

偏振组合对光子晶体全息制作影响的 数值模拟及实验研究

戚志明¹ 梁文耀^{2*}

¹广东开放大学 广东理工职业学院, 广东 广州 510091

²华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640

摘要 光子晶体是类比固体晶格制作的新型人工材料,激光全息法是制作光子晶体的重要方法之一,光束偏振在其中起到关键作用。从多光束干涉原理出发,以斜方光子晶体为例探讨了其全息制作的设计思路及光束构型。进而结合计算机模拟,系统研究了线偏振、圆偏振、椭圆偏振等不同偏振组合对“原子”的影响,发现偏振组合和光强比对“原子”形状、取向和位置存在显著影响。进一步设计实验进行验证,结合计算机实时监控调节各光束的偏振和光强,获得了不同偏振组合和光强比下的多种光子晶体结构,发现实验结果与理论预测、数值模拟均符合得很好。该研究不仅有助于提高特定“原子”光子晶体的设计效率,而且可有效降低偏振操控的盲目性,提高实验效率。

关键词 材料;光子晶体;全息制作;计算机模拟;偏振组合;实时显示

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0916002

Numerical Simulations and Experimental Research on the Influence of Polarization Combination on Holographic Fabrication of Photonic Crystals

Qi Zhiming¹ Liang Wen Yao²

¹The Open University of Guangdong, Guangdong Polytechnic Institute, Guangzhou, Guangdong 510091, China

²School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Photonic crystals are novel artificial microstructures which are fabricated analogously to the arrangement of atoms in solid crystals. Laser holography method is an important method to fabricate photonic crystals where polarization combination of light beams plays a key role. Starting with the multi-beam interference principle, rhombic lattice is taken as an example to discuss its design principle and beam configuration. Moreover, combining with computer simulations, the influence of the combination of different types of polarizations is systematically studied, such as linear, circular and elliptical polarizations, on the "atom" of photonic crystal microstructures. It is found that different polarization combinations and intensity ratio of light beams sensitively affect the shape, direction, as well as the positions of the "atom". What is more, laser holography experiments are designed and carried out to verify the theoretical predictions and simulations. Real-time monitoring by computer is employed to facilitate the adjustment of polarizations and intensity ratio of light beams. Various photonic crystal microstructures are obtained under different conditions of polarization combinations and intensity ratios. The experimental results agree well with the theoretical predictions and simulations. The results are not only beneficial for improving the design efficiency of photonic crystals with specific shape of "atom", but also can effectively reduce the control blindness of polarizations and enhance the experimental efficiency accordingly.

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(11504114, 11247253)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZZ056)、广东开放大学2015年度科研课题项目(1513)、华南理工大学第二批探索性实验教项目(Y1150620)

作者简介: 戚志明(1979—),女,硕士,讲师,主要从事计算机应用和新材料方面的研究。E-mail: zhiming_qi@foxmail.com

*通信联系人。E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

Key words materials; photonic crystals; holographic fabrication; computer simulation; polarization combination; real-time display

OCIS codes 160.5298; 090.5694; 260.5430

1 引 言

近年来,人们对信息容量及其传输速度的要求与日俱增,随着集成电路的集成度和处理速度的不断提高,电子器件小型化导致的电路阻抗和能量损耗急剧增大,使得以半导体为基础的电子集成芯片及微电子技术面临着发展瓶颈。与电子相比,光子具有宽带、快速和互不干扰等优点。因此,人们迫切希望发展光信息科学以突破微电子学的发展瓶颈。光子晶体是一类能在亚波长尺度上控制光子行为的新型人工结构,被誉为光子学中的“半导体”,是发展光信息科学的重要基石。光子晶体最早于1987年由美国的Yablonovitch^[1]和John^[2]分别在讨论抑制自发辐射和无序电介质材料中的光子局域时提出,根据周期性可分为一维、二维和三维光子晶体。其中,二维光子晶体对光具有良好的控制能力,且制备相对简单,除了光子禁带和光子局域特性外,利用其通带的色散特性还可实现负折射、超准直和超棱镜等反常传输效应^[3-12],这使得二维光子晶体在光子集成、光子晶体微腔、宽带全反射等领域中具有重要的应用价值。早期对二维光子晶体的研究主要集中在正方晶格、三角晶格等特殊晶格^[10-12],而普通的斜方晶格光子晶体更加适用于制作弯曲波导^[13]、光学聚焦器件^[14]等,但相关研究相对较少。

如何高效制作光子晶体已成为近年来光信息科学领域的研究重点之一。目前制备光子晶体的主要方法有半导体微加工技术^[15]、胶体自组织生长法^[16]、激光直写法^[17]和激光全息法^[18-19]等。其中半导体微加工技术是基于半导体成熟工业技术发展起来的,是一种制备光子晶体的可靠方法,但是其工艺复杂,造价较为昂贵;胶体自组织法生长的颗粒一般为球形,适用于制作面心立方或体心立方等三维光子晶体,但其占空比控制困难;激光直写法利用光敏材料的双光子聚合反应,由聚焦的飞秒激光逐点刻写微结构,其效率较低,聚合的单元一般为椭球。与前述方法不同,激光全息法是一种并行刻写的方法,它通过多束相干激光形成周期驻波图案进行曝光,其干涉图样可由各光束的波矢构型进行控制,且其占空比可由曝光量自由控制,具有灵活高效、干涉图样丰富、结构高度有序、便于大面积制作等优点,这使得激光全息法尤其适用于制作亚波长微结构。近年来,人们利用激光全息法制作了周期结构^[18-19]、缺口环超材料^[20]和螺旋光子晶体^[21]等多种微结构模板,而且还可根据实际需要进行二次加工,例如利用另外一束光引入缺陷、填充高折射率材料等。

目前,制备光子晶体的激光全息法可分为两类:1)是多光束干涉法,其原理是将来自于同一激光器的多束相干光汇聚叠加,利用感光材料单次或多次曝光制作光子晶体模板;2)是计算全息法^[22],其原理是利用计算机的数值计算替代物理光学中的干涉衍射过程,事先根据全息计算理论生成光子晶体微结构的计算全息图,然后以此为基础实现微结构模板,最后再以填充材料等方式制作光子晶体。后一类方法(即计算全息法)因制作复杂具有较大局限性,故应用较少。而第一类方法(即多光束干涉法)由于操作较为方便,而且可用于制作大面积的周期结构,因此备受关注。然而该类方法在实验制作时面临光束偏振调节这一关键问题。由于参与干涉的各光束可以设为线偏振、圆偏振、椭圆偏振等不同的偏振态,它们的不同组合对微结构制作(例如“原子”的形状、取向等)的影响十分显著,然而光束的偏振组合十分繁多,在实验操作时存在较大的盲目性,需要反复调节和大量试制样品以获得满意的样品。因此,有必要系统研究偏振组合对光子晶体制作的影响,以进一步提高实验效率。

本文以二维斜方晶格光子晶体为研究对象,结合多光束干涉原理和计算机数值模拟,首先从理论上研究不同偏振组合对微结构“原子”形状的影响,然后进一步设计实验方案进行验证,利用互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器将光子晶体微结构实时传输到电脑中进行监控,灵活调节各光束的偏振态和光强,获得不同偏振组合和光强比条件下的多种斜方晶格光子晶体,实验结果与理论预测、数值模拟结果均符合得很好。

2 激光全息法制作光子晶体的实验原理

多光束干涉原理是激光全息法制作光子晶体的理论基础。从本质上看,就是利用多束相干光汇聚产生空间周期变化的驻波图案,进而通过光与物质的相互作用在记录材料上形成有序结构的过程。在实验中,

通常选用连续激光作为光源,并用单色平面波 $\mathbf{E} \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta)]$ 近似描述单束连续激光(其中 \mathbf{E} 、 \mathbf{k} 、 δ 分别为电矢量、波矢、初相位)。在线性光学范围内,光波的振动遵守线性叠加原理, N 束光在相干区域的光强空间分布 $I(\mathbf{r})$ 为^[18]

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_{\text{total}}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_{\text{total}}^*(\mathbf{r}) \\ &= \sum_{i,j=1}^N (\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_j^*) \exp[i(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \cdot \mathbf{r} + (\delta_i - \delta_j)] \\ &= \sum_{i,j=1}^N S_{ij} \exp[i(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij})] \\ &= S_0 + \sum_{i,j=1, i \neq j}^N S_{ij} \exp[i(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij})] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{g}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$ 和 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 分别为波矢差和初相位差, S_0 为本底光强,每两束光电矢量之间的点积 $S_{ij} = \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_j^*$ 是光强分布 $I(\mathbf{r})$ 的傅里叶变换系数。根据固体物理知识,可引入正空间点阵基矢 $\{\mathbf{a}_m; m = 1, 2, 3\}$ 和对应的倒空间点阵基矢 $\{\mathbf{b}_n; n = 1, 2, 3\}$ 来分析光强函数 $I(\mathbf{r})$ 的周期性,其中 $\mathbf{a}_m \cdot \mathbf{b}_n = 2\pi\delta_{mn}$ 。将波矢差 \mathbf{g}_{ij} 等效为倒空间矢量,则任意不同方向的两束相干光 \mathbf{k}_i 和 \mathbf{k}_j 叠加可形成一维晶面,各种取向的晶面叠加可产生二维、三维周期结构。进一步研究表明,当将 \mathbf{b}_n 和 \mathbf{g}_{ij} 对应后,上述激光干涉产生的光强分布是以 $\{\mathbf{a}_m\}$ 为基矢的周期函数,对于任一正空间格矢 $\mathbf{R} = l_1\mathbf{a}_1 + l_2\mathbf{a}_2 + l_3\mathbf{a}_3$ ($l_1, l_2, l_3 \in \text{整数}$),光强分布函数均满足 $I(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r} + \mathbf{R})$,其形成的微结构晶格类型仅取决于波矢差 \mathbf{g}_{ij} 。这表明干涉光场具有空间周期性,适用于制作周期结构。

另一方面,由于在特定条件下椭圆偏振光可退化为线偏振光或圆偏振光,为便于分析偏振的影响,可用椭圆偏振光形式描述电矢量,将每束光的电矢量 \mathbf{E} 分解为初相位相差 $\pi/2$ 、振动方向彼此垂直的 \mathbf{E}_a (椭圆半长轴)和 \mathbf{E}_b (椭圆半短轴)分量,表达式如下:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_a + \mathbf{E}_b = E_a \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta)]\mathbf{e}_a + E_b \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta - \pi/2)]\mathbf{e}_b, \quad (2)$$

则干涉光场的空间分布表达式可改写为

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= \left| \sum_j E_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)]\mathbf{e}_{aj} + \sum_j E_{bj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j - \pi/2)]\mathbf{e}_{bj} \right|^2 \\ &= \sum_j (E_{aj}^2 + E_{bj}^2) + \sum_{i < j} 2E_{ai}E_{aj}\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij}) \\ &\quad + \sum_{i < j} 2E_{bi}E_{bj}\mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij}) \\ &\quad + \sum_{i < j} 2E_{ai}E_{bj}\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij} - \pi/2) \\ &\quad + \sum_{i < j} 2E_{bi}E_{aj}\mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij} + \pi/2) \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式可知,任意两束光叠加可形成一维晶面,各种取向的一维晶面的相对强弱不仅与光束的电矢量强度有关(如 E_{ai} 、 E_{bj}),而且还与其偏振夹角(如 $\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj}$ 、 $\mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{bj}$)密切相关。所有一维晶面的相对位置和相对强弱决定了由其叠加而成的微结构的“原子”形状。换言之,光束的偏振组合在调控微结构“原子”形状中起着关键作用。

3 斜方光学晶格的光束构型及数值模拟

3.1 光学晶格的光束构型设计思路

首先讨论光束构型的设计思路。以多光束干涉原理为基础,并结合结构维度和晶格类型,可确定参与干涉的光束数量、空间配置等基本参数,即确定光束构型。基本思路如下:1) 首先根据结构维度确定所需光束数量。由前面讨论可知,当 N 束非共面相干光汇聚时,两两干涉可形成 $N(N-1)/2$ 组取向不同的极大值平行平面。因此,一维结构仅需要两束相干光,此时仅有一组平行平面,即形成一维周期晶格;二维结构则需要 3 束非共面相干光,此时有 3 组方向不同的平行平面,它们在空间相交形成周期性的极值线,即二维周期晶格;对于三维结构,需要 4 束非共面相干光,此时存在 6 组平行平面,它们彼此相交形成三维周期结构。如果有

更多相干光参与干涉,将产生结构更加丰富、“原子”形状更加复杂的周期结构;2) 根据晶格类型确定各光束的空间配置。从正结构基矢 $\{\mathbf{a}_m; m = 1,2,3\}$ 出发,计算其对应的倒格子基矢 $\{\mathbf{b}_n; n = 1,2,3\}$,然后将 \mathbf{b}_n 与若干个波矢差 \mathbf{g}_i (其个数具体由晶格维度决定)对应起来,进而利用 \mathbf{g}_i 确定各光束的传播方向和空间分布,给出各光束的空间配置。值得指出的是,对于周期晶格而言,除与倒格子基矢 \mathbf{b}_n 对应的基本波矢差 \mathbf{g}_i 以外,其他“多余”的波矢差所对应的非基本倒格矢不会破坏图样的平移对称性,因为它们并非独立基矢,而是所选波矢差 \mathbf{g}_i 的线性叠加,后面将以斜方晶格为例进一步说明。

3.2 斜方晶格光子晶体的光束构型分析

二维光学晶格包括斜方(也称平行四边形)、长方、三角和正方晶格4种类型。不失一般性,本文选取最普通的斜方晶格为例研究不同偏振组合对微结构的影响,其他类型晶格可类似研究。如前所述,二维周期结构仅需3束非共面相干光,其波矢差有3种组合,但仅有两个为独立基矢,设为 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$, 令 $\mathbf{b}_1 = \mathbf{g}_{21} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1, \mathbf{b}_2 = \mathbf{g}_{32} = \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_2$, 不难看出, $\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1 = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2$ 并非独立基矢,而是 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ 的线性叠加。正结构光学晶格的对称性完全取决于倒格子基矢 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ 之间的对称关系。为方便起见,在后面讨论中假设各光束的初相位均为零。

斜方晶格是最普通的二维周期结构,根据固体物理知识可知,斜方晶格的参数条件为 $|\mathbf{b}_1| \neq |\mathbf{b}_2|$, 且其夹角不为 90° 。若不对相干光的波矢差作任何限制,将产生斜方晶格光子晶体。图1(a)为产生该类光子晶体的一种光束构型,设3束相干光环绕Z轴分布且汇聚于轴上某一区域,它们与Z轴的夹角(即极角)均为 30° 。由于3束光均来源于同一激光器,故其波矢长度相等,各波矢的始端均落在XOY平面上以原点为圆心的某一圆周上,其投影与X轴的夹角(即方位角)分别为 $\varphi_1 = -36^\circ, \varphi_2 = 62^\circ, \varphi_3 = 118^\circ$ 。需要指出的是,由于制作斜方晶格只需要3束不共面的相干光,故这里选取的极角、方位角并没有特殊的含义。根据固体物理正、倒格子间的互易关系,很容易推导出任意两束相干光形成的平行平面间距(即晶格常数)为 $d = \lambda / [2\sin(\theta/2)]$, 式中 λ 为波长, θ 为两光束的夹角。可见,光束间夹角越小,光子晶体的晶格常数越大,在实验方案中应根据需要进行设计。

图1(a)的光束构型在XOY平面上的投影如图1(c)所示,可以看出共有3组波矢差 $\mathbf{g}_{21}, \mathbf{g}_{32}$ 和 \mathbf{g}_{31} , 在前述几何参数条件下,可推导出 $\mathbf{g}_{21} \approx 1.6\mathbf{g}_{32}$ (即 $\mathbf{g}_{21} \neq \mathbf{g}_{32}$), 且其夹角约为 77° , 满足斜方晶格的参数条件。图1(b)给出了斜方晶格的正、倒空间基矢示意图,当选择 $\mathbf{g}_{21}, \mathbf{g}_{32}$ 为倒格子基矢(即 $\mathbf{g}_{21} = \mathbf{b}_1, \mathbf{g}_{32} = \mathbf{b}_2$)时,将形成以 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ 为基矢的斜方晶格光子晶体。

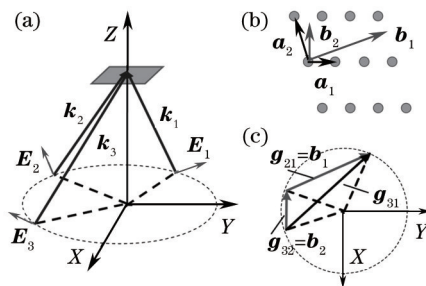


图1 (a) 斜方晶格光子晶体的光束构型; (b) 斜方晶格正、倒空间基矢 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ 和 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ 示意图; (c) 斜方晶格光束构型的波矢差分析图
Fig.1 (a) Beam configuration for rhombic lattice photonic crystal; (b) basic vectors of $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ and $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ for rhombic lattice in real and reciprocal space respectively; (c) schematic diagram of wave-vector difference for rhombic lattice

3.3 不同偏振组合对微结构的影响及数值模拟

激光全息法制作微结构的关键因素之一是各光束的偏振组合调节。由于各光束不共面,故其电矢量不可能完全一致,其两两相干只是各光束在特定方向上的电矢量分量的叠加,而总干涉效果则是所有两两相干结果的几何叠加。因此,光束的偏振组合对微结构的“原子”有着显著的影响。在前面的多光束干涉原理讨论中已将每束光的电矢量分解为椭圆偏振光的形式。为方便起见,在数值计算中,将 \mathbf{E}_{ij} 的方向 \mathbf{e}_{ij} 定义为垂直于波矢 \mathbf{k}_j 的平面和XOY平面的交线,而 \mathbf{E}_{ij} 的方向 \mathbf{e}_{ij} 由 \mathbf{k}_j 叉乘 \mathbf{e}_{ij} 得出。后面各图上部的偏振组合符号说明如下:所有偏振均位于垂直于波矢 \mathbf{k}_j 的平面内,其中水平(或垂直)双箭头表示平行于长轴 \mathbf{E}_{ij} (或短轴 \mathbf{E}_{ij})的线偏振光,椭圆表示椭圆偏振光,圆代表圆偏振光。

首先讨论各光束偏振演变对微结构“原子”的影响。图2为等光强条件下各光束的偏振态分别演变的模

拟结果。 $k_1 \sim k_3$ 的偏振组合具体见各子图上部符号,其演变规律为水平(沿长轴)线偏振→椭圆→圆→沿短轴的线偏振。为便于分析偏振的影响,在演变过程中假设其他两束光的偏振状态保持不变。图2(a1)~(a4)为 k_2 、 k_3 均为水平线偏振光时 k_1 演变的模拟结果。可以看出,当3束光均为线偏振光时,仅产生一组干涉条纹,结合图1(c)可以看出其原因是 k_1 、 k_2 在 XOY 平面内的偏振方向几乎互相垂直,不存在干涉效应,因此退化为一维情况。随着 k_1 偏振逐渐演变, k_1 、 k_2 的平行分量逐渐增大,从而形成斜方晶格微结构。图2中(b)、(c)系列分别为 k_2 、 k_3 偏振单独演变的结果,可看出 k_2 的偏振演变对微结构“原子”形状、取向和位置的影响较为明显,而 k_3 的影响相对较小,其原因分析如下:以 k_1 为参考, k_2 的偏振改变引起的平行分量改变更加敏感(相对 k_3 的偏振改变而言)。

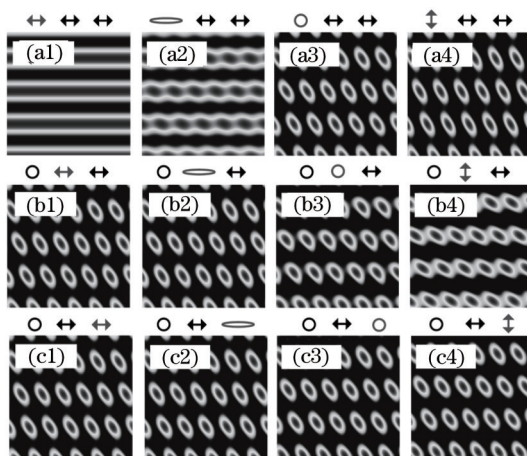


图2 等光强条件下各光束偏振态分别演变对“原子”的影响, $k_1 \sim k_3$ 的偏振组合具体见各子图上部图形。

系列(a)~(c)为 k_1 、 k_2 、 k_3 单独演变时的模拟结果

Fig. 2 Influence of different polarization combinations on "atom" under equal intensity condition. Polarization combinations of $k_1 \sim k_3$ are shown on the top of each subplot. Series (a)~(c) are the simulation results when k_1 , k_2 or k_3 varies independently

由上述讨论可知,当各光束的偏振态发生改变时,它们两两干涉产生的一维条纹的光强极大、极小值和位置也会改变,从而导致叠加后的“原子”位置、形状和取向发生相应改变。由于光束的偏振态可以设为线偏振、圆偏振和椭圆偏振,进一步考虑线偏振的取向和椭圆偏振光的椭圆度,各光束的偏振组合将极其繁多,故可产生图样种类极其丰富的“原子”形状。图3(a1)~(a3)给出了等光强条件下($I_1:I_2:I_3=1:1:1$)3组典型偏振组合的模拟结果。可以看出,选取不同的偏振组合可获得不同形状的“原子”,这将为实验制作特定“原子”形状的光子晶体提供指导。

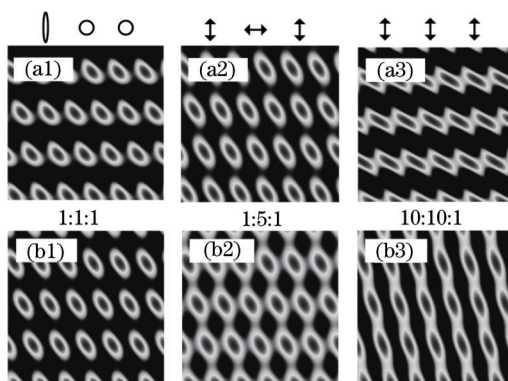


图3 (a1)~(a3) 等光强情况下3种偏振组合的模拟结果;(b1)~(b3)同一偏振组合“○ — —”在不同光强比条件下的模拟结果

Fig. 3 (a1)~(a3) Simulation results for three typical polarization combinations under equal intensity condition.

(b1)~(b3) simulation results for different intensity ratios with polarization combination of "○ — —"

此外,还进一步研究了光强比变化对微结构的影响。图3(b1)~(b3)给出了 $k_1 \sim k_3$ 偏振组合为“○ — —”(即圆-线-线)条件下不同光强比的模拟结果。当光强比为1:1:1时,形成椭圆“原子”长轴沿左上方取向的斜方晶格微结构;当光强比变为1:5:1时,“原子”形状由椭圆变成近似平行四边形;当光强比变为10:10:1时,“原子”形

状变为离心率更大的狭长椭圆。可见,各光束的光强比对原子形状同样存在显著影响。这是由于不同的光强比可直接影响到两两干涉的一维晶格的极大、极小值,从而影响最终的微结构“原子”的形状分布。

4 激光全息制作实验方案及结果讨论

为了验证上述理论预测及数值模拟结果的正确性,进一步设计实验方案进行验证。在实验方案中引入计算机实时显示手段,利用 CMOS 传感器将干涉产生的微结构实时传输到电脑中进行监控,进而调节各光束的偏振态和光强,最后得到所需的光子晶体微结构。这不仅有助于提高实验操作的方便性,而且可减少实验过程中偏振操控的盲目性,从而提高实验效率。

4.1 实验方案设计及步骤

在实验中选取波长为 532 nm 的单纵模半导体连续激光器作为光源,有关参数如下:线宽小于 1×10^{-5} nm,相干长度大于 50 m,偏振度大于等于 100:1,功率 50 mW 左右,这完全能够满足本实验的要求。由于激光器的功率较大,为安全起见,在图 4(a)的实验光路中加入若干中性滤波片(元件 a)以减弱光强。实验方案及步骤如下:

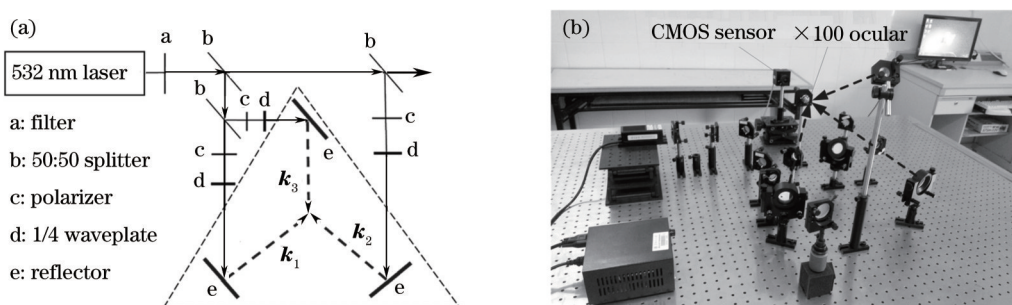


图 4 (a)实验光路图;(b)全息实验装置

Fig.4 (a) Experimental light-path diagram; (b) holography experimental setup

1) 搭建实验光路。实验光路可分为平面光路和立体光路两部分,其中平面光路部分利用 50:50 分光镜(元件 b)将出射激光分为 4 束等强度光束,根据前面分析可知产生二维微结构需要 3 束非共面光束,因此 4 束光中的一束为闲置光。而立体光路部分[图 4(a)中的三角形虚线框]利用万向反射镜将除闲置光外的 3 束激光变成非共面光束,并汇聚干涉产生光子晶体微结构。光路中的偏振片(元件 c)和 1/4 波片(元件 d)的作用是调节各束激光的偏振态及光强。具体按照图 1(a)光束构型的参数搭建产生斜方晶格光子晶体的实验光路;

2) 将微结构图样传输到电脑进行实时监控。图 4(b)为实验室搭建的实际光路,图中蓝色虚线表示 3 束非共面激光[与图 4(a)立体光路部分对应]。将 3 束激光汇聚于 $\times 100$ 显微目镜前干涉产生斜方晶格微结构,然后由 CMOS 传感器采集放大后的微结构图样实时传输至电脑,利用配套的软件监控斜方晶格微结构;

3) 实时调节光束参数获得所需的微结构“原子”分布。由于实际搭建的光路和理想光路存在一定的误差,因此需要进一步在预设的光束参数基础上加以调节。“原子”的形状分布主要取决于各光束的偏振组合和光强比,在实验中具体通过调节偏振片和 1/4 波片来改变各光束的偏振态和光强,当得到所需的微结构后将图像拍摄保存。

4.2 实验结果讨论及应用展望

验证了多种“原子”形状的斜方晶格光子晶体微结构。由于偏振组合繁多,为方便起见,在此仅选取几种代表性偏振组合的结果进行说明。对于等光强情况,以图 3(a2)的偏振组合为例,图 5(a1)~(a3)是 3 束光两两干涉产生的一维周期结构,可看出它们的取向与图 1(c)中的波矢差 g_{ij} 互相垂直,符合正、倒空间基矢关系 $a_m \cdot b_n = 2\pi\delta_{mn}$,叠加将产生图 5(b)的斜方晶格微结构。对于光强比变化情况,以图 3(b2)、(b3)为例。图 5(c)、(d)给出了偏振组合为“○ — —”条件下,光强比分别为 1:5:1 和 10:10:1 的实验结果。可以看出,尽管受 CMOS 传感器性能所限微结构的分辨率不够高,但是实验结果均和理论预测、数值模拟一致。进一步研究表明,其他多种偏振组合的实验结果也符合得很好。由于本实验主要利用计算机实时显示辅助分析不同偏振组合对微结构“原子”的影响,在实验方面只是进行了初步的实验验证,并未引入光刻胶实际制作,如需要可加入光刻胶制作。

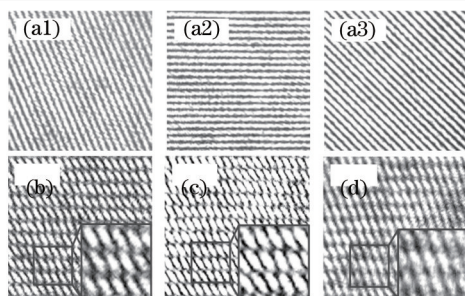


图5 实验结果。(a1)~(a3)光束两两干涉形成的一维周期结构,它们叠加形成图(b)的斜方晶格光子晶体;
(c)、(d)“O - -”偏振组合下两种光强比的实验结果

Fig.5 Experimental results. (a1)~(a3) One-dimensional periodic structures resulted from the two-two beams interference, whose superposition will produce the rhombic lattice shown in (b); (c) and (d) are the experimental results under two cases of intensity ratios with polarization combination of “O - -”

为了更好地指导今后的实验研究,下面就如何制作特定结构的光子晶体和选取光刻胶曝光等方面进行简要讨论。首先,制作特定结构光子晶体的关键在于确定各光束在空气中的传播方向。由于各束光倾斜入射到光刻胶上会产生折射,这将改变光刻胶内部各光束的光束配置,从而影响光子晶体结构。因此,在设计实验方案时应结合光刻胶的折射率,利用折射定律反推各光束在空气中的光束配置,即确定它们在空气中的传播方向。其次,光刻胶的选取及曝光也会影响光子晶体的结构。根据化学反应机理和显影原理,光刻胶可分为正性和负性两类。对于正性光刻胶,大于曝光阈值的部分会形成可溶物质,在冲洗过程中被去除,未曝光的部分形成光子晶体模板;而负性光刻胶的性质与此相反,冲洗过程中未曝光的部分会被去除。因此,选择不同性质的光刻胶进行实验可得到互补的光子晶体模板。而曝光量与介质的占空比有密切联系,曝光时间越长,曝光量越大,相应地介质的占空比将越小(正性光刻胶)或越大(负性光刻胶)。在实验设计中应根据需要选取光刻胶和设定合适的曝光量。

由上述讨论可知,本文中经过改进后的激光全息法应用前景更加广阔。通过灵活调节各光束的偏振组合和光强比,不仅能够制作特定“原子”形状、取向的光子晶体,而且可结合计算机技术通过参数优化获得高对比度的微结构。尤其值得指出的是,该方法不仅适用于本文研究的二维简单晶格光子晶体的制作,如引入更多的干涉光束,还可用于制作二维复式晶格或者三维光子晶体等更为复杂、更加丰富的周期微结构。并将在今后的研究中进一步进行探讨。

5 结 论

系统地研究了干涉光束不同偏振组合对二维光子晶体微结构全息制作的影响。以二维斜方晶格微结构为例,利用多光束干涉原理,并结合结构维度和晶格类型讨论了全息制作的设计思路,并给出相应的光束构型,然后利用 Matlab 编程进行数值模拟,系统地探讨了各光束偏振的演变对光子晶体微结构“原子”分布的影响,发现光束的偏振组合及光强比对微结构“原子”分布具有显著的影响;进一步结合计算机实时显示设计全息实验进行了验证,获得了多种偏振组合和不同光强比条件下的微结构,发现实验结果与理论预测、数值模拟结果均符合得很好。以上理论和实验研究有助于提高特定“原子”分布的光子晶体结构设计效率,减少偏振操控的盲目性以提高实验效率。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
 - 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
 - 3 Fan C Z, Wang J Q, He J N, *et al.*. Theoretical study on the photonic band gap in one-dimensional photonic crystals with graded multilayer structure[J]. Chin Phys B, 2013, 22(7): 074211.
 - 4 He Zhiyu, Jiao Hongfei, Cheng Xinbin, *et al.*. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic band gap[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0231002.
- 贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0231002.

- 5 Liu Qi'neng. Interference theory of the defect mode in one-dimensional doped photonic crystal[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806001.
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论[J], 中国激光, 2013, 40(8): 0806001.
- 6 Wang X, Gao W S, Hung J, *et al.*. Optical activities of large-area SU8 microspirals fabricated by multibeam holographic lithography [J]. Appl Opt, 2014, 53(11): 2425–2430.
- 7 Zhou Xingping, Shu Jing. Novel 1×3 splitter based on photonic crystals self-collimation effect[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0423002.
周兴平, 疏 静. 基于光子晶体自准直效应的新型1×3分束器[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0423002.
- 8 Zhang X, Chen Y H. Broadband phase retarder based on one-dimensional photonic crystal containing mu-negative materials[J]. J Opt Soc Am B, 2012, 29(10): 2704–2709.
- 9 Liu Yanhong, Dong Lijuan, Liu Lixiang, *et al.*. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0823001.
刘艳红, 董丽娟, 刘丽想, 等. 基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0823001.
- 10 Liang W Y, Chen W H, Yin M, *et al.*. Highly efficient beam combiner based on the super-collimation effect in photonic crystals with elliptical rods[J]. J Opt, 2014, 16(6): 065101.
- 11 Li W, Zhang X G, Lin X L, *et al.*. Enhanced wavelength sensitivity of the self-collimation superprism effect in photonic crystals via slow light[J]. Opt Lett, 2014, 39(15): 4486–4489.
- 12 Liang W Y, Liu X M, Yin M. Large-angle beam splitter with sensitive adjustable power ratio based on superprism effect[J]. J Phys D: Appl Phys, 2013, 46(49): 495109.
- 13 Gao D, Zhou Z, Citrin D S. Self-collimated waveguide bends and partial bandgap reflection of photonic crystals with parallelogram lattice[J]. J Opt Soc Am A, Opt Image Sci Vis, 2008, 25(3): 791–795.
- 14 Ogawa Y, Omura Y, Iida Y. Study on self-collimated light-focusing device using the 2-D photonic crystal with a parallelogram lattice[J]. J Lightwave technol, 2005, 23(12): 4374–4381.
- 15 Loncar M, Doll T, Vuckovic J, *et al.*. Design and fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides[J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(10): 1402–1411.
- 16 Jin C, McLachlan M A, McComb D W, *et al.*. Template-assisted growth of nominally cubic (100)-oriented three-dimensional crack-free photonic crystals[J]. Nano Lett, 2005, 5(12): 2646–2650.
- 17 Jia T, Baba M, Suzuki M, *et al.*. Fabrication of two-dimensional periodic nanostructures by two-beam interference of femtosecond pulses[J]. Opt Express, 2008, 16(3): 1874–1878.
- 18 Mao W D, Zhong Y C, Dong J W, *et al.*. Crystallography of two-dimensional photonic lattices formed by holography of three noncoplanar beams[J]. J Opt Soc Am B, 2005, 22(5): 1085–1091.
- 19 Lü H, Zhao Q L, Zhang Q Y, *et al.*. Fabrication of two-dimensional superposed microstructure by interference lithography[J]. Appl Opt, 2012, 51(3): 302–305.
- 20 Liang G Q, Mao W D, Zou H, *et al.*. Holographic formation of large area split-ring arrays for magnetic metamaterials[J]. J Mod Opt, 2008, 55(9): 1463–1472.
- 21 Pang Y K, Lee J, Lee H, *et al.*. Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography[J]. Opt Express, 2005, 13(19): 7615–7620.
- 22 Liu Y Z, Pang X N, Jiang S J, *et al.*. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling[J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12068–12076.

栏目编辑: 张浩佳