

光束偏振对三角光子晶体全息制作影响的仿真研究

梁文耀 何锐斌 林灯荣 龚珏

华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510641

摘要 从多光束干涉基本原理出发,对激光全息制作光子晶体的普遍规律和影响因素进行了研究。进一步通过 Matlab 软件进行数值仿真,以三角晶格为例系统研究了光束的不同偏振类型组合对光子晶体微结构的影响。利用三角晶格光束配置的对称性,在等光强条件下研究了三组共 10 种不同光束偏振组合对微结构的光强极大、极小值和对比度的影响,进一步总结了激光偏振改变时光子晶体微结构的变化规律,并得到了实现最佳对比度三角晶格微结构的偏振组合。

关键词 材料; 光子晶体; 激光全息; 数值仿真; 偏振

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.091601

Influence of Beam Polarizations on Holographic Fabrication of Triangular Photonic Crystals

Liang Wenyao He Ruibin Lin Dengrong Gong Jue

School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract Based on the multiple beam interference principle, the common rules and influence factors in holographic fabrication of photonic crystals are studied. Furthermore, taking triangular lattice as an example, the polarization combinations influence on photonic crystal microstructures is studied by Matlab simulations. Using symmetry of the beam configuration of triangular lattice, the influence of polarization combinations on the intensity maximum, minimum value and contrast under the equal intensity condition is studied by dividing ten kinds of polarization combinations into three groups. The influence rules of polarization change on the photonic crystal microstructures are further summarized. Finally, a set of optimal polarization combination for triangular lattice with optimal contrast is obtained.

Key words materials; photonic crystals; laser holography; numerical simulation; polarization

OCIS codes 160.5298; 090.2910; 260.5430

1 引言

光子晶体是介电常数在波长尺度上按周期排列的人工微结构材料,其概念由 Yablonivitch 和 John 在 1987 年首次提出^[1-2],可分为一维、二维和三维光子晶体。光子晶体存在光子带隙^[3-4]、光子局域^[5]、超准直^[6]、磁光效应^[7]等众多新颖的物理效应,可用于制作全向反射镜^[8]、多通道滤波器^[9]、光学微腔^[10]等各种光子晶体器件,在集成光电子学、光通信、量子光学等领域具有重要的应用前景。由于光子晶体的巨大潜在应用价值,设计和制作可见光和近红外波段的光子晶体已成为光学领域的研究热点之一。

人们提出了多种制作光子晶体的方法,主要包括半导体微电子加工技术^[11]、聚焦激光刻蚀法^[12]、胶体颗粒自排法^[13]和激光全息法^[14]等,其中半导体微电子加工技术较成熟,但是工艺复杂,成本较高;聚焦激光刻蚀法

收稿日期: 2016-03-22; **收到修改稿日期:** 2016-04-05; **网络出版日期:** 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(11504114,11247253)、国家留学基金、中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZZ056)、国家大学生创新创业训练计划项目(201410561108)、华南理工大学教研教改项目(Y1141830)、华南理工大学第二批探索性实验项目(Y1150620)、2015 年学生研究计划资助项目

作者简介: 梁文耀(1981—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体和超材料等方面的研究。

E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

是利用聚焦的飞秒激光逐点刻蚀微结构,效率较低,而且形成的刻蚀单元一般为椭球形状;胶体颗粒自排法是将介质微粒均匀混入特殊溶液中,通过自组织生长成面心立方、体心立方等三维周期结构,工艺较为简单,但是能够形成的结构非常有限,难以避免随机缺陷。与上述方法不同,激光全息法利用多束相干光在相干区域形成光强有序分布的周期干涉图案,进而通过光与物质相互作用制作折射率在空间周期变化的有序结构,通过调整干涉光束方向可以获得不同维度、不同类型的周期微结构,具有灵活、高效、可大面积制作等独特的优点,目前已被用于制作不同类型的周期结构^[14-16]、准晶结构^[17]、螺旋光子晶体^[18]等新型结构。

利用激光全息法制作光子晶体的关键技术之一是各光束偏振的调节。因此,研究光束偏振对于干涉图案的影响并找出最佳的偏振态组合,对制作微结构光子晶体具有重要意义。光束之间的夹角大小会影响干涉图案所能达到的最大对比度;各光束的偏振会影响干涉图案的分布、对称性和光强对比度,而这些因素对图案的影响并非相互独立,所以在实验中探索相关规律具有较大的挑战性,需要花费大量的时间和精力。因此,从理论上找出其变化规律至关重要,这将有助于降低实验操作难度及提高制作效率。

以具有高度对称性的三角晶格光子晶体为研究对象,根据多光束干涉原理,结合 Matlab 语言编程进行数值模拟,研究了三组共 10 种偏振组合情况下干涉图案的空间分布特点,讨论了不同偏振类型组合对三角晶格微结构的影响规律,得到了制作具有最佳对比度的三角晶格光子晶体的最优偏振组合。

2 激光全息法的基本原理

多光束干涉原理是激光全息法制作光子晶体的物理基础。激光全息微制作是利用多束相干光在空间会聚形成干涉图案,并用合适的介质材料来记录强度变化,进而通过填充等方式形成周期微结构的一种方法。由于其形成的干涉图案周期与干涉波长同量级,而且高度有序,因此在实验中可通过调整光束参数灵活改变图案的结构类型和元胞分布。

激光具有高度的相干性,通常被用作全息干涉实验的光源。为便于后续分析偏振的影响,以椭圆偏振光形式描述各束光的偏振,将振幅 \mathbf{E}_j 分解为相位相差 $\pi/2$ 、振动方向相互垂直的两个线偏振光,与椭圆长短轴对应的振幅分别为 \mathbf{E}_{aj} 和 \mathbf{E}_{bj} ,即 $\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{aj} + \mathbf{E}_{bj} = E_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] \mathbf{e}_{aj} + E_{bj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} - \pi/2)] \mathbf{e}_{bj}$,则 N 束非共面干涉光在会聚区域的空间光强分布 $I(\mathbf{r})$ 为

$$\begin{aligned}
 I(\mathbf{r}) = & \left| \sum_j E_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] \mathbf{e}_{aj} + \sum_j E_{bj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} - \pi/2)] \mathbf{e}_{bj} \right|^2 = \\
 & \sum_j (E_{aj}^2 + E_{bj}^2) + \sum_{i < j} 2E_{ai} E_{aj} \mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r}) + \\
 & \sum_{i < j} 2E_{bi} E_{bj} \mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r}) + \\
 & \sum_{i < j} 2E_{ai} E_{bj} \mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} - \pi/2) + \\
 & \sum_{i < j} 2E_{bi} E_{aj} \mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \pi/2), \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{g}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$ 为波矢差。(1)式中已经忽略了各束光的初相位,即假设彼此间的相位差为零。分析(1)式可知:第 1 个求和项为本底光强,后 4 个为干涉项。在各个干涉项中有两类关键因子,即 \mathbf{g}_{ij} 和 $2E_{ai} E_{aj} \mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj}$ 、 $2E_{bi} E_{bj} \mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{bj}$ 等,下面分别对其进行讨论。

第一类因子 \mathbf{g}_{ij} 为任两束光的波矢差,其组合决定了干涉图案的晶格类型。根据固体物理知识,光强 $I(\mathbf{r})$ 的周期性可由正、倒空间点阵基矢量 $\{\mathbf{a}_m; m=1,2,3\}$ 和 $\{\mathbf{b}_n; n=1,2,3\}$ 进行分析,其中 $\mathbf{a}_m \cdot \mathbf{b}_n = 2\pi\delta_{mn}$ 。当将 \mathbf{g}_{ij} 和倒空间矢量 \mathbf{b}_n 对应起来后,干涉产生的光强分布是以 $\{\mathbf{a}_m\}$ 为基矢的周期函数,对于任一正空间位置矢量 $\mathbf{R} = l_1 \mathbf{a}_1 + l_2 \mathbf{a}_2 + l_3 \mathbf{a}_3$,其中 $l_1, l_2, l_3 \in \mathbf{Z}$, \mathbf{Z} 为整数集,均满足 $I(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r} + \mathbf{R})$,其形成的周期结构类型仅取决于波矢差 \mathbf{g}_{ij} ,这表明上述干涉光场具有空间周期性,可用来制作周期结构。

第二类因子与振幅的大小和方向有关,它们决定了周期结构的元胞分布。实际上,多光束干涉可处理为若干个双光束干涉的叠加,任意两束光干涉产生一维晶面结构,各种不同取向的一维晶面叠加产生特定元胞分布的周期微结构。而各种晶面的相对强弱不仅与光束的电矢量强度有关(如 E_{aj} 、 E_{bj} 等),而且还与它们

的偏振夹角(如 $\mathbf{e}_{aj} \cdot \mathbf{e}_{bj}$ 等)有密切关系。可见,光束的偏振态会导致干涉图案出现不同的元胞形状并影响其对比度。

3 三角晶格光子晶体的光束配置分析

首先讨论干涉图案的维度和光束数的关系。 N 束非共面入射光束两两干涉形成的不同平行平面组数为

$$n = C_N^2 = (N-1) + (N-2) + \cdots + 1 = N(N-1)/2, \quad (2)$$

这些不同方向的平面互相交叠,就会形成极值点或者极值线。例如当 $N=2$ 时,会产生一组平行极大值平面,即一维周期结构;当 $N=3$ 时,会产生方向不同的三组平行极大值平面,它们在空间相交而成的极值点在二维上周期变化,但在第三维上是极值线,因此三束光能形成二维周期图案。如要形成二维复式晶格结构或三维结构,至少需要 4 束光,本文主要讨论二维简单晶格情况,故仅考虑 $N=3$ 的情形。

二维光学晶格包括斜方、长方、正方和三角晶格 4 种类型。光束的偏振态可按照线偏振、椭圆偏振和圆偏振进行分类,而按照每束光 3 种偏振态进行组合,共有 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 种组合。椭圆偏振态根据偏振度不同还可定义出不同的 E_a 和 E_b 组合,这将增加计算机仿真的复杂性并带来一定的难度。三角晶格是一种典型的二维微结构,产生三角晶格的三束光具有高度的对称性,这将使偏振态的组合数由 27 种减少到 10 种。为方便起见,本文选择三角晶格进行讨论。

下面给出三角晶格的光束配置和模拟实例。如前所述,二维周期结构仅需三束非共面相干光,其波矢差仅有两个是独立的,令 $\mathbf{b}_1 = \mathbf{g}_{13} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_3$ 、 $\mathbf{b}_2 = \mathbf{g}_{32} = \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_2$, 则 $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2$ 并非独立基矢。三角晶格的产生条件为: \mathbf{g}_{13} 与 \mathbf{g}_{32} 之间的夹角为 60° 且 $|\mathbf{g}_{13}| = |\mathbf{g}_{32}|$ 。图 1(a) 给出了产生三角晶格的一种光束配置,三束光关于 z 轴呈对称分布, $\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_3$ 的极角均为 30° , 方位角分别为 $180^\circ, -60^\circ, 60^\circ$, 彼此间夹角为 120° 。图 1(b) 为 xoy 平面上的波矢差分析图。根据固体物理正、倒格子间的互易关系,可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。数值计算中采用的工作波长为 532 nm, 根据上述参数及图 1(a) 的几何关系,可求得干涉产生的三角晶格微结构的晶格常数为 $d = 614.3$ nm。

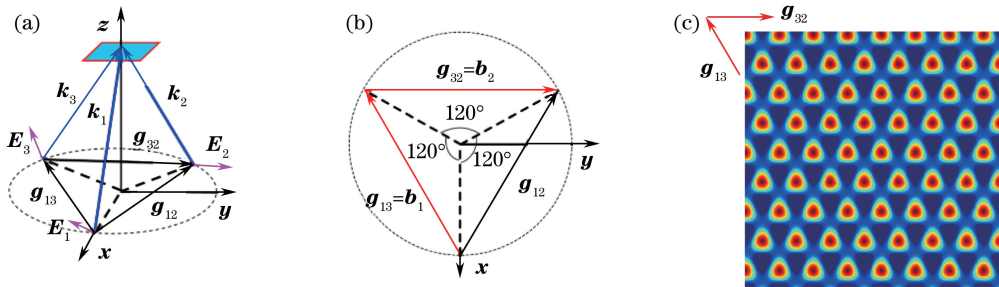


图 1 (a)三角晶格的光束配置;(b) xoy 平面上的波矢差分析图;(c)模拟实例

Fig. 1 (a) Beam configuration of triangular lattice; (b) schematic diagram of \mathbf{k} -vector difference on xoy plane; (c) simulation example

利用 Matlab 语言编写程序对三角晶格微结构进行了数值模拟。在数值计算中,定义 E_a 的默认方向为垂直波矢 \mathbf{k} 的平面和 xoy 平面的交线,而 E_b 的方向由波矢 \mathbf{k} 又乘 E_a 得出。图 1(c) 为图 1(a) 光束配置下的一个模拟实例,其中 \mathbf{k}_1 为圆偏振光, $\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ 为线偏振光,其具体参数见表 1。

表 1 图 1(c) 中三角晶格的光束配置参数

Table 1 Beam parameters of triangular lattice for Fig. 1(c)

k_i	Direction		E_a and E_b					
	$\theta_k / (^\circ)$	$\varphi_k / (^\circ)$	$ E_a $	$\theta_a / (^\circ)$	$\varphi_a / (^\circ)$	$ E_b $	$\theta_b / (^\circ)$	$\varphi_b / (^\circ)$
k_1	30	180	1	90	270	1	60	0
k_2	30	-60	$\sqrt{2}$	90	30	0	60	120
k_3	30	60	$\sqrt{2}$	90	150	0	60	120

4 不同偏振态组合对干涉图案对比度及对称性的影响

激光的偏振态会导致干涉图案出现不同的元胞形状并影响其对比度,研究偏振对晶格图案影响的具体规律,对激光全息制作微结构具有重要意义。由于光束的偏振可以分为线偏振、圆偏振、普通的椭圆偏振等形式,其中,线偏振和圆偏振可看作是特殊的椭圆偏振。为便于分析,将线偏振、圆偏振独立出来,与普通的椭圆偏振并列讨论。如前所述,三角晶格的高度对称性可使三束光的偏振组合由 27 种减为 10 种,为方便起见,下面以三角晶格为例研究偏振对干涉图案影响的基本规律和变化趋势。

对比度是衡量图像质量的一个重要参数,对视觉效果的影响非常关键,一般对比度越大,图像越清晰醒目。增强对比度可提高图像的清晰度、细节表现和灰度层次表现,可使图像获得更佳的视觉效果,提高人眼对信息的辨别能力。对比度的定义有多种,采用迈克耳孙对比度^[19],定义为

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

式中的 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为干涉场的极大和极小值。迈克耳孙对比度与人的视觉感受中视锥细胞对视场光通量的空域频率的感受程度在理论上是一致的。

利用 Matlab 数值模拟仿真研究了 10 种不同偏振组合的干涉情况,并利用仿真出来的数据矩阵,求出了对应的极大值 I_{\max} 、极小值 I_{\min} 和对比度 γ ,再将数据矩阵以二维图像的形式显示出来。根据光束相同类型的数量来对偏振组合进行分类,可分为三束光偏振均相同、两束光偏振相同和三束光偏振均不同等三组情况,下面分别对其进行讨论。如无特殊说明,后文线偏振的默认振动方向为前文提到的 E_a 方向,即垂直波矢 k 的平面和 xoy 平面的交线,椭圆偏振光的默认偏振度为 $P = E_b/E_a = 1/2$ 。

4.1 三束光的偏振类型均相同

偏振类型相同的三束光组合情况共有三种,即均为线偏振、均为椭圆偏振和均为圆偏振。图 2 为线偏振(默认)和椭圆偏振(默认)时,三种组合所产生的晶格图案,其相应的极大、极小值和对比度见表 2。

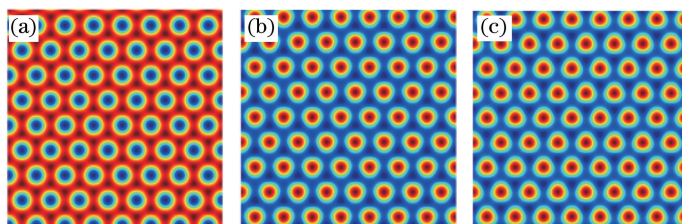


图 2 三束光的偏振态相同的干涉图案。(a)线偏振;(b)椭圆偏振;(c)圆偏振

Fig. 2 Interference patterns of the three beams with the same polarization.

(a) linear polarization; (b) elliptical polarization; (c) circular polarization

表 2 产生图 2 三角晶格的极大值、极小值和对比度

Table 2 I_{\max} , I_{\min} and contrast corresponding to Fig. 2

Beam polarization combination	I_{\max}	I_{\min}	γ
Linear, linear, linear	9	0	1
Elliptical, elliptical, elliptical	14.7853	0.9	0.8852
Circular, circular, circular	15.6692	0.0808	0.9897

由图 2 可以看出,在三束光的配置具有高度对称的情况下,其产生的干涉晶格图案也呈现出高度的对称性。在元胞分布方面,三束光均为线偏振的光强分布与另两种情况的光强分布具有互补性,其中,当三束光均为线偏振时,以极小值为中心形成严格的圆形元胞;当均为椭圆偏振或圆偏振时,以极大值为中心形成元胞且其形状由圆退化为多边形。在对比度方面,由表 2 可以看出,当三束光均为线偏振时,图像的对比度达到最大值 1;均为圆偏振时,对比度有所降低,为 0.9897;而当均为椭圆偏振时,对比度最低,为 0.8852。其原因分析如下:由于参与干涉的各束光不共面,其电矢量不可能完全一致,它们之间的相干只是各束光在特定方向上分量之间的叠加,而总的相干效应是三个垂直偏振分量各自相干结果的几何叠加。当均为线偏振光时有最佳的对比度,在其他两种情况下,干涉分量偏离最佳的分布,使得对比度降低。由上述分析可知,三束光均为线偏振且

偏振矢量 \mathbf{E}_{aj} 平行于 xoy 平面时,可得到元胞形状为圆形、晶格图案具有最佳对比度的三角晶格光子晶体。

在上述基础上,进一步考虑下述两种情况光束偏振对三角晶格的影响。

1) 对于三束光均为线偏振光的情况,将三束光的偏振方向同时绕各自光矢量 \mathbf{k}_j 逆时针旋转特定的角度后(即 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$),得到的晶格图案如图 3 所示,对应的参数见表 3。

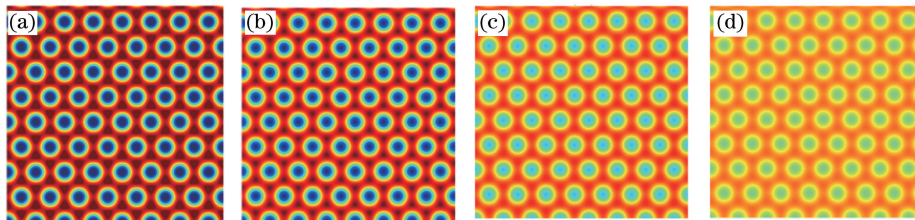


图 3 偏振方向同时旋转特定角度后的干涉图案。(a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; (d) 90°

Fig. 3 Interference patterns with different polarization directions synchronously rotated (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° and (d) 90°

表 3 产生图 3 三角晶格的极大、极小值和对比度

Table 3 I_{\max}, I_{\min} and contrast corresponding to Fig. 3

Beam polarization combination	Rotation angle / ($^\circ$)	I_{\max}	I_{\min}	γ
Linear, linear, linear	0	9	0	1
Linear, linear, linear	30	8.4375	1.125	0.7647
Linear, linear, linear	60	7.3125	3.375	0.3684
Linear, linear, linear	90	6.750	4.500	0.20

由图 3 可以看出,偏振方向旋转不同角度产生的晶格图案具有相同的元胞形状,但是对比度存在明显差异。通过表 3 可看出,旋转角度从 0° 逐渐增大到 90° , 图案的对比度呈下降趋势;当三束光均为线偏振光且沿默认方向时,图像的对比度达到最大值 1;当偏振方向依次旋转 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时,对比度由 0.7647 下降到 0.3684,直至最小值 0.20。结合图 3(d) 可以看出,此时图案变得模糊难以分辨。由上述分析可知,三束光均为线偏振且偏振矢量 \mathbf{E}_{aj} 平行于 xoy 平面时(不做角度旋转情况下),可以得到具有最佳对比度的三角晶格光子晶体,这跟上文的结论一致。而当偏振方向旋转角度增大时,晶格的对比度下降。

2) 光束均为椭圆偏振时,同时改变三束光的椭圆偏振度 P ,得到的晶格图案如图 4 所示,对应的参数见表 4。

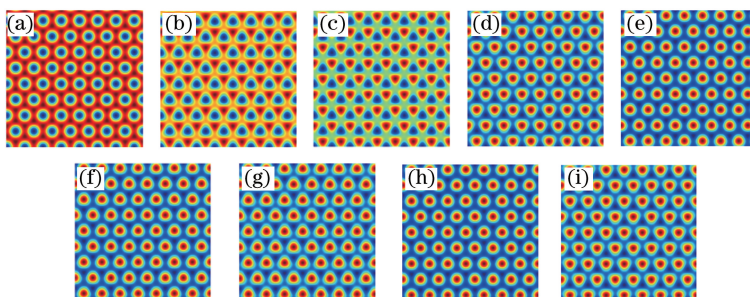


图 4 不同椭圆偏振度下的干涉图案。(a) 0; (b) 0.1; (c) 0.2; (d) 0.4; (e) 0.8; (f) 1; (g) 2; (h) 5; (i) 10

Fig. 4 Interference patterns for different polarizations of (a) 0, (b) 0.1, (c) 0.2, (d) 0.4, (e) 0.8, (f) 1, (g) 2, (h) 5 and (i) 10

由图 4 可以看出产生晶格图案之间对比度的差异,由表 4 可看出,随着椭圆偏振度 P 从 0(此时为线偏振)逐渐增加,图案的对比度呈先下降后上升再下降的变化趋势。对比度的两个极大值分别对应 $P=0, 1$ 两种情况,即当三束光均为线偏振光和均为圆偏振光时,所产生晶格的对比度出现最大值,介于两者之间的椭圆偏振产生的晶格图案的对比度较低。

表 4 产生图 4 三角晶格的极大值、极小值和对比度

Table 4 I_{\max} , I_{\min} and contrast corresponding to Fig. 4

$P = E_b/E_a$	I_{\max}	I_{\min}	γ
0	9	0	1
0.1	10.5211	0.0446	0.9916
0.2	11.9112	0.1731	0.9714
0.4	14.0649	0.6207	0.9155
0.8	15.7260	4.500	0.9362
1	15.6692	0.0808	0.9897
2	13.4353	0.9646	0.8660
5	9.8342	3.8388	0.4385
10	8.3157	4.4554	0.3023

4.2 两束光的偏振类型相同

两束光偏振类型相同的偏振组合共有 6 种。线偏振和椭圆偏振光为默认设置情况下计算得到的晶格图案如图 5 所示(同一列为具有两束相同偏振态的配置组合),对应的参数见表 5。

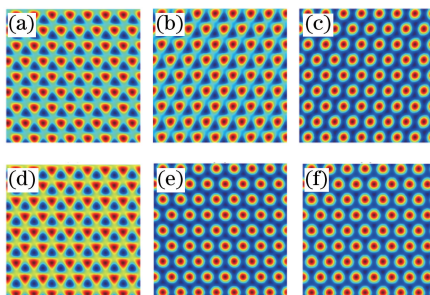


图 5 两束光偏振类型相同的组合下的干涉图案。(a)线偏振、线偏振和圆偏振;(b)椭圆偏振、椭圆偏振和线偏振;(c)圆偏振、圆偏振和线偏振;(d)线偏振、线偏振和椭圆偏振;(e)椭圆偏振、椭圆偏振和圆偏振;(f)圆偏振、圆偏振和椭圆偏振

Fig. 5 Interference patterns of the groups with two same polarizations. (a) Linear, linear, circular;

(b) elliptical, elliptical, linear; (c) circular, circular, linear; (d) linear, linear, elliptical;

(e) elliptical, elliptical, circular; (f) circular, circular, elliptical

表 5 产生图 5 三角晶格的极大值、极小值和对比度

Table 5 I_{\max} , I_{\min} and contrast corresponding to Fig. 5

Beam polarization combination	I_{\max}	I_{\min}	γ
Linear, linear, circular	12.5677	0.3491	0.9459
Elliptical, elliptical, linear	13.0876	0.5242	0.923
Circular, circular, linear	14.3481	1.7501	0.7826
Linear, linear, elliptical	11.279	0.1128	0.9802
Elliptical, elliptical, circular	15.3046	1.2651	0.8473
Circular, circular, elliptical	15.5808	0.5202	0.9354

结合图 5 和表 5 可知,当光束的偏振分布不对称时,产生的晶格图案也不具有良好的对称性质;有两束线偏振光的组合所形成的图案对比度比较高。

4.3 三束光的偏振类型均不同

对于三束光偏振类型均不同的组合,只有一种,即三束光分别为线偏振、椭圆偏振和圆偏振。进一步选取 4 种不同的椭圆偏振态(即椭圆偏振度变量 P 取不同的值)进行模拟仿真,得到的晶格图案如图 6 所示,对应的参数见表 6。

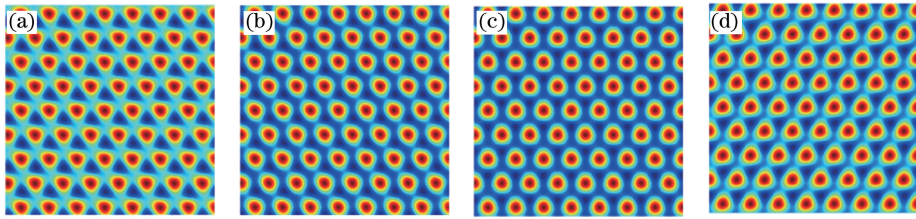


图 6 三束光偏振态各不相同时的干涉图案,其中椭圆偏振度 P 分别为 (a) 0.1, (b) 0.5, (c) 2, (d) 10

Fig. 6 Interference patterns for three different polarizations with elliptical polarization of (a) 0.1, (b) 0.5, (c) 2 and (d) 10

表 6 产生图 6 三角晶格的极大值、极小值和对比度

Table 6 I_{\max} , I_{\min} and contrast corresponding to Fig. 6

Beam polarization combination	P	I_{\max}	I_{\min}	γ
Linear, elliptical, circular	0.1	12.9031	0.4580	0.9314
Linear, elliptical, circular	0.5	13.8952	1.0341	0.8615
Linear, elliptical, circular	2	14.3246	0.9982	0.8697
Linear, elliptical, circular	10	13.6971	0.5241	0.9263

从图 6 和表 6 可以看出,当椭圆偏振光束的偏振度 P 取不同的值时,所产生图案的对比度也不同。当椭圆偏振度 P 从 0 到 1 再到 ∞ 变化时,实际上就是偏振组合由“线(默认)、线(默认)、圆”到“线(默认)、圆、圆”再到“线(默认)、线(旋转 90°)、圆”的演化过程,结合表 5 和表 6,可看出三束光偏振态互不相同的配置形成的图案对比度介于“线、线、圆”组合(0.9459)和“圆、圆、线”组合(0.7826)之间,与图 5 和图 6 的结果相一致。

综上所述,得出如下规律:要得到具有良好对称性的晶格图案,对应的光束偏振应该具有高度的对称性;线偏振和圆偏振由于具有良好的对称性质,所以产生的晶格对称性好,对比度高;椭圆偏振可视为介于圆偏振和线偏振之间的一种偏振状态,所以在其他参数不变的情况下,用椭圆偏振代替圆偏振或线偏振都会导致晶格图案对比度下降。最后,得到产生最高对比度的一组最优偏振组合,即三束光均为线偏振(方向沿 E_{aj} 的默认方向)时,可得到元胞形状为圆形、晶格图案具有对比度为 1 的三角晶格光子晶体。

5 结 论

通过计算机模拟仿真系统研究了干涉光束的偏振组合对三角晶格光子晶体全息制作的影响。从多光束干涉原理出发,讨论了三角晶格光子晶体的光束配置设计思路,给出相应的光束配置和 Matlab 编程模拟实例。结合数值模拟,将 10 种偏振组合按照光束偏振类型相同的数量分为三组进行研究,系统探讨了各光束偏振的变化对三角晶格光子晶体的极大、极小值和对比度的影响规律。研究表明:线偏振和圆偏振由于具有良好的对称性质,产生的元胞对称性好,对比度高;椭圆偏振作为介于圆偏振和线偏振之间的一种偏振状态,在其他参数不变的情况下,用它代替圆偏振或线偏振都会导致对比度下降;当三束光均为线偏振且偏振矢量平行于 xoy 平面时,可得到元胞为圆形、晶格图案具有最佳对比度的三角晶格光子晶体。该研究方法为寻找最佳偏振组合制作高对比度的光子晶体提供了一种有效手段。由于其他光子晶体结构的对称性不同于三角晶格,本结论不一定适用于其他光子晶格结构,但其研究方法可以推广和应用到其他光子晶体结构。在后续研究中将进一步研究其他晶格的情况,探讨不同晶格类型的对称性对全息制作的影响。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 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]. Chinese Physics B, 2013, 22(7): 074211.

- 4 Miao Lei, Shi Jiaming, Zhao Dapeng. Influence of material absorption spectrum and band gap of two dimensional photonic crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress. 2015, 52(12): 121601.
苗雷, 时家明, 赵大鹏. 材料吸收对二维光子晶体带隙和光谱的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 121601.
- 5 Wang X, Chen Z. Beam control and multi-color routing with spatial photonic defect modes[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16927-16932.
- 6 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]. Journal of Optics, 2014, 16(6): 065101.
- 7 Tang Yueming, Fang Yuntuan, Lü Cuihong, *et al.* Nonreciprocal transmission based on nonsymmetric coupling of magnetic microcavity in photonic crystal[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0606003.
汤月明, 方云团, 吕翠红, 等. 光子晶体磁性微腔非对称耦合的非互易传输[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0606003.
- 8 Fink Y, Winn J N, Fan S, *et al.* A dielectric omnidirectional reflector[J]. Science, 1998, 282(5394): 1679-1682.
- 9 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.
- 10 Han Lihong, Liu Liming, Guo Xuan, *et al.* Research and design of L3 square air holes photonic crystal cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1116005.
韩利红, 刘立明, 郭璇, 等. 正方形空气孔 L3 型光子晶体平板微腔的研究与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1116005.
- 11 Lončar M, Doll T, Vučković J, *et al.* Design and fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides[J]. Journal of Lightwave Technol, 2000, 18(10): 1402-1411.
- 12 Jia T, Baba M, Suzuki M, *et al.* Fabrication of two-dimensional periodic nanostructures by two-beam interference of femtosecond pulses[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1874-1878.
- 13 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 Letters, 2005, 5(12): 2646-2650.
- 14 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]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(5): 1085-1091.
- 15 Lü H, Zhao Q L, Zhang Q Y, *et al.* Fabrication of two-dimensional superposed microstructure by interference lithography[J]. Applied Optics, 2012, 51(3): 302-305.
- 16 Pu Y Y, Liang G Q, Mao W D, *et al.* Fabrication of two-dimensional photonic crystals with triangular rods by single-exposure holographic lithography[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(4): 983-985.
- 17 Mao W D, Liang G Q, Zou H, *et al.* Design and fabrication of two-dimensional holographic photonic quasi crystals with high-order symmetries[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(10): 2046-2050.
- 18 Pang Y K, Lee J, Lee H, *et al.* Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography[J]. Optics Express, 2005, 13(19): 7615-7620.
- 19 Doi M, Iwasaki Y, Shionoya T, *et al.* High-resolution displacement measurement using mode interference in the optical waveguide[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(5): 651-653.