

全息制作不同晶面取向光子晶体模板^{*}

钟永春¹⁾ 朱少安¹⁾ 汪河洲^{1)†} 曾兆华²⁾ 陈用烈²⁾

1) 中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州 510275)

2) 中山大学高分子研究所, 广州 510275)

(2005 年 4 月 20 日收到, 2005 年 7 月 11 日收到修改稿)

用单向光入射和单次曝光的激光全息技术制作了类金刚石结构, 此类金刚石结构有宽完全带隙和低介质折射率要求等优点. 在同一种光束配置下, 引入恰当的匹配棱镜, 用激光全息技术制作了大面积的类金刚石光学晶格不同晶面取向的亚微米周期结构. 满足如负折射效应等研究中所需的特殊晶面取向要求.

关键词: 激光全息技术, 光学晶格, 光子晶体

PACC: 4240K, 4290, 4270Q

1. 引 言

光子晶体是折射率在光波长的尺度上成周期分布的一种人工材料^[1,2]. 光子晶体的各种新颖的现象和奇特的性质使它已被广泛应用于制作各种光子器件, 例如滤光片^[3]、光波导^[4]和共振腔^[5]等. 光子晶体的各种新颖的现象和它的各种应用都要考虑晶面的取向. 例如理论研究表明光子晶体的负折射现象与入射光的方向密切相关^[6]. 又如光子晶体中的超棱镜效应也是与光子晶体的表面取向有关的, 由于 Tushar Prasad 等人^[7]实验上只制作了(111)和(100)两种表面取向的 FCC 结构, 他们在对 FCC 结构的超棱镜现象的讨论中不能根据光子晶体晶面取向来优化超棱镜效应. 但根据他们所计算出的等频面看, 最大超棱镜效应不是在 L 方向(对应(111)方向)或者是 X 方向(对应(100)方向), 而是在第一布里渊区中两个平面相交的对应取向. 另外, 光从均匀介质进入光子晶体的耦合效率与光子晶体的晶面取向也有关^[8], 因此光子晶体的表面取向直接影响如负折射等各种现象和应用.

光子晶体的激光全息技术(Holographic Lithography)微加工制作方法以其耗时短、工艺简单等特点受到人们的普遍关注. 但是激光全息技术制

作的光子晶体通常不厚, 不能像用半导体切割一样提供各晶面为表面的样品来满足应用的需求. 所以用激光全息技术直接制作出符合应用要求的对应晶面是光子晶体的激光全息制作术发展的一重要内容.

本文介绍一种不改变光束的配置, 制作同一光学晶格的任意表面取向的光子晶体模板的方法. 作为例子, 我们用此方法制作了三种不同晶面取向的类金刚石(Diamond-like)结构的光子晶体模板.

2. 实验原理及实验配置

2.1. 类金刚石结构的制作和带隙

根据全息理论, 通过改变激光束的光束数、传播方向、光强比和偏振, 可以产生许多不同的一维、二维和三维周期格阵光强分布. 激光空间干涉光场形成的这种周期格阵光强分布被称为光学晶格, 结合光聚合技术, 可以得到不同光学晶格的周期结构.

制作类金刚石结构的实验配置如图 1 所示. 离子激光器输出的 514nm 激光被分成四束相干的偏振光, 其中 K_4 沿着 z 轴方向竖直向上, K_1 , K_2 和 K_3 都与 K_4 成 38.9° 夹角, K_1 , K_2 和 K_3 间夹角相等, 即他们在 xy 平面上的投影相互成 120° . 因为偏振是

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10274108)国家重点基础研究发展规划(973)项目(批准号: 2003CB314901, 2004CB719804)国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号: 2003AA311022)和广东省自然科学基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: stswzh@zsu.edu.cn

类金刚石结构能否形成的关键因素,为了描述偏振的取向,定义 ω_1 为电场方向 E_1 与单位向量 a_1 之间的夹角(其中 a_1 是在 OAD 平面上与波矢 K_1 相互垂直的单位向量)。同样,定义 ω_2 和 ω_3 为 E_2 与 a_2 和 E_3 与 a_3 之间的夹角。偏振配置对激光全息技术制作是关键的一步^[9]经计算得类金刚石结构的各光束所对应的偏振配置分别为: $\omega_1 = 5\pi/12$, $\omega_2 = 5\pi/9$, $\omega_3 = 0$, 中间光束是圆偏振光,四束光的光强比是 $E_1 = E_2 = E_3 = 1/3 E_4$ 。

计算机模拟此光束配置得到的类金刚石结构光场的等强度面如图 1(b)所示,图中灰暗部分是光强大于感光阈值之处(这光强大于感光阈值的地方在显影的过程中将保留下来成为微结构)。为更明确直观说明问题,我们把真正的金刚石结构的每两个最靠近的“原子球”用圆柱连起来(圆柱半径等于“原子球”的半径,旋转轴在 (111) 方向上,圆柱体的高为面心立方原胞长对角线的四分之一),得到图 1(c)所示结构,很明显它与图 1(b)完全相同。因此把这种结构叫做类金刚石结构。

计算表明此类金刚石结构的反 Opal 结构具有很宽的完全带隙,当折射率比仅为 2.7:1(TiO_2 的折射率),介质占空比为 25.8% 时,这种类金刚石的反 Opal 结构在第二和第三能带之间存在完全带隙,带宽与中心频率之比为 9.8%。此类金刚石结构产生完全带隙的折射率比仅为 2.05:1。

2.2. 不同晶面类金刚石结构的制作

由于光从空气进入介质要发生折射,所以图 1(a)所示的光路是光敏环氧树脂内的光路。即使最简单的 (111) 面样品制作(对应图 1(a)的光路,光敏环氧树脂膜片水平放置),也不能简单地直接放置光敏环氧树脂膜片于光路中,必需在光路中加一特殊的多面棱镜^[10]。各不同晶面的制作也必需设计专门的棱镜,棱镜用折射率为 1.6(等于未聚合的环氧树脂的折射率)的玻璃制作,棱镜间加匹配液。下边以 $(1,1,1)$ 、 $(1,1,4)$ 和 $(1,1,0)$ 三个晶面为例进行具体介绍:

已知 $(1,1,1)$ 面垂直于 K_4 方向,所以首先要计算出 $(1,1,1)$ 面与 $(1,1,4)$ 和 $(1,1,0)$ 面之间的夹角。两个晶面 (h_1, k_1, l_1) 和 (h_2, k_2, l_2) 之间的夹角 α 可以由下式求得:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a_1 \cdot a_2}{|a_1| \cdot |a_2|}\right), \quad (1)$$

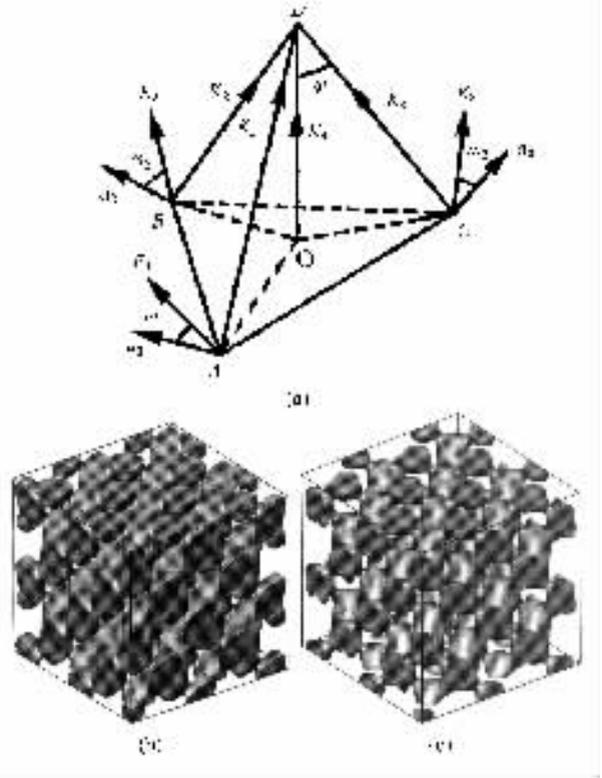


图 1 (a)制作类金刚石结构的激光束配置图 (b)由(a)的光束配置所得到的干涉光场等光强面图 (c)类金刚石结构图

其中

$$\begin{cases} a_1 = (h_1, k_1, l_1), \\ a_2 = (h_2, k_2, l_2), \end{cases}$$

代入晶面的参数得到 $(1,1,1)$ 面与 $(1,1,4)$ 和 $(1,1,0)$ 面之间的夹角都是 35.26° ,只是在旋转方向上刚好相反。因此只要让样品曝光的时候与中间光束在对应的方向上成一个 35.26° 就可以得到表面是 $(1,1,4)$ 或者是 $(1,1,0)$ 面的类金刚石结构的光子晶体。因此我们制作了一个其中两个面之间的角度是 35.26° 的三棱镜,这样就可以在原来制作 $(1,1,1)$ 面的光路的基础上,通过匹配棱镜不同的摆法得到同一光学晶格的表面为 $(1,1,4)$ 或者 $(1,1,0)$ 面的光子晶体模板。图 2(a)和(b)分别是实验中制作 $(1,1,4)$ 面和 $(1,1,0)$ 面的入射光与棱镜相对位置的侧视示意图,即是实验装置在 K_1 与 K_4 所构成的平面上的投影图,在这个投影面上 K_2 和 K_3 的投影重合。如图所示,感光样品被放在棱镜的上面进行曝光,从而得到了表面为 $(1,1,4)$ 面或 $(1,1,0)$ 面的光子晶体模板。实验中,外围三束光的功率为 4mW,而中间光束功率为 12mW。使用 SU8-epoxy resin(环氧树脂)作为预聚体,按照 1:1:0.015 的比例与溶剂 1,4-丁内脂

和可见光引发剂 Irgacure256 混合配制感光材料,其他过程见参考文献 [11].

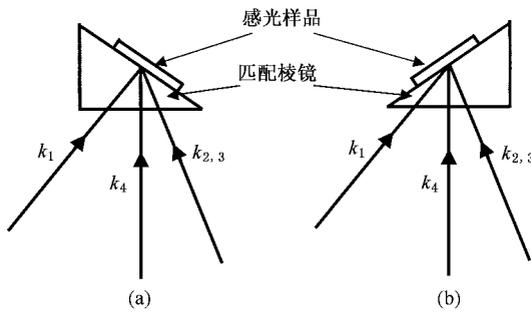


图 2 制作(a) $\chi(111)$ 和(b) $\chi(110)$ 表面取向类金刚石结构光子晶体的实验设置示意图(多面棱镜没画出)

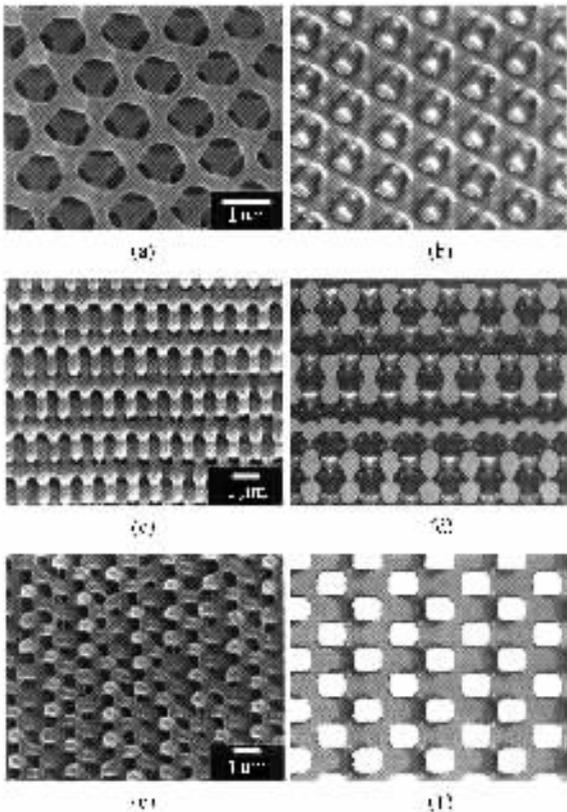


图 3 三种不同表面取向(a)和(b) $\chi(1,1,1)$, (c)和(d) $\chi(1,1,1)$, (e)和(f) $\chi(1,1,0)$ 面的类金刚石结构样品的 SEM 照片及它们的计算机模拟图. 其中图(a)(c)和(e)是 SEM 照片,图(b)(d)和(f)是对应的计算机模拟图

3. 实验结果与讨论

图 3 是已制作得各种晶面取向类金刚石结构样品的部分典型面的扫描电镜 (SEM) 照片及它们的计

算机模拟图,其中,图(a)(c)和(e)分别对应(1,1,1)(1,1,1)和(1,1,0)面的 SEM 照片,而图(b)(d)和(f)分别对应(1,1,1)(1,1,1)和(1,1,0)面的计算机模拟图. 实验结果和计算机模拟结果的一致表明使用匹配棱镜来制作同一光学晶格的不同表面取向的光子晶体模板是可行的.

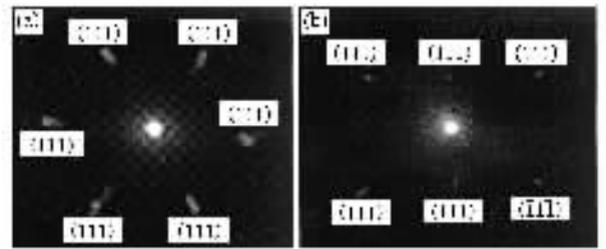


图 4 样品的衍射图 (a) $\chi(1,1,1)$ 面取向的样品的衍射图,(b) $\chi(1,1,0)$ 面取向的样品的衍射图

图 4 是 He-Ne 激光入射到不同取向的光子晶体模板得到的衍射图. 图 4(a)是取向为(1,1,1)面的样品的衍射图,图 4(b)是取向为(1,1,0)面的样品的衍射图. 由衍射理论可知,相同光学晶格不同表面的衍射花样可以看成是此光学晶格的倒格子在这个表面上的投影. 由于类金刚石结构的倒格子是体心立方结构,衍射花样可以看成是体心立方的九个格点在各个面上的投影. 在衍射花样图上,我们以(000)(111)($\bar{1}\bar{1}1$)($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)($1\bar{1}1$)($11\bar{1}$)($\bar{1}1\bar{1}$), ($1\bar{1}\bar{1}$)和($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)标示其倒格子的九个格点. 在(111)面上,如图 4(a)所示其九个格点表现为一个有心的正六边形. 在(110)面上,倒格子的九个格点则表现为矩形,而且点(111)与($1\bar{1}\bar{1}$)的距离是点(111)与($\bar{1}\bar{1}1$)的距离的 $\sqrt{2}$ 倍,这与图 4(b)中(110)面的衍射花样相同. 这不仅仅证明了所做出来的光子晶体模板是同一种光学晶格,而且还反过来表明了对于未知的光子晶体,可以使用衍射原理,通过类似于晶体学中 X 射线分析的方法,测量光子晶体的衍射花样来比较准确的得到它的光学晶格结构及其结构常数.

4. 结 论

通过恰当的匹配棱镜用激光全息技术制作了大面积的类金刚石光学晶格中不同晶面取向或任意切面的亚微米周期结构. 这种光子晶体的不同晶面取向的制作方法不但对研究光子晶体不同晶面的光学

性质有意义,对负折射效应等物理性质研究有意义,而且对三维光子晶体走向实用提供了样品制作方法.本文的样品的激光衍射花样的分析说明:本文的不同晶面或任意切面的制作与其激光衍射花样的

数据分析相结合,提供了一种研究激光全息技术制作的全新结构性质的新方法.另外,本文制作的类金刚石结构有宽完全带隙和低介质折射率要求的优点.

- [1] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [2] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [3] Schilling J, Muller F, Matthias S, Wehrspohn R, Gosele U, Busch K 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1180
- [4] Lin S Y, Chow E, Hietala V, Villeneuve P, Joannopoulos J 1998 *Science*, **282** 274
- [5] Noda S, Chutinan A, Imada M 2000 *Nature* **407** 608
- [6] Luo C Y, Johnson S G, Joannopoulos D J 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201104
- [7] Prasad T, Colvin V, Mittleman D 2003 *Phys. Rev. B* **67** 165103
- [8] Ruan Z C, Qiu M, Xiao S S, He S L, Thylen L 2005 *Phys. Rev. B* **71** 045111
- [9] Su H M, Zheng X G, Wang X, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1044 (in Chinese) [苏慧敏、郑锡光、王 霞、汪河洲 2002 物理学报 **51** 1044]
- [10] Miklyaev Y V 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1284
- [11] Wang X, Xu J F, Su H M, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 527 (in Chinese) [王 霞、许剑峰、苏慧敏、汪河洲 2002 物理学报 **51** 527]

Fabrication of photonic crystals with different surface orientation by holographic lithography^{*}

Zhong Yong-Chun¹⁾ Zhu Shao-An¹⁾ Wang He-Zhou^{1)†} Zeng Zhao-Hua²⁾ Chen Yong-Lie²⁾

1) *State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Zhongshan (Sun Yat-Sen) University, Guangzhou 510275, China*

2) *Institute of Macromolecule, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China*

(Received 20 April 2005 ; revised manuscript received 11 July 2005)

Abstract

A diamond-like structure, which has a large complete photonic band gap and needs only a low refractive index contrast to open the complete photonic band gap, have been fabricated using four umbrellalike beams. By use of special prism to match the beams, diamond-like crystals with special surface orientations have been fabricated. The capability and feasibility of this method have been demonstrated by the fabrication of long-range ordered diamond-like microstructures with (114) and (110) surface orientation. The fabrication of large crystals with adjustable surface orientations will be advantageous to the systematic investigation of photonic properties such as negative reflection etc.

Keywords : holographic lithography, photonic lattice, photonic crystal

PACC : 4240K, 4290, 4270Q

^{*}Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10274108), the National 973 Project of China (Grant Nos. 2003CB314901 and 2004CB719804), the National 863 Project of China (Grant No. 2003AA311022), and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China.

[†] Corresponding author. E-mail : stswzh@zsu.edu.cn