

实时全息微结构制作的计算机仿真与设计*

戚志明¹, 梁文耀², 陈武喝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: 激光全息是制作光子晶体微结构的重要方法, 为便于调节参数以提高实验成功率, 提出利用 CMOS 传感器代替传统的记录材料全息干板, 将全息干涉形成的微结构实时输入计算机处理。根据多光束干涉原理探讨了实现二维微结构的光束配置和设计原则, 结合计算机数值仿真讨论了光束偏振对微结构“原子”形状的影响。进一步设计实验进行验证, 结合实时显示技术方便、灵活调节各光束参数, 获得了三角晶格和正方晶格两类典型的微结构。实验结果表明, 计算机的实时显示技术有助于提高微结构的设计和制作效率。

关键词: 光子晶体; 激光全息; 实时显示; 微结构; 数值仿真

中图分类号: O436 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2014)04-0069-05

Computer Simulation and Design of Real-time Holographic Fabrication of Microstructures

QI Zhiming¹, LIANG Wenyao², CHEN Wuhe²

(1. The Open University of Guangdong//Guangdong Polytechnic Institute, Guangzhou 510091, China;
2. School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Laser holography is an important method for fabricating photonic crystal microstructures. In order to facilitate adjusting beam parameters to improve the success rate of experiment, it is proposed to transfer the formed microstructure to a computer for real-time display and processing by using a CMOS sensor. According to the principle of multi-beam interference, the beam configurations and design principles of the realization of 2D microstructures are explored. Combining with numerical simulations, the influence of the beam polarizations on the shapes of the formed microstructure “atom” is also discussed. Further experiments validate the designs. With the help of the convenient real-time display and flexible adjusting of the beam parameters, two kinds of microstructures, i. e., the triangular and square lattices, are obtained. Experimental results show that the real-time computer display technology is helpful to improve the efficiency of design and fabrication of microstructures.

Key words: photonic crystals; laser holography; real-time display; microstructures; numerical simulations

全息光学是光学领域的一个重要分支, 普通全息是利用全息干板曝光记录参考光和被摄物体上反

射光叠加产生的干涉条纹, 经显影、定影, 然后再现物体的三维成像。普通全息技术已被广泛应用,

* 收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11247253); 2013年广东省高等学校教学质量与教学改革工程资助项目(N913061a); 2014华南理工大学校级教研教改资助项目

作者简介: 戚志明(1979年生), 女; 研究方向: 计算机应用; 通讯作者: 梁文耀; E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

例如, 全息照相已成为大学物理实验的一个经典实验, 近年来普通全息已经发展到了白光全息阶段。

除普通全息外, 激光全息还可以用于微结构制作领域, 它直接由多束相干激光干涉而无需经过任何物体反射。多光束激光全息具有干涉图样复杂、图样高度有序等特点, 在微结构制作方面具有操作灵活、便于大面积制作等独特的优点。光子晶体是介电材料周期排列而成的人工微结构, 最早于 1987 年由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 各自独立提出, 存在光子带隙^[3]、反常相位^[4]、超准直等新颖的物理效应^[5], 应用前景广阔^[6], 被誉为光子学中的“半导体”。在光子晶体制作方面, 激光全息法具有高效、灵活和图样多样性的优势, 已被用于制作不同类型微结构, 如周期结构^[7]、准晶结构^[8]、亚波长结构等^[9], 而且可结合实际需要进行二次加工 (如引入缺陷、填充高折射率材料等)。目前, 制备微结构的激光全息法可分为两大类。第一类是多光束干涉法, 它是将来自同一光源的激光分成多束再相交干涉, 通过单次或多次曝光制作微结构; 另一类是计算全息法^[10-11], 它是先根据计算全息理论设计好光子晶体器件的全息干涉图案^[12], 然后利用此图案实现光子晶体器件的光学晶格。第二类方法因制作复杂和较大局限性而很少应用。而第一类方法不仅制作较容易, 而且适用于制作大面积的微结构, 因此受到广泛关注。然而该类方法在实验制作时需要反复调节光路参数和大量试制样品, 以获得满意的实验样品, 其制作效率和实验成功率有待进一步提高。

在本文中, 我们提出结合多光束全息干涉法和计算机实时显示技术设计微结构制作实验。在实验设计方案中, 重点考虑利用计算机的实时显示进行二维微结构的光束参数辅助调节, 用 CMOS 传感器代替光刻胶, 直接将采集到的微结构图象实时传输到电脑中进行观察和分析, 反过来调节各光束参数以获得所需的微结构。本实验方案无需进行光刻胶的曝光、显影和定影, 具有实时、形象、方便调节等优点。

1 多光束全息干涉实验原理

1.1 全息干涉法原理概述

由于激光具有良好的相干性, 在微结构制作实验中通常选用激光作为相干光源。一束连续激光可用单色平面波近似, 其参数包括波矢 \mathbf{k} 、电矢量 \mathbf{E} (包括振幅 E 和偏振方向 \mathbf{e})、初相位 δ 。以椭圆偏光的形式描述偏振态, 则 \mathbf{E} 可分解为初相位相差 $\pi/$

2、振动相互垂直的 \mathbf{E}_a (椭圆长轴) 和 \mathbf{E}_b (椭圆短轴), 其波函数如式 (1):

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_a &= E_a \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta)] \mathbf{e}_a, \\ \mathbf{E}_b &= E_b \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta - \pi/2)] \mathbf{e}_b \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathbf{r} 为位置矢量, 在非强光光学范围内, 当有 j 束相干光在同一空间范围内相交且两两相干时, 光振动遵守光波的叠加原理, 则干涉光场的空间分布 $I(\mathbf{r})$ 如式 (2) 所示^[8]:

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

其中 $\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$ 为波矢差, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 为初相位差。

分析式 (2) 可知: 多光束干涉可分解成各线偏振分量的两两干涉, 它们形成的周期性干涉光场适用于制作周期结构, 所形成的周期结构的晶格类型仅取决于波矢差 \mathbf{G}_{ij} 的大小和方向, 任意两束不同方向的光束 \mathbf{k}_i 和 \mathbf{k}_j 叠加可获得一维晶面, 各种取向的一维晶面叠加可形成二维、三维周期微结构。而且, 各种取向的一维晶面的相对强弱由光强和偏振夹角确定 (如 $E_{ai} E_{aj} \mathbf{e}_{ai} \cdot \mathbf{e}_{aj}$), 其相对位置决定了晶格的“原子”形状。换言之, 光学晶格点阵的“原子”形状和明暗对比度由参与干涉的各光束的偏振组合、光强以及初相位决定。

1.2 不同维度各类光学晶格形成及计算机仿真

考虑所需要制作的结构的晶格类型, 并结合上述多光束干涉原理, 我们可以确定制作微结构所需的光束个数、空间配置等几何参数, 即确定光束配置。基本思想是: 首先从正结构基矢出发, 利用固体物理的正、倒易空间的变换关系反推倒格子基矢, 然后将光波矢差与倒格矢基矢一一对应起来, 让等长的波矢经过倒空间格点并相交于一点, 且使得这些波矢差至少可满足晶格的所有倒格子基矢, 对于周期晶格而言, 除构成倒格子基矢外的“多余”波矢差形成的非基本倒格矢不会破坏结构的平移对称性, 最后, 进一步计算出各束光的传播方向和空间分布, 给出光束配置参数。下面给出不同维度下的一些晶格设计实例。为了更好地理解设计实例, 本文进一步利用 Matlab 编程进行数值仿真, 直观、形象地给出各设计实例的模拟结果。为便于

讨论并不失一般性，下述计算中假设参与干涉的各光束的光强相同、初相位均为零。

当只有两束激光干涉时，只存在一个倒空间基矢 $\mathbf{G}_{12} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ ，图 1 (a) 为波矢配置图，此时结果就是最普通的一维干涉条纹，即一维微结构。从图 1 (a) 可以看出， \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 夹角越小，倒空间基矢的模 $|\mathbf{G}_{12}|$ 就越小，则根据正、倒空间的互易关系可知所形成的晶面间距越大。图 1 (b) 是 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 夹角为 30° 时的模拟结果，该一维微结构在垂直 \mathbf{G}_{12} 方向上为等值面。

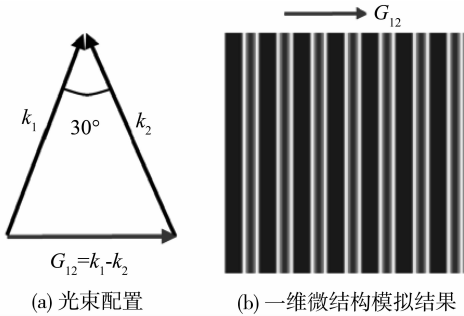


图 1 一维微结构实例

Fig. 1 Example of one-dimensional microstructure

对于二维平面周期结构，需有三束非共面激光相干，但仅有两个独立基矢，设为 $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ ，令 $\mathbf{G}_1 = \mathbf{G}_{21} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1, \mathbf{G}_2 = \mathbf{G}_{31} = \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1$ ，而 $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 = \mathbf{G}_1 - \mathbf{G}_2$ 并非独立基矢。倒格子基矢 \mathbf{G}_i 的大小以及它们之间的对称关系决定了正空间光学晶格的对称性。在三维直角坐标系中，设三束光的波矢与 z 轴夹角均相等，则形成的干涉图案为平行于 xoy 平面的二维微结构。例如，按照图 2 (a) 的光束配置，当 $|\mathbf{G}_{21}| = |\mathbf{G}_{31}|$ ，且其夹角为 60° 时，此时将形成三角晶格微结构，图 2 (b)、(c) 为两种不同“原子”形状的模拟结果，相应的参数条件见表 1，其中，已将各束光的电矢量分解为椭圆偏光的 \mathbf{E}_a 和 \mathbf{E}_b ，其中 \mathbf{E}_a 的方向定义为垂直波矢的平面和 xoy 平面的交线， \mathbf{E}_b 的方向由波矢 \mathbf{k} 叉乘 \mathbf{E}_a 得出，图 2 (c) 结构与 (b) 结构相比仅 $|\mathbf{E}_a|$ 和 $|\mathbf{E}_b|$ 大小变化，其余参数不变。而当 $|\mathbf{G}_{31}| = |\mathbf{G}_{23}|$ ，且其夹角为 90° 时，其光束配置见图 3 (a)，此时将形成正方晶格微结构，图 3 (b)、(c) 为两种不同“原子”形状的模拟结果，相应的参数条件见表 2，各参数含义与表 1 相同。若不对倒格基矢 \mathbf{G}_i 的大小和对称性进行特殊限制，则干涉形成的光学晶格为任意四边形分布。通过类似的分析可获得面心、体心等三维微结构及其光束空间配置，因本文主要

考虑二维情况，故不赘述三维情况。

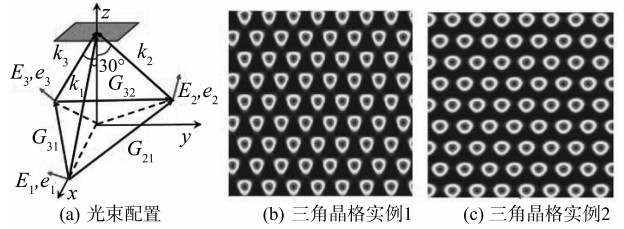


图 2 三角晶格光束配置

(其中 $|\mathbf{G}_{21}| = |\mathbf{G}_{31}|$ ，且其夹角为 60°) 和不同偏振条件下的两个模拟实例

Fig. 2 Beam configuration for triangular lattice and

two simulation examples under different polarization conditions

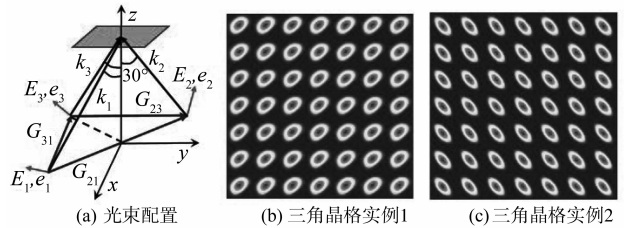


图 3 正方晶格光束配置

(其中 $|\mathbf{G}_{31}| = |\mathbf{G}_{23}|$ ，且其夹角为 90°) 和不同偏振条件下的两个模拟实例

Fig. 3 Beam configuration for square lattice and

two simulation examples under different polarization conditions

表 1 产生三角晶格两种“原子”形状的光束配置参数¹⁾
Table 1 Beam configuration parameters for the two simulation examples of triangular lattice

光束 k_i	k 方向		图 2(b) 结构						图 2(c) 结构	
	θ_k	φ_k	$ \mathbf{E}_a $	θ_a	φ_a	$ \mathbf{E}_b $	θ_b	φ_b	$ \mathbf{E}_a $	$ \mathbf{E}_b $
k_1	$\pi/6$	π	$\sqrt{2}/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$	$\sqrt{2}/2$	$\pi/3$	0	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$
k_2	$\pi/6$	$-\pi/3$	$\sqrt{2}$	$\pi/2$	$\pi/6$	0	$\pi/3$	$2\pi/3$	$\sqrt{2}/5$	$2\sqrt{2}/5$
k_3	$\pi/6$	$\pi/3$	$\sqrt{2}$	$\pi/2$	$5\pi/6$	0	$\pi/3$	$-2\pi/3$	1	1

1) 与图 2 (b) 相比，图 2 (c) 结构仅 $|\mathbf{E}_a|$ 和 $|\mathbf{E}_b|$ 大小变化，其余参数不变

表 2 产生正方晶格两种“原子”形状的光束配置参数¹⁾
Table 2 Beam configuration parameters for the two simulation examples of square lattice

光束 k_i	k 方向		图 3(b) 结构						图 3(c) 结构	
	θ_k	φ_k	$ \mathbf{E}_a $	θ_a	φ_a	$ \mathbf{E}_b $	θ_b	φ_b	$ \mathbf{E}_a $	$ \mathbf{E}_b $
k_1	$\pi/6$	$3\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$\pi/2$	$5\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$\pi/3$	$-\pi/3$	1	1
k_2	$\pi/6$	$-\pi/4$	$\sqrt{2}/5$	$\pi/2$	$\pi/4$	$2\sqrt{2}/5$	$\pi/3$	$3\pi/4$	$\sqrt{2}/5$	$2\sqrt{2}/5$
k_3	$\pi/6$	$\pi/4$	$\sqrt{2}/5$	$\pi/2$	$3\pi/4$	$2\sqrt{2}/5$	$\pi/3$	$-3\pi/4$	$\sqrt{2}$	0

1) 与图 3 (b) 相比，图 3 (c) 结构仅 $|\mathbf{E}_a|$ 和 $|\mathbf{E}_b|$ 大小变化，其余参数不变

1.3 偏振组合对微结构“原子”的影响

下面讨论光的偏振对“原子”的影响。激光全息法制作微结构的关键因素之一是各光束偏振的调节，其影响主要有两点：一是对干涉图案亮暗对

比度的影响。由于参与干涉的各束光不共面，它们的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。光束的偏振变化会使干涉图案的亮暗对比度发生变化，计算表明，当光束间夹角较大时偏振的影响较为突出，当夹角较小时影响很小。二是对微结构“原子”形状的影响。由式 (2) 可以看出，当各束光的偏振发生改变，两两相干产生的光强极大、极小值的大小和绝对位置也会发生变化，从而改变叠加后的“原子”形状。由于参与干涉各光束的偏振可以设为线偏振、圆偏光、椭偏光等多种形式，不同的偏振组合可得到各种各样的“原子”形状，然而由于各光束的偏振组合繁多，实际上不存在普适的分析方法来确定特定“原子”形状所需的各束光偏振组合，只能用计算机进行偏振搜索。

2 实验方案设计及其结果讨论

根据上述原理我们设计实验进行了验证。首先采用激光全息干涉产生所需的微结构，然后利用 CMOS 传感器将采集到的微结构图像实时传输到电脑中进行分析 and 调节。实验中采用里欧光电公司生产的 532 nm 单纵模连续激光器作为相干光源，其线宽 $< 1 \times 10^{-5}$ nm，相干长度 > 50 m，功率约为 60 mW，偏振度 $\geq 100:1$ ，能够满足全息干涉实验要求。由于激光功率较大，为安全起见，在光路处放入若干中性滤波片以减弱光强。

2.1 实验步骤

1) 按照图 4 搭建光路。图 4 为总体实验光路，可分为平面光路和立体光路两部分，平面光路利用 1:1 分光镜获得四束等光强的激光，然后利用其中三束光进一步搭建立体光路以形成二维微结构。通过调节偏振片和 1/4 波片，可灵活调节各束光的偏振和光强。立体光路用于汇聚三束光产生干涉。制作三角晶格时以图 2 (c) 为例，立体光路按照图 2 (a) 搭建，三束光与 z 轴的夹角均为 $\pi/6$ ，相应的方位角分别为 π 、 $\pm \pi/3$ 。

2) 利用万向反射镜将三束光调节相聚于显微镜 ($\times 100$) 入口处，在该处干涉产生微结构，放大后的微结构由 CMOS 传感器实时传输到电脑，然后利用 CMOS 传感器配套的处理软件分析放大后的微结构。

3) 以结构对比度为优化调节参数，实时观察和调节各光束的偏振和光强。由于实际光路和理想光路存在一定误差，因此需要在预设参数基础上进

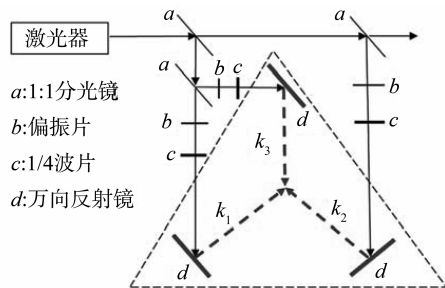


图 4 实验光路图

Fig. 4 Experiment configuration

虚线三角形框内的光路为形成微结构的立体光路部分，具体见图 2 (a) 和图 3 (a)

一步调节。以表 1 的参数为基础微调各光束偏振，得到所需“原子”的形状，然后再调节各偏振片改变光强比以增大微结构的对比度。由于防震平台等原因，结构对比度会发生微弱的强弱周期变化。仔细观察将最清晰的微结构图像拍摄保存下来，实验结果见图 5 (a)。

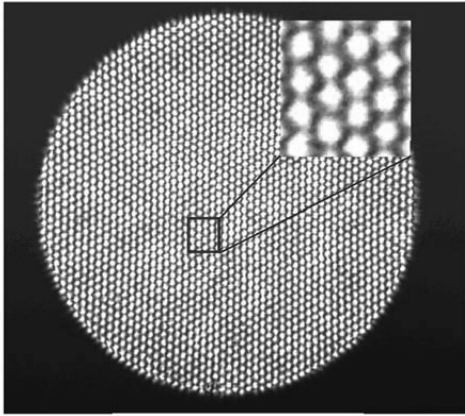
类似地验证图 3 (c) 微结构，按照图 3 (a) 的光束配置和表 2 有关参数搭建和调节光路，结合计算机的实时显示进一步调节各束相干光的参数，可获得正方晶格微结构，实验结果见图 5 (b)。

2.2 实验结果讨论

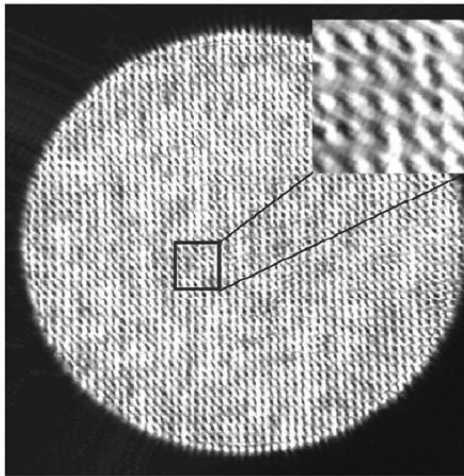
图 5 的实验结果验证了前面的理论分析和数值仿真结果。需要注意的是，在理论分析部分为简便起见假设参与干涉的各束光的光强相等，但在特定偏振组合下等光强干涉通常难以获得最佳的对比度。因此，在实验中当完成偏振调节得到特殊“原子”的形状后，还需进一步调节各束光的光强来提高对比度。我们进一步对其它多种不同偏振组合下的微结构进行了研究，发现尽管由于受 CMOS 传感器分辨率所限微结构的分辨率不够高，但所有结果均很好地体现了实时显示技术在微结构制作参数调节方面的灵活性。这表明，在激光全息微结构制作中引入实时显示技术，不仅有助于提高特定类型、特殊“原子”微结构的制作效率和成功率，而且可有效减少操作的盲目性。由于本文主要探讨计算机实时显示在微结构制作参数调节方面的作用，并未引入光刻胶制作微结构，如需实际制作，只需在上述调整好的光路中加入光刻胶即可进行。

3 结论

本文主要探讨了计算机实时显示技术在二维微结构制作参数调节方面的作用。首先从理论上根据多光束干涉原理给出了二维三角晶格、正方晶格微



(a) 三角晶格微结构



(b) 正方晶格微结构

图5 实验结果

Fig. 5 Experiment results

结构的光束配置和设计原则, 并利用 Matlab 编程进行了数值仿真, 进而讨论了光束偏振组合对微结构“原子”的影响, 最后设计实验, 结合实时显示技术进行参数调节, 获得了两类典型的微结构。实验结果表明, 将实时显示技术和激光全息法结合起来, 不仅有助于提高制作特定类型、特殊“原子”形状微结构的制作效率和成功率, 而且可有效减少操作的盲目性。

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] MEN H, NYUYEN N C, FREUND R M, et al. Design of photonic crystals with multiple and combined band gaps [J]. *Phys Rev E*, 2011, 83(4):046703.
- [4] LIANG Wenyao, YIN Miao, LI Chao, et al. 2DPSK modulator based on the transmission phase properties of photonic crystals with coupled cavities [J]. *J Opt*, 2013, 15(3):035101.
- [5] LIANG Wenyao, CHEN Wuhe, YIN Miao, 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.
- [6] 黄东焱, 李一伦, 滕东东, 等. 基于光学体全息的耳廓识别技术的研究[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2009, 48(S2):211-215.
- [7] PU Yiyi, LIANG Guanquan, MAO Weidong, et al. Fabrication of two-dimensional photonic crystals with triangular rods by single-exposure holographic lithography [J]. *Chin Phys Lett*, 2007, 24(4):983.
- [8] MAO Weidong, LIANG Guanquan, ZOU Hui, et al. Design and fabrication of two-dimensional holographic photonic quasi crystals with high-order symmetries [J]. *J Opt Soc Am B*, 2006, 23(10):2046-2050.
- [9] HUANG Min, ZHAO Fuli, Cheng Ya, et al. Effects of the amorphous layer on laser-induced subwavelength structures on carbon allotropes [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4):677-679.
- [10] 梁艳明, 吴琦, 周建英. 三维光场的计算全息设计与再现研究[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2010, 49(5):56-60.
- [11] LIU Yuanzhi, PANG Xiaoning, JIANG Shaoji, et al. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling [J]. *Opt Express*, 2013, 21(10):12068-12076.
- [12] 杜晶晶, 许利剑, 谢勇, 等. 一种新型纸基激光全息图成像涂料的研究及其防伪应用[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2007, 46(S1):206-207.