

表面等离激元体干涉制备纳米光子晶体的模拟分析

金凤泽 方 亮 张志友 杜惊雷 郭永康

(四川大学 物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 利用表面等离激元短波长和近场增强效应的特性,用多束 p 偏振态相干光激发表面等离激元(SPPs),并优化干涉光刻的曝光参数,可获得高分辨率、高对比度周期性纳米结构。阐述了多束 SPPs 干涉法制备纳米光子晶体的原理,并得到了干涉场强度分布随光束增加的关系。随着干涉 SPPs 数目的增加,干涉场会复杂变化,对此进行了计算机模拟。模拟了三束 SPPs 和六束 SPPs 干涉的强度分布,并分析了调制技术干涉曝光结果。该方法适合光电子器件中大范围亚波长的周期性孔阵或点阵结构的制作以及纳米量级光子晶体的制作,并可以有效降低制作成本。

关键词 光子晶体; 表面等离激元; 多束 SPPs 干涉; 纳米光子晶体

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.1075

Photonic Crystal Fabrication Based on Surface Plasmon Polaritons Interference Nanolithography

Jin Fengze Fang Liang Zhang Zhiyou Du Jinglei Guo Yongkang

(Department of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Through multi-beam coherent surface plasmon polaritons (SPPs) excited by p-polarized light beams, and optimizing exposure parameter of interference lithography, high resolution and contrast periodicity nanometer structure is obtained by using the features of short wavelength and near-field enhanced effect. The principle for nanometer photon-crystal fabrication by the method of multi-beam coherent SPPs intervening is expatiated on. The relation between the magnetic-field distribution and the light beam number is conducted. The interference field tends complicated with the rise of beam numbers, and the simulation results are given. The intensity distributions of tri-beam SPPs interference and exposure with six-beam SPPs interference are simulated, and the results of interferential exposure about modulation technology are analyzed. The method is suitable for fabricating nanometer photonic crystal and deep sub-micrometer periodic patterns in large field size used in opto-electronical components, and it can reduce cost effectively.

Key words photonic crystal; surface plasmon polariton; interference of multi-beam coherent SPPs; nanometer photonic crystal

1 引 言

随着时代的发展和进步,纳米尺度下的电子器件的进一步集成化变得越来越困难,随之产生的巨大能耗对器件运行速度和性能提升的影响也越来越难以克服。基于光子运动的光子器件^[1]给人们

带来了解决问题的希望。光子晶体可以控制光子运动的新结构材料的出现有望将这一希望变成现实。由于光子晶体在自发辐射抑制、波导及集成光路^[1]等方面的潜在优点,人们期望把它广泛应用于未来的光电集成器件,以便生产出尺寸更小、集成度更高

收稿日期: 2008-07-17; 收到修改稿日期: 2008-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(6067602、60878031)和教育部博士点基金(20060610006)资助项目。

作者简介: 金凤泽(1981—),男,硕士研究生,主要从事光刻、微纳加工和光电子器件方面的研究。

E-mail: jinfengze462@sina.com

导师简介: 杜惊雷(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学、微纳光子学和光电子器件方面的研究。

E-mail: dujl@scu.edu.cn (通信联系人)

和处理速度更快的产品^[2]。不过目前光子晶体的应用大多仍处于理论研究和实验阶段,真正做到产业化的很少,主要原因在于光子晶体的制作工艺成本高、耗时长,仍仅适用于实验室研究所用。因此为满足产业化的需要,高性能、低价格、大面积的光子晶体的制作日益成为光子晶体研究领域的热点之一。

光子晶体的制作有以下几种方式^[3]:精密机械加工法、半导体微纳加工法、激光全息制作技术^[4]、激光干涉光刻等。然而,尽管激光干涉光刻有如此多的优点,但该技术仍然不能突破衍射极限,其制作图形的最小线宽为 $1/4$ 波长^[4~8]。探讨一种加工纳米尺度周期性结构的方法更有重要意义。本文提出一种多束 SPPs 干涉光刻的方法制作光子晶体,其结构相对简单、廉价,较易达到高分辨率,且具有大视场曝光,图形对比度高等优点,可方便快捷地制作纳米级周期性阵列图形。

2 多束 SPPs 干涉的原理

表面等离激元(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波^[9,10]。表面等离激元的突出特点之一就是具有将电磁场能量聚集在纳米空间范围的特性。当表面等离激元与光波形成共振时可实现近场光增强效应,这种增强效应应用到多束干涉光刻中可以获得对比度较高的纳米尺度阵列图形^[9~11]。其中,多棱锥镜^[5]耦合下的 SPPs 干涉光刻具有大面积、无掩模光刻的优点,使低成本制作周期性纳米结构成为可能。

由麦克斯韦方程组得到三层介质的透射系数后,我们很容易就可以得到单束 SPPs 的电磁场分布。SPPs 电磁场为

$$\begin{aligned} H_{y2} &= TH_0 e^{-ik_{z2}z} e^{ik_x x}, \\ E_{x2} &= -\frac{k_{z2}}{\omega \epsilon_2} TH_0 e^{-ik_{z2}z} e^{ik_x x} = -\frac{k_{z2}}{\omega \epsilon_2} H_{y2}, \\ E_{z2} &= -\frac{k_x}{\omega \epsilon_2} TH_0 e^{-ik_{z2}z} e^{ik_x x} = -\frac{k_x}{\omega \epsilon_2} H_{y2}. \end{aligned} \quad (1)^{[10,12]}$$

当 $|\epsilon'_1(\omega)| > \epsilon_2$ 时, k_{z2} 将是一个虚数,若将 k_{z2} 写成 $k_{z2} = i\kappa$, κ 为实数,则(1)式可写为

$$\begin{aligned} H_{y2} &= TH_0 e^{-\kappa z} e^{ik_x x}, \\ E_{x2} &= -\frac{i\kappa}{\omega \epsilon_2} H_{y2}, \quad E_{z2} = -\frac{k_x}{\omega \epsilon_2} H_{y2}. \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式表明 H_{y2} 的大小随 z 的增加呈指数衰减,如图 1 所示。由于 κ 较大, H_{y2} 的穿透深度 $\delta = 1/\kappa$ 较小,金属下表面归一化磁场强度最大值可达到

120,曝光深度几乎可达到 200 nm,显然通过 SPPs,金属下表面的电磁场获得了极大的增强效果。

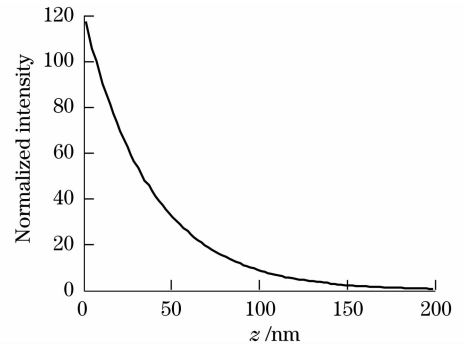


图 1 磁场强度随 z 的增加呈指数衰减

Fig. 1 Magnetic fields of excited SPP as a function of the propagation distance along z direction

从以上分析知道, E_{x2} 、 E_{z2} 与 H_{y2} 之间仅相差一个常数,且 E_{x2} 和 E_{z2} 的比值为 $-i \sqrt{\frac{\epsilon'_m(\omega)}{\epsilon_d}}$ 。由于

n 束 SPPs 的干涉在抗蚀剂表面形成的强度 $I \propto E^2 = E_x^2 + E_z^2 \propto H^2 = H_y^2$, 因此电场和磁场的强度分布是相似的。采用数学不完全归纳法和多光束干涉的原理推导出 SPPs 的干涉电场强度为^[6]

$$I(\mathbf{r}) = \sum |E_i|^2 + \sum_{i < j, i, j=1 \dots n} 2 |E_i| |E_j| \cos \theta_{ij} \cdot \cos[(\mathbf{k}_j - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r} + \phi_j - \phi_i]. \quad (3)$$

由(3)式可知 n 束光以对称方式入射时强度极大值点之间的周期, $\mathbf{k}_j - \mathbf{k}_i = 2k_{\text{spp}} \sin(\pi/n)$, 所以干涉图的周期^[9,10,12]为

$$d = \frac{2\pi}{2k_{\text{spp}} \sin(\pi/n)}, \quad (4)$$

$$k_{\text{spp}} = k_0 [\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)]^{1/2}. \quad (5)$$

如果图形线宽为周期的一半。则由(4)和(5)式可推出分辨率

$$R = \frac{\lambda_0}{4 \sin(\pi/n)} \sqrt{\frac{\epsilon_m + \epsilon_d}{\epsilon_m \epsilon_d}}. \quad (6)$$

(3)式表明对比度是由加号前后两项共同控制的,所以可以通过改变总光强即 $\sum |E_i|^2$ 项来控制对比度,图形的图案由 $\sum_{i < j, i, j=1 \dots n} |E_i| |E_j| \cdot \cos \theta_{ij} \cos[(\mathbf{k}_j - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r} + \phi_j - \phi_i]$ 项控制,其中 $(\mathbf{k}_j - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{k}$ 决定了图案的周期,也就是说即使改变相位及振幅,入射光波长和光束数一定,材料一定,周期也就一定。银膜在波长为 441 nm 的激光入射下,介电系数为 $\epsilon_m = -8.917 + i0.2320$, 耦合棱镜的折射率为 1.9325, 光刻胶抗试剂的折射率为 1.53, 由(6)式可知,当两束 SPPs 相互干涉时,干涉获得的光栅

周期为 120 nm,分辨率可以达到 60 nm。

3 模拟结果及分析

3.1 多束 SPPs 干涉的分析

图 2 是三束 SPPs 干涉曝光分布模拟结果。从图中可以看出点阵的周期大约为 140 nm,金属下表面归一化磁场强度最大值可达到 120,曝光深度几乎可达到 150 nm,显然通过 SPPs,金属下表面的电磁场获得了极大的增强效果。

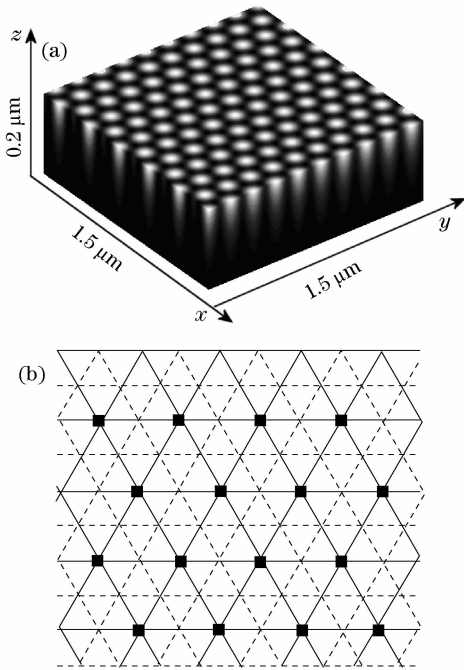


图 2 (a)三束 SPPs 干涉的强度分布,(b)三束 SPPs 相互干涉
Fig.2 (a)3D distribution of three beams SPP interference intensity (a), and overlapping by three beams (b)

三束 SPPs 干涉的结果是在三个方向上均有周期性调制的强度分布的叠加,这是由于其中的两束 SPPs 两两干涉所导致的。三束 SPPs 曝光干涉的结果是在三个方向上均有调制的强度分布,在排地很密的六角形网格上形成强度峰值。峰值光斑处于每个六角形的中心处,强度极大值为 $9A^2$,在周围是中间强度区域,零强度位于这些六角形的交界处的三角区。其强度极大值的周期为: $d_{3d} = \frac{d_{2d}}{\sin(\pi/3)}$ 三束 SPPs 干涉的图样为六角形网格状分布的光斑阵列,如图 2(b)所示。随着干涉 SPPs 数目的增加,干涉场会复杂变化^[3,4],图 3 是六束 SPPs 干涉曝光的强度的分布模拟结果。

从图 3 中的强度分布曲线可以看出,在多光束激发 SPPs 产生干涉中,每个最小的单元大概是一百个或几百个纳米左右。通过以上图形的比较可以看出,不论是三束还是六光束激发的 SPPs 在传播

150 nm 左右后能量几乎全部消失,与理论值基本相符。比较各光束激发的 SPPs 干涉的强度曲线,及由周期式(4)式发现随着入射光束数目的增加干涉点周期变大,能量的集中度有了较大的提高。与多束激光干涉相比,虽然没有大的焦深,但是突破了衍射极限易于提高分辨率,制作纳米尺度的图形。那么三束 SPPs 干涉、四束 SPPs 干涉和六束 SPPs 干涉的图形周期分别约为 140 nm,170 nm,240 nm。与前面的理论分析是吻合的。

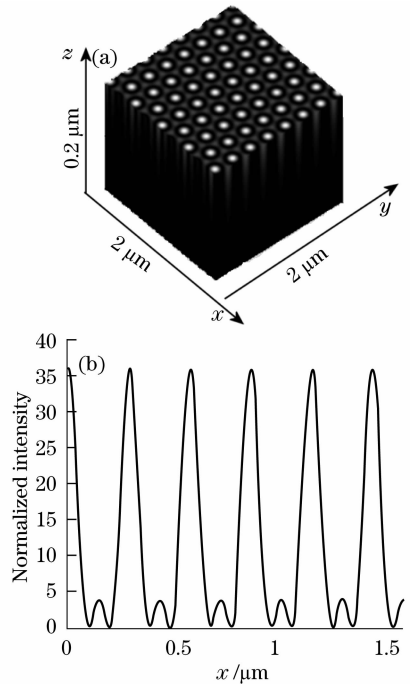


图 3 (a)六束 SPPs 的干涉强度分布,(b)六束 SPPs 的干涉分布在 x 方向的强度曲线

Fig.3 (a)3D distribution of six beams SPP interference intensity (a), interference intensity of distribution in x direction (b)

在三束或六束光入射时,图案的周期或是准周期中必包含正三或六边形或可由亮点连接构成的正三或是六边形,这可以如下解释:两束光入射时为平行条纹,三束光入射时亮点的连接是等边三角形,任意几束光入射时是其中任意两束光干涉之后通过一定形式叠加的结果, n 光束对称入射时,基本单元或亮点的连接包含正 n 边形,这些 n 边形的边长大约在几百个纳米左右,边数越多面积越大,并且多边形之间是一种嵌套结构。

3.2 调制技术改变图形的形状分析

很显然,多束 SPPs 相互干涉产生光斑阵列的前提是要求 SPPs 等强度和同相位,如果相互干涉的 SPPs 强度或振幅或初相位不相同,则金属下表面的

电磁场分布将发生一定的变化。根据这一原理,我们可以考虑在多束 SPPs 干涉光刻中引入调制技术以获得特殊图形,为特殊光子晶体的制作提供了可能。考虑到 SPPs 沿水平方向有一定的传播距离,可只对入射光进行沿垂直于传播方向的振幅或相位调制。振幅调制技术是指对入射光的振幅进行空间调制,SPPs 的振幅由入射光和增强因子所决定,因此,当增强因子一定时,对入射光振幅的调制即可实现对 SPPs 振幅的调制,这时将影响在 z 方向上的曝光深度的变化。但是相位的变化将改变表面图形的形状,模拟结果如图 4。由图 3(a)和图 4 可知经过相位的变化不仅改变了图形的形状而且也提高了分辨率,与前面的理论分析是相吻合的。在图 4(b)可以看出,六束激发光相位依次增加 π 后,图形不仅出现了特异的形状而且分辨率增加了一倍,光强的分布集中度也有了很大的提高,SPPs 的近场增强特性得以展现并为曝光深度的提高做出贡献。

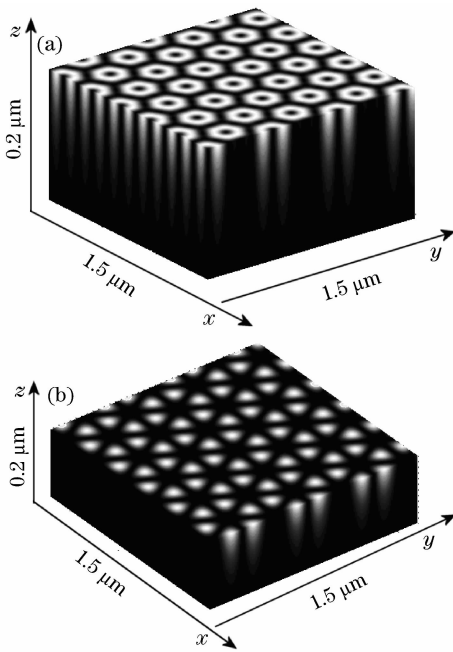


图 4 六束 SPPs 的初相位依次增加 $\pi/3$ (a)和 π (b)的干涉强度分布

Fig. 4 3D distribution of interference intensity that original phasic of six bearrs SPPs adds $\pi/3$ (a) and π (b) in turn

4 结 论

利用表面等离激元短波长特性和近场增强性进行多束 SPPs 干涉可获得高分辨率、高对比度周期性纳米量级的阵列图形。SPPs 干涉光刻具有设计

灵活、制作简捷、大面积、无掩模光刻的优点,使低成本制作周期性纳米结构光子晶体成为可能。对调制技术的引入做了初步的探讨,有关调制度与图形位置以及图形形状之间的关系,关于实验研究的开展,下一步还需进一步深入和研究。

参 考 文 献

- 1 Wang Hong, Ouyang Zhengbiao, Han Yanling *et al.*. Optical properties and mode tuning of defect modes in one-dimensional photonic crystal micro-cavity containing dispersive medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):940~945
王宏,欧阳征标,韩艳玲等. 含色散介质的一维光子晶体微腔的光学特性和模式调节[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5):940~945
- 2 Li Yiyu, Gu Peifu, Wang Baoqing *et al.*. Filling-factor graded wavelike two-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):169~173
厉以宇,顾培夫,王保清等. 填充率渐变型波状结构二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):169~173
- 3 Li Xia, Xue Wei, Jiang Yu-rong *et al.*. Recent progress in the fabrication and application of photonic [J]. *Opt. Technique*, 2006, **32**(6):871~878
李夏,薛唯,蒋玉蓉等. 光子晶体的制备方法及其应用[J], *光学技术*, 2006, **32**(6): 871~878
- 4 Liu Huan, Yao Jianquan, Li Enbang. Simulated calculation and analysis of the forbidden band for fabricating two and three dimensional photonic crystal structures using holographic lithography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(05):2286~2292
刘欢,姚建铨,李恩邦. 激光全息法制作二、三维光子晶体的模拟计算及禁带分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(05):2286~2292
- 5 Lei Ming, Yao Baoli. Theoretical and experimental studies on multi-beam interference by using pyramid lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):757~762
雷铭,姚保利. 多棱锥镜产生多光束干涉场的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):757~762
- 6 Yi Yang, Suhuai Zhang, Guoping Wang. Fabrication of two-dimensional metalodielectric quasicrystals by single-beam holography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 251104
- 7 Zhang Jin, Feng Boru, Guo Yongkang. Theoretical analysis for fabricating nanometer hole array with 4 laser beams interference lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):410~413
张锦,冯伯儒,郭永康. 四激光束干涉光刻制造纳米级孔阵的理论分析[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4):410~413
- 8 Zhang Jin, Feng Boru, Guo Yongkang *et al.*. Laser interference photolithography for fabricating periodic patterns in large area [J]. *Opto-Elec Engineering*, 2001, **28**(6):20~23
张锦,冯伯儒,郭永康等. 用于大面积周期性图形制造的激光干涉光刻[J]. *光电工程*, 2001, **28**(6):20~23
- 9 X. Guo, J. Du, Y. Guo. Large-area surface-plasmon polariton interference[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 2613
- 10 H. Raether. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988
- 11 Zhao Huawei, Huang Xuguang, Su Hui. A novel Y-branch waveguide based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1649~1652
赵华伟,黄旭光,苏辉. 基于表面等离激元波子的新型 Y 分支波导[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1649~1652
- 12 邱国斌,薛定平. 金属表面电浆简介[J]. *物理双月刊*, 2006, **28**(2):472~485