

四光束干涉单次曝光构造含平面缺陷 三维周期性微纳结构

陈小军^{1)2)†} 张自丽²⁾ 葛辉良²⁾

1) (香港科技大学物理系, 香港)

2) (杭州应用声学研究所, 杭州 310012)

(2012年2月29日收到; 2012年6月7日收到修改稿)

本文使用多光束干涉方法构造三维周期性微纳结构. 通过多次匀胶与单次曝光结合, 在负光刻胶 SU8 上刻蚀出含平面缺陷的类金刚石结构 (fcc-like) 光子晶体. 扫描电子显微镜 (SEM) 观测显示, 相比无缺陷光子晶体结构, 该结构在 (111) 晶面上存在清晰可见的平面缺陷. 通过控制匀胶时的转速, 可以精确控制平面缺陷厚度在适合的范围. 傅里叶红外反射光谱测试显示完整周期微纳结构在 (111) 方向上有明显的特征峰, 两个特征反射峰中心波长接近 $1.2\ \mu\text{m}$ 和 $2.4\ \mu\text{m}$. 含缺陷的结构则在反射光谱特征峰中掺入了明显的凹陷, 并且随着平面缺陷的厚度增大, 缺陷模从处于 $2.4\ \mu\text{m}$ 禁带移至 $1.2\ \mu\text{m}$ 禁带处. 提取 SEM 图中的结构参数, 用 FDTD 方法模拟分析, 发现模拟结果与实验值基本一致, 证明了平面缺陷不但存在, 而且面积较大.

关键词: 光子晶体, 四光束干涉, 平面缺陷, 红外反射光谱

PACS: 42.70.Df, 61.30.Vx, 42.25.Hz, 61.72.jn

1 引言

光子晶体是一种有不同介电常数介质材料空间周期排列而成的微纳结构, 自从被提出概念至今已经被众多学者深入研究^[1], 其广泛的应用领域已被深刻和务实的评估与实验室研究^[2-5]. 同时关于其灵活、可靠的制备方法的探索也取得了众多进展^[6-9], 特别是多光束干涉刻蚀方法, 为光子晶体的制作提供了一条简易经济的途径^[10]. 然而, 对于可控地在光子晶体结构中植入缺陷, 一直是一个棘手的问题. 最常用的方法是使用晶片融结技术搭建, 双光子直写等方法^[11,12], 在光子晶体周期结构的制作过程中直接引入缺陷; 相对简易的方法为先制备完整光子晶体结构, 再以电子束刻蚀或者激光直写等方法构造缺陷^[13,14]. 这些方法, 都需要在微纳尺度上做多次操作, 对仪器的精度要求极高, 同时也不利于大面积的缺陷的制作. 另外, 基于空间光

调制器 (spatial light modulator) 的计算机产生全息技术 (computer generate holography technique) 构造含缺陷光子晶体结构虽已有研究, 但其不足也很明显: 设计算法复杂, 缺陷含周期性, 结构的小晶格尺寸与构造大面积是一对难于调和的矛盾^[15]. 此外, 还有不同微纳尺寸的单分散性小球多次沉积形成面缺陷, 但该方法制备的周期性结构单一^[16].

2 实验

鉴于目前多种构造方法的不足, 我们提出了多次匀胶制膜单次曝光相结合的方法. 该方法, 只需对传统的四光束干涉刻蚀的方法作些许改进, 采用多次匀胶, 单次的干涉光束刻蚀, 而使用的光路装置与传统多光束干涉光路一样, 都采用了三棱台折射光干涉, 如图 1(a), (b) 所示. 这种方法用机械精度上的控制代替了光学精度上的操作, 因此极大地简

† E-mail: xjchen_acoustics@163.com

化了缺陷引入的实验操作难度与复杂度. 通过控制缺陷层 SU8 胶的浓度以及匀胶速度, 可以将其厚度在数十纳米到几十微米之间作调节. 另外, 该方法容易得到较大面积的含平面缺陷光子晶体结构, 并且只需改变干涉光束的对称性, 就可以得到不同周期性和对称性的微纳结构.

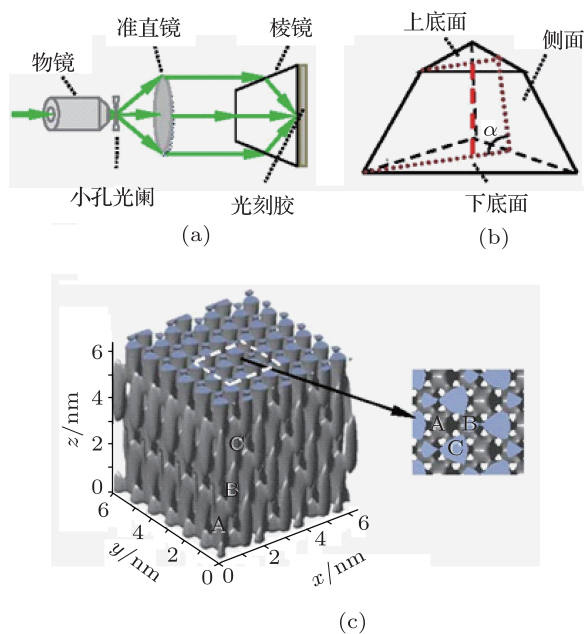


图 1 多光束干涉实验的示意图 (a) 多光束干涉刻蚀的实验装置; (b) 实验装置的三棱台, 其倾角 α 为 50.9° ; (c) 计算机模拟四光束干涉构造得到的结构图 (左侧为立体结构图, 右侧为俯视图, A, B, C 分别表示独立的相邻三层基元)

实验中选用了负性光刻胶 SU8, 作为多光束刻蚀的原材料, 其固化交联后的结构具有优良的光学 (折射率 1.58 左右) 和力学性能^[17]. 样品制备之前, 在清洁的载玻片基底上制作 SU8 基底膜, 基底膜用于附着光子晶体结构之用^[18], 厚度一般小于 $1 \mu\text{m}$. 基底膜的制作, 经历匀胶, 前烘, 均匀光束过曝, 后烘, 显影, 清洗 6 个步骤, 最后制成一层坚固、平整的底膜, 该层膜能牢固的固定在载玻片基底上. 样品制备过程如图 2: 1) 在基底上以 9 s (转速 600 r/min) 和 30 s (转速 1000 r/min) 匀上含光引发剂 261 的 SU8 厚胶 (SU8 于溶液中浓度为 48%), 光引发剂相对于纯 SU8 的浓度为 2%, 然后烘干 SU8 胶, 使其基本固化. 2) 以不同转速 (3000 r/min, 4000 r/min, 5000 r/min) 匀上光引发剂浓度为 6% 甚至可以更高的 SU8 胶 (调节匀胶速度以对应设计的缺陷层厚度), 缺陷层 SU8 胶浓度为 28%, 烘干 SU8 胶. 这一层作为缺陷层, 需要比较精确地控制匀胶时的转速, 从而精确控制缺陷层

的厚度. 用相同材料产生缺陷层, 可以避免由于折射率差太大而在界面处引起强反射. 3) 重复步骤 1) 的操作. 4) 干涉光束对光刻胶样品曝光, 后烘, 显影, 清洗. 以上制样过程中, 匀胶后的样品都立即在温度为 90°C 的烘箱中烘干. 由于构造的结构层和缺陷层, 使用了相同的光刻胶和溶剂, 故快速的烘干可以减少各层之间相互渗透的深度. 通过以上制备过程, 胶层厚度可以达到十几到几十微米, 这样的好处是, 制备的光子晶体样品在厚度方向上能得到足够多的周期结构, 从而易于在光谱上观测到禁带特征反射峰.

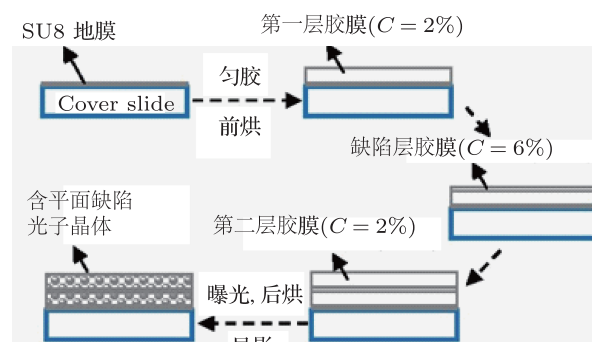


图 2 多光束干涉刻蚀制备含平面缺陷周期性微纳结构实验流程

多光束干涉曝光装置如图 1(a) 所示. 其中关键器件为图 1(b) 所示具有分光和聚光作用的三棱台. 棱台侧面于底面夹角 $\alpha = 50.9^\circ$, 折射率为 1.52. 中心波长为 532 nm 的激光作为光刻用光源. 从激光器中出射的激光光斑直径小于 1 mm , 搭建 $10\times$ 低倍物镜和大孔径的凸透镜 ($f = 13 \text{ cm}$) 组成的显微系统进行扩束, 并将 $50 \mu\text{m}$ 孔径的光阑置于物镜后焦点上作空间滤波. 激光光束经过该系统扩束为光强相对均匀的宽光束. 整体上, 光束中心到边沿的光强以高斯函数缓慢衰减, 但在小区域 (几毫米) 内的两点间, 光强几乎相同. 将宽光束分成 4 束子光束, 中心光束与棱台顶面和底面垂直入射, 其余三束对称地围绕主光束 (底面投影相互夹角为 120°), 并且与中心光束平行地入射到棱台的侧面. 经棱台侧面界面折射, 三光束与中心光束在棱台的底面附近形成光波长量级干涉图样, 景深可达几毫米. 图 1(c) 为依照棱镜参数用计算机模拟四光束干涉得到的周期性结构, 可以发现, 得到的结构将是基元为椭圆形的类金刚石 (fcc-like) 的排列结构.

用于干涉的四子光束光斑尺寸均为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, 光强分别为 5.7 mW (对应中心光束)

和 4.1 mW (对应其余三光束), 将完成整个实验流程 (1)—(3) 操作的载玻片紧贴于三棱台底面, 以折射率为 1.48 的硅油作为匹配液, 用于除去棱镜与光刻胶样品之间的空气缝隙引起的多次反射和次生干涉. 曝光、后烘和显影之后, 曝光量达到阈值区域的 SU8 胶将完全胶连, 其余部分被显影液洗去. 由于中间缺陷层的光引发剂浓度高出两边结构层的引发剂浓度 3 倍多, 因而缺陷层光刻胶产生胶连所需的曝光剂量将远远低于结构层. 在我们的实验中, 将曝光刻蚀时间控制在 1 min 30 s—1 min 36 s 之间, 烘箱中 90°C 烘烤 30 min. 在这个曝光剂量的范围内, 结构层将形成不同填充率的周期结构, 而对于缺陷层, 同样光剂量足以导致其 SU8 光刻胶在整个胶层区域内的交联.

如图 3(a) 所示, 中间缺陷层已完全过曝, 同时由图 3(a), (b) 可以看到, 其中的结构层为完整的周期性结构. 由于我们采用了匀胶的方法嵌入缺陷层光刻胶, 因而在理论上, 过曝的缺陷层范围将遍布整块光子晶体结构. 但实验中, 结构层和缺陷层所使用的是完全相同的光刻胶和溶剂, 不同层之间的互溶时刻发生, 同时从匀胶到烘干溶剂, 至少会有 30min 的时间间隔, 因此, 在最后制得的结构中, 并非所有区域均能得到完好的缺陷层结构. 尽管如此, 图 3(a) 中的缺陷层结构已足够明显, 依照标尺, 该缺陷层延伸的范围至少在 40 μm 以上. 对于测试样品的近红外反射谱, 这样面积的区域已经足够大. 同时, 我们注意到, 相比于完整结构光子晶体侧面的剖面扫描电镜 (SEM) 图 (图 3(c)), 含平面缺

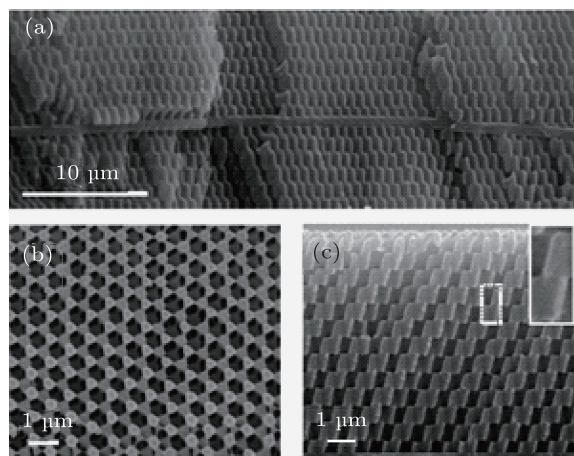


图 3 类金刚石周期微纳结构的扫描电子显微镜图 (a) 含大范围平面缺陷的周期性微纳结构; (b) 类金刚石周期结构 (111) 晶面; (c) 无缺陷结构侧面剖面图 (其中白框中为单个基元的放大图)

陷周期性微纳结构的侧面图总是显得凹凸不平, 原因可能为周期性结构与平面缺陷在不同区域的粘合力不同; 此外, 缺陷层处于两结构层之间, 平面上各处的应力可能不同, 导致在切开时, 断裂的剖面不如完整结构光子晶体的均匀, 如图 3(a), (c). 由于图 3(a), (c) 所示结构, 均为相同的四光束干涉情况下得到, 因而可以从图 3(c) 中提取结构参数, 用于时域有限差分法建模数值模拟, 来进行缺陷结构的性能估计.

我们使用傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 测定完整和含缺陷的周期微纳结构 (111) 反射谱, 其中含缺陷结构制备了三种不同的厚度缺陷, 分别为 500 nm, 750 nm 和 1000 nm. FT-IR 光谱仪使用物镜汇聚入射光同时收集反射光, 以孔径光阑控制入射光束的光斑尺寸从而实现足够小区域的测试, 实验测试面积大概在 60 μm × 60 μm (实际测试可以取得更小区域, 但需考虑到孔径限制导致的衍射效应与探测微小区域的平衡). 图 4(d), (f), (h) 给出了含平面缺陷周期性微纳结构的 FT-IR 反射光谱图, 这些在用多光束干涉法研究中还是首次报道. 对无缺陷的周期性结构, 实验测得, 红外反射光谱显示在 2.4 μm 和 1.2 μm 附近存在两个特征峰 (图 4(b) 实线). 而由图 4(d), (f), (h) 实线描述的含缺陷结构反射谱分别在 2.4 μm 出的特征反射峰处和 1.2 μm 处特征峰处发生了明显凹陷, 我们认为这是由平面缺陷引起. 比较图 4(b), (d) 可以发现相对于完整结构光子晶体, 含缺陷结构的两个特征峰不同程度的发生了漂移. 这些特性可能由反射谱凹陷的挤压和两个样品不同的填充率引起. 此外, 由图 4(d), (f), (h) 显示, 随着平面缺陷厚度的增加, 凹陷缺陷模将从长波长特征反射峰中移动到短波长特征反射峰处. 对图 4(f), (h) 比较, 由缺陷模导致的劈裂的两个子反射峰的相对强度也随着缺陷层厚度的变化而变化.

3 仿真模拟

提取图 3、图 4 的 SEM 图周期性结构的结构参数 (包括基元的形状、尺寸、晶格周期) 和平面缺陷层的厚度等, 如表 1 所示. 根据测得的参数, 我们用时域有限差分法 (FDTD) 对这种结构的反射光谱进行数值模拟 (模拟软件为东竣科技的 EastFDTD), 得到的反射谱曲线如图 4(b), (d), (f), (h) 中的虚线, 模拟结构采用了周期性边界条

件,用于模拟无限大的平面缺陷结构.模拟结果与实验结果在特征峰数量、长波长特征峰位置和缺陷引起凹陷的描述上吻合得很好,说明在实验上,确实得到了较大面积的含平面缺陷的光子晶体周期结构.但对短波长特征反射峰,数值模拟结果相对于实验数据存在 $0.1\ \mu\text{m}$ 左右的蓝移,这可能是由

于数值模拟时设定结构无限延伸(周期边界),而实验测试区域为有限尺寸;另外,数值模拟中得到的反射峰为严格的(111)晶向,由于实验中小区域测试导致的衍射作用,其结果将会存在多个晶向上反射的贡献.此外,实际周期结构填充率并不是空间完全均匀也可能对这种峰值偏移有影响.

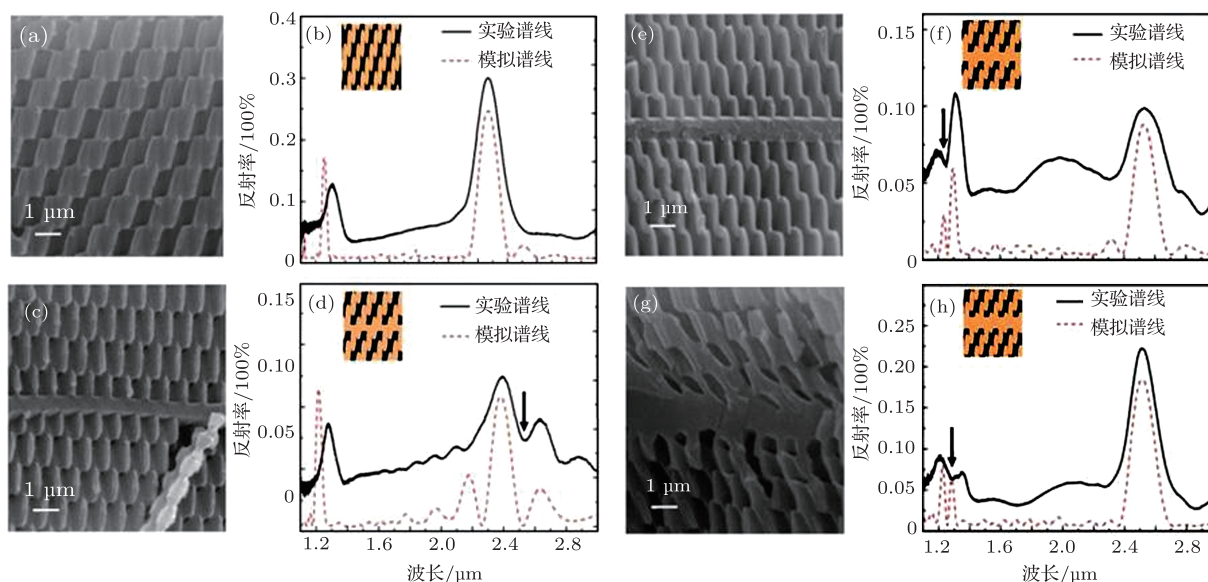


图4 类金刚石周期性微纳结构的 SEM 图及其对应的(111)方向傅里叶红外(FT-IR)反射光谱 (a), (c), (e), (g) 分别为无缺陷和含不同厚度缺陷层的周期性微纳结构侧面剖面图,对应的缺陷层厚度分别为 $500\ \text{nm}$, $750\ \text{nm}$, $1000\ \text{nm}$; (b), (d), (f), (h) 分别对应 (a), (c), (e), (g) 无缺陷结构和含不同厚度缺陷层的周期性微纳结构傅里叶红外反射谱. 箭头指的位置为缺陷模. 其中实线为实验测试得到的谱线,虚线为数值模拟得到的反射谱;左上角子图为 FDTD 数值模拟构造的结构侧面剖面图

表1 SEM 测得平面缺陷周期性微纳结构的结构参数

结构	周期类型	基元形状	基元长轴	基元短轴	同层相邻基元间距	相邻层间距	层数	缺陷层厚度	
参数	类 FCC	椭球体	$1.83\ \mu\text{m}$	$0.51\ \mu\text{m}$	$0.78\ \mu\text{m}$	$0.85\ \mu\text{m}$	> 13	$0.5\ \mu\text{m}$	$0.75\ \mu\text{m}$ $1\ \mu\text{m}$

4 结论

文章提出了一种多次匀胶和单次多光束干涉刻蚀方法来构造平面缺陷光子晶体结构,并在实验上实现了这种微纳结构. SEM 对结构的观测和 FT-IR 对光谱特性的测试,证明了平面缺陷结构确实存在,缺陷层延伸范围至少达数十微米;通过控制不同的匀胶速度,实验调节缺陷层的厚度在几

百纳米范围变化;根据实际结构参数构造该结构模型, FDTD 方法计算发现理论与实验符合得很好,也证明了缺陷层结构的大面积和均匀性.这种改进的多光束干涉全息法为构造各种对称结构的光子晶体异质结提供了一种简易、廉价的方法.

感谢香港科技大学物理系黄锦胜教授对该项研究的资助与指导.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] Chen X J, Xu Y, Sheng L, Qi G, Yang X, Wu L J 2008 *Appl. Opt.* **26** 4701
- [3] Wu L J, Malizu M, Gallet J F, Krauss T F 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 211106
- [4] Xu Y, Chen X J, Lan S, Guo Q, Hu W 2008 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10** 085201
- [5] Chen X J, Wu L J, Hu W, Lan S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1028 (in Chinese) [陈小军, 吴立军, 胡巍, 兰胜 2009 物理学报 **58** 1028]
- [6] Hao Q 2004 *Nature* **429** 540
- [7] Blanco A 2000 *Nature* **405** 427
- [8] Kawashima T, Miura K, Sato T, Kawakami S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2613
- [9] Deubel M 2004 *Nature Mater.* **3** 444
- [10] Campbell M 2000 *Nature* **404** 53
- [11] Noda S, Tomoda K, Yamamoto N, Chutinan A 2000 *Science* **289** 604
- [12] Deubel M, Wegener M, Linden S, Freymann G, John S 2006 *Opt. Lett.* **31** 805
- [13] Jun Y H, Leatherdale C A, Noriss D J 2005 *Adv. Mater.* **17** 1908
- [14] Scrimgeour J, Sharp D N, Blanford C F, Roche O M, Denning R G, Turberfield A J 2006 *Adv. Mater.* **12** 1557
- [15] Zhang P Q, Xie X S, Guan Y F, Zhou J Y, Wong K S, Yan L 2010 *Appl. Phys. B* **104** 113
- [16] Tetreault N, Mihi A, Miguez H, Rodriguez I, Ozin G A, Meseguer F, Kitaev V 2004 *Adv. Mater.* **16** 346
- [17] Delcampo A, Greiner C 2007 *J. Micromech. Microeng.* **17** R81
- [18] Wu L J, Zhong Y C, Chan C T, Wong K S, Wang G P 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241102

Fabricating three-dimensional periodic micro-structure with planar defects via a single exposure

Chen Xiao-Jun^{1)2)†} Zhang Zi-Li²⁾ Ge Hui-Liang²⁾

1) (*Department of Physics, HongKong University of Science and Technology, HongKong, China*)

2) (*Hangzhou Institute of Applied Acoustics, Hangzhou 310012, China*)

(Received 29 February 2012; revised manuscript received 7 June 2012)

Abstract

In this paper, we introduce a method to incorporate a planar defect into the fcc-like photonic crystal structure by utilizing a negative photoresistor SU8. This method in which multi-coating and a single exposure are used simplifies the experiment much more than other methods. In the paper, we exhibit the SEM images for the intact and defective structures. Corresponding to each structure, the reflection spectrum in (1 1 1) direction fabricated shows obviously characteristic peaks and pits. For the intact structure, the spectrum contains two peaks whose wavelengths approach to 1.2 μm and 2.2 μm . These two peaks corresponds to two optical forbidden gaps. For the structure with planar defect, a pit which splits the optical forbidden gap is considered to be a defect mode exhibited on spectral curve. The structure parameters are extracted from the SEM image and used to simulate the reflectance spectra via FDTD program. The simulation results almost match the experiment data accurately.

Keywords: photonic crystal, multi-beam interference, infrared spectrum

PACS: 42.70.Df, 61.30.Vx, 42.25.Hz, 61.72.jn

† E-mail: xjchen_acoustics@163.com