

光学学报

多光束全息干涉法制作复式光子晶体的数值仿真研究

梁文耀^{1*}, 杨佳琪¹, 李志远^{1,2}

¹华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510641;

²广东晶启激光科技有限公司, 广东 东莞 523808

摘要 光子晶体是由介电材料周期排列构成的人工微结构,在集成光电子学、微纳光子学等领域具有广阔的应用前景。本文对多光束全息干涉法制作复式光子晶体进行了理论和数值研究,根据多光束干涉原理给出了一种复式光子晶体的光束配置,并编写了 MATLAB 仿真程序,仿真结果与理论预测符合得很好。在此基础上,研究了单束、两束、三束以及四束光的不同偏振组合对复式光子晶体元胞的影响规律。研究结果表明,光束偏振组合对元胞的影响十分显著,在不同的偏振组合条件下可以获得双水滴状、双圆形等各种元胞形状;当所有光束同为线偏振时,复式光子晶体具有最佳的对比度。此外,本文还探讨了入射光初相位的变化对复式光子晶体元胞的影响。研究结果对于设计具有各种元胞形状的复式光子晶体具有指导意义,并可用于物理实验教学。

关键词 材料; 光子晶体; 全息干涉法; 复式微结构; 数值仿真; 偏振组合; 对比度

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1116002

Numerical Simulation on Fabricating Compound Photonic Crystals by Multi-Beam Holographic Interferometry

Liang Wenyao^{1*}, Yang Jiaqi¹, Li Zhiyuan^{1,2}

¹ School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology,

Guangzhou, Guangdong 510641, China;

² Guangdong Full-Spectra Laser Technology Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523808, China

Abstract Photonic crystals, artificial microstructures composed of periodic dielectric materials, have broad application prospects in integrated optoelectronics, nanophotonics, and other fields. In this paper, the fabrication of compound photonic crystals by the multi-beam holographic interferometry is studied theoretically and numerically. According to the multi-beam interference principle, we design a beam configuration of compound photonic crystals and write a program by MATLAB. The simulation results agree well with the theoretical predictions. Furthermore, we symmetrically study the influences of single-beam, two-beam, three-beam, and four-beam polarization combinations on the unit cell of the compound photonic crystals. The results indicate that polarization combinations have a significant influence on the unit cell, and various unit-cell shapes such as double-drop and double-circle shapes can be easily obtained at different polarization combinations. The optimal contrast is achieved when all beams are linear polarization. Additionally, the influence of the initial phase of the incident light on the unit cell is discussed. The above research guides the design and fabrication of compound photonic crystals with various unit-cell shapes and can be used in the physics experiment teaching.

Key words materials; photonic crystals; holographic interferometry; compound microstructure; numerical

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2020-12-22; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0306200)、国家自然科学基金(12074127,11974119,11504114)、广东大学生创新创业教育研究中心项目(2018A030606)、广东省高等教育教学改革项目(x2wl-Y1191601)、广州市科技计划项目(201904010105)、华南理工大学教研教改项目(x2wl-Y1190281)、中央高校基本科研业务费重点项目(2019ZZ50)、2020 年学生研究计划(x2wl-C9202026)

* E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

simulations; polarization combination; contrast
 OCIS codes 160.5298; 120.2880; 220.4000

1 引言

光子晶体是由 Yablonovitch 和 John 在 1987 年提出的人工周期结构材料^[1-2], 该材料由介电材料按周期排列而成, 可在亚波长尺度上控制光子的传输行为, 被誉为光子学中的“半导体”。光子晶体的物理特性包括光子禁带^[3-4]、光子局域^[5]、负折射^[6-7]、超棱镜效应^[8-9]等, 这些特性使得光子晶体在光电子学和光通信方面具有很重要的应用价值, 可被用于设计光子晶体光纤、光分束器、光波导等^[10-12]。

与晶格结构的分类相似, 光子晶体可以分为简单晶格光子晶体和复式晶格光子晶体(后文将其分别简称为“简单光子晶体”和“复式光子晶体”)。其中, 简单光子晶体的每一格点仅含一个“原子”, 而复式光子晶体则由两个或两个以上简单的光子晶体嵌套而成, 其每一格点含两个或更多的“原子”^[13]。本文主要研究复式光子晶体。与简单光子晶体相比, 复式光子晶体具有更加丰富的物理性质, 例如: 具有更低的对称性, 能够解除光子能带简并对带隙宽度的限制, 从而增大完全带隙的带宽; 通过优化结构参数可以在二维复式正方光子晶体中实现类似三维光子晶体的完全禁带^[14]。除此之外, 复式光子晶体具有更多的结构和材料参数设计自由度, 有助于灵活设计更加丰富的光子晶体结构, 为深入挖掘光子晶体更多的新物理、新现象以及光子晶体的潜在应用提供了更加广阔的舞台。

在光子晶体的制备方面, 人们逐渐发展了多种制备方法。其中, 一维光子晶体的主要制备方法有镀膜、光刻等, 二维光子晶体的主要制备方法有木堆积法^[15]、电子束直写法^[16]、激光全息法^[17-20]等, 而三维光子晶体的主要制备方法有蘸笔纳米光刻术^[21]、胶体颗粒自组合法^[22]、多光束全息干涉^[23-24]等。在上述方法中, 激光全息法能够制备各种光子晶体结构, 具有低成本、大面积、灵活高效、图样丰富等独特优势^[17, 25-28]。其物理原理是利用多束相干激光干涉产生强度呈周期分布的干涉模板, 然后根据需要填充合适的材料就可得到所需的微结构。值得

指出的是, 激光全息法中参与干涉的光束数量可以根据所要制作的微结构的维度和复杂程度(如简单晶格或者复式晶格)灵活选取, 通过设计合适的光束配置和偏振参数, 可以获得不同维度、不同类型的各种简单或复式微结构, 这表明激光全息法在复式光子晶体制备方面具有独特的优势。如何灵活控制偏振组合是激光全息制作的关键, 而由于参与干涉的光束的偏振可为线偏振、圆偏振、椭圆偏振等状态, 光束还可以分为左旋光、右旋光, 还具有不同的偏振度, 因此光束的偏振组合极多, 迫切需要深入研究光束偏振组合对复式光子晶体的影响规律。

本文根据多光束干涉原理提出了一种四光束干涉实现复式光子晶体的光束配置, 结合计算机编程, 系统研究了单光束、两光束、三光束以及四光束的偏振组合对复式光子晶体元胞、对比度的影响规律, 并进一步研究了干涉光束的初相位对复式光子晶体的影响。研究结果对于设计具有特殊元胞形状的复式光子晶体具有一定的理论指导意义, 也可用于物理实验教学。

2 多光束全息干涉法的基本原理

2.1 多光束干涉原理

众所周知, 激光具有高单色性、高亮度、高方向性等特性, 是干涉实验中的常用光源, 可用平面波近似进行描述: $\mathbf{E}_j(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_j \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)]$, 其中波矢为 \mathbf{k}_j , 电矢量为 \mathbf{E}_j (包括振幅 E 与偏振方向 \mathbf{e}_j), 初相位为 δ_j , 波面上任一点的方向向量为 \mathbf{r} 。在一定条件下, 椭圆偏振光可以转变为圆偏振光和线偏振光^[13], 不失一般性, 在编写程序时默认干涉光为椭圆偏振光。椭圆偏振光可以分解为相位差为 $\pi/2$ 且互相垂直的两个线偏振分量 \mathbf{E}_a 和 \mathbf{E}_b (垂直于 \mathbf{k}_j 的平面与 xoy 平面的交线同 \mathbf{E}_a 的方向平行, \mathbf{E}_b 的方向由 $\mathbf{k} \times \mathbf{E}_a$ 确定), 故入射光可以改写为

$$\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{aj} + \mathbf{E}_{bj} = \mathbf{E}_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)] \mathbf{e}_{aj} + \mathbf{E}_{bj} \exp\left[i\left(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j - \frac{\pi}{2}\right)\right] \mathbf{e}_{bj} \quad (1)$$

在非强光范围内, N 束同频率、等强度的入射光在会聚区域的干涉场 $I(\mathbf{r})$ 的表达式为^[13, 17, 19]

$$I(\mathbf{r}) = |\mathbf{E}_{\text{total}}(\mathbf{r})|^2 = \left| \sum_j \mathbf{E}_{aj} \exp[i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)] \mathbf{e}_{aj} + \sum_j \mathbf{E}_{bj} \exp\left[i\left(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j - \frac{\pi}{2}\right)\right] \mathbf{e}_{bj} \right|^2 =$$

$$\sum_j (\mathbf{E}_{aj}^2 + \mathbf{E}_{bj}^2) + \sum_{i < j} 2\mathbf{E}_{ai}\mathbf{E}_{aj}\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij}) + \sum_{i < j} 2\mathbf{E}_{bi}\mathbf{E}_{bj}\mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij}) + \sum_{i < j} 2\mathbf{E}_{ai}\mathbf{E}_{bj}\mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{bj} \cos\left(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij} - \frac{\pi}{2}\right) + \sum_{i < j} 2\mathbf{E}_{bi}\mathbf{E}_{aj}\mathbf{e}_{bi} \cdot \mathbf{e}_{aj} \cos\left(\mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \delta_{ij} + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

式中： $\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$ 为波矢差； $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 为相位差。

由(2)式可知，当仅有两束光干涉时，其干涉结果为等间距的一簇平行平面，即一维周期晶格。当非共面相干光个数 N 大于 2 时，两两干涉的波矢差数量为 $N(N-1)/2$ ，相应会产生 $N(N-1)/2$ 组一维周期平面，它们彼此叠加形成最终的周期结构。具体而言，当 $N=3$ 时，存在 3 个波矢差(但仅 2 个彼此独立)，3 组不同取向的平行平面彼此叠加形成二维简单晶格结构；类似地，要形成三维结构至少需要四束光入射，此时存在 6 个波矢差，此时可进一步细分为两种情况，即：6 个波矢差非共面或完全共面。非共面时会产生三维周期结构，而完全共面时

则会产生二维复式周期结构。本文主要研究完全共面的情况，根据多光束干涉原理，即(2)式，在 MATLAB 中编写仿真程序，对二维复式周期结构进行研究。

2.2 复式光子晶体的光束配置

图 1 为本文设计的四束光组成的光束配置，其干涉结果为多套简单光子晶体嵌套而成的复式光子晶体，如图 2 所示。四束入射光的光强和极角均相同， $\mathbf{k}_1 \sim \mathbf{k}_4$ 的方位角分别为 $120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 0^\circ$ ，初相位均设为零，所有光束的初始偏振均设为椭圆偏振(其主轴沿各光束自身的 \mathbf{E}_a 方向，偏振度设为 $R = \mathbf{E}_b / \mathbf{E}_a = 0.2$)。

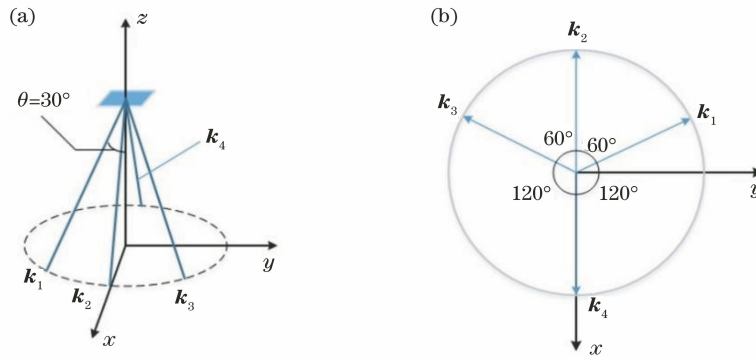


图 1 光束配置。(a) 复式光子晶体的光束配置；(b) 在 xoy 面上的投影

Fig. 1 Beam configuration. (a) Beam configuration for compound photonic crystal; (b) projection on xoy plane

根据多光束干涉原理，极角会对干涉图样产生影响。图 2 是四束光的极角同时变化且分别为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时的仿真结果，其中颜色条表示干涉强度 I (后面各图中颜色条的意义与此相同，不再逐一说明)。当极角变大时，干涉图样的结构类型不

变，但最大光强由 10.1419 降低至 8.9180，而且晶格常数逐渐变小，从而使得单位面积内的元胞个数逐渐增多。由于极角为 30° 时图样的疏密程度较为合适，因此在后续研究中将所有入射光的极角设为 30° 。

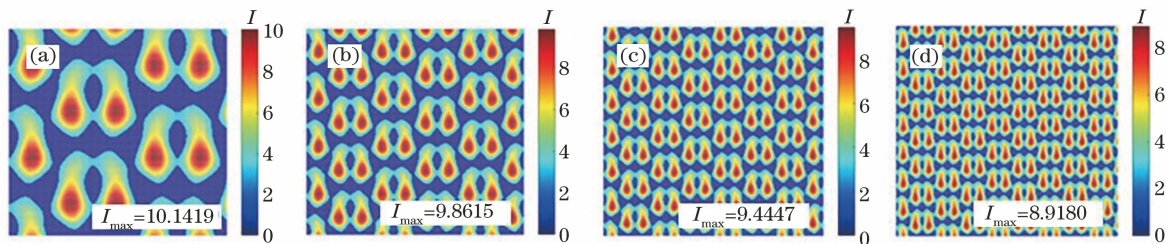


图 2 不同极角下光束的仿真结果。(a) 15° ；(b) 30° ；(c) 45° ；(d) 60°

Fig. 2 Simulations for beam at different polar angles. (a) 15° ；(b) 30° ；(c) 45° ；(d) 60°

3 光束偏振组合对晶格类型的影响

干涉光束的偏振态可以分为线偏振、椭圆偏振

和圆偏振。进一步考虑椭圆偏振度(即其长短轴之比)和偏振角(即其主轴与 xoy 平面的夹角)，椭圆偏振光还可以细分为更加复杂的情况。本文将采取

图 1 所示的光束配置,分别探究单光束、两光束、三光束以及四光束偏振变化对复式光子晶体的影响,每种情形下光束的偏振均按照“椭圆偏振($R = E_b/E_a = 0.2$) \rightarrow 沿 E_a 线偏振 \rightarrow 圆偏振 \rightarrow 沿 E_b 线偏振”的规律变化。本文通过比较各情况下干涉图样的最大、最小光强以及干涉对比度 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 对干涉结果进行评价。

3.1 单光束偏振变化的情况

在讨论每束光偏振单独变化时,保持另外三束光为椭圆偏振光($R = E_b/E_a = 0.2$)不变。图 3 为 k_1 偏振发生变化的仿真结果。从图 3 中可以看出,

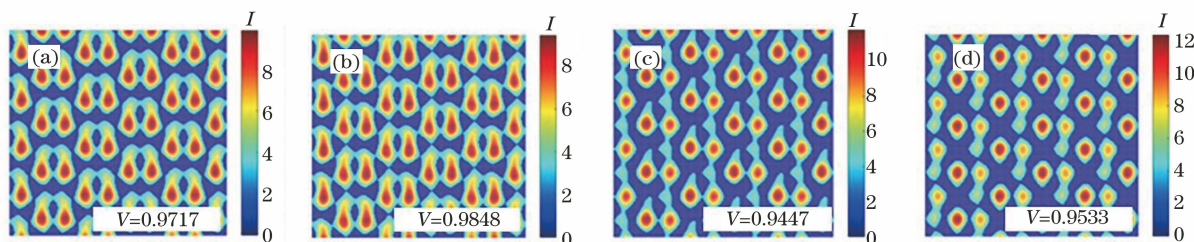


图 3 单光束 k_1 偏振变化时的仿真结果。(a)椭圆偏振;(b)沿 E_a 线偏振;(c)圆偏振;(d)沿 E_b 线偏振
Fig. 3 Simulation results when polarization of k_1 changes. (a) Elliptical polarization; (b) polarization along E_a line; (c) circular polarization; (d) polarization along E_b line

3.2 两光束偏振同时变化的情况

两束光偏振同时发生变化有多种情况,干涉种类十分复杂。为简便起见,本文只讨论两束光同时改变至同一偏振态,而另外两束光始终保持为椭圆偏振(即 $R = E_b/E_a = 0.2$)的情形,此时共有 (k_1, k_2) 、 (k_1, k_4) 、 (k_2, k_3) 、 (k_3, k_4) 、 (k_1, k_3) 、 (k_2, k_4) 这 6 种情形,可以将其概括为“邻”“间”两类情况。“邻”是指两束入射光相邻,共有 (k_1, k_2) 、 $(k_1,$

当 k_1 为椭圆偏振时,元胞为双水滴状,当 k_1 偏振依次变化为沿 E_a 线偏振、圆偏振、沿 E_b 线偏振时,其左侧子元胞沿纵向拉长,逐渐连在一起,而右侧子元胞则逐渐退化为圆形,其原因在于 k_1 偏振的变化破坏了原先光束偏振分布的对称性。除图 3 所示的 k_1 偏振变化情况外,其他三束光单独变化的仿真结果也呈现出类似的演变规律,尤其是当 k_4 偏振发生变化时尤为明显。综合分析各种情况的对比度变化,可以得出如下结论:当单光束的偏振态改变后,对比度呈现周期性变化,且当单光束偏振改变至沿 E_a 线偏振时得到的对比度最大,干涉图样效果最好。

$k_4)$ 、 (k_2, k_3) 、 (k_3, k_4) 4 种情形;进一步由光束配置的对称性可知 (k_1, k_2) 与 (k_2, k_3) 等价, (k_1, k_4) 与 (k_3, k_4) 等价,故只需考虑 (k_1, k_2) 和 (k_1, k_4) 两种情形。“间”的组合共有 (k_1, k_3) 和 (k_2, k_4) 两种情形,下面分别进行讨论。

3.2.1 “邻”情况

图 4 为两种“邻”情况的仿真结果。由图 4(a1)~(a4)可以看出:当 k_1 和 k_2 的偏振同时

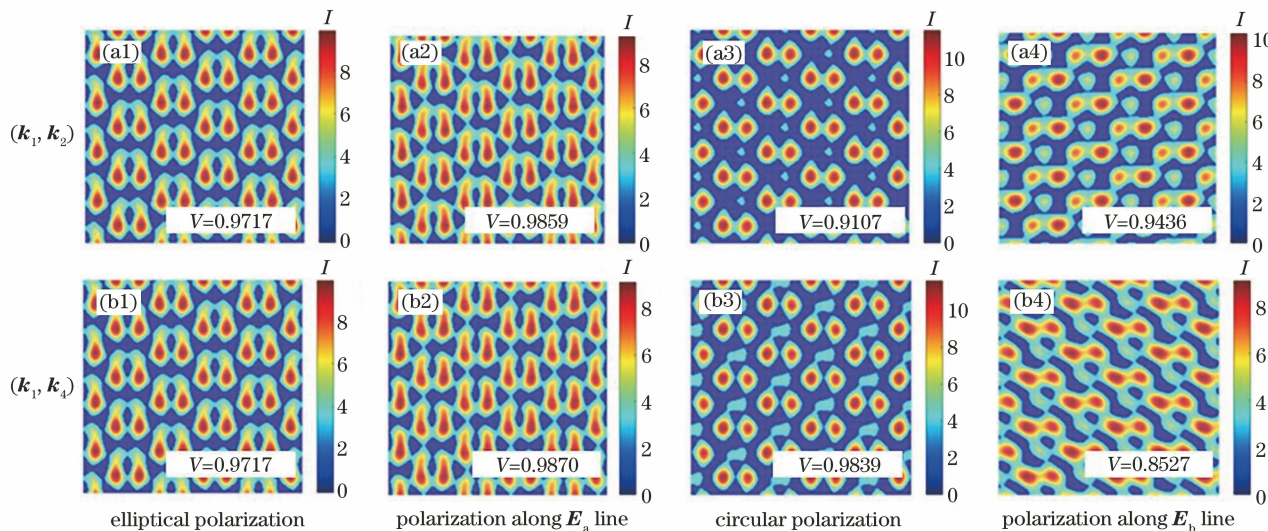


图 4 “邻”情况的仿真结果
Fig. 4 Simulation results in the “neighbor” cases

为椭圆偏振时,复式光子晶体的元胞包括两个水滴状子元胞;当偏振变成沿 E_a 线偏振时,两个子元胞沿 y 方向延伸;当偏振变为圆偏振时,两个子元胞均为圆形;当偏振变成沿 E_b 线偏振时,左侧子元胞干涉强度变小,两元胞上方又生成一小元胞。由图 4 (b1)~(b4)可以看出:当 (k_1, k_4) 的偏振为椭圆偏振和沿 E_a 线偏振时,即图 4(b1)~(b2),复式光子晶体的元胞形状与 (k_1, k_2) 的情况[即图 4(a1)~(a2)]基本相同;当其偏振为圆偏振时,左侧子元胞的干涉强度和大小相对于右侧子元胞较大;当 (k_1, k_4) 的偏振变成同时沿 E_b 线偏振时,两个子元胞呈

“左上-右下”分布的椭圆形,左侧子元胞的干涉强度同样较大。

3.2.2 “间”情况

图 5 为“间”情况的仿真结果。不难看出:当 (k_1, k_3) 与 (k_2, k_4) 的偏振态为椭圆偏振和沿 E_a 线偏振时,元胞形状与 (k_1, k_2) 同偏振态下的元胞形状基本相同[见图 4(a1)~(a2)];当 (k_1, k_3) 为圆偏振时,两个子元胞均为圆形;当 (k_1, k_3) 为沿 E_b 线偏振时,两子元胞呈现沿 y 方向拉伸的椭圆形;当 (k_2, k_4) 的偏振态为圆偏振和沿 E_b 线偏振时,子元胞形状均为圆形。

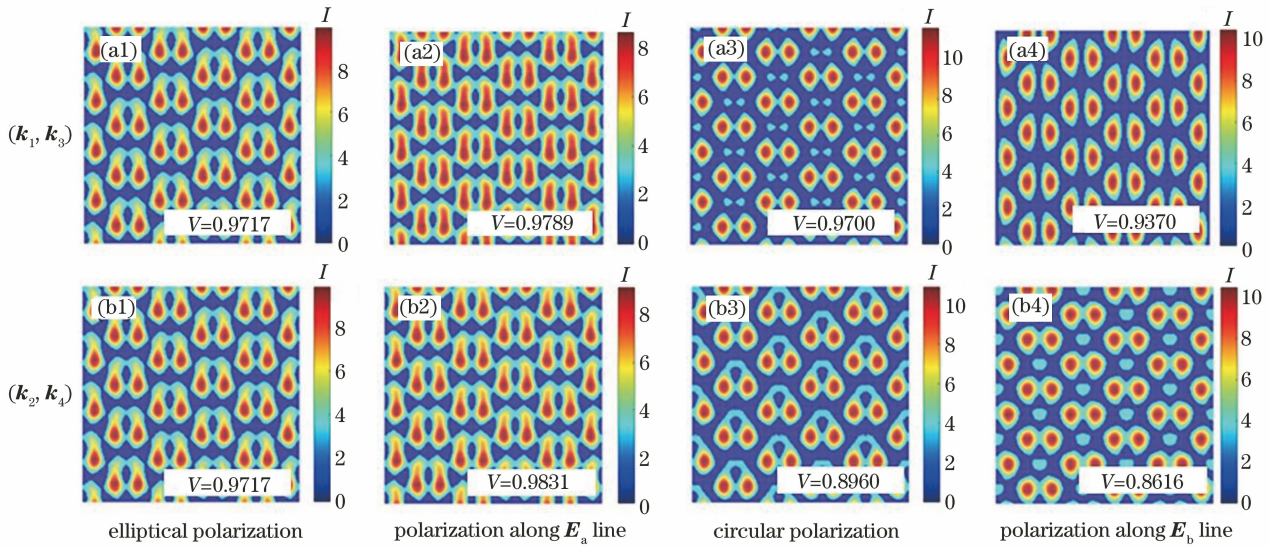


图 5 “间”情况的仿真结果

Fig. 5 Simulation results in the “interval” cases

在对比度方面,综合图 4、5 可以看出,不管是“邻”情况还是“间”情况,任意两束光同时变化至沿 E_a 线偏振时的对比度最大,沿 E_b 线偏振时的对比度最小,椭圆偏振和圆偏振时干涉图样的对比度位于中间范围。

3.3 三光束偏振同时变化的情况

三光束偏振变化存在多种情况,为简便起见,此

处仅对任意三束光偏振组合同时改变的情况进行探究。由于篇幅所限,本文只列出了 (k_1, k_2, k_3) 偏振同时变化的仿真结果,如图 6 所示。可以看出,三光束偏振同时变化对元胞的形状具有显著影响:同为椭圆偏振时,元胞为双水滴状;同为沿 E_a 线偏振时,元胞沿纵向拉伸变为双条状;同为圆偏振时,元胞为双圆形;同为沿 E_b 线偏振时,元胞变为三个相

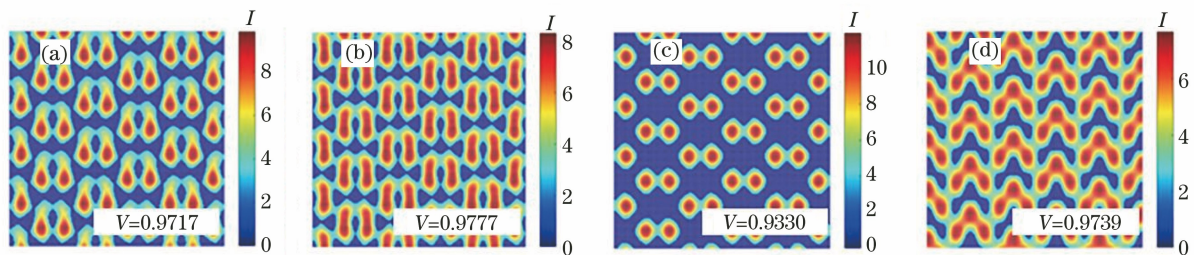


图 6 (k_1, k_2, k_3) 偏振同时变化的情况。(a)椭圆偏振;(b)沿 E_a 线偏振;(c)圆偏振;(d)沿 E_b 的线偏振

Fig. 6 Simulation results when the polarizations of (k_1, k_2, k_3) change simultaneously. (a) Elliptical polarization; (b) polarization along E_a line; (c) circular polarization; (d) polarization along E_b line

连的圆形子元胞。

在对比度方面,随着偏振由椭圆偏振→沿 E_a 线偏振→圆偏振→沿 E_b 线偏振演变,复式光子晶体的对比度由 0.9717 微升至 0.9777,随后快速下降至 0.9330,最后又剧烈上升。本文进一步对其余三束光组合在偏振变化下的对比度进行了计算,结果发现存在类似的对比度变化规律。在对所有情形分析之后得出如下结论:沿 E_a 线偏振时,得到的干涉图样效果最好,对比度较大;圆偏振时的效果最差,对比度最小;椭圆偏振光为这两种偏振的过渡状态,效果和对比度也位于这两者之间。

3.4 四光束偏振同时变化的情况

在前文可以发现,所有光束沿 E_a 方向线偏振

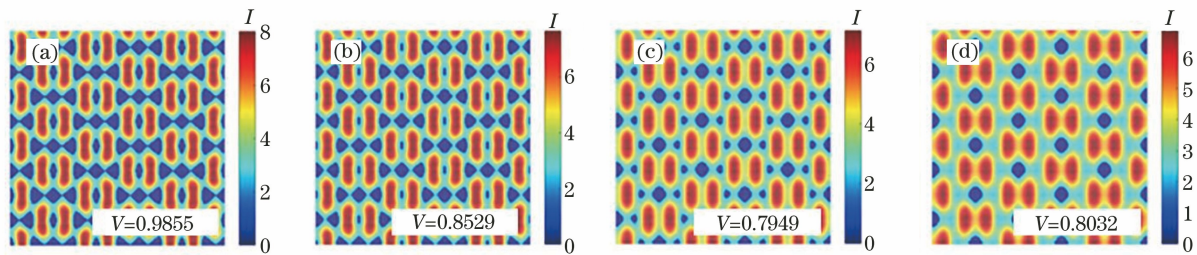


图 7 四束光偏振角 γ 同时变化的干涉图样。(a) $\gamma=0^\circ$;(b) $\gamma=30^\circ$;(c) $\gamma=60^\circ$;(d) $\gamma=90^\circ$

Fig. 7 Interference patterns with simultaneous changes of polarization angles γ of four beams.

(a) $\gamma=0^\circ$; (b) $\gamma=30^\circ$; (c) $\gamma=60^\circ$; (d) $\gamma=90^\circ$

4 不同初相位的影响

上述的研究均是基于初相位(δ)全为 0° 这一假设条件进行的,然而在实验操作中这一条件通常难以精确实现,因此有必要进一步研究初相位对复式光子晶体元胞的影响。为简便起见,本文只讨论四束入射光同为沿 E_a 线偏振时,单光束初相位改变对干涉图样的影响。由图 1 所示的光束配置图可知 k_1 和 k_3 具有对称性,因此对于单光束初相位的变化,实际上只有三种情况:(k_1, k_2, k_3) 保持不变, k_4 初相位改变;(k_1, k_3, k_4) 保持不变, k_2 初相位改变;(k_2, k_3, k_4) 保持不变, k_1 初相位改变[该情况与“(k_1, k_2, k_4) 保持不变, k_3 初相位改变”等价]。不失一般性,设保持不变的三束光的初相位为 0° ,相应的仿真结果分别如图 8(a1)~(a4)、(b1)~(b4)、(c1)~(c4) 所示。

由图 8(a1)~(a4) 可以看出,对于仅 k_4 初相位增大的情况,左侧子元胞形状基本不变,但右侧子元胞的强度逐渐变小并最终分裂为两个强度较低且相连的元胞。由图 8(b1)~(b4) 可以看出,对于仅 k_2

时可以得到具有最佳对比度的干涉图样,因此在下文的讨论中将四束光统一设置为沿 E_a 方向的线偏振光。图 7 给出了同时改变四束光的偏振角 γ 的仿真结果。可以看出,随着偏振角由 0° 逐渐增大到 90° ,复式光子晶体的双条状元胞逐渐缩短变为椭圆形,并且其两个子元胞彼此逐渐靠近。值得注意的是,偏振角的变化会显著改变干涉结果的对比度:当偏振角为 0° 时,对比度最大,为 0.9855;当偏振角为 60° 时,对比度最小,为 0.7949。这是因为当偏振角改变后,有效参与干涉的偏振平行分量会发生变化,导致干涉结果的本底光强相应改变,最终使得对比度随着偏振角增大经历先变小后变大的演变过程。

的初相位逐渐增大的情况,左侧子元胞呈现先分裂后合并继而再分裂的规律变化。由图 8(c1)~(c4) 可以看出,对于仅 k_1 初相位增大的情况,当 $\delta_1=60^\circ$ 时,左侧子元胞分裂为两个小元胞,右侧子元胞保持不变;当 $\delta_1=120^\circ$ 时,刚好相反,左侧子元胞保持不变,而右侧子元胞分裂为两个小元胞;当 $\delta_1=180^\circ$ 时,元胞恢复 $\delta_1=0^\circ$ 时的形状,但是位置发生了移动。这些现象的物理原因在于初相位的改变导致光束两两干涉的极值点位置发生了移动,从而使得两两干涉条纹叠加后的最终的元胞形状产生了变化。在对比度方面,由图 8 可看出,三种情况下各光束的初相位对干涉图样的对比度影响不大(对比度均在 0.94 以上)。

本课题组进一步得到了三束光的初相位同时为 30° 或 60° 时的仿真结果,结果表明,这两种情况仍然符合单束光初相位的改变对干涉图样对比度影响不大这一结论,但其干涉图样的元胞与不变的三束光初相位为 0° 的情况略有不同,其原因是该三束光的初相位改变导致两两干涉条纹叠加所形成的复式光子晶体元胞发生了变化,但该变化并不显著。

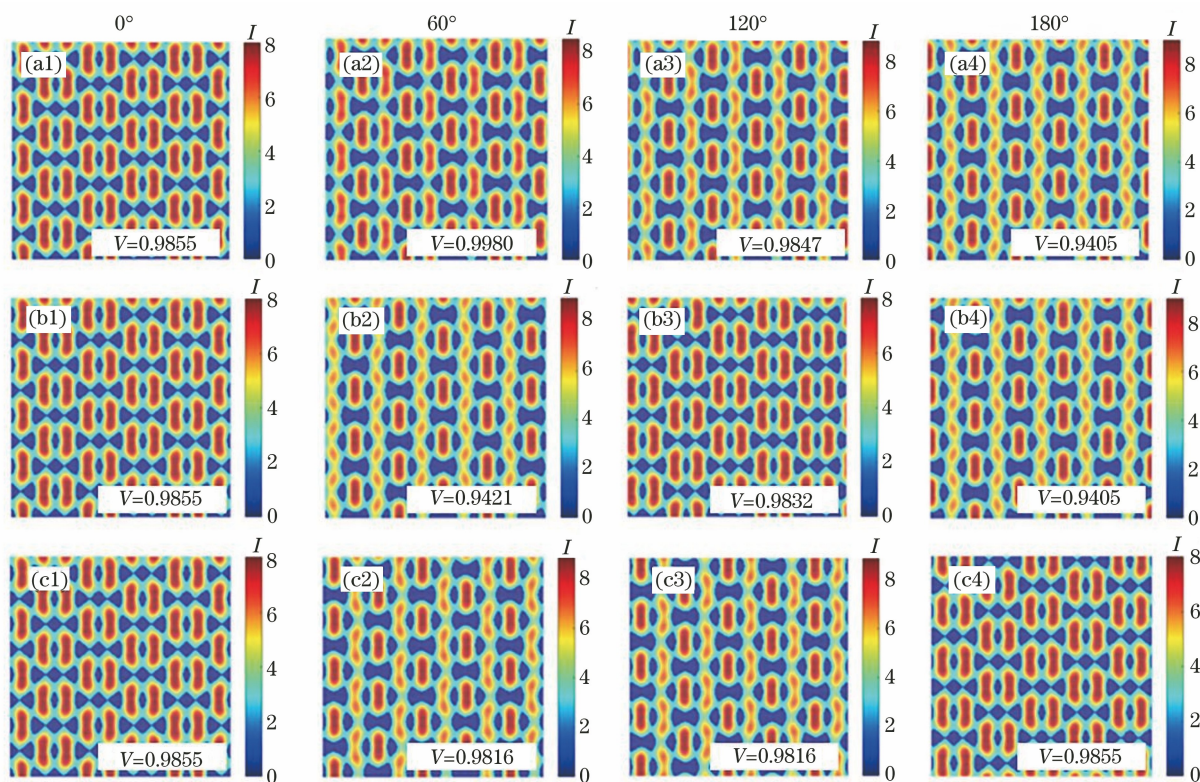


图 8 单束光初相位变化时的仿真结果。(a1)~(a4) $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$, δ_1 变化; (b1)~(b4) $\delta_1 = \delta_3 = \delta_4 = 0$, δ_2 变化; (c1)~(c4) $\delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = 0$, δ_1 变化

Fig. 8 Simulation results when initial phase of single light beam changes. (a1)~(a4) $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$, δ_1 changes; (b1)~(b4) $\delta_1 = \delta_3 = \delta_4 = 0$, δ_2 changes; (c1)~(c4) $\delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = 0$, δ_1 changes

5 结 论

本课题组从多光束全息干涉原理出发,结合固体物理的正、倒空间基矢特点,讨论了激光全息法制作光子晶体的理论基础及复式光子晶体的光束配置。在此基础上,本课题组利用 MATLAB 编写程序进行数值仿真,系统地研究了单束、两束、三束以及四束光的不同偏振组合对复式光子晶体的影响规律,结果发现光束偏振组合对光子晶体元胞的形状和对比度影响显著,能够产生具有各种特殊形状元胞的复式光子晶体结构,特别是当四束入射光同时沿 E_a 方向线偏振时,有最佳的对比度。最后进一步研究了干涉光束初相位对复式光子晶体的影响。这些研究成果对于设计具有特殊元胞形状的复式光子晶体具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Confined Electrons and Photons*, 1995: 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Men H, Nguyen N C, Freund R M, et al. Design of photonic crystals with multiple and combined band gaps[J]. *Physical Review E*, 2011, 83(4): 046703.
- [4] Wang H, Sha W, Huang Z X, et al. A novel eigenvalue method for calculating the band structure of lossy and dispersive photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184210.
王辉, 沙威, 黄志祥, 等. 有耗色散光子晶体带隙结构的本征值分析新方法 [J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184210.
- [5] Wang X S, Chen Z G. Beam control and multi-color routing with spatial photonic defect modes [J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16927-16932.
- [6] Niu J K, Liang B M, Zhuang S L, et al. Confocal system based on the negative refraction of two-dimensional photonic crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 020501.
牛金科, 梁斌明, 庄松林, 等. 基于二维光子晶体负折射的共聚焦系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 020501.
- [7] Cai P J, Liao T Q. Band gap characteristics of one-dimensional double periodic photonic crystals

- containing negative refractive index materials [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science Edition), 2020, 32(2): 141-146.
- 蔡培君, 廖同庆. 含负折射率材料的一维双周期光子晶体带隙特性[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2020, 32(2): 141-146.
- [8] Chen X J, Wu L J, Hu W, et al. The light intensity-dependent superprism phenomenon in nonlinear photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 1025-1030.
- 陈小军, 吴立军, 胡巍, 等. 非线性光子晶体中光敏超棱镜现象的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 1025-1030.
- [9] Gumus M, Giden I H, Akcaalan O, et al. Enhanced superprism effect in symmetry reduced photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(13): 131103.
- [10] Liang W Y, Liu X M, Yin M, et al. Large-angle beam splitter with sensitive adjustable power ratio based on superprism effect[J]. Journal of Physics D, 2013, 46(49): 495109.
- [11] Shao M, Sun H N, Zhang R, et al. Michelson interferometric humidity sensor based on photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2406002.
- 邵敏, 孙浩男, 张蓉, 等. 基于光子晶体光纤的迈克耳孙干涉仪型湿度传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2406002.
- [12] Ren K, Fan J Y, Ren X B, et al. Active control of nonreciprocal optical transmission direction[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0726003.
- 任坤, 范景洋, 任晓斌, 等. 非互易光传输方向的主动调控[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0726003.
- [13] Qi Z M. Research on computer simulations of two-dimensional complex microstructures[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 37(2): 138-142.
- 戚志明. 复式二维微结构的计算机模拟[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 138-142.
- [14] Feng Z F, Wang Y Q, Zhang D Z, et al. Plementation of complete band gap in 2-D photonic crystals using complex unit cell[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2004, 30(3): 390-392.
- 冯志芳, 王义全, 张道中, 等. 利用复式原胞实现二维光子晶体中的完全带隙[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(3): 390-392.
- [15] Song M L, Wang X P, Wang L J, et al. Advances in the fabrication and application of photonic crystals[J]. Materials Review, 2016, 30(7): 22-27.
- 宋明丽, 王小平, 王丽军, 等. 光子晶体制备及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 22-27.
- [16] Škriniarová J, Pudiš D, Andok R, et al. Investigation of the AZ 5214E photoresist by the laser interference, EBDW and NSOM lithographies[J]. Applied Surface Science, 2017, 395: 226-231.
- [17] 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]. JOSA B, 2005, 22(5): 1085-1091.
- [18] 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.
- [19] Qi Z M, Zhang F. Research on computer simulations of complex photonic crystals based on laser holography method[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(2): 140-148.
- 戚志明, 张凡. 基于激光全息法的复式光子晶体计算机仿真研究[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 140-148.
- [20] Liang W Y, He R B, Lin D R, et al. Influence of beam polarizations on holographic fabrication of triangular photonic crystals [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091601.
- 梁文耀, 何锐斌, 林灯荣, 等. 光束偏振对三角光子晶体全息制作影响的仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091601.
- [21] Yu Y F, Cao Y. From dip-pen nanolithography to mechanochemical printing[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(2): 024202.
- 俞奕飞, 曹毅. 从蘸笔纳米刻印术到力化学打印[J]. 物理学报, 2021, 70(2): 024202.
- [22] Xie H Y, Yu X C, Gao Q G, et al. Self-assembled colloidal crystals in field of micro-nano optics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230001.
- 谢洪洋, 余晓畅, 高麒淦, 等. 自组装胶体晶体在微纳光学领域的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230001.
- [23] Berger V, Lafaye O G, Costard E, et al. Photonic band gaps and holography[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(1): 60-64.
- [24] Yao D, Xiong Y Q, Wang J Z, et al. Progress on fabrication of three-dimensional photonic crystals by holographic lithography[J]. Vacuum and Cryogenics, 2010, 16(3): 142-147.
- 姚东, 熊玉卿, 王济洲, 等. 激光全息法制备三维光子晶体的研究进展[J]. 真空与低温, 2010, 16(3): 142-147.
- [25] 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.
- [26] Lü H, You K, Lan Y Y, et al. Fabrication of two-dimensional micro-nano photonic structures by symmetry-lost beams interference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(21): 217801.
吕浩, 尤凯, 兰燕燕, 等. 非对称光束干涉制备二维微纳光子结构研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(21): 217801.
- [27] Sun X H, Wu Y L, Liu W, et al. Fabrication of ten-fold photonic quasicrystalline structures [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(5): 057108.
- [28] Wang Xia, Lü H, Zhao Q L, et al. Application progress of holographic lithography in fabrication of micro-nano photonic structures[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(11): 3461-3469.
王霞, 吕浩, 赵秋玲, 等. 激光全息光刻技术在微纳光子结构制备中的应用进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(11): 3461-3469.