  波长,并与普通激光多光束干涉场进行了对比分析, SPPs 干涉场的形态与普通光场几乎完全一致,即可根据普通光干涉的光场掌握 SPPs 干涉场的分布情况,此结论在目前还未能实现多束 SPPs 的实验研究的情况下,显得尤为重

要,为实现多束 SPPs 光刻和纳米级光学器件的制造提供了参考。

#### 参考文献

- [1] RAETHER H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988: 23-56.
- [2] LEI M, YAO B L. Theoretical and experimental studies on multi-beam interference by using pyramid lens [J]. Acta Optica Sinica, 2006 26(5): 757( in Chinese ).
- [3] GUO X W, DU J L, GUO Y K. Large-area surface-plasmon polariton interference [J]. Optical Letter 2006 31(31): 2613.
- [4] JIN F Z, FANG L, ZHANG Zh Y, *et al.* Photonic crystal fabrication based on surface plasmon polaritons interference nanolithography [J]. Acta Optica Sinica 2009 29(4): 1075-1078( in Chinese ).
- [5] LI H J, LIN W K, ZHANG X D, *et al.* Two dimensional nanoarray fabricated by near-field lithography technology based on surface plasmon [J]. Micronanoelectronic Technology, 2010 47(1): 60-63( in Chinese ).
- [6] WANG P, ZHANG D C, TANG L, *et al.* Nano-photolithography using super-resolution near-field structure [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005 22(6): 840( in Chinese ).
- [7] LI A K, WANG Z M, LIU J J, *et al.* Direct laser writing of strip waveguide in sol-gel film [J]. Laser Technology, 2008 32(3): 317-319( in Chinese ).
- [8] SUN M. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Journal of Beijing Technology and Business University( Natural Science Edition) 2009, 27(1): 42-46( in Chinese ).
- [9] ZHENG Y, WANG J Q, JIN F Z, *et al.* Multi-beam interference simulation software of SPPs [J]. Journal of Sichuan University( Natural Science Edition) 2009 46(5): 1423-1428( in Chinese ).
- [10] ZHENG Y, YANG X, LI Q H, *et al.* Research on SPPs interference lithography imaging simulation [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering( Natural Science Edition) 2010 23(1): 91-94( in Chinese ).
- [11] LEI M, YAO B L. Theoretical and experimental studies on multi-beam interference by using pyramid lens [J]. Acta Optica Sinica, 2006 26(5): 757-762( in Chinese ).
- [12] ZHANG J, FENG B R, GUO Y K, *et al.* Laser interference photolithography for fabricating periodic patterns in large area [J]. Opto-Electronic Engineering 2001 28(6): 20-23( in Chinese ).