

立体光刻技术制备三维光子晶体*

文 景¹ 尹海清² 张瑞娟¹ 曹文斌^{1,†}

(1 北京科技大学材料科学与工程学院 无机非金属材料系, 北京 100083)

(2 北京科技大学材料科学与工程学院 粉末冶金研究所, 北京 100083)

摘要: 以三维金刚石结构光子晶体为例, 采用立体光刻技术(SLA)进行三维光子晶体的制备研究. 微波透射谱测试表明, 所制备的光子晶体的禁带分布在 12.3~13.4GHz 之间, 与理论计算值一致, 表明立体光刻技术可用于复杂三维光子晶体结构的制备研究.

关键词: 立体光刻技术; 光子晶体; 光子禁带; CAD

PACC: 4270E; 4270Q

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0357-03

1 引言

光子晶体的概念是 1987 年由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在研究抑制自发辐射和光子局域时各自提出的. 光子晶体 (photonic crystal, PC) 是一种折射率(或介电常数)呈现周期性变化、具有光子禁带的人造结构. 光子禁带类似于半导体的电子能带. 影响光子禁带的因素很多. 一般来说, 组成光子晶体材料的介电常数反差越大(一般要求大于 2), 得到光子带隙的可能性就越大. 光子禁带的出现和调节主要取决于晶格类型、组成材料的介电常数等. 相比其他具有相同参数的三维光子晶体结构, 金刚石结构三维光子晶体具有较大的禁带宽度.

自然界中存在光子晶体, 比如蝴蝶翅膀和蛋白石等, 但是大多数光子晶体需要人工制备. 光子晶体按照介质周期排布方式可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体. 通常将在一个方向上具有光子带隙的材料称为一维光子晶体, 这种光子晶体在结构上最为简单、易于制备, 目前在光纤和半导体激光器中已得到应用^[3]. 但迄今为止, 仍没有成熟的可用于三维光子晶体的制备方法, 因此其制备方法的研究自然也成为了光子晶体研究领域的热点. 本文采用立体光刻技术进行三维金刚石结构光子晶体的制备研究.

2 立体光刻技术制备三维光子晶体

立体光刻(SLA)^[4], 又称立体印刷、光敏液相固

化等, 基本原理是借助 CAD 技术对所需制备的模型进行三维实体模型造型, 再采用切片软件对实体模型按需要分层切割, 得到二维片层平面信息, 生成扫描路径, 以此驱动激光束按照每一层切片的轮廓使盛于容器内的液态光敏聚合物逐层固化. 待第一层光敏聚合物固化后, 平台沿垂直方向下降一个层片距离, 新的一层液态聚合物又覆盖在已固化层面上, 再进行第二层固化, 如此反复逐渐堆积成三维实体, 其技术设备及工作原理如图 1 所示. 立体光刻技术工艺稳定, 制备效率高, 精度可高达 0.2%, 其中定位精度为 0.02mm, 重复精度为 0.005mm, 厚度方向精度为 0.005mm, 并且精度不受结构复杂度限制^[5], 故可用来制备复杂的三维光子晶体.

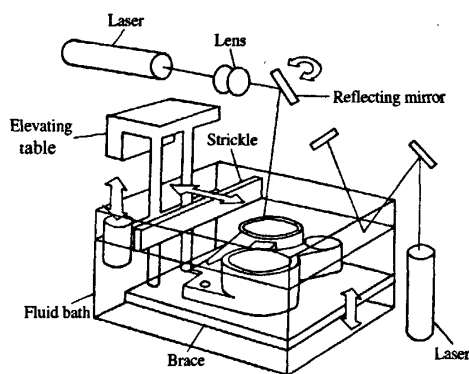


图 1 立体光刻技术设备及工作原理图

Fig. 1 Picture of facility and principle of SLA

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:2004CB719802),北京市科技新星计划(批准号:2003B12)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20050008002)资助项目

† 通信作者. Email:wbcao@mater.ustb.edu.cn

2006-12-11 收到,2006-12-19 定稿

本文以三维金刚石结构光子晶体的制备为例,对采用 SLA 技术进行光子晶体的制备进行研究.图 2 是金刚石结构光子晶体的晶胞图. $R, L, a, C-C$ 分别是连接两相邻节点圆柱的半径、圆柱的长度、晶格常数和 C—C 键. C—C 键为 $109^{\circ}28'$. 这样的单胞在空间按照规律周期排布,即可构成光子晶体.由此可见,金刚石结构光子晶体的制备比较复杂,难于准确控制圆柱的长度、直径,尤其是角度.

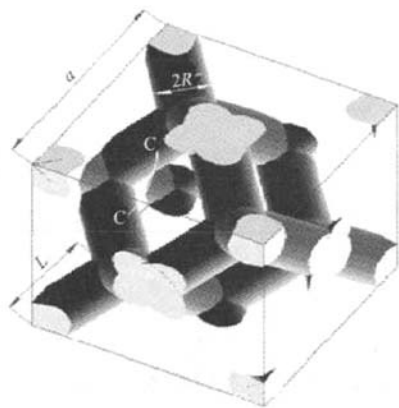


图 2 金刚石结构光子晶体的晶胞图

Fig.2 Unit cell of photonic crystal of diamond structure

SLA 制备技术所采用的材料为光敏树脂,经测定其介电常数 ϵ 为 3.3. 在此基础上,根据光子晶体的晶格参数,采用平面波法模拟了光子晶体禁带分布特征:当 $a = 14.00\text{mm}$ 时,禁带宽度最宽达到 1.4GHz,分布在 13.7~12.3GHz 范围内,位于微波波段.此时, R, L 分别为:1.78mm 和 6.07mm. 由此可见,这种毫米结构的光子晶体的制备难度较大.由前述可知,SLA 适合制备三维复杂毫米、亚毫米结构,因此该技术可能是制备三维微波光子晶体的一种比较理想的方法.

根据上述光子晶体晶胞数据,采用 Auto CAD 设计出该光子晶体实体模型,如图 3 所示.在 x, y, z 三个方向的尺寸分别为 $70.00\text{mm} \times 28.00\text{mm} \times 10.00\text{mm}$. 将设计好的实体模型传送到立体光刻成型机的数据处理系统中,选择适当的参数,利用分层软件将模型分层,得到每一薄片层的平面信息及其生成相关的扫描路径,用于控制激光束的扫描轨迹,最终即可制备出光子晶体.

图 4 是利用立体光刻技术所制备的三维金刚石结构的光子晶体照片,它的尺寸是 $70.20\text{mm} \times 28.10\text{mm} \times 9.95\text{mm}$,与理论尺寸基本吻合,但出现了微小变形,整体误差在 0.2% 左右.

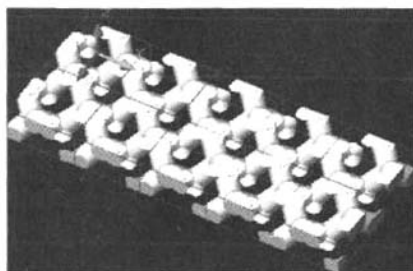


图 3 三维金刚石结构的光子晶体的实体模型

Fig.3 Model of photonic crystal with diamond structure

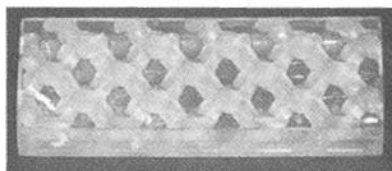


图 4 立体光刻技术制备的三维金刚石结构的光子晶体

Fig.4 Three-dimensional photonic crystal prepared by SLA

3 测试结果及分析

利用惠普网络分析仪对所制备的光子晶体样品在微波波段的透射谱进行了测试.测试时入射电磁波信号的频率范围为 10~20GHz,电磁波入射方向为光子晶体的 $\langle 100 \rangle$ 方向.测试结果如图 5 所示,当衰减在 -10dB 以上时,频率落在这一范围的电磁波在光子晶体中无法传播,这一频率范围即为光子禁带,从图中可知从 12.3~13.4GHz 频率范围内出现了明显的光子禁带,这与理论值 12.3~13.7GHz 一致.且当频率等于 12.7GHz 时,衰减程度最大,对应的衰减率值为 -26dB.

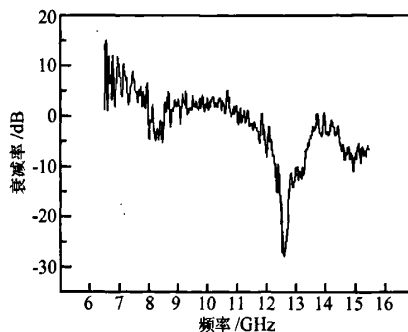


图 5 光子晶体的 $\langle 100 \rangle$ 透射谱

Fig.5 Attenuation of transmission amplitude of microwave as a function of frequency in $\langle 100 \rangle$ direction

4 结论

(1) 采用立体光刻技术, 成功制备了晶格常数 $a = 14.00\text{mm}$ 、理论禁带分布在 $12.3 \sim 13.7\text{GHz}$ 的三维金刚石结构微波光子晶体。

(2) 测试表明, 所制备的三维金刚石结构光子晶体禁带分布在 $12.3 \sim 13.4\text{GHz}$ 范围内。频率等于 12.7GHz 时, 衰减程度最大, 对应的衰减率值为 -26dB , 可以看出理论与实际基本吻合。

(3) 立体光刻技术可以用于一些比较复杂的微波波段三维光子晶体的制备研究。

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physical and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(18): 2059
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(8): 2486
- [3] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric crystals by multibeam laser interference into a photopolymerizable resin. *Phys Rev Lett*, 1990, 65(25): 3152
- [4] Wang Xiufeng, Luo Hongjie. Rapid prototyping manufacturing technology. Beijing: China Light Industry Press, 2001: 30 (in Chinese) [王秀峰, 罗宏杰. 快速成型制造技术. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 30]
- [5] Jiang Kaiyong, Liu Bin, Li Hongyou. Status quo and trend of the study on fast forming technique. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2006, 27: 1 (in Chinese) [江开水, 刘斌, 李红友. 快速成形技术的研究现状及发展趋势. 华侨大学学报, 2006, 27: 1]
- [6] Hong Xiaoyin, Meng Huaidong, Yin Jinxiang. Stereo lithography apparatus technique. *Photographic Science and Photochemistry*, 1997, 15: 276 (in Chinese) [洪啸吟, 孟怀东, 阴金香. 立体光刻技术. 感光科学与光化学, 1997, 15: 276]

Fabrication of Three-Dimensional Photonic Crystals with Diamond Structure by SLA Technique*

Wen Jing¹, Yin Haiqing², Zhang Ruijuan¹, Cao Wenbin^{1,†}

(1 Department of Inorganic Nonmetallic Materials, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 China)

(2 Institute of Powder Metallurgy, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 China)

Abstract: It is difficult to fabricate three-dimensional (3D) photonic crystals. In this paper, the 3D photonic structure with diamond structure was fabricated by stereo lithography apparatus (SLA) as this technique can fabricate 3D structures no matter how complicated they are. The lattice constant of the structure was optimized as 14.00mm . The theoretic photonic band-gap was ranged between 12.3GHz and 13.7GHz . Computer model of the crystal was designed. The photonic crystal was prepared by SLA. The transmission of microwave from 10 to 20GHz was measured in $\langle 100 \rangle$ direction. A band gap is formed at the range of 12.3GHz to 13.4GHz . The magnitude of the maximum attenuation is as large as -26dB at 12.7GHz , which indicates that the fabricated structure works well as a photonic crystal.

Key word: SLA; photonic crystal; photonic band-gap; CAD

PACC: 4270E; 4270Q

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0357-03

* Project is supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2004CB719802), the Beijing Scientific Novel Star Project (No. 2003B12), and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20050008002)

† Corresponding author. Email: wbciao@mater.ustb.edu.cn

Received 11 December 2006, revised manuscript received 19 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics