

多束 SPPs 干涉成像模拟研究

郑宇^{1,2}, 杨黠³, 李群华¹, 杜惊雷²

(1. 武警成都指挥学院教研部, 成都 610213; 2. 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064

3. 四川理工学院理学院, 四川 自贡 643000)

摘要: 多束 SPPs 干涉光刻是一种可突破衍射极限的新型纳米加工方法。在分析 SPPs 激励和传输机理基础上, 建立多束 SPPs 干涉成像模型, 编制了能快速准确地计算多束 SPPs 干涉光刻成像的仿真软件。并在此基础上对多束 SPPs 的干涉像进行了模拟, 发现如果将两束光增加到四束或八束光激发 SPPs 干涉, 则可获得二维分布的周期性光斑点阵, 在制作纳米光子晶体材料方面有很强的应用前景。随着入射 SPPs 的增加, 当棱锥棱数足够多近似于一个圆锥时, 干涉场会形成一系列的同心圆结构, 可考虑实现纳米级波带片的制作。

关键词: 多束 SPPs 干涉光刻; 光子晶体; 模拟研究

中图分类号: O 436. 1

文献标识码: A

引言

当前, 突破衍射极限以获得各种高效光耦合器、光波导、光调制器及全光集成回路, 成为目前纳米光子学领域的一大研究热点。表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons SPPs) 是由外部电磁场 (如光波) 诱导金属表面自由电子集体振荡, 从而形成一种沿着金属导体表面传播的电荷疏密^[1]。SPPs 相对入射光波具有更高强度和更短波长的特性, 用无掩模多束 SPPs 干涉光刻可获得高对比度的纳米尺度阵列图形^[2], 受到学界的关注和重视。

目前, 无掩模 SPPs 纳米干涉光刻已取得许多重要进展^[2,9], 但纳米光刻工艺十分精密、复杂, 影响曝光图形质量的条件和因素较多, 曝光实验和观察测试难度大、费用高, 因此采用计算机进行光刻过程准确、迅速地仿真和分析非常重要, 可大幅度节约实验成本、提高纳米光子器件优化设计和加工的效率。现在普遍使用的 FDTD 模拟商用软件进行模拟, 是基于麦克斯韦方程组理论, 通过时域有限差分法计算电磁场, 并不能完全满

足 SPPs 干涉模拟的实际需要, 无法完成多束干涉和三维结构模拟。我们通过对 SPPs 电磁场传输理论分析, 建立 SPPs 干涉成像模型, 编制适用于无掩模多束 SPPs 干涉成像的计算模拟软件 SPPs Interference, 并使用此软件对多束 SPPs 干涉成像进行了计算模拟, 发现 SPPs 干涉光刻在制作纳米光子晶体和纳米波带片方面有很强的应用前景。

1 SPPs 干涉成像模型

光激励 SPPs 主要有两种途径: 光栅耦合和多棱锥镜耦合^[7]。其中, 多棱锥镜加工相对容易, 成本低廉, 所以主要采用此种激励方式。其耦合方式如图 1 所示, 主要有多棱锥镜、金属膜、光刻胶 3 层结构, 用于激励的 p 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, 产生周期状的二维和三维的点阵结构, 其电场分量使得抗蚀剂曝光, 实现干涉光刻。

我们将棱镜耦合下的 SPPs 干涉光刻系统考虑为三层介质堆积的结构 (如图 2 所示), 区域 0 表示棱镜, 区

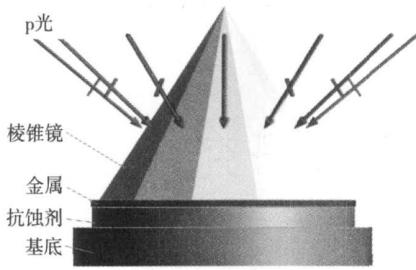


图1 多棱锥耦合 SPPs 干涉光刻

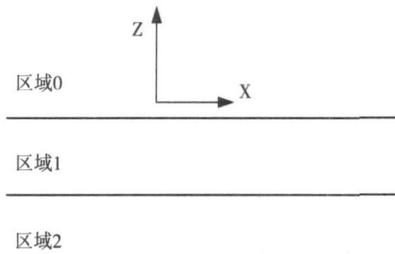


图2 三层介质结构示意图

域 1表示金属膜,区域 2表示光刻成像区域。设入射单束光的光场为:

$$E_0 = A \cdot e^{ik(x \cos\theta + y \sin\theta)} e^{ikz \cos\theta}$$

其中 θ 为等离子体共振角。根据文献 [1],通过对入射和出射磁场强度的计算,得到三层结构的磁场透射系数和电场 E_z 的透射系数分别为:

$$T_m = e^{ik_z d} T_{01} T_{12} / (1 + R_{01} R_{12} e^{2ik_z d})$$

$$T_{ez} = T_m (\epsilon_0 / \epsilon_2)$$

其中 $T_{ij} = 2 \left[1 + \frac{\epsilon_i k_{zj}}{\epsilon_j k_{zi}} \right]$, $R_{ij} = \left[\frac{k_{iz}}{\epsilon_i} - \frac{k_{jz}}{\epsilon_j} \right] \left[\frac{k_{iz}}{\epsilon_i} + \frac{k_{jz}}{\epsilon_j} \right]$,

T_{ij}, R_{ij} 分别表示其中两层介质磁场的透射系数和反射系数, k_z 为 z 方向波矢, ϵ 为各层的介电常数, i 表示输入层数,取 0, 1, j 表示输出层数,取 1, 2通过进一步解析推导,简化得到区域 2中的单束 SPPs电场 z 分量为:

$$E_{z2} = C_z \cdot T_{ez} A e^{ik_0(x \cos\theta + y \sin\theta)} e^{iz(k_z^2 - k_0^2)^{1/2}}$$

$$= C_z T_{ez} e^{iz[(k_z^2 - k_0^2)^{1/2} - k \cos\theta]} \cdot E_0$$

$$E_{x2} = C_x \cdot T_{ex} A e^{ik_0(x \cos\theta + y \sin\theta)} e^{iz(k_z^2 - k_0^2)^{1/2}}$$

$$= C_x T_{ex} e^{iz[(k_z^2 - k_0^2)^{1/2} - k \cos\theta]} \cdot E_0$$

其中 k_0, k_z 分别表示区域 0和区域 2中的波矢, C 为常数。 E_{x2} 和 E_{z2} 两电场分量仅是数值上相差 $\sqrt{|\epsilon_1(\omega)| / \epsilon_2}$ 相位上相差 $\pi/2$ 。所以,可得 n 束 SPPs 的光场干涉强度为:

$$I \propto (|E_{z1} + E_{z2} + \dots E_{zn}|)^2 + (|E_{x1} + E_{x2} + \dots E_{xn}|)^2$$

此即为 SPPs干涉光刻成像模型。

2 计算软件的模拟结果

采用 VC和 Matlab库函数混合编程编制了可计算多束 SPPs干涉光刻成像的仿真软件 SPPs Interference 其对话框如图 3所示。为确保软件计算的准确性,我们将 SPPs Interference模拟结果与商用 FDTD 模拟软件进行了对比。计算用到的参量是:激励光波长 441nm,多棱锥折射率 1.9626,光刻胶折射率 1.53,金属银,金属膜厚度 30nm,图 4(a)、(b)是在 XZ平面内的光场对比,图 4(c)、(d)表示分别用 SPPs Interference和 FDTD 模拟的相同情况下两束 SPPs干涉,在 Z方向传播 2mm 处的光强曲线。可见 SPPs干涉条纹在 X方向周期性分部,两种方法计算所得的周期均约 125nm, Z方向光场指数衰减,到 150nm左右消失,与文献 [7-8]中理论结果吻合。此软件在 1秒钟内就可完成双束 SPPs干涉光场分部的计算,而 FDTD 方法模拟同等条件的光场分布需要 28分钟,前者比后者节约计算时间数千倍。

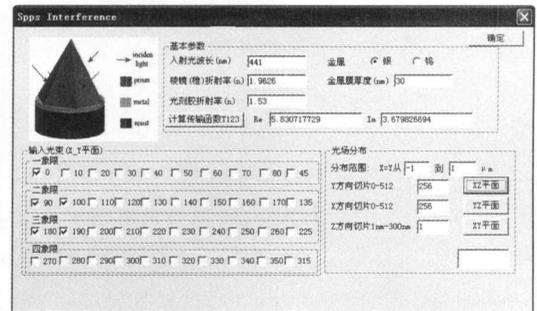


图3 SPPs Interference对话框

3 多束 SPPs干涉模拟

图 5所示的是入射光波长 441nm,多棱锥折射率 1.9626,光刻胶折射率 1.53,金属银,金属膜厚度 30nm,由 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 四个方向的径向偏振光对称入射的激励光生成的 SPPs干涉, Z方向上的传播深度约为 150nm,曝光视场较大,在 XY 平面内产生线度约为 125nm的圆形光斑,分辨率达到 $1/6-1/7$ 波长,与文献 [2]中所得结论, SPPs干涉分辨率为 $\eta = 2\pi \left[2k_{pp} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \right]$ 的计算结果相吻合,图形对比度较高,且曝光视场大,可以方便快捷地获得周期性纳米孔径结构。

基本参数同上不变,由 $30^\circ, 80^\circ, 120^\circ, 170^\circ, 210^\circ, 260^\circ, 300^\circ$ 和 350° 八个方向的径向偏振光入射的激励光生成的 SPPs干涉,所得结果如图 6所示: Z方向上的传

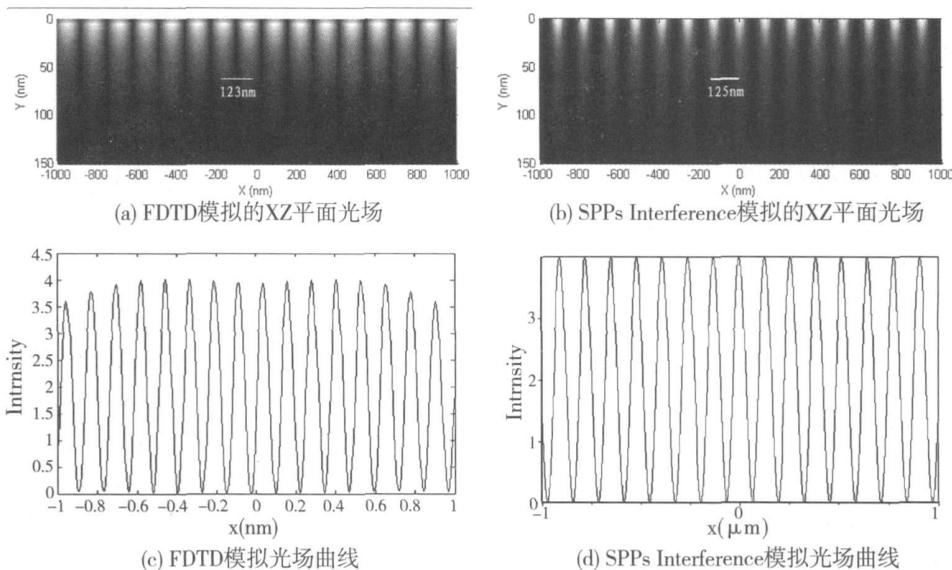


图 4 SPPs Interference 与 FDTD 模拟结果的对比

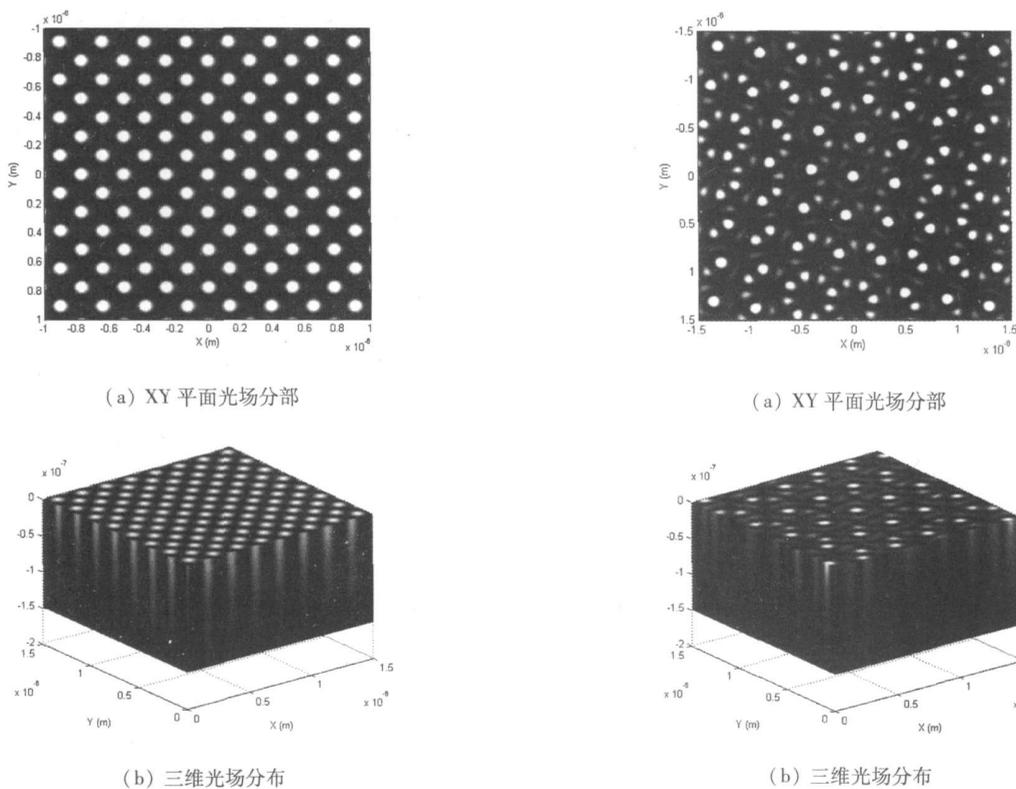


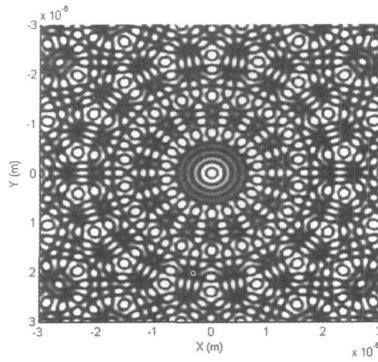
图 5 模拟四束完全对称入射 SPPs 干涉图样

图 6 模拟八束不完全对称入射 SPPs 干涉图样

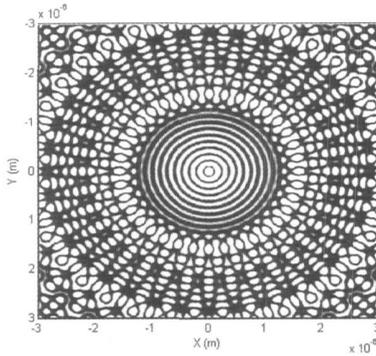
播深度约为 150nm, XY 平面内产生了两种不同形状的光斑, 分辨率约为 1/6 波长, 两种光斑分别形成一个个小的组, 不同形状光斑的组与组之间相互嵌套, 形成特异的光强周期性分布格阵, 此种方式可一次性产生两种不同形状的纳米周期性结构, 能实现两种纳米光子晶体的同时制作, 有很强的应用前景。

基本参数仍然不变, 我们还可以得到 18束和 36束光束对称激发 SPPs干涉后的磁场分布, 18束, 即在整

个圆周上, 每 20°就有一束径向偏振光以共振角入射; 36束, 即在整个圆周上, 每 10°就有一束径向偏振光以共振角入射。使用计算软件, 我们很容易就得到了两次的计算结果, 如图 7所示。发现其分辨率仍达到 1/6-1/7波长, 在 XY 干涉平面的中心 14μm 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, 而 8束时是 2个级纹, 说明参与的 SPPs越多, 同心圆的条纹数就越多。周期也只有 120nm, 可考虑实



(a) 18束干涉光场XY平面分部



(b) 36束干涉光场XY平面分部

图7 18和36光束对称入射激发SPPs干涉

现纳米级波带片的制作。

4 结束语

本文建立了无掩膜多束SPPs干涉成像的理论模型,编写能够独立运行的计算软件SPPs Interference,实

现多束SPPs干涉光刻计算模拟,运行证明,其计算模拟准确迅速。并在此基础上对多束SPPs的干涉像进行了模拟,得出重要结论,为SPPs干涉光刻全过程模拟和实验的开展提供了保证,为大面积、低成本、高效率地制作纳米光子晶体和纳米波带片提供参考。

参考文献:

- [1] Raether H. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. Berlin, 1988
- [2] 金凤泽, 方亮. SPPs干涉制备纳米光子晶体的模拟分析[J]. 光学学报, 2009, (4): 1075-1078
- [3] 方亮, 段茜, 郭小伟, 等. 多光点扫描数字光刻制作DOE的方法研究[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2007, 44(6): 1315-1320
- [4] Lei Ming Yao Baoli Theoretical and experimental studies on multi-beam interference by using pyramid lens[J]. Acta Optica Sinica 2006 26(5): 757.
- [5] Betzig E, Trautman J K. Near-Field Optics Microscopy Spectroscopy, and Surface Modification Beyond the Diffraction Limit[J]. Science, 1992 257
- [6] 王沛, 张斗国. 超分辨近场结构之纳米光刻技术[J]. 量子电子学报, 2005, 22(6): 840
- [7] 罗先刚, 姚汉民. 纳米光刻技术[J]. 物理学和高新技术, 2000, (29): 358-361
- [8] Guo X, Du J Guo Y. Large-area surface-plasmon polariton interference[J]. Opt Lett 2006 31 2613
- [9] 方亮, 杜惊雷. 基于ATR耦合下的SPPs干涉光刻研究[D]. 四川: 四川大学, 2008

Research on SPPs Interference Lithography Imaging Simulation

ZHENG Yu^{1,2}, YANG Xia³, LI Qun-hua¹, DU Jing-lei²

(1 Department of Teaching and Research, Chengdu Command College of Chinese Armed Police of China, Chengdu 610213, China)

(2 Institute of Physics Science and Technology, Sichuan University of China, Chengdu 610065, China)

(3 School of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 610065, China)

Abstract Multi-beam SPPs interference lithography is a kind of the new nano-processing methods which can break the diffraction limit. After analysing the SPPs transmission mechanism of incentives, we build a imaging model of multi-beam SPPs interference and a software which can be prepared quickly and accurately to calculate the multi-beam interference lithography imaging SPPs simulation. Based on this, we have simulated multi-beam interference of SPPs and found that if the two beams of light to four or eight beam excited SPPs interference, we will receive a two-dimensional distribution of lattice periodic spot, which has a strong application prospects of nano-phonic crystal materials production. As the incident SPPs increase in the number of edges when the pyramid is similar to a cone enough. The interference field will form a series of concentric circles structure, and could be considered to achieve nanometer level zone plate production.

Key words multi-beam SPPs interference lithography, photonic crystals, simulation