

非对称光束干涉制备二维微纳光子结构研究

吕浩 尤凯 兰燕燕 高冬 赵秋玲 王霞

Fabrication of two-dimensional micro-nano photonic structures by symmetry-lost beams interference

Lü Hao You Kai Lan Yan-Yan Gao Dong Zhao Qiu-Ling Wang Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 217801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.217801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.217801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I21>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非线性光学超构表面

Nonlinear photonic metasurfaces

物理学报.2017, 66(14): 147803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.147803>

利用波矢滤波超表面实现超衍射成像

Super diffraction imaging with wave vector selective metasurface

物理学报.2017, 66(14): 147804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.147804>

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection

物理学报.2015, 64(23): 237802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237802>

基于加权实数编码遗传算法的超材料优化设计

Optimization of metamaterial based weighted real-coded genetic algorithm

物理学报.2014, 63(8): 087804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.087804>

基于集总元件和负微分元件的有源可调谐超材料传输线

Active tunable metamaterial transmission line based on lumped elements and negative differential devices

物理学报.2014, 63(2): 027802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.027802>

## 非对称光束干涉制备二维微纳光子结构研究\*

吕浩<sup>1)2)</sup> 尤凯<sup>1)2)</sup> 兰燕燕<sup>1)2)</sup> 高冬<sup>1)2)</sup> 赵秋玲<sup>1)2)</sup> 王霞<sup>1)2)†</sup>

1)(青岛科技大学数理学院, 青岛 266061)

2)(山东省新型光电材料与技术工程实验室, 青岛 266061)

(2017年7月6日收到; 2017年8月6日收到修改稿)

研究了基于不同偏振组合的非对称4束和5束光干涉制备二维微纳光子结构. 通过改变光束的参数组合获得了枝节状、波形状等结构. 在非对称光束干涉中, 光束的构型和偏振改变了波矢量分布, 从而改变晶格形貌和对比度. 利用CHP-C感光胶开展了全息光刻实验制备, 获得了与模拟一致的光子结构. 该研究为制备新颖光子结构提供了有效途径, 此类光子结构还可以为制备不同类型的金属点阵结构提供模板, 对新型光子器件的制备和应用研究具有一定的促进作用.

**关键词:** 多光束干涉, 非对称, 光子结构, 偏振

**PACS:** 78.67.Pt, 42.40.Kw, 42.25.Hz, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.66.217801

## 1 引言

微纳光子结构指内部微观周期在微纳尺度, 且对光的产生、传输、调控、探测和传感具有特定作用的结构. 微纳光子结构的研究随着光子学、半导体物理学及微加工技术的发展而逐渐成为研究热点. 以光子晶体 (photonic crystals)<sup>[1,2]</sup>、表面等离子体 (plasmonics)<sup>[3]</sup> 和超材料 (metamaterials)<sup>[4]</sup> 为主要分类的微纳光子结构在光信息领域发挥着日趋重要的作用, 并相继有很多新的成果出现<sup>[5-9]</sup>. 人工制作的微纳光子结构在表面激光发射、光波导、高 $Q$ 值激光器等具有重要应用潜力, 其加工制作方法主要有激光直写<sup>[10]</sup>、电子束直写<sup>[11]</sup>、电化学腐蚀<sup>[12]</sup>、激光全息光刻<sup>[13]</sup>等.

激光全息光刻技术利用多束激光相互干涉产生空间全息图案并记录于合适的介电材料上形成有序的微结构, 具有制作成本低、面积大、周期短、效率高等优势, 近年来在微纳光子结构制备方面得到了较多应用. 通过改变干涉光路构型, 可方便调

节所制作光子结构样品的结构形貌、周期, 光波响应范围可从几百纳米到几微米. 将光束的排布由对称分布变为非对称分布, 可以获得多种形状的二维点阵<sup>[14]</sup>和二维准晶结构<sup>[15]</sup>. Jiménez-Ceniceros等<sup>[16]</sup>计算分析了多光束干涉中方位对称性和偏振对结构的影响, 调整干涉光束的偏振、相位、曝光次数等参数, 可以获得二维棋盘式、正方格子等复式结构<sup>[17-20]</sup>. 采用多次曝光全息光刻技术, Solak<sup>[21]</sup>制作了二维准周期结构, Lai等<sup>[22]</sup>制作了二维复式结构. 这些尝试都为全息光刻技术制备二维微纳光子结构研究提供了新的思路. 但是全息光刻多次曝光实验中对于曝光和样品的旋转控制仍然较难操作, 实验过程中光束偏振的控制、光路的精密调控、样品结构的曝光显影处理等方面仍然存在挑战.

在前期全息光刻制作微纳结构研究的基础上<sup>[23-26]</sup>, 本文基于多光束干涉理论, 模拟分析了4束和5束非对称光干涉获得二维微纳光子结构, 通过改变光束的构型、方位角和偏振组合, 获得了不

\* 山东省高等学校科技计划(批准号: J14LJ06)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2014FP012)和国家自然科学基金(批准号: 11274189, 11504194)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: phwangxia@163.com

同格点排布的干涉结构. 实验中采用多切面棱镜分光单次曝光技术, 通过  $\lambda/2$  波片调节光束的偏振, 利用 CHP-C 正性感光胶获得了与模拟相符合的二维微纳光子结构.

## 2 激光全息干涉理论

根据光的干涉叠加原理,  $N$  束单色平面波  $\mathbf{E}_i = E_i e^{i(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} + \delta_i)}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 干涉光强的空间分布  $I(\mathbf{r})$  可以表示为

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

其中,  $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{k}_i$  和  $\delta_i$  分别是第  $i$  束平面光波的复振幅矢量、波矢和初相;  $\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$  和  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  分别为波矢差和初相位差, 选取  $\delta_{ij} = 0$ . 由 (1) 式可知, 干涉场光强的空间分布  $I(\mathbf{r})$  仅决定于波矢差  $\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$  的大小和方向, 改变各入射光的波矢  $\mathbf{k}_i$  的方向, 可得到不同的空间周期排布.

计算机模拟可为全息干涉实验中光束构型与偏振的调控提供理论指导, 促进微结构的制备和优化. 在模拟中, 以图 1 所示对称分布 4 束光为例, 定义干涉光路中旁路光束的波矢为  $\mathbf{k}_i = k(-\cos \theta_i \sin \varphi, -\sin \theta_i \sin \varphi, \cos \varphi)$ , 其中,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda = 488 \text{ nm}$  为相干激光的波长;  $\varphi$  为  $\mathbf{k}_i$  和  $z$  轴的夹角;  $\omega_i$  表示光束的偏振角, 即光束的复振幅矢量  $\mathbf{E}_i$  和其入射平面之间的夹角;  $\theta$  表示方位角, 即光束在  $x-y$  面的投影与  $x$  轴正方向之间的夹角. 光束的电场复振幅矢量可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= E_i(\cos \omega_i \cos \varphi \cos \theta_i \\ &\quad - \sin \omega_i \sin \theta_i, \cos \omega_i \cos \varphi \sin \theta_i \\ &\quad + \sin \omega_i \cos \theta_i, \cos \omega_i \sin \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

为了优化计算, 我们取  $|\mathbf{E}_i| = 1, i = 1, \dots, N$ , 光束的入射角为  $42^\circ$ . 将干涉光强数据在 Linux 系统下导入 opendx 软件, 根据干涉光强值分布特征, 归一化后选取恰当的阈值把数据中大于设定值的区域舍掉, 保留小于阈值的部分, 转化为空间排布的光学晶格模型.

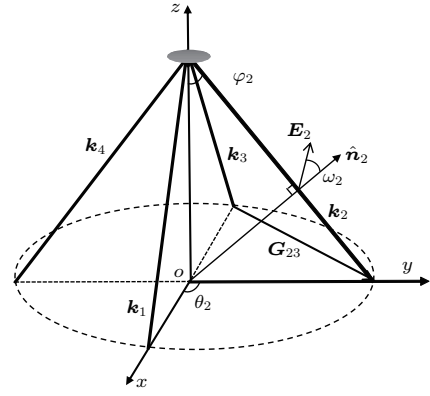


图 1 直角坐标系中多束光干涉光路图

Fig. 1. Schematic setup for multiple beams interference in rectangular coordinate system.

## 3 实验过程

以非对称 4 束光为例, 实验中搭建如图 2 所示光路. 图 2(a) 为光路示意图, 图 2(b) 为实验光路实物图. 选用 CHP-C 正性光刻胶 [27], 对 488 nm 光的吸收率约为 70%, 折射率为 1.54, 通过曝光和显影处理可获得均一性较好的光子结构. 从氩离子激光器发出的 488 nm 线偏光, 通过准直扩束系统和多孔光阑后获得 4 束相干光, 从多切面棱镜底部入射到侧表面并发生全反射, 以相同入射角在棱镜上表面汇聚干涉, 厚度约  $8 \mu\text{m}$  的 CHP-C 感光胶置于棱镜上表面, 膜面向下, 最上面放置导光棱镜导出光束. 在所有接触面之间滴加折射率液, 防止多次反射和折射对结构产生影响. 光阑小孔内放置  $\lambda/2$  波片, 通过转动波片精确调节各光束偏振角度. 整个光路及器件放置在光学防震平台上, 减小外界环境对干涉结构的影响.

CHP-C 感光胶对 488 nm 激光的灵敏度约为  $20 \text{ mJ/cm}^2$ , 实验中通过调整光束的功率和曝光时间来控制曝光量. 每束光的功率约为 18—20 mW, 根据实验所采用的光束数目不同, 曝光时间选择 20—30 s. 功率太小或曝光时间太短不足以引起样品的聚合反应, 观察不到周期结构; 功率太大或曝光时间太长会使样品过多区域发生感光反应, 在显影时全部洗掉 [27]. 曝光完成后用去离子水冲洗掉表面的折射率液, 放入质量浓度为 1% 的 NaOH 溶液中显影 8 s 左右, 最后用去离子水冲掉表面残留的显影液, 空气中自然晾干后获得所需样品.

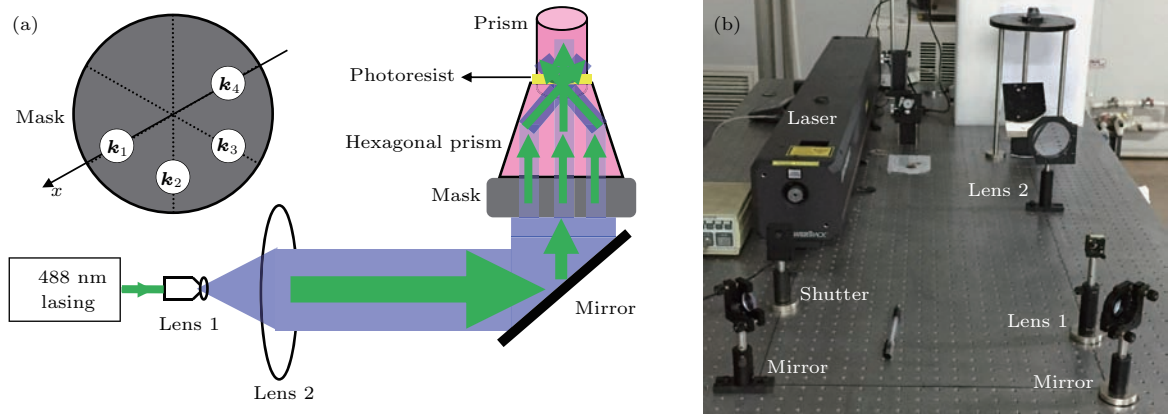


图2 (网刊彩色) 非对称光束制备二维微纳光子结构光路图 (a) 示意图, 左上角插图为4孔光阑; (b) 实物图  
 Fig. 2. (color online) Symmetry-lost coherent beams interference setup for two-dimensional micro-nano photonic structures fabrication with (a) schematic configuration and (b) optical elements setup, while the left-top inset of (a) is mask with four holes.

## 4 结果与分析

### 4.1 非对称4束光干涉

非对称光束是指多束光以相同入射角绕 $z$ 轴分布, 但不呈伞型对称<sup>[28]</sup>. 如非对称4束光分布于

$x-z$ 面一侧, 各光束在 $x-y$ 面的投影均在 $x$ 轴上或 $y$ 轴正方向, 4束光的方位角分别为 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ)$ , 如图3(a)和图3(b)所示. 当4束光的偏振都为 $0^\circ$ 时, 即图3(a)中 $x-y$ 面内双向箭头的方向, 得到图3(c)所示干涉结构, 每一个结构单元为不规则长方形, 尺寸约为 $0.3 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ , 模拟中选取

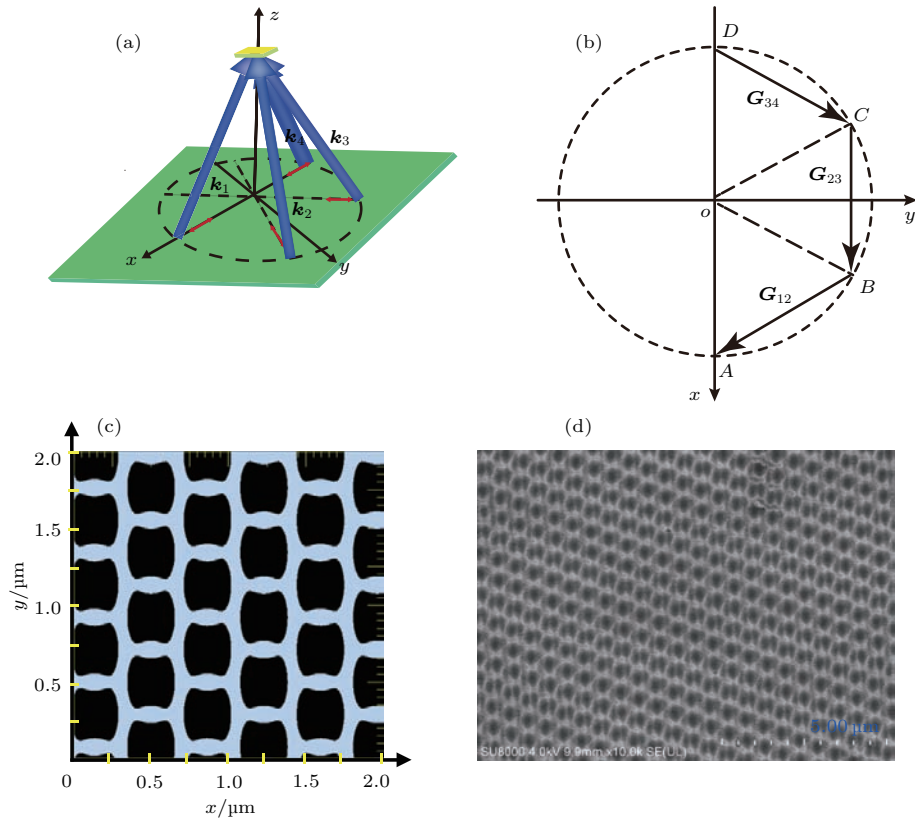


图3 (网刊彩色) 非对称4束光 $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ 偏振组合干涉结构 (a) 光束构型及偏振方向示意图; (b)  $x-y$ 面内光束波矢差分布; (c) 阈值0.5时的模拟结果; (d) 实验制备结构的SEM图

Fig. 3. (color online) Structures by the interference of 4 symmetry-lost beams with polarization  $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ : (a) Beam setup and polarization directions; (b) wave-vector difference distribution in  $x-y$  plan; (c) simulation results with threshold cutoff of 0.5; (d) SEM image of experimental results.



的归一化阈值为0.5(最小光强为0, 最大光强为1, 下同). 4束光中每相邻两束的波矢差在  $x-y$  面内排布为图3(b)所示的1/2个正六边形  $ABCD$ , 干涉结构将沿着该构型在平面内扩展, 因而干涉格点整体上仍呈六角格点排布. 图3(d)为实验制备样品的扫描电子显微镜(SEM)图, 所用测量仪器为Hitachi FE-SU8010场发射扫描电子显微镜. 结构在较大范围内呈整齐均匀的六角分布, 每一个长方形小结构单元是由感光胶未被洗掉的凸起部分构成的, 周期约  $0.3 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ . 由于干涉过程中, 干涉格点不同位置的光强分布存在差别, 显影后留下部分的深度不同, 从而获得二维结构.

激光全息干涉中, 影响干涉结构的因素很多, 光束偏振的调节会影响光学格点的亮暗对比度和清晰度. 将4束光的偏振均调整为图4(a)所示的  $45^\circ$ , 结构单元棱边变宽,  $y$  方向相邻结构单元之间

填充变多, 出现了小的凸起, 形成凸点连接的椭圆状结构, 如图4(b)所示, 模拟中选取的归一化阈值为0.5. 由于没有改变光束的构型和入射角, 干涉结构的对称性和周期都未发生改变. 实验获得了图4(c)所示的均匀干涉结构, 结构单元与模拟分析结果一致, 均匀区域约为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ .

进一步把所有光束偏振都调节为  $90^\circ$ , 如图5(a)所示,  $y$  方向相邻结构单元之间填充更多, 椭圆间小的凸起之间开始交联, 在椭圆结构单元内部形成如图5(b)所示的枝节状条纹, 相邻竹节之间约  $0.35 \mu\text{m}$ , 原周期性结构变为嵌套的复式结构, 模拟中选取的归一化阈值为0.5. 实验中获得了与模拟结果一致的光子结构, 如图5(c)所示. 复式结构有望获得完全光子带隙<sup>[17]</sup>, 促进二维光子晶体的应用研究.

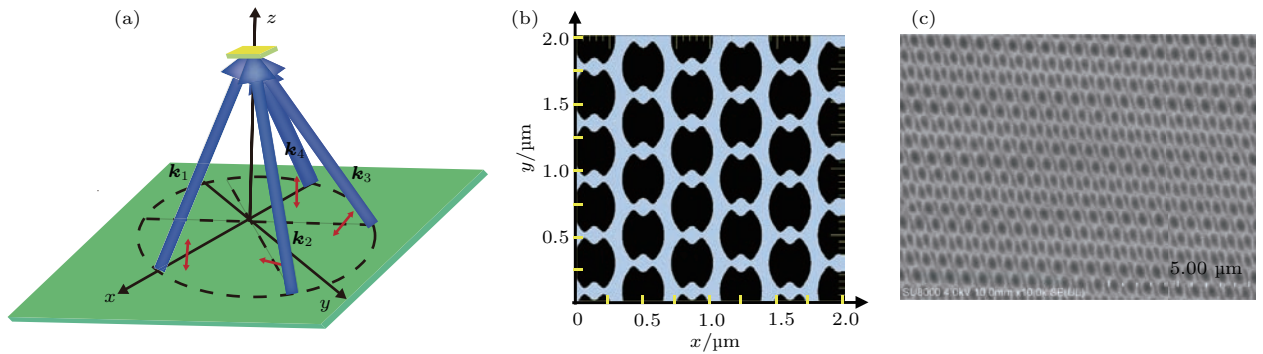


图4 (网刊彩色) 非对称4束光  $45^\circ, 45^\circ, 45^\circ, 45^\circ$  偏振组合干涉结构 (a) 光束构型及偏振方向示意图; (b) 阈值0.5时的模拟结果; (c) 实验制备结构的SEM图

Fig. 4. (color online) Structures by the interference of 4 symmetry-lost beams with polarization  $45^\circ, 45^\circ, 45^\circ, 45^\circ$ : (a) Beam setup and polarization directions; (b) simulation results with threshold cutoff of 0.5; (c) SEM image of experimental results.

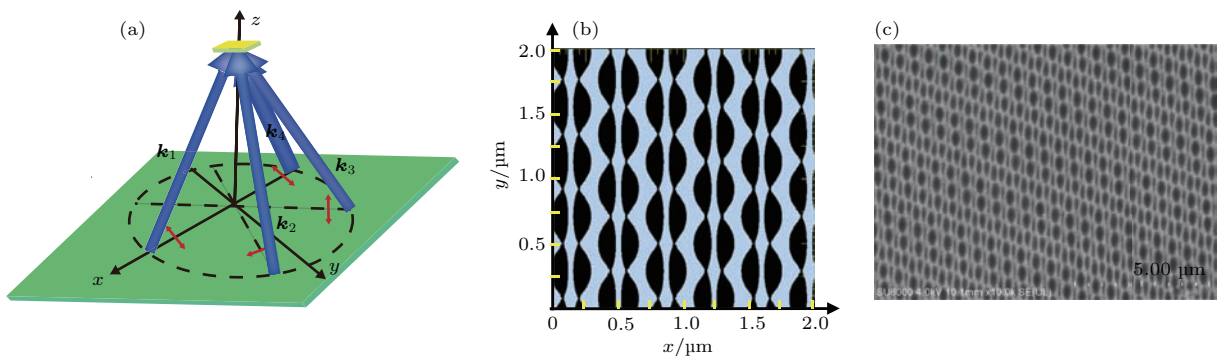


图5 (网刊彩色) 非对称4束光  $90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ$  偏振组合干涉结构 (a) 光束构型及偏振方向示意图; (b) 阈值0.5时的模拟结果; (c) 实验制备结构的SEM图

Fig. 5. (color online) Structures by the interference of 4 symmetry-lost beams with polarization  $90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ$ : (a) Beam setup and polarization directions; (b) simulation results with threshold cutoff of 0.5; (c) SEM image of experimental results.

### 4.2 非对称5束光干涉

改变光束构型, 将光束由4束增加为5束, 即在4.1节分析的情形中以相同方位角增量添加光束  $k_5$ , 如图6(a)所示, 5束光的方位角为  $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ)$ . 由于多增加一光波矢, 相邻光束波矢差便会增加, 如图6(b)所示, 但是由于所有波矢差都在二维平面内, 且  $AB, BC, CD, DE$  长度相等, 所以其仍可以用相同的两个波矢差分量表示

所有的波矢差<sup>[29]</sup>, 结构整体同样呈六角格点排布. 当五束光的偏振为  $(90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$  时, 获得图6(c)带枝节的波浪结构,  $y$  方向的结构周期约为  $0.5 \mu\text{m}$ , 模拟中选取的归一化阈值为0.3. 实验获得了图6(d)的结构, 整体排布与模拟结果相同, 但是由于枝节在两个相邻的波浪单元连接处, 显影过程的处理会对其造成破坏, SEM 观察的枝节不如模拟结果明显.

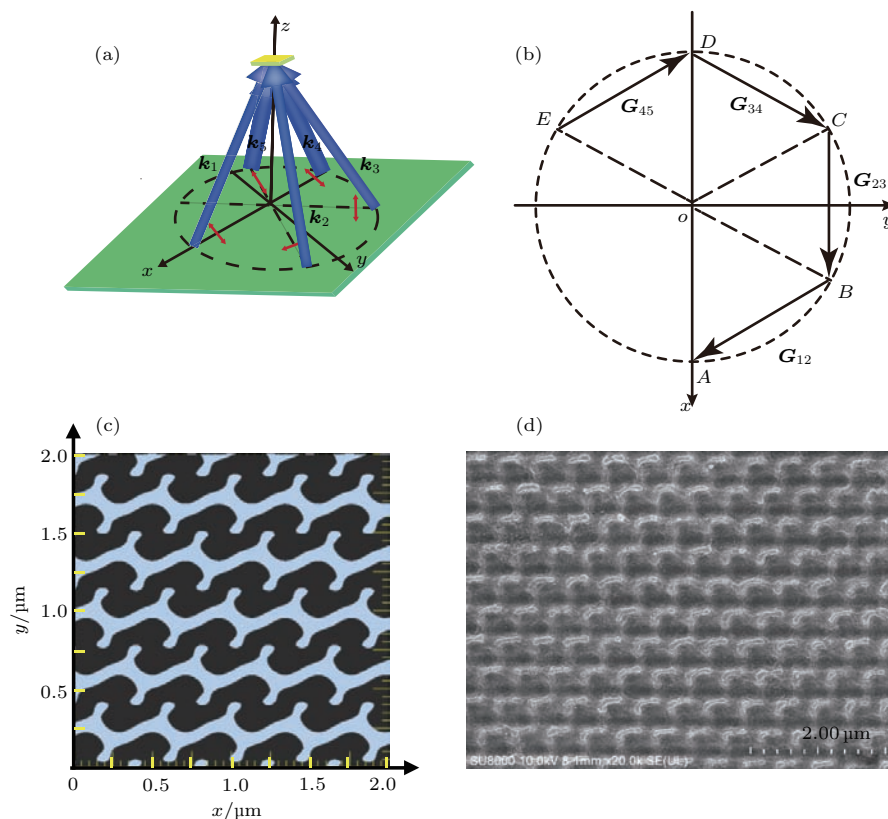


图6 (网刊彩色) 非对称5束光  $90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ$  偏振组合干涉结构 (a) 光束构型及偏振方向示意图; (b)  $x$ - $y$  面内光束波矢差分布; (c) 阈值0.3时的模拟结果; (d) 实验制备结构的SEM图

Fig. 6. (color online) Structures by the interference of 5 symmetry-lost beams with polarization  $90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ : (a) Beam setup and polarization directions; (b) wave-vector difference distribution in  $x$ - $y$  plan; (c) simulation results with threshold cutoff of 0.3; (d) SEM image of experimental results.

## 5 结 论

本文分析了非对称光束干涉制备不同周期形貌的微纳光子结构, 改变光束的构型、对称性和偏振组合, 获得了波形状、枝节状等格点结构. 采用激光全息光刻技术, 利用CHP-C正性感光胶制作了多种较大面积的二维光子结构, 实验方法简单可行, 实验结果与计算机模拟结果相符合. 采用非对称光束激光全息技术成功获得二维微纳光子结构,

为复式结构和缺陷模式光子晶体的制备提供了方法和条件, 对新型光电材料和集成光子器件的研究具有重要的应用意义.

### 参考文献

[1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059  
 [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486  
 [3] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, Halas N J, Nordlander P, Giessen H, Chong C T 2010 *Nat. Mater.* **9** 707

- [4] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [5] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [6] Driscoll T, Basov D N, Starr A F, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 081101
- [7] Yang Y, Li Q, Wang G P 2008 *Opt. Express* **16** 11275
- [8] Li Z, Zhao R, Koschny T, Kafesaki M, Alici K B, Colak E, Caglayan H, Ozbay E, Soukoulis C M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081901
- [9] Phan A H, Piao M, Park J H, Kim N 2013 *Appl. Opt.* **52** 2385
- [10] Rill M S, Plet C, Thiel M, Staude I, Freymann G V, Linden S, Wegener M 2008 *Nat. Mater.* **7** 543
- [11] de Vittorio M, Todaro M T, Stomeo T, Cingolani R, Cojoc D, Fabrizio E D 2004 *Microelectron. Eng.* **73–74** 388
- [12] Birner A, Grüning U, Ottow S, Schneider A, Müller F, Lehmann V, Foell H, Gösele U 1998 *Phys. Status Solidi A* **165** 111
- [13] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, Denning R G 2000 *Nature* **404** 53
- [14] Lü H, Chu C X, You K, Zhao Q L, Wang X 2017 *Optik* **140** 25
- [15] Shen K, Jiang G, Mao W, Baig S, Wang M R 2013 *Appl. Opt.* **52** 6474
- [16] Jiménez-Ceniceros A, Trejo-Durán M, Alvarado-Méndez E, Castaño V M 2010 *Opt. Commun.* **283** 362
- [17] Wang J L, Chen H M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 922 (in Chinese) [汪静丽, 陈鹤鸣 2007 物理学报 **56** 922]
- [18] Nian X Z, Chen H M 2009 *Opt. Laser Technol.* **7** 23 (in Chinese) [年秀芝, 陈鹤鸣 2009 光学与光电技术 **7** 23]
- [19] Zeng J, Pan J Y, Dong J W, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2785 (in Chinese) [曾隽, 潘杰勇, 董建文, 汪河洲 2006 物理学报 **55** 2785]
- [20] Pan J Y, Liang G Q, Mao W D, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 729 (in Chinese) [潘杰勇, 梁冠全, 毛卫东, 汪河洲 2006 物理学报 **55** 729]
- [21] Solak H H 2005 *Microelectron. Eng.* **78** 410
- [22] Lai N D, Lin J H, Hsu C C 2007 *Appl. Opt.* **46** 5645
- [23] Wang X, Xu J F, Su H M, He Y J, Jiang S J, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 527 (in Chinese) [王霞, 许剑锋, 苏慧敏, 何拥军, 江绍基, 汪河洲 2002 物理学报 **51** 527]
- [24] Wang X, Tam W Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5398 (in Chinese) [王霞, 谭永炎 2006 物理学报 **55** 5398]
- [25] Wang X, Wang Z X, Lü H, Zhao Q L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4656 (in Chinese) [王霞, 王自霞, 吕浩, 赵秋玲 2010 物理学报 **59** 4656]
- [26] Zhao Q L, Lü H, Zhang Q Y, Niu D J, Wang X L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044208 (in Chinese) [赵秋玲, 吕浩, 张清悦, 牛东杰, 王霞 2013 物理学报 **62** 044208]
- [27] Lü H, Zhang Q Y, Zhao Q L, Wang X 2012 *Appl. Opt.* **51** 302
- [28] Wang X, Xu J, Lee J C W, Tam W Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 051901
- [29] Lü H, Wang S Z, Wang X 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 201 (in Chinese) [吕浩, 王守智, 王霞 2014 中国激光 **41** 201]

# Fabrication of two-dimensional micro-nano photonic structures by symmetry-lost beams interference\*

Lü Hao<sup>1)2)</sup> You Kai<sup>1)2)</sup> Lan Yan-Yan<sup>1)2)</sup> Gao Dong<sup>1)2)</sup> Zhao Qiu-Ling<sup>1)2)</sup> Wang Xia<sup>1)2)†</sup>

1) (College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

2) (Shandong Advanced Optoelectronic Materials and Technologies Engineering Laboratory, Qingdao 266061, China)

( Received 6 July 2017; revised manuscript received 6 August 2017 )

## Abstract

Micro-nano photonic structures, such as meta-materials and photonic crystals, having special effects on light generation, transmission, detection and sensing on a submicron scale, play an increasingly significant role in optical information fields. Micro-nano photonic structures have great potential applications in surface laser emission, optical waveguide and high- $Q$  laser. There are several methods to fabricate micro-nano photonic structures, including laser direct writing, electron beam direct writing, electrochemical corrosion, and holographic lithography and so on. Holographic lithography employs multi-beam interference to generate periodic patterns and records them on photosensitive materials to form typical structures. What is more, it has advantages of low cost, large area and high efficiency. However, there are still some challenges in fabricating typical micro-nano photonic structures, especially the precise optical alignment, beam polarization and control of the details of local interference pattern. A specially designed prism is employed in this work and we propose a compact symmetry-lost setup with the rapid adjustment of beam configuration and polarization.

Based on the theory of multi-beam interference, symmetry-lost four- and five-beam interference with different polarizations are simulated. By changing the combination of beam configuration and polarization, novel two-dimensional micro-nano photonic structures can be achieved. The variations of azimuthal angle and polarization of beam in symmetry-lost system affect the wave vector difference, and thus changing the lattice shape and structure contrast. Branch-like and wave-like structures are generated by symmetry-lost four beams with polarizations of  $(90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ)$  and five beams with polarizations of  $(90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ , respectively. An appropriate threshold is selected in simulation, such that the intensity data larger than the threshold are removed, while the smaller data are remained, which is transformed into an optical lattice pattern. The interference structures show different morphologies and structural contrasts, and have a period of several hundred nanometers.

In experimental fabrication, a top-cut hexagonal prism is used to generate two-dimensional micro-nano photonic structure on CHP-C positive photoresist by single exposure. The intensity of each beam is about 18–20 mW, and the incident angle is  $42^\circ$ . The beam polarization is adjusted by rotating a half waveplate inside the holes of the mask and structure volume fraction is determined by exposure dose controlled by beam intensity and exposure time. The scanning electron microscope images of the samples show good agreement with simulation results. This study could provide an effective method of fabricating novel photonic structures, which can be used as templates of fabricating different types of metal lattice structures, thereby promoting the development and applications of novel photonic devices.

**Keywords:** multi-beam interference, symmetry-lost, photonic structures, polarization

**PACS:** 78.67.Pt, 42.40.Kw, 42.25.Hz, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.66.217801

\* Project supported by the Project of Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program, China (Grant No. J14LJ06), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2014FP012), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274189, 11504194).

† Corresponding author. E-mail: [phwangxia@163.com](mailto:phwangxia@163.com)