

蛋白石型光子晶体红外隐身材料的制备

张连超 邱丽莉 芦薇 于颖杰 孟子晖 王树山 薛敏 刘文芳

Preparation of opal photonic crystal infrared stealth materials

Zhang Lian-Chao Qiu Li-Li Lu Wei Yu Ying-Jie Meng Zi-Hui Wang Shu-Shan Xue Min Liu Wen-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 084208 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.084208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种编码式宽带多功能反射屏

[A wideband coding reflective metasurface with multiple functionalities](#)

物理学报.2017, 66(6): 064203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064203>

硅基光子晶体异质结的单向传输特性

[Study on unidirectional transmission in silicon photonic crystal heterojunctions](#)

物理学报.2017, 66(5): 054209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054209>

基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体 THz 波调制器

[Parallel magneticcontrolled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal](#)

物理学报.2017, 66(5): 054210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054210>

宽绝对禁带的一维磁性光子晶体结构

[One-dimensional magnetic photonic crystal structures with wide absolute bandgaps](#)

物理学报.2017, 66(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014204>

新型 Fibonacci 准周期结构一维等离子体光子晶体的全方位带隙特性研究

[Omnidirectional photonic bandgap of the one-dimensional plasma photonic crystal based on a novel Fibonacci quasiperiodic structure](#)

物理学报.2016, 65(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244204>

蛋白石型光子晶体红外隐身材料的制备*

张连超¹⁾ 邱丽莉^{1)†} 芦荟¹⁾ 于颖杰¹⁾ 孟子晖¹⁾ 王树山²⁾
薛敏¹⁾ 刘文芳¹⁾

1)(北京理工大学化学与化工学院, 北京 100081)

2)(北京理工大学机电学院, 北京 100081)

(2016年8月31日收到; 2017年1月21日收到修改稿)

基于光子晶体的红外隐身材料, 主要采取一维层层堆叠结构和三维木堆结构等来实现对红外波段电磁波辐射性能的调控. 本文报道了一种操作简易、成本低廉的光子晶体红外隐身材料制备方法. 通过优化的垂直沉积法, 微米级 SiO₂ 胶体微球自组装成高质量的蛋白石型光子晶体结构. 对 SiO₂ 胶体微球进行优选, 成功制备了禁带位于 2.8—3.5 μm, 8.0—10.0 μm 的 SiO₂ 胶体晶体蛋白石型光子晶体材料. 该材料可改变目标相应波段的红外辐射特征, 具有目标红外波段的隐身效果.

关键词: 光子禁带, 胶体阵列, 垂直沉积法, 红外隐身

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.66.084208

1 引言

随着先进红外探测器和光电侦察探测技术的快速发展, 光学隐身尤其是红外波段光学隐身显得尤为重要, 红外隐身技术已成为一种极其重要且有效的防护手段^[1-3], 在复杂的电磁探测领域扮演着无可替代的关键角色. 针对热红外探测器 (3—5 μm, 8—14 μm) 和红外热像仪等探测手段, 红外隐身技术要求尽可能降低隐身目标的光谱反射特性与周围环境的光谱反射特性的差异或者降低相应波段红外辐射的强度^[4], 从而对探测器俘获光谱造成干扰或使探测器难以捕捉到其工作波段的红外信号, 进而实现一定程度上的隐身效果.

红外隐身涂料是红外隐身技术的主要手段. 红外隐身涂料由填充材料和成膜材料组成, 填充材料主要决定了涂层的红外发射率, 通常为 Al, Ag, Fe 等金属颗粒或 ITO, ATO, ZnO 等掺杂氧化物半导体^[5,6]; 成膜材料主要决定了材料的力学性能, 一般为红外透明的树脂等高分子聚合物. 近些年来,

红外隐身涂料的研究主要集中在用掺杂氧化物、介孔碳、碳纳米管、纤维等新材料来降低红外发射率^[7,8], Bi₂O₃, VO₂ 等相变材料^[9-11] 在涂料中的使用也为红外隐身涂料的发展提供了新的思路.

红外隐身涂料中多采用金属填料作为填充材料, 而金属本身的高反射性, 在降低红外发射率和太阳吸收率的同时, 也增加了对雷达波和可见光的反射, 不利于雷达/可见光和红外光的兼容隐身. 另一方面, 由于涂层阻挡目标波段红外辐射能量的同时, 也阻挡了目标波段外的辐射能量的透过, 从而造成散热差、光谱不可控等问题.

为解决这一系列问题, 光子晶体红外隐身材料应运而生. 光子晶体是一种结构型的功能材料, 具有特殊的光学禁带, 使其在化学传感器^[12-15]、滤波器^[16-20]、光纤^[21-23]、太阳能光电转换等^[24] 领域有着巨大的应用价值. 相比电介质或金属材料, 光子晶体能够在一定的频率范围内禁止电磁波的传播, 利用光子禁带位于红外波段的光子晶体, 可以实现红外隐身性能^[25,26]: 抑制目标相应波段的

* 国家自然科学基金 (批准号: 21375009, U153010105) 和北京理工大学科技创新计划基础研究基金 (批准号: 20151042004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qilili@bit.edu.cn

红外辐射, 从而改变目标的红外辐射特征, 对探测器的俘获光谱造成干扰.

目前, 光子晶体红外隐身材料应用最广泛的为折射率不同的电介质层层堆叠的一维光子晶体材料和三维木堆结构的光子晶体材料. 以LiF/Si, Ge/ZnS, Si/KCl, PbTe/Na₃AF₆等高低折射率材料组成的一维光子晶体结构能够实现3—5 μm, 8—14 μm极宽的光子禁带^[27-31], 通过构造异质结构, 还能实现多波段的兼容^[27,32]. 以半导体硅为代表的三维木堆结构, 在红外波段能够有效减少禁带内目标的红外辐射, 并加强禁带外的红外辐射^[33]; 而以钨为代表的全金属三维木堆结构, 禁带更宽, 而且能够选择性控制辐射^[34].

这两种光子晶体红外隐身材料的问题在于制作工艺复杂, 成本昂贵, 不利于大规模地推广应用; 而以胶体晶体组装的蛋白石结构光子晶体则规避了这一系列问题. 由于光子晶体红外隐身结构需满足高质量、大面积、热稳定的特点, 本文选取机械强度高、化学稳定性强、高温稳定性好的SiO₂胶体微球来制备光子禁带位于红外波段的光子晶体材料. 为了使光子禁带位于红外探测器工作波段(3—5 μm, 8—14 μm), 本文制备并优选了合适粒径的SiO₂微球, 并对垂直沉积法进行优化, 成功实现了微米级SiO₂微球的高质量自组装, 从而得到了光子禁带位于红外波段的蛋白石型光子晶体红外隐身材料.

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

正硅酸乙酯 (TEOS, 纯度 98%)、过氧化氢 (质量分数 30 wt.%)、氨水 (质量分数 25 wt.%)、乙醇

(纯度 99.7%)、浓硫酸 (纯度 > 95%)、氢氟酸 (质量分数 40 wt.%)、二溴甲烷 (纯度 98%), 以上试剂均为分析纯.

采用 QUANTA FEG 250 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品的形貌 (美国 FEI 公司); 采用光纤光谱仪 Avaspec-2048 TEC 对可见光波段的光子晶体进行表征 (Avantes 公司); 采用 Varian 2000-IR 表征样品的红外性能 (中国 Varian 公司).

2.2 实验过程

将一定比例的 A 溶液 (TEOS/乙醇) 和 B 溶液 (NH₃/H₂O) 在平稳的搅拌下, 以一定的速度滴加到 250 mL 空圆底烧瓶内, 加料完成后, 继续反应 24 h 以上. 通过水和乙醇反复洗涤多次, 得到微米级 SiO₂ 微球.

将处理过的亲水玻片或硅片垂直悬挂在平稳的玻璃缸中. 将 1.5 μm 单分散 SiO₂ 微球, 分散在乙醇中, 控制 SiO₂ 微球的浓度为 1 mg/mL, 在 60 °C、相对湿度 50% 下通过垂直沉积法组装 12 h, 得到 SiO₂ 光子晶体膜. 将 4.3 μm 单分散 SiO₂ 微球, 分散在二溴甲烷-乙醇混合溶液中, 二溴甲烷与乙醇的体积比为 3 : 1, 控制 SiO₂ 微球的浓度为 1 mg/mL, 在 60 °C、相对湿度 50% 下通过垂直沉积法组装 12 h, 得到 SiO₂ 光子晶体膜.

3 结果与讨论

3.1 系列微球的合成

3.1.1 纳米级微球的制备

通过采取改进的 Stöber 法进行纳米级 SiO₂ 微球的制备, 通过调节试剂之间的比例 (表 1), 来合成一系列单分散的 SiO₂ 微球 (图 1 (a)、图 1 (b)).

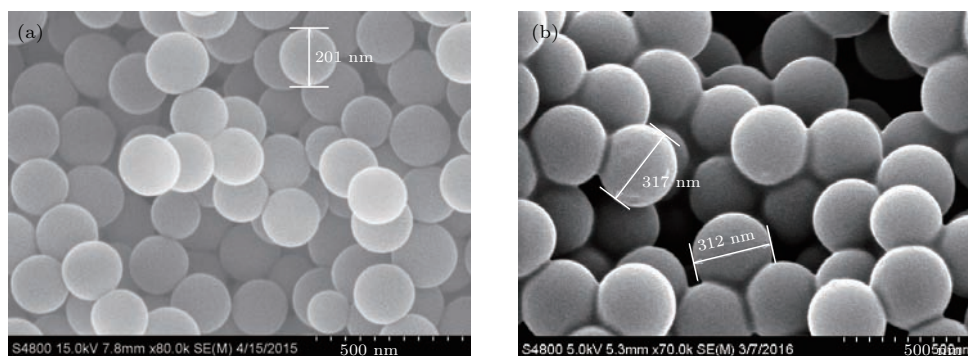


图 1 Stöber 法制备的 SiO₂ 微球的 SEM 图 (a) 粒径为 200 nm; (b) 粒径为 312 nm

Fig. 1. SEM images of SiO₂ spheres prepared with modified Stöber method: (a) $D = 200$ nm; (b) $D = 312$ nm.

表1 SiO₂ 微球制备配方及相应粒径
Table 1. The final diameters of different preparation formula.

序号	A(硅源)	B(氨溶液)	加料方式	粒径 D
1	TEOS/乙醇 4 mL/92 mL	氨水/乙醇/水 13.2 mL/32 mL/48 mL	A 迅速加入 B 中	200 nm
2	TEOS/乙醇 4.5 mL/46 mL	氨水/乙醇/水 10 mL/16 mL/24 mL	A 迅速加入 B 中	312 nm
3	TEOS/乙醇 13.5 mL/136.5 mL	氨水/乙醇/水 30.24 mL/71.25 mL/48.25 mL	A 迅速加入 B 中	400 nm

3.1.2 微米级微球的制备

制备单分散微米级 SiO₂ 微球的传统做法是采取种子法, 但该方法影响因素较多, 不易操作和控制, 本文采取控制前驱体滴加速度的方法(表2), 通过控制滴加速度和初始浓度得到单分散的 SiO₂ 微球(图2(a)、图2(b)).

将 A, B 两种溶液分别以 0.19 和 0.27 mL/min 的速率加入到 250 mL 空圆底烧瓶内, 历时 3 h, 之后继续反应 24 h, 得到均一的 1.0 μm SiO₂ 微球(图2(a)). 将 A, B 两种溶液分别以 0.24 和 0.51 mL/min 的速率加入到 250 mL 空圆底烧瓶内, 历时 3 h, 之后继续反应 24 h, 得到均一的 1.5 μm SiO₂ 微球(图2(b)).

表2 控制滴速法的制备配方及相应粒径
Table 2. The final diameters of different formula with controlled feeding rate.

序号	A(硅源)	B(氨溶液)	加料方式	粒径
1	TEOS/乙醇 81 wt. %	NH ₃ /水 12.8 wt. %	一定速度滴加 A, B	1.0 μm
2	TEOS/乙醇 81 wt. %	NH ₃ /水 12.8 wt. %	一定速度滴加 A, B	1.5 μm

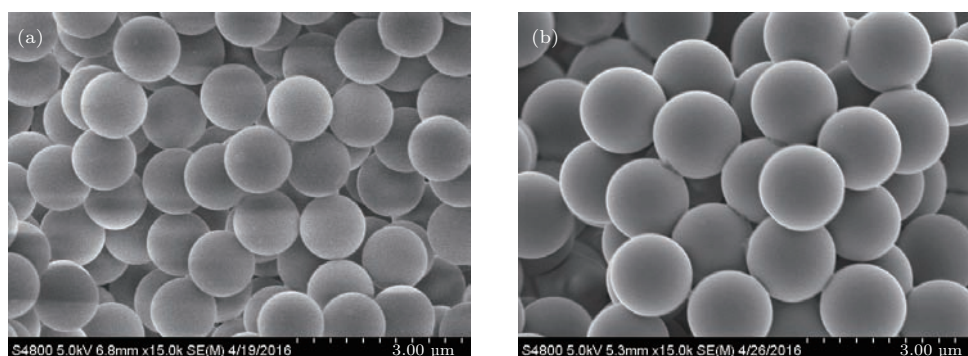


图2 以控制滴速法制备的 SiO₂ 微球的 SEM 图 (a) 粒径为 1.0 μm ; (b) 粒径为 1.5 μm
Fig. 2. SEM images of SiO₂ spheres prepared with controlled feeding rate: (a) $D = 1.0 \mu\text{m}$; (b) $D = 1.5 \mu\text{m}$.

在该制备过程中, 随着 A, B 溶液的恒定速率滴入, 混合溶液中 TEOS、乙醇、NH₃、水的初始组成分别为 32.4 wt.%, 7.4 wt.%, 7.7 wt.%, 52.6 wt.%, 这一比例使混合溶液呈现两相, 随着水解反应的进行, 由于 TEOS 水解产生乙醇以及新颗粒的生成, 两相混合液变成单相. 形成的微球在单相液中通过继续加入前驱液生长到目标尺寸, 而不会产生新的固体颗粒, 因此得到了粒径均一的微米级 SiO₂ 微球.

对于更大粒径微球的制备, 则需要将控制滴加速度的方法与种子法结合起来, 以 1.5 μm SiO₂ 微

球为种子溶液, 以一定的速度加入 A, B 溶液, 从而在微球的基础上进一步长大生成更大粒径的微球.

3.2 红外探测器工作波段光子晶体所需目标微球粒径的确定

光子晶体重要光学性质是具有光学禁带, 当一种光子晶体的折射率变化周期与某一光波长处于同一量级时, 它禁止该波段的光在其内部传播, 即出现了光子禁带现象, 其理论数值可通过布拉格衍射方程求解得到.

对于完全密堆积 SiO₂ 蛋白石型光子晶体结构, 禁带中心波长 λ 满足布拉格反射关系式:

$$\lambda = 2d(n_{\text{eff}}^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

λ 为禁带中心波长, d 为面心立方结构 (111) 面的晶面间距, n_{eff} 为等效折射率, θ 为反射角. 而等效折射率 n_{eff} 满足下式:

$$n_{\text{eff}}^2 = n_{\text{sphere}}^2 f_{\text{sphere}} + n_{\text{air}}^2 (1 - f_{\text{sphere}}), \quad (2)$$

n_{air} 为空气的折射率, 约为 1; n_{sphere} 为胶体微球的折射率, 对于 SiO₂ 光子晶体, $n_{\text{SiO}_2} = 1.43$, 对于密堆积结构, 微球的体积分数 $f_{\text{sphere}} = 74.6\%$.

面心立方 (111) 面的面间距 d_{111} 满足下式:

$$d_{111} = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}} = \sqrt{\frac{2}{3}}D, \quad (3)$$

a 为面心立方结构的晶格常量, D 为微球的直径.

因此, 由 (1) 式—(3) 式求得

$$\lambda = 2.18D \quad (\text{垂直入射}). \quad (4)$$

为了验证 SiO₂ 蛋白石型光子晶体结构中微球粒径 D 与禁带中心波长 λ 的关系, 分别对 200, 312, 400, 600 nm SiO₂ 微球进行了垂直自组装, 从而制备了各粒径对应的三维光子晶体, 通过光纤光谱仪对其进行检测, 得到了各种光子晶体的反射光谱 (图 3), 反射峰位置分别为 450, 700, 900, 1350 nm. 通过计算可知, 实际上粒径 D 与反射峰位置的关系为

$$\lambda = 2.25D \quad (\text{垂直入射}). \quad (5)$$

由于红外探测波段位于 3—5 μm , 8—12 μm , 制备禁带位于这些波段的光子晶体材料可以有效抑制红外探测器可探测波段的辐射, 从而实现一定

的红外隐身性能. 因此, 对于 SiO₂ 蛋白石型光子晶体结构, 根据 (5) 式可求得所需微球的粒径范围为 1.33—2.22 μm , 3.56—5.33 μm .

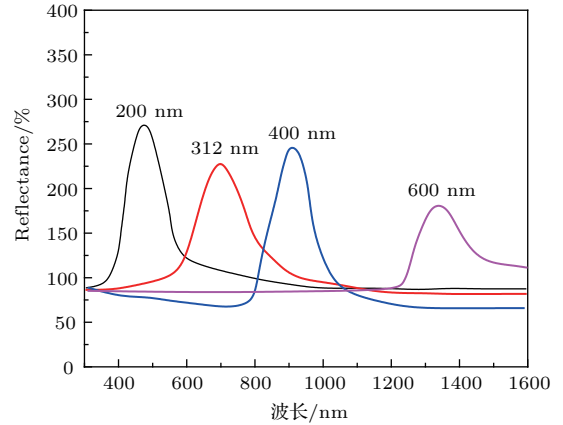


图 3 不同粒径 SiO₂ 微球光子晶体对应的反射光谱
Fig. 3. Reflectance spectra of SiO₂ photonic crystal with different diameters.

3.3 目标波段光子晶体的制备和红外性能表征

根据所求得的微球粒径范围, 本文选取了 1.5 和 4.3 μm 的 SiO₂ 微球作为光子晶体的制备单元. 为了垂直沉积制备出高质量的光子晶体膜, 本文对垂直沉积法进行了改进. 对于 1.5 μm SiO₂ 微球的自组装, 选取低沸点的溶剂乙醇为分散剂, 并采取 60 °C 高温, 使液面蒸发速度与微球沉降速度达到平衡, 从而得到高质量阵列结构 (图 4(a)). 对于 4.3 μm SiO₂ 微球的自组装, 选取高密度的二溴甲烷与乙醇的混合溶剂, 降低微球与分散剂的密度差, 从而降低微球的沉降速度制备出光子晶体膜 (图 4(b)).

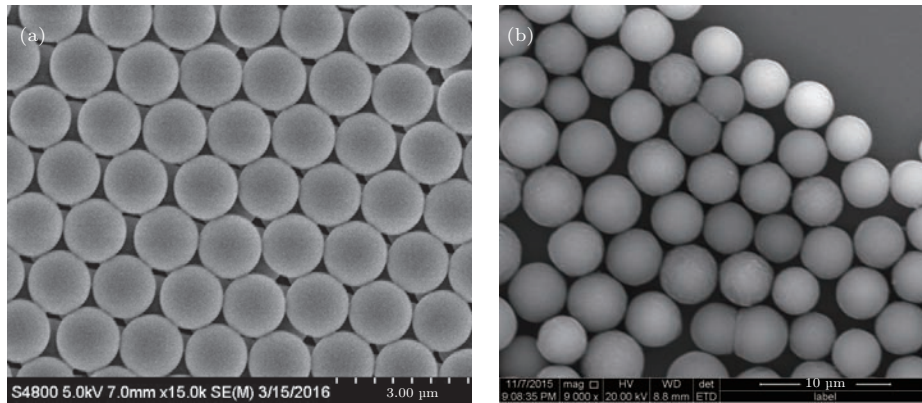


图 4 改进的垂直沉积法制备的 SiO₂ 蛋白石光子晶体的扫描电镜图 (a) 粒径为 1.5 μm ; (b) 粒径为 4.3 μm
Fig. 4. SEM images of SiO₂ photonic crystals prepared by modified vertical deposition method: (a) $D = 1.5 \mu\text{m}$; (b) $D = 4.3 \mu\text{m}$.

根据理论计算,以1.5和4.3 μm 的 SiO_2 微球制备的蛋白石型光子晶体的禁带中心波长分别为3.27和9.37 μm .通过红外透射光谱可以看出,1.5 μm SiO_2 光子晶体得到的实际禁带中心波长为3.2 μm ,与理论计算的3.27 μm 基本符合,而且制备的光子晶体禁带宽度达0.7 μm ,能够一定程度上满足中红外隐身的宽禁带要求(图5).

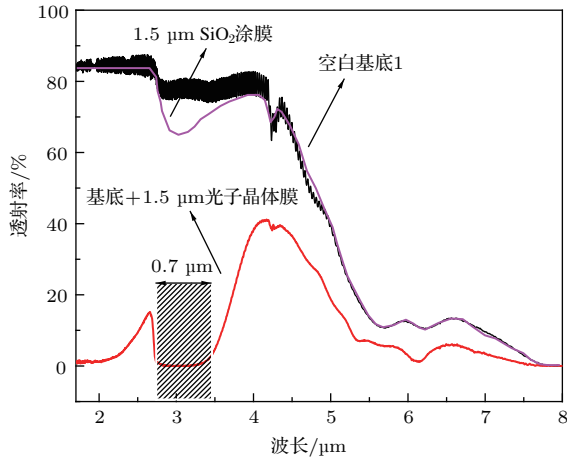


图5 (网刊彩色) 1.5 μm SiO_2 光子晶体垂直入射时的红外谱图

Fig. 5. (color online) Normal incident infrared transmission spectra of 1.5 μm SiO_2 photonic crystal film.

4.3 μm SiO_2 光子晶体得到的实际禁带中心波长为9.0 μm ,与理论计算的9.37 μm 基本符合.之所以有部分出入,是因为光子晶体排列不够紧密,达不到理想中的蛋白石计算模型.制备的光子晶体禁带宽度达1.9 μm ,能够在保证相应红外波段低透过性的同时,满足远红外隐身的宽禁带要求(图6).

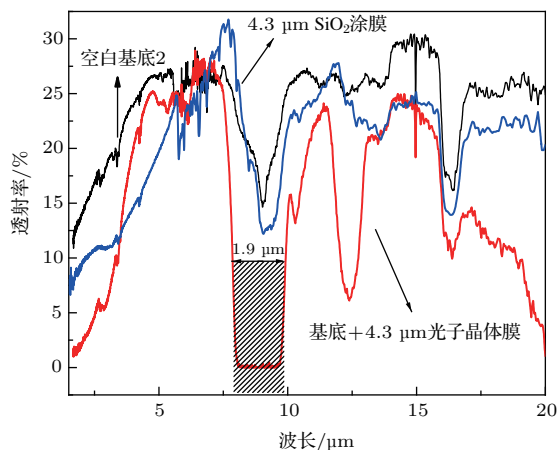


图6 (网刊彩色) 4.3 μm SiO_2 光子晶体垂直入射时的红外谱图

Fig. 6. (color online) Normal incident infrared transmission spectra of 4.3 μm SiO_2 photonic crystal film.

4 结 论

本文通过实验验证了完全密堆积 SiO_2 蛋白石型光子晶体结构中 SiO_2 微球粒径与禁带中心波长的关系,并由此得出了红外探测器工作波段蛋白石型光子晶体所需目标微球的粒径范围,并采用优化垂直沉降自组装法制备了禁带位于红外波段的新型胶体晶体蛋白石型光子晶体红外隐身材料.得到以下结论:

1) 通过一系列完全密堆积 SiO_2 蛋白石型光子晶体结构中纳米微球粒径与对应禁带位置的关系,计算出了红外探测器工作波段蛋白石型光子晶体所需目标微球的粒径范围: 1.33—2.22 μm , 3.56—5.33 μm ;

2) 利用控制滴加速度的改进Stöber法制备了一系列微米级 SiO_2 微球,利用控制滴速法与种子法结合,来制备更大粒径的 SiO_2 微球;

3) 选取1.5和4.3 μm 的 SiO_2 微球作为光子晶体的制备单元,采用提升溶剂挥发速度和使用混合溶剂的改进垂直沉积法,制备了光子禁带中心波长分别为3.2和9.0 μm 的光子晶体材料,其禁带宽度分别为0.7和1.9 μm ,满足红外隐身的宽禁带要求,实现了2.8—3.5 μm , 8.0—10.0 μm 可探测波段的红外辐射特征的调制.

参考文献

- [1] Li R, Lu Y H, Gong C L, Liu Y 2012 *Infrared Phys. Technol.* **55** 380
- [2] Liu F, Shao X P, Han P L, Li X B, Yang C 2014 *Opt. Eng.* **53** 744
- [3] Wang R F, Lu J H 2015 *Proc. SPIE* (Bellingham: SPIE) 9674
- [4] Chen X, Li J S, Tang Y, Hu B 2010 *Adv. Intel. Soft Comput.* **114** 1009
- [5] Zhang S Q, Shi Y L, Huang C G, Lian C C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5508 (in Chinese) [张拴勤, 石云龙, 黄长庚, 连长春 2007 物理学报 **56** 5508]
- [6] Mao Z, Yu X, Zhang L, Zhong Y, Xu H 2014 *Vacuum* **104** 111
- [7] Wang T, He J P, Zhao J H, Ding X C, Zhao J Q, Wu S C, Guo Y X 2010 *Micropor. Mesopor. Mat.* **134** 58
- [8] Wang W, Fang S, Zhang L, Mao Z 2014 *Text. Res. J.* **85** 1065
- [9] Liu X F, Lai Y K, Huang J Y, Aldeyab S S, Zhang K Q 2014 *J. Mater. Chem.* **3** 345
- [10] Mao Z P, Wang W, Liu Y, Zhang L P, Zhong Y 2014 *Thin Solid Films* **558** 208
- [11] Liu D, Cheng H, Xing X, Zhang C, Zheng W 2016 *Infrared Phys. Technol.* **77** 339

- [12] Xue F, Duan T R, Xue M, Liu F, Wang Y F, Wei Z Q, Meng Z H 2011 *Chin. J. Anal. Chem.* **39** 1015 (in Chinese) [薛飞, 段廷蕊, 薛敏, 刘烽, 王一飞, 韦泽全, 孟子晖 2011 分析化学 **39** 1015]
- [13] Lu W, Xue F, Huang S Y, Meng Z H, Xue M 2012 *Chin. J. Anal. Chem.* **40** 1561 (in Chinese) [芦薇, 薛飞, 黄舒悦, 孟子晖, 薛敏 2012 分析化学 **40** 1561]
- [14] Chen W, Xue M, Xu F, Mu X R, Xu Z B, Meng Z H, Zhu G X, Shea K J 2015 *Talanta* **140** 68
- [15] Xue F, Asher S A, Meng Z H, Wang F Y, Lu W, Xu M, Qi F L 2015 *RSC Adv.* **5** 18939
- [16] Dai X, Xiang Y, Wen S 2011 *Prog. Electromagn. Res.* **120** 17
- [17] Chen W D, Dong X Y, Chen Y, Zhu Q G, Wang N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154207 (in Chinese) [陈卫东, 董昕宇, 陈颖, 朱奇光, 王宁 2014 物理学报 **63** 154207]
- [18] Zhu Q G, Dong X Y, Wang C F, Wang N, Chen W D 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034209 (in Chinese) [朱奇光, 董昕宇, 王春芳, 王宁, 陈卫东 2015 物理学报 **64** 034209]
- [19] Deng X H, Yuan J R, Liu J T, Wang T B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 074101 (in Chinese) [邓新华, 袁吉仁, 刘江涛, 王同标 2015 物理学报 **64** 074101]
- [20] Zhuang Y Y, Zhou W, Ji K, Chen H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224202 (in Chinese) [庄煜阳, 周雯, 季珂, 陈鹤鸣 2015 物理学报 **64** 224202]
- [21] Zhao X T, Zheng Y, Han Y, Zhou G Y, Hou Z Y, Shen J P, Wang C, Hou L T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064215 (in Chinese) [赵兴涛, 郑义, 韩颖, 周桂耀, 侯峙云, 沈建平, 王春, 侯蓝田 2013 物理学报 **62** 064215]
- [22] Yang P L, Dai S X, Yi C S, Zhang P Q, Wang X S, Wu Y H, Yu Y S, Lin C G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014210 (in Chinese) [杨佩龙, 戴世勋, 易昌申, 张培晴, 王训四, 吴越豪, 许银生, 林常规 2014 物理学报 **63** 014210]
- [23] Zhang Z M, Wu B, Liu Y J, Jiang L, Mi N, Wang X S, Liu Z J, Liu S, Pan Z H, Nie Q H, Dai S X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 124205 (in Chinese) [赵浙明, 吴波, 刘雅洁, 江岭, 密楠, 王训四, 刘自军, 刘硕, 潘章豪, 聂秋华, 戴世勋 2016 物理学报 **65** 124205]
- [24] Chen P Z, Hou G F, Suo S, Ni D, Zhang J J, Zhang X D, Zhao Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 128801 (in Chinese) [陈培专, 侯国付, 索松, 倪岱, 张建军, 张晓丹, 赵颖 2014 物理学报 **63** 128801]
- [25] Gao Y F, Shi J M, Zhao D P, Xu B 2012 *Infrared Laser Eng.* **41** 970 (in Chinese) [高永芳, 时家明, 赵大鹏, 许波 2012 红外与激光工程 **41** 970]
- [26] Arpin K A, Losego M D, Cloud A N, Ning H L, Mallek J, Sergeant P N, Zhu L X, Yu Z F, Kalanyan B, Fan S H, Braun P V 2013 *Nat. Commun.* **4** 8
- [27] Zhang W, Xu G, Zhang J, Wang H, Hou H 2014 *Opt. Mater.* **37** 343
- [28] Li J, Ye H, Wei M L 2010 *Acta Armamentarii* **31** 1426 (in Chinese) [李进, 叶宏, 韦孟柳 2010 兵工学报 **31** 1426]
- [29] Li W S, Zhang Q, Huang H M, Fu Y H 2012 *Infrared Laser Eng.* **41** 2578 (in Chinese) [李文胜, 张琴, 黄海铭, 付艳华 2012 红外与激光工程 **41** 2578]
- [30] Zhang M, Yang X J, Liu M Y 2009 *J. Academy of Armored Force Engineering* **23** 89 (in Chinese) [张民, 杨小静, 刘名扬 2009 装甲兵工程学院学报 **23** 89]
- [31] Zhang W, Xu G, Shi X, Ma H, Li L 2015 *Photonic Nanostruct.* **14** 46
- [32] Wang Z, Cheng Y, Nie Y, Wang X, Gong R 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 054905
- [33] Lin S Y, Fleming J G, Chow E, Bur J, Choi K K 2000 *Phys. Rev. B* **62** 2243
- [34] Fleming J G, Lin S Y, Kady I E, Biswas R, Ho K M 2002 *Nature* **417** 52

Preparation of opal photonic crystal infrared stealth materials*

Zhang Lian-Chao¹⁾ Qiu Li-Li^{1)†} Lu Wei¹⁾ Yu Ying-Jie¹⁾ Meng Zi-Hui¹⁾
Wang Shu-Shan²⁾ Xue Min¹⁾ Liu Wen-Fang¹⁾

1) (School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 31 August 2016; revised manuscript received 21 January 2017)

Abstract

With the development of infrared detection technology, the survival of military target is now under serious threat. Therefore, new infrared stealth technologies and materials are now in an urgent demand. The photonic crystal (PhC) possesses regularly repeating structure which results in band-gap and diffraction satisfying Bragg's law of diffraction. The PhC presents unique optical properties and functionality. The PhC with band-gap located in visible band is used widely as biosensor, chemical sensor, optical filter, reflector, modulator, metasurface and solar cell. The PhC with band-gap located in infrared band can be used to control the propagations of the electromagnetic waves of infrared band, and could be used as a promising material in the infrared stealth technology.

Photonic structure used to tune the infrared radiation usually has a one-dimensional layer-by-layer stack or three-dimensional wood pile structure. However, the poor flexibility, low strength, small area coverage, complicated fabrication process and high cost can prevent this new infrared stealth technology from being applied and developed. In this report, a simple and cost-effective method of preparing the opal PhC materials is proposed, and this infrared stealth material forbids electromagnetic waves of infrared band to propagate on account of band-gap.

In this paper, opal PhCs materials with high quality are assembled from SiO₂ colloidal microspheres with micrometer size by using optimized vertical deposition method. We calculate the relation between the diameter of SiO₂ colloidal microsphere and the frequency of opal PhCs band-gap in theory and verified in experiment, which operates in the working band of infrared detector. The results show that the diameters of SiO₂ colloidal microspheres should be 1.33–2.22 μm and 3.56–5.33 μm. A series of monodispersed micrometer SiO₂ colloidal microspheres is prepared by the modified Stöber method, and bigger microspheres are prepared by using the seeded polymerization method. Then, we choose the diameters of 1.5 μm and 4.3 μm SiO₂ microspheres to prepare the opal PhCs materials. The PhCs materials assembled by 1.5 μm SiO₂ microspheres are prepared in alcohol under 60 °C or in acetone under 40 °C; while the PhCs material assembled by 4.3 μm SiO₂ microspheres is prepared in alcohol/dibromomethane = 3 : 1 under 60 °C. Finally, the opal PhC materials with band-gap located in 2.8–3.5 μm and 8.0–10.0 μm are successfully prepared, and the widths of band-gap are 0.7 μm and 1.9 μm, respectively. These opal PhCs materials could change the infrared radiation characteristics of the target in infrared waveband, and meet the requirements of wide band-gap for infrared stealth materials.

Keywords: photonic bandgap, colloidal crystal array, optimized vertical deposition, infrared stealth

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.66.084208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 21375009, U153010105) and the Foundation for Science and Technology Innovation Program of Beijing Institute of Technology, China (Grant No. 20151042004).

† Corresponding author. E-mail: qiulili@bit.edu.cn