

全息干涉光学格点一到三维空间维度的 简捷变换*

王霞[†] 王自霞 吕浩 赵秋玲

(青岛科技大学数理学院, 光子信息技术研究所, 青岛 266061)

(2009 年 8 月 20 日收到; 2009 年 11 月 6 日收到修改稿)

采用计算机模拟技术, 研究了激光全息干涉光学格点从一维、二维到三维的简易空间变换. 采用镜像添加光束技术, 改变光束配置, 可以较容易地实现干涉场光学格点从二维到三维的空间变换. 进一步研究发现, 若改变入射光束的偏振方向, 干涉场可由三维结构变为一维层状结构, 并且层状结构周期最小可达半个光波长. 本文对全息光刻制作各种空间维度, 尤其是光学波段禁带的光子晶体提供了简捷可行的实验技术思路.

关键词: 全息模拟, 干涉光学格点, 光子晶体

PACC: 4240J, 4225K, 4270Q

1. 引 言

光子晶体是把介电材料按某种对称形式进行排布的一种人工晶体结构. 自 1987 年被提出以来^[1], 即引起了国际学术界的密切关注和浓厚兴趣^[2-16]. 光子晶体的主要制备方法有以 Yablonovitch 钻孔结构为代表的精细机械加工技术、一维介质棒逐层叠加方法、双光子聚合逐点扫描法、离子束刻蚀、蛋白石结构模板法、激光全息刻写法等. 其中, 激光全息刻写技术是利用多束相干激光汇聚干涉, 形成光强明暗分布的空间全息图案 (亦称干涉光学格点), 然后用介质记录刻写下这种干涉格点^[4]. 近几年来, 激光全息刻写技术因其经济、快速、灵活、可制作大面积光子晶体等优势, 已成为研究制备光子晶体模板的一种有效途径^[5-10]. 本研究组前期用全息光刻技术开展了系列研究工作, 制作了一到三维的周期、准周期、螺旋等各种对称形式的光子晶体微结构^[5-9].

为了高效地制作具体的光子晶体结构, 在制作前可先通过理论计算获得所需要的光束数目、光束偏振态、光束构型等参数, 然后利用计算机编程计

算干涉场分布, 并通过三维图形模拟显示出来^[11-14]. 本文采用计算机模拟技术, 研究了激光全息干涉光学格点从一维、二维到三维的简易空间变换. 我们在制作二维准周期结构所用的三光束构型基础上, 增加引入与之镜像对称的反射光束 (实验中用反射镜可实现), 数值模拟发现, 在一定光强阈值下, 沿 z 轴方向的等光强面由原来的柱状结构演变为周期性间隔的椭球状, 从而实现了干涉场光学格点从二维到三维的空间变换^[17]. 近期我们进一步研究发现, 当原入射三光束的偏振角度均由 0° 变为 90° , 并镜像添加对称光束后, 六光束的干涉场由三维结构演变为一维层状结构. 沿 z 轴方向呈层状结构, 在 $x-y$ 平面内是二维周期分布, 并且层状结构周期最小可达半个光波长, 利用这一计算模拟结果可方便快捷地制作一维层状光子晶体结构, 尤其是制作难度较大的禁带位于可见光区域的光子晶体.

2. 全息干涉理论

为了便于分析多光束产生的干涉图样, 我们先给出描述空间中偏振平面波复振幅的表达式如下:

* 国家自然科学基金 (批准号: 10974106, 60608015)、山东省自然科学基金 (批准号: ZR2009AZ002) 和山东省高等学校科技计划 (批准号: J09LA10) 资助的课题.

[†] E-mail: phxwang@yahoo.com.cn

$$\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_j e^{i(\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r} + \delta_j)}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E}_j, \mathbf{k}_j, \delta_j$ 分别表示振幅偏振矢量、波矢及光的初相位. 根据(1)式, 如果不考虑光波初相 δ_j , 空间中多光束干涉光强分布如下:

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= \left[\sum_{j=1}^N \mathbf{E}_j(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}) \right] \\ &\times \left[\sum_{j=1}^N \mathbf{E}_j^*(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}) \right] \\ &= N |\mathbf{E}_j|^2 + \sum_{i \neq j} \mathbf{E}_j^* \cdot \mathbf{E}_i \\ &\times \exp[i(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \cdot \mathbf{r}]. \quad (2) \end{aligned}$$

干涉场的光强极大值处满足布拉格衍射条件 $\Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = 2n\pi$ (n 是整数). 而 $\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$, 对应干涉图案的倒易矢量.

假设有 3 束相干激光绕 z 轴对称分布, 如图 1(a) 所示. 入射光方向与 z 轴正向夹角用 φ_i ($i=1-3$) 表示, 令 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$, 各光束在 $x-y$ 平面的投影相邻之间夹角均为 120° . 过坐标原点做每束光的法向矢量 \hat{n}_i , 并定义每束光的偏振角度 θ_i 为振动矢量 \mathbf{E}_i 与法向矢量 \hat{n}_i 沿逆时针方向的夹角, 设图 1(a) 中 \mathbf{k}_3 的偏振角度为 θ_3 .

按以上各量值定义, 可得到平面直角坐标系下各光束的单位振幅矢量 \mathbf{E}_i 、波矢量 \mathbf{k}_i 的一般表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= |\mathbf{E}_i| \left((\cos\psi_i \cdot \cos\varphi_i \cdot \cos\theta_i \right. \\ &\quad \left. - \sin\psi_i \cdot \sin\theta_i) \hat{i} \right. \\ &\quad \left. + (\sin\psi_i \cdot \cos\varphi_i \cdot \cos\theta_i \right. \\ &\quad \left. + \cos\psi_i \cdot \sin\theta_i) \hat{j} \right. \\ &\quad \left. + (\cos\varphi_i \cdot \cos\theta_i) \hat{k} \right), \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_i &= |\mathbf{k}_i| \left(-(\cos\psi_i \cdot \sin\varphi_i) \hat{i} \right. \\ &\quad \left. - (\sin\psi_i \cdot \sin\varphi_i) \hat{j} + \cos\varphi_i \hat{k} \right), \quad (4) \end{aligned}$$

其中 ψ_i ($i=1-3$) 为各入射光束在 $x-y$ 平面投影与 x 轴正向逆时针方向夹角, $|\mathbf{E}_i|$ 为入射光的振幅大小; $|\mathbf{k}_i| = 2\pi/\lambda$ 是入射光波数. 如果入射光的入射角 φ_i 和偏振方向 θ_i 设已知, 由(2)–(4)式可得到三光束在空间的干涉场分布.

3. 全息干涉场光学格点计算机模拟

3.1. 二维周期结构光学格点

根据(2)式, 计算了三光束干涉的光强分布. 取入射角度 $\varphi_i = 45^\circ$, 各振幅大小为 1, 偏振角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 均取 0° , 通过计算知, 干涉场明暗衬比度可达到理想值 1, 光强最大值约为 5.90. 利用 C 语言编程、做图软件, 通过对振幅、偏振、入射角度等相应参数设定, 把干涉场中大于某光强阈值的区域显示出来, 而将小于此阈值的部分舍去, 就可得到光强等值面呈空间分布的光学格点. 若将空间中阈值 $I(\mathbf{r}) \geq 3.65$ 的干涉部分保留, 干涉结构等光强面三维分布如图 1(b) 所示. 可见, $x-y$ 平面内干涉光强分布是呈正三角对称的周期结构, 沿 z 轴方向是呈柱状分布, 即为二维光子晶体结构模型.

3.2. 二维柱状到三维结构光学格点的简捷变换

若将图 1(a) 中所示光束汇聚处上放置一光学

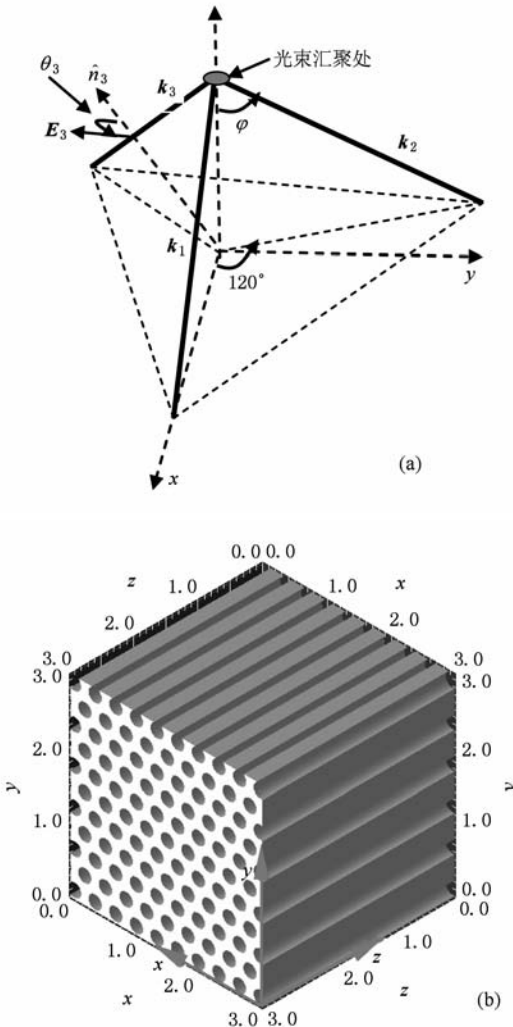


图 1 三光束干涉的构型光路图及计算机模拟干涉结构图
(a) 三光束干涉光路构型, (b) 计算机模拟三光束干涉的二维柱状空间光学格点分布 (取光强阈值 3.65)

全反镜(镜面垂直 z 轴),这样经过全反镜反射,汇聚处相当于新增加了3束干涉光束,并且与原入射光束关于镜面对称,如图2(a)所示.新增加的光束 k_{i+3} 到达汇聚点的入射角是 $\varphi_{i+3} = \pi - \varphi_i$,其振幅、偏振等参量基本未发生变化.再利用(3),(4)式,分别把6束光的偏振和波矢量表达式代入(2)式,就可得到变化后的光强空间分布^[17].

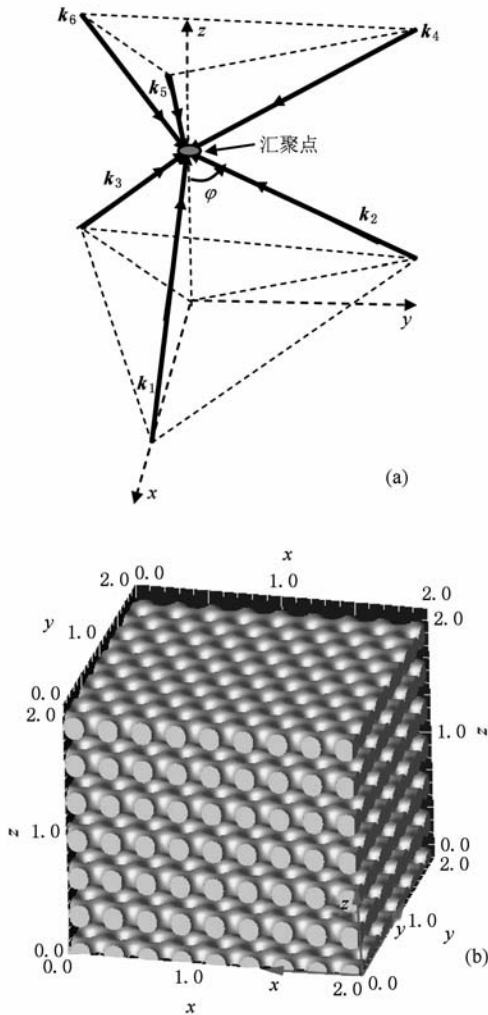


图2 三光束加镜像对称光束构成的六光束干涉光路以及计算机模拟干涉结构图 (a)三光束加镜像对称光束构成的六光束干涉光路构型,(b)计算机模拟六光束(3+3光束)干涉的三维光强等值面(三光束偏振均为 0° ,光强阈值取5.5)

参与干涉的激光由三光束变化到六光束,(2)式中干涉项增加,取偏振角度 $\theta_{i+3} = \theta_i = 0^\circ$ ($i = 1-3$),仍然利用编程模拟干涉结构的等光强面,可得到六光束相干涉的光学格点,如图2(b)所示.六光束叠加干涉后,计算得最大光强值是18,图2(b)是

取光强阈值 $I(r) \geq 5.5$ 时,光强等值面三维分布图.把图2(b)和图1(b)进行比较,可见沿竖直的 z 方向上看,等光强面不再是柱状分布,而是分离成为一个个的“椭球”,“椭球”在 $x-y$ 面或 $y-z$ 面内互联,在 z 方向上呈周期变化,由此演变为三维光子晶体结构模型.

3.3. 三维光学格点到一维层状光学格点的简捷变换

理论和实验已证明入射相干光束的偏振方向对光学格点的明暗分布起着非常重要的调节作用^[11].我们进一步研究发现,同样采用镜像添加光束技术,使汇聚处参与干涉的光束为3+3束.当保持原入射三光束的其他条件不变,利用半波片来调整改变三光束的偏振方向,当使偏振角度由 0° 变化到 90° ,即 $\theta_{i+3} = \theta_i = 90^\circ$ ($i = 1-3$)时,编程模拟干涉结构的等光强面,然后将数据导入 opendx 得到光学晶格模型.同样也取光强阈值为5.5,结果如图3所示.比较图3与图2(b)的 z 轴可见,当偏振角度都为 90° 时, z 方向结构变化显著,由原来(偏振角度为 0° 时)相连接的椭球状三维结构变化为在 z 轴上易于分离的层状一维结构.改变光束偏振方向可影响改变模型的空间维度,利用此最新计算模拟结果,我们可以采用激光全息光刻技术单次曝光制作一维层状光子晶体结构.设 z 方向层状结构的周期为 d ,则易得 $d = (\lambda/2) \cos\varphi$.其中 λ 为介质中光波长, φ 为图1(a)所示夹角.通过调节光束入射角度 φ ,光子带隙位置可在光学波段附近的一个很大范围内调节,层状周期最小可达 $d = \lambda/2$.

实际上,模拟一维层状光子晶体的结果不仅适用于3+3束光干涉情况,对于1束光采用镜像添加光束数目的方法,也可以得到一维层状结构模型.但如果在实际的实验制作中应用1+1束光路构型,有些感光材料容易发生坍塌而不能成功制作.若采用多光束镜像添加技术得到干涉模型,因 $x-y$ 表面有干涉明暗结构,这样就会使得所制作结构的每一层因有序的凹凸起伏而不至于坍塌.同很多研究者们采用的多重涂膜、半导体生长或化学沉积等制作一维光子晶体的传统方法^[18,19]比较,采用一步成型的全息光刻技术有简捷有效的独特优势.

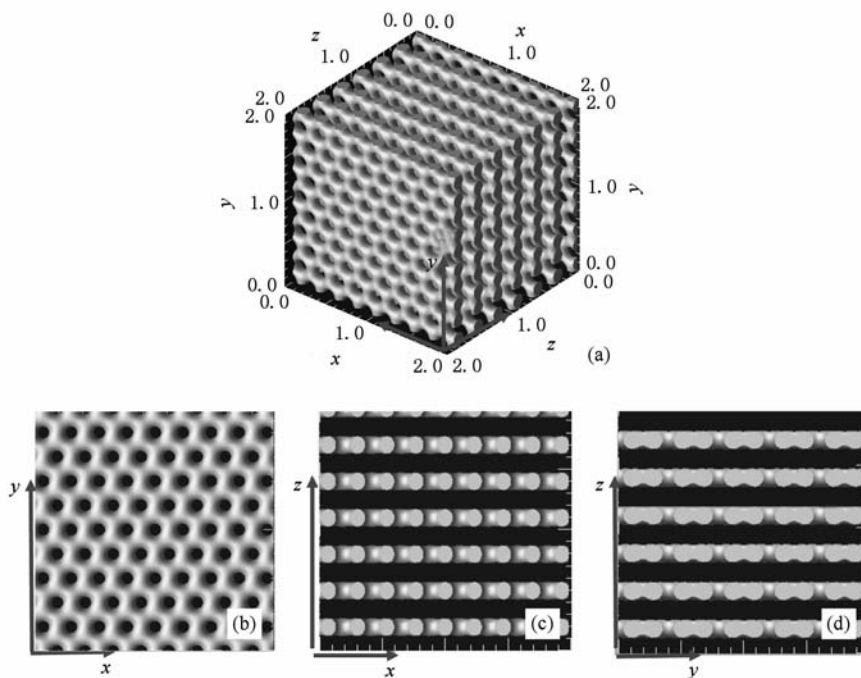


图3 当原三光束偏振角选取为 90° 并增加镜面反射后的六光束干涉光强等值面 光强阈值取 5.5. (a) 三维光强等值面, (b) x - y 面, (c) x - z 面, (d) y - z 面

4. 结 论

本文通过对三光束加镜面反射后的六光束干涉场光学格点的计算模拟, 发现可以较容易实现光学格点从二维到三维结构的演变. 在此基础上模拟研究了各光束偏振角度的变化对干涉结构的影响. 结果是当 6 束光偏振角度均调整到 0° 时, 更容易制作三维光子

晶体周期结构; 但当偏振角度由 0° 改变到 90° 时, 模拟结构呈现层状一维光子晶体结构. 由柱状二维光子晶体到三维、一维层状光子晶体结构的简捷空间变化研究, 对制作难度相对较大的光学波段禁带光子晶体提供了有效的理论及实验技术思路.

作者感谢香港科技大学物理系谭永炎教授的启发和探讨.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, Schubert E F 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3294
- [3] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S 1997 *Nature* **386** 143
- [4] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, Denning R G, Turberfield A J 2000 *Nature* **404** 53
- [5] Wang X, Ng C Y, Tam W Y, Chan C T, Sheng P 2003 *Adv. Mater.* **15** 1526
- [6] Wang X, Xu J, Lee J C, Pang Y K, Tam W Y, Chan C T, Sheng P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 051901
- [7] Wang X, Xu J F, Su H M, Zeng Z H, Chen Y L, Wang H Z, Pang Y K, Tam W Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2212
- [8] Pang Y K, Lee J C W, Lee H F, Tam W Y, Chan C T, Sheng P 2005 *Opt. Express* **13** 7615
- [9] Wang X, Tam W Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5398 (in Chinese)
- [10] Zhong Y C, Zhu S A, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 0688 (in Chinese) [钟永春、朱少安、汪河洲 2006 物理学报 **55** 0688]
- [11] Su H M, Zheng X G, Wang X, Xu J F, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1044 (in Chinese) [苏慧敏、郑锡光、王霞、许剑锋、汪河洲 2002 物理学报 **51** 1044]
- [12] Tam W Y 2007 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9** 1076
- [13] Sharp D N, Turberfield A J, Denning R G 2003 *Phys. Rev. B* **68** 205102
- [14] Cai L Z, Yang X L, Wang Y R 2002 *Opt. Lett.* **27** 900
- [15] Feng T H, Dai Q F, Wu L J, Guo Q, Hu W, Lan S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4533
- [16] Wang J, Yuan C W, Tang F Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 1581
- [17] Wang X, Li H B, Wang Z X 2009 *Opt. Lett.* **5** 0434
- [王霞、谭永炎 2006 物理学报 **55** 5398]

[18] Komikado T, Yoshida S, Umegaki S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061123

[19] Yang H, Xie P, Chan S K, Lu W, Zhang Z Q, Sou I K, Wong G K L, Wong K S 2006 *IEEE J. Quantum Electronics* **42** 447

Short-cut transformation from one-dimensional to three-dimensional interference pattern by holographic simulation^{*}

Wang Xia[†] Wang Zi-Xia Lü Hao Zhao Qiu-Ling

(*Institute of Photonic Information Technology, School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China*)

(Received 20 August 2009; revised manuscript received 6 November 2009)

Abstract

One short-cut transformation from one-dimensional (1D) to three-dimensional (3D) spatial optical lattices is simulated and studied. By adding mirror-symmetric beams for 3 original beams, the interference patterns from 2D to 3D can be obtained. Furthermore, by selecting appropriate polarization of the interference beams, the 3D structure can become 1D layered structure, and the period of the layers can reach the sub-wavelength. This result offers an alternative method to produce 1D and 3D photonic crystals, especially for the fabrication of optical band gap structures.

Keywords: holographic numerical simulations, interference pattern, photonic crystal

PACC: 4240J, 4225K, 4270Q

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10974106, 60608015), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2009AZ002), and the Scientific Research Program of the Higher Education Institutions of Shandong Province, China (Grant No. J09LA10).

[†] E-mail: phxwang@yahoo.com.cn