

非线性曝光对三维全息光子晶体禁带特性的影响*

任晓斌 翟天瑞 任 芝 林 晶 周 静 刘大禾†

(应用光学北京市重点实验室, 北京师范大学物理系, 北京 100875)

(2008 年 1 月 21 日收到, 2008 年 3 月 31 日收到修改稿)

从理论和实验两方面研究了非线性曝光对全息方法制作光子晶体的影响. 使用低折射率材料($n = 1.52$)制作了金刚石结构光子晶体, 通过控制曝光量使记录介质工作在线性曝光区域, 发现光子禁带的特性得到了明显的改善. 并由此提出了用低折射率材料实现全空间禁带的设想.

关键词: 光子晶体, 光学全息, 非线性曝光

PACC: 4270Q, 7820P, 4240K

1. 引 言

全息方法制作光子晶体因其技术简单、成本低、可实现多种结构而受到人们的关注^[1-5]. Ho 等人从理论上预言金刚石结构光子晶体具有全空间禁带^[6], 但折射率调制度必须大于 2. 此后, 人们设计了多种方法用全息技术和高折射率材料制作金刚石结构光子晶体^[7,8]. 其中, 有代表性的工作是用负光刻胶制作反金刚石结构, 然后再填充高折射率材料^[9-11]. 这种方法在技术上是复杂的、困难的. 同时, 寻找合适的高折射率材料也是相当困难的. 另一方面, 用复杂技术和高折射率材料所实现的三维全空间禁带都是在红外和微波波段. 因此, 在可见光范围内实现三维全空间禁带成为人们所关注的问题. 近来, 我们在用全息方法和低折射率材料获得三维全空间禁带的研究方面取得了一定的进展. 我们用全息方法以重铬酸盐明胶(DCG)为记录介质, 制作了由三个不同方位金刚石结构组成的复合结构, 虽然尚未获得全空间禁带, 但已在全空间 4π 立体角的 83% 的范围内获得了禁带, 且禁带宽度达到 260 nm ^[12]. 我们在工作中发现, 控制记录介质的曝光量, 使其工作在曝光的非线性区域, 是一个至关重要的问题. 我们对此从理论和实验两方面进行了进一步地深入研究.

2. 线性曝光记录的理论分析

若利用 N 束频率为 ω 的光进行全息干涉记录, 每束光可以表示为

$$E_i(\mathbf{r}, t) = E_i \boldsymbol{\varepsilon}_i \exp[i\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i + \varphi_i] \times \exp(-i\omega t), \quad (1)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 表示这束光的偏振方向, \mathbf{k}_i 为其波矢量, \mathbf{r}_i 为其位置矢量, φ_i 为其初位相. 在干涉叠加区域, 总电场为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^N E_i \boldsymbol{\varepsilon}_i \exp[i(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i + \varphi_i)] \times \exp(-i\omega t). \quad (2)$$

总的光强度为^[13]

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}^*(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \\ &= \sum_{i=1}^N E_i^2 + 2 \sum_{i>j=1}^N E_i E_j |\boldsymbol{\varepsilon}_i^* \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_j^*| \\ &\quad \times \cos(\mathbf{k}_{ij} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{ij} + \gamma_{ij}), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{k}_{ij} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$; $\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j$; $\gamma_{ij} = \arg(\boldsymbol{\varepsilon}_i \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_j)$.

利用全息方法制作面心立方(fcc)结构时常采用图 1 所示的四束光干涉的方法. 周围对称分布的三束相干光, 与中间光束之间的夹角均为 38.9° . 则干涉区内的光强分布为

$$I(\mathbf{r}) = I_0 + 2\Delta I(\mathbf{r}), \quad (4)$$

其中 $I_0 = E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + E_3^2$.

* 国家自然科学基金(批准号 60277014 和 60677006)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: dhliu@bnu.edu.cn

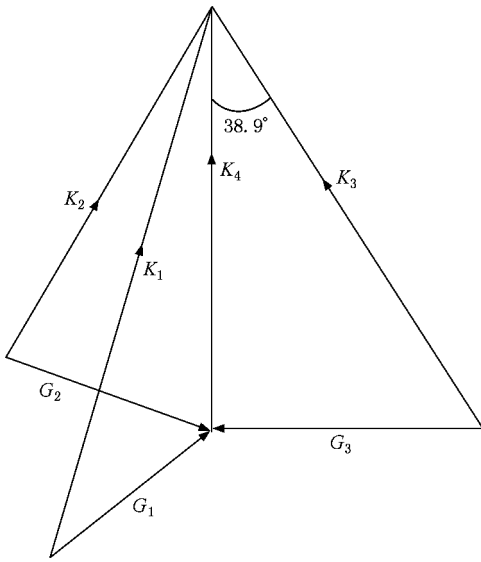


图1 制作面心立方结构的光路

$$\Delta I(\mathbf{r}) = c_{12} \cos(\mathbf{k}_{12} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{12} + \gamma_{12}) + c_{13} \cos(\mathbf{k}_{13} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{13} + \gamma_{13}) + c_{14} \cos(\mathbf{k}_{14} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{14} + \gamma_{14}) + c_{23} \cos(\mathbf{k}_{23} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{23} + \gamma_{23}) + c_{24} \cos(\mathbf{k}_{24} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{24} + \gamma_{24}) + c_{34} \cos(\mathbf{k}_{34} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{34} + \gamma_{34}),$$

$$c_{ij} = E_i E_j |\mathbf{e}_i^* \cdot \mathbf{e}_j^*| \quad i, j = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

在记录过程中,通过调整四束光的强度、偏振、位相,可消除(5)式中的部分交叉项,使干涉光强分布满足下式^[13-16]:

$$\Delta I(\mathbf{r}) \propto \cos(-X + Y + Z) + \cos(X + Y + Z) + \cos(X + Y - Z) + \cos(X - Y + Z). \quad (6)$$

曝光、处理后可得到图2所示的三维结构,这是一个典型的面心立方晶格.若在第一次曝光后沿此面心立方晶格的对角线方向将记录介质移动四分之一对角线长度,并进行第二次曝光,处理后可得如图3所示的金刚石结构^[12].

然而,这种理想的面心立方和金刚石结构只有在各干涉光束满足特定的强度、偏振、位相等条件时,才能够实现.一般情况下,这些条件,特别是偏振条件,在实际中是很难精确调控的.因此,在一般的实验条件下,实际的光强分布为(5)式.由此得到的三维结构并不是严格意义上的面心立方,而是格点形状为长椭球的准面心立方结构(见图4).图中竖

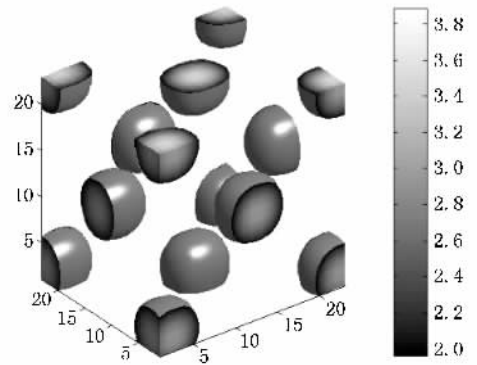


图2 理想面心立方结构

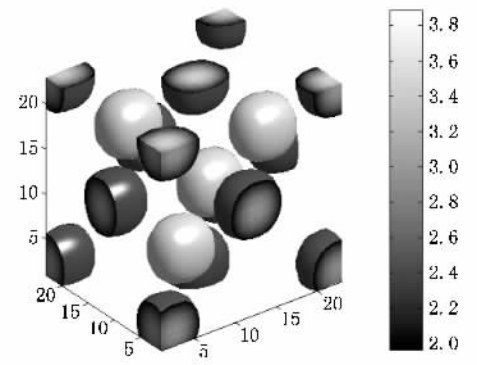


图3 理想金刚石结构

直方向为记录时中心光束方向).若采用上述方法进行两次曝光,则所得结构如图5所示.可以看到,我们无法区分两个独立的面心立方结构.因此,实际得到的并不是由两个面心立方所形成的金刚石结构,而是一个格点形状更长的准面心立方结构.因此,理论预言的金刚石结构的禁带特性无法实现.

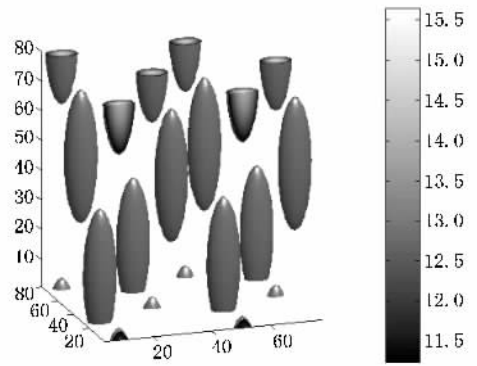


图4 准面心立方结构

这里,必须强调指出的是上述全部讨论都是基于记录介质工作在线性曝光区域,即对于吸收型全

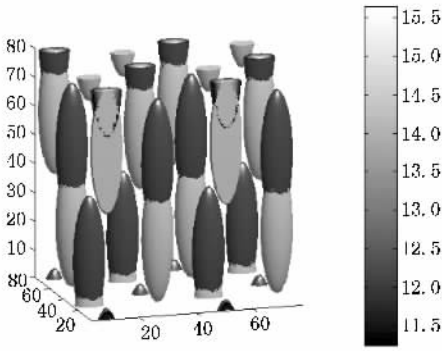


图 5 两个准面心立方结构的叠加

息图,其振幅透过率与曝光量成正比^[17],对于位相型全息图,其折射率与曝光量成正比^[18].而线性曝光记录的主要作用是保证所记录的图像在光强分布上不失真.

3. 非线性曝光的作用

在全息技术中,非线性曝光可以提高振幅或位相的调制度,从而提高衍射效率.另外,在保证干涉

极值位置不变的情况下,可以改变光强的分布规律.在利用图 1 所示光路制作面心立方或金刚石结构时,若控制曝光量,使记录介质工作在非线性曝光区,则可使干涉极大与极小之间变化更为陡峭,由此可得到与线性曝光记录明显不同的结构.图 6 为不同非线性曝光情况下用位相型记录介质记录的由两个面心立方结构构成的金刚石结构的理论模拟结果.可以看到,高阶非线性曝光能够有效地将两个面心立方结构分开,从而形成一个金刚石结构.

4. 实验结果及讨论

我们利用图 1 的光路制作金刚石结构.制作过程中,先将记录介质曝光一次,形成一个面心立方结构.然后,沿中心光束方向移动面心立方结构对角线长度四分之一的距离,并进行第二次曝光.两次曝光后,进行显影和定影处理.实验中,所用的记录介质分别为重铬酸盐明胶(DCG)和国产 CHP-C 型光刻胶.这是两种典型的位相型全息记录介质.光刻胶的折射率为 1.6,DCG 的折射率为 1.52.我们通过大量的前期实验规律总结,将它们控制在高阶非线性曝

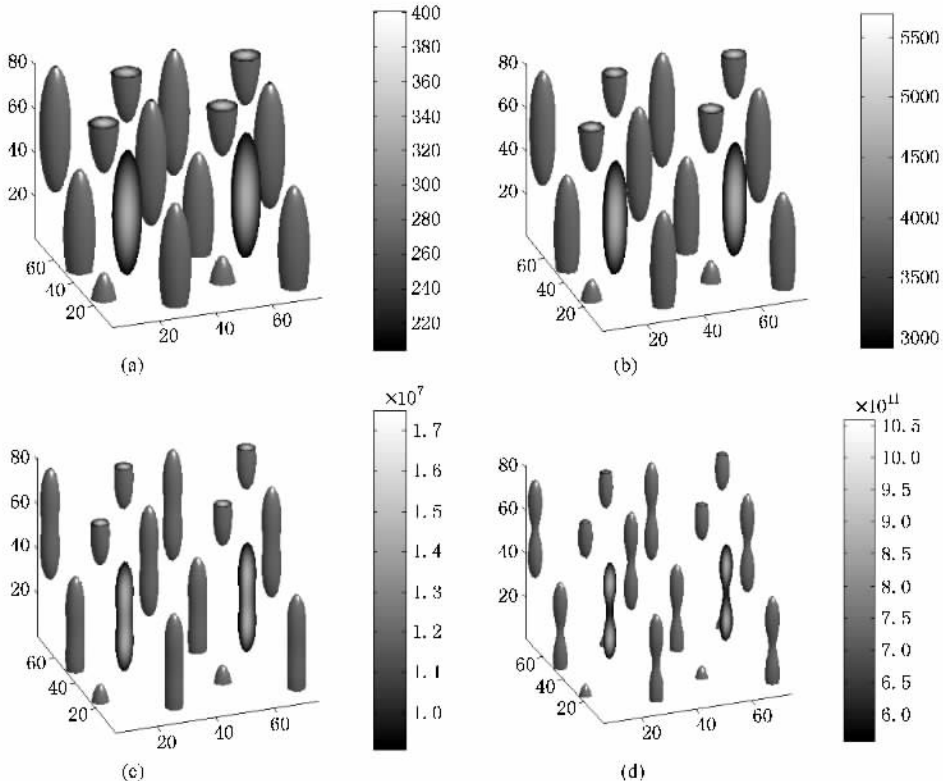


图 6 不同非线性曝光情况下用位相型记录介质记录的由两个面心立方结构构成的金刚石结构的理论模拟结果 (a) 折射率与曝光量平方成比例 (b) 折射率与曝光量三次方成比例 (c) 折射率与曝光量六次方成比例 (d) 折射率与曝光量十次方成比例

光区域内. 所用激光器为 Melles Griot 公司 85-BLT-605 型激光器, 输出波长为 457.9 nm, 输出功率为 400 mW 线宽为 200 kHz.

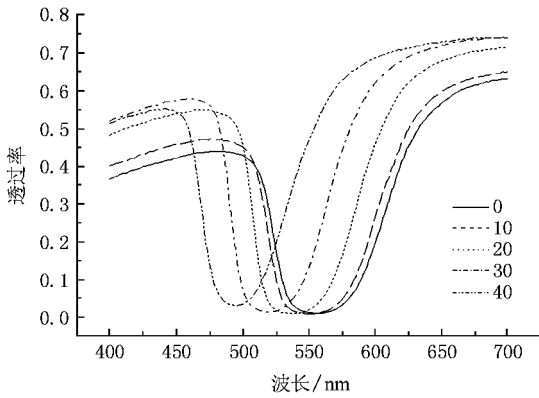


图 7 用光刻胶制作的金刚石结构的透射光谱

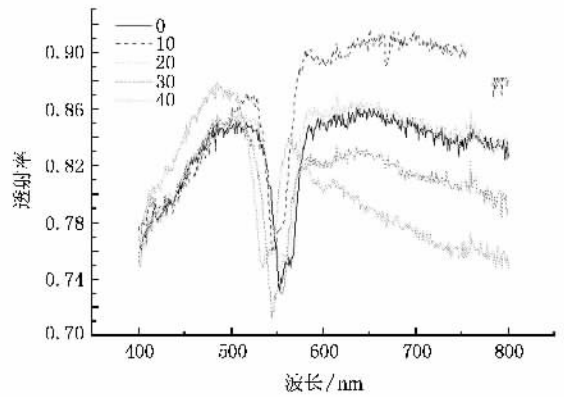


图 9 用 36 μm 厚度 DCG 制作的金刚石结构的透射光谱

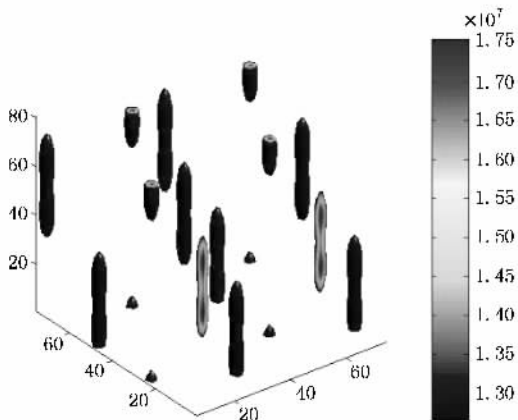


图 8 用光刻胶制作的金刚石结构的理论模拟结果

图 7 为用 10 μm 厚度光刻胶制作的金刚石结构的透射光谱. 由于光刻胶是一种特殊用途的材料, 它相当于一种二值化的记录材料, 即只要光强大于阈值, 光强分布就会记录在记录介质上, 若光强小于阈值, 则无任何光化学反应发生. 因此, 光刻胶曝光的宽容度非常小, 不可能得到高的非线性曝光效果. 我们设其具有六次方的非线性效应, 理论模拟的结构如图 8 所示. 这实际上并不是一个金刚石结构, 而是一个准面心立方结构. 可以看到, 随着入射角的改变, 禁带发生明显的移动. 当入射角大于 40° 时, 已没有公共的禁带. 因此, 用光刻胶制作的金刚石结构不可能具有全空间禁带.

图 9 为用 36 μm 厚度 DCG 制作的金刚石结构的透射光谱. 我们发现, 其禁带的宽度小于用光刻胶制作的金刚石结构的禁带宽度. 这是由于 DCG 的折

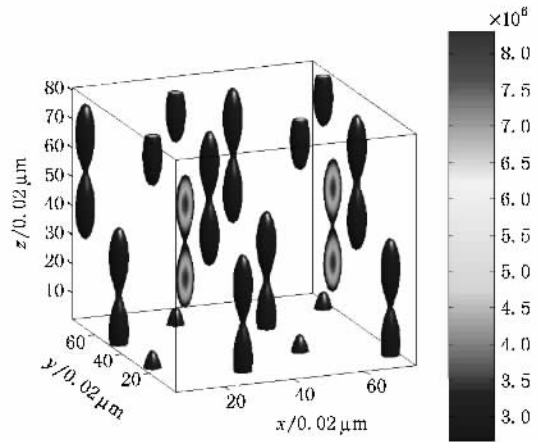


图 10 用重铬酸盐明胶制作的金刚石结构的理论模拟结果

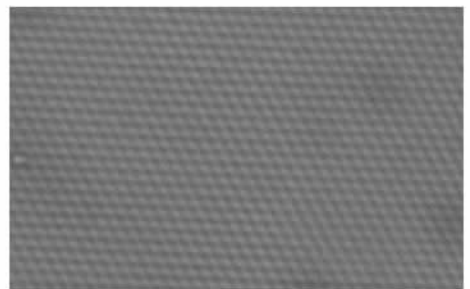


图 11 用重铬酸盐明胶制作的金刚石结构的显微镜照片

射率调制度 ($\Delta n < 0.1$) 远小于光刻胶的折射率调制度 ($\Delta n = 0.6$). 然而, 随着入射角的改变, 在小于 40° 的范围内, 用 DCG 制作的金刚石结构的禁带几乎没有移动. 这表明, 用 DCG 制作的结构确实为金刚石结构, 只是由于其折射率低、折射率调制度过小而不具备全空间禁带. 由于 DCG 的曝光量具有非常大的宽容度, 我们设其具有十二次方的非线性效应. 图

10 为理论模拟的用 DCG 制作的金刚石结构. 可以看到, 两个面心立方结构能够被清楚分开, 已经构成了一个金刚石结构. 这也正是当入射角在一定范围内改变时, 其禁带并不移动的原因. 另外, 由于 DCG 所记录的是一种折射率的分布, 并没有浮雕效果. 因此, 无法得到电镜照片. 图 11 为在 1280 倍显微镜下得到的显微镜照片.

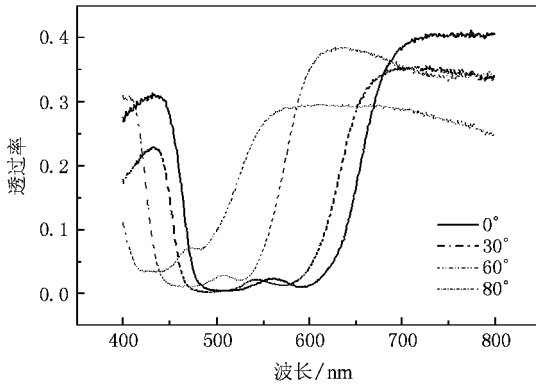


图 12 套构金刚石结构的透过光谱

虽然用重铬酸盐明胶制作的金刚石结构因其折射率低 ($n = 1.52$), 折射率调制度小 ($\Delta n < 0.1$) 而无法得到全空间禁带, 但它为我们用低折射率材料和非线性曝光实现全空间禁带提供了一个很好的技术

路线. 我们用重铬酸盐明胶为记录介质, 精确控制其曝光量, 在 $[111][010][100]$ 三个方向上制作三个金刚石结构, 得到了一个由三个金刚石套构形成的复合结构. 这个结构的禁带宽度达到了 260 nm, 且在 150° 的入射角范围内 (即 4π 立体角 83% 的范围内) 可获得宽度为 20 nm 的公共禁带. 图 12 为这个结构的透射光谱. 关于这个结构及其禁带特性的详细讨论请参看文献 [12].

5. 结 论

通过我们的理论和实验分析, 可见控制曝光量, 充分利用全息记录介质的非线性曝光性质, 可以有效改善三维光子晶体的禁带特性, 为用低折射率材料获得全空间禁带提供了有效的方法. 我们认为只要能够在以下两个方面: 1) 进一步改善 DCG 的曝光特性, 提高其曝光宽容度, 以实现多个方位金刚石套构的复合结构; 2) 进一步研制新的具有高非线性曝光特性的全息记录材料, 使其折射率大于 1.7, 折射率调制度仍为 0.1. 这样可以通过非线性曝光的影响提高记录介质的记录特性, 我们应该能够得到全空间带隙.

- [1] Berger V, Gauthier-Lafaye O, Costard E 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 60
- [2] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, Denning R G 2000 *Nature* **404** 53
- [3] Wang X, Xu J F, Su H M, He Y J, Jiang Sh J, Wang H Z, Zeng Z H, Cheng Y L 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、曾兆华、陈用烈 2002 物理学报 **51** 527]
- [4] Zhong Y C, Zhu S A, Wang H Z, Zeng Z H, Chan Y L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 688 (in Chinese) [钟永春、朱少安、汪河洲、曾兆华、陈用烈 2006 物理学报 **55** 688]
- [5] Wang X, Tan Y Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5398 (in Chinese) [王霞、谭永炎 2006 物理学报 **55** 5398]
- [6] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 3152
- [7] Sharp D N, Turberfield A J, Denning R G 2003 *Phys. Rev. B* **68** 205102
- [8] Toader T, Chan Y M, John S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 101117
- [9] Meisel D C, Wegener M, Busch K 2004 *Phys. Rev. B* **70** 165104
- [10] Blanco A, Chomski E, Grabtchak S, Ibsate M, John S, Leonard S W, Lopez C, Meseguer F, Miguez H, Mondia J P, Ozin G A, Toader O, van Driel H M 2000 *Nature* **405** 437
- [11] Vlasov Y A, Bo X Z, Sturm J C, Norris D J 2001 *Nature* **414** 289
- [12] Ren Z, Wang Z N, Zhai T R, Gao H, Liu D H 2007 *Phys. Rev. B* **76** 035120
- [13] Timothy, Chan Y M, Toader O, John S 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046605
- [14] Sharp D N, Turberfield A J, Denning R G 2003 *Phys. Rev. B* **68** 205102
- [15] Zhong Y C, Wang H Z 2006 *Opt. Express* **14** 6837
- [16] Escuti M J, Qi J 2003 *Opt. Lett.* **28** 522
- [17] Goodman J W 1978 *Introduction to Fourier Optics* (Science Press, Beijing, China) [J. W. 顾德门 1978 傅立叶光学导论 (北京: 科学出版社)]
- [18] Liu D H, Zhou J 1994 *Opt. Commun.* **107** 471



The effect of nonlinear exposure on bandgap of three-dimensional holographic photonic crystal^{*}

Ren Xiao-Bin Zhai Tian-Rui Ren Zhi Lin Jing Zhou Jing Liu Da-He[†]

(*Applied Optics Beijing Area Major Laboratory ,Department of Physics ,Beijing Normal University ,Beijing 100875 ,China*)

(Received 21 January 2008 ; revised manuscript received 31 March 2008)

Abstract

The effect of nonlinear exposure on the characteristics of photonic crystal fabricated by holography is investigated theoretically and experimentally. A kind of materials with low refractive index($n = 1.52$) is used to fabricate diamond structure. By controlling the exposure in strong nonlinear range , the property of photonic bandgap is improved. Also ,some proposals are made to achieve complete band gaps by materials with low refractive index .

Keywords : photonic crystal , holography , non-linear exposure

PACC : 4270Q , 7820P , 4240K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 60277014 , 60677006).

[†] Corresponding author. E-mail ldhliu@bnu.edu.cn