

·光电器件与材料·

## 基于光子晶体的中红外与多波段激光兼容伪装材料

苗雷<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 徐延亮<sup>2</sup>

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 91876部队, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 针对现代战争探测和精确制导系统由单一波段向复合波段扩展, 对伪装材料提出了更高的要求。光子晶体作为一种人工晶体功能材料, 利用其带隙特性实现在中红外波段的伪装, 采用电子束蒸发和薄膜沉积等技术, 设计并制备在3~5  $\mu\text{m}$  隐身同时兼容0.93  $\mu\text{m}$ , 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  激光波段的光子晶体。对飞行器尾喷管部位的隐身具有重要的意义。光谱分析表明, 各项指标满足使用要求。

**关键词:** 光子晶体; 中红外; 激光; 伪装

中图分类号: 0734

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-05-0042-04

## Compatible Mid-infrared and Multi-band Laser Camouflage Material Based on Photonic Crystal

MIAO Lei<sup>1</sup>, LI Zhi-gang<sup>1</sup>, XU Yan-liang<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2. 91876 Army Unit of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** In modern war, the detection and precise guidance systems have been developed from single band to composite band, which put forward higher requirements on camouflage material. Photonic crystal as a kind of artificial crystal function material, its band gap characteristics are used to realize camouflage at mid-infrared band. The photonic crystal is designed and fabricated by applying electron beam evaporation and thin film deposition technology, which is stealth at 3~5  $\mu\text{m}$  and compatible with laser waveband at 0.93  $\mu\text{m}$ , 1.06  $\mu\text{m}$  and 10.6  $\mu\text{m}$ . It is very important for aircraft nozzle position stealth. Spectrum analysis shows that the specifications meet application requirements.

**Key words:** photonic crystal; mid-infrared; laser; camouflage

在现代高科技战争中, 光电技术的应用使得交战双方的政治、经济、军事目标和武器装备时刻有可能暴露在对方的侦察系统和精确制导系统下。随着激光技术的发展, 激光在探测和制导领域有了越来越多的应用。比较常用的波段有 0.93  $\mu\text{m}$ , 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ , 激光探测装备向目标发射光束, 然后接收目标的回波信号, 与发射信号对比, 从而获得目标参数<sup>[1]</sup>。

中红外波段 3~5  $\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup> 是红外探测器常用的一个

窗口, 也是多数发动机尾气热辐射峰值的探测波段。军事目标在实现伪装时, 伪装材料降低目标表面的热红外辐射特性<sup>[3]</sup>。光子晶体作为一种新型结构的功能材料, 可以抑制或增强在特定波长的辐射, 在红外伪装中有潜在的应用价值<sup>[4-6]</sup>。

当前, 红外伪装材料往往在较宽波段具有低发射率(高反射率), 而激光伪装要求材料具有低反射率, 这本身就是矛盾的, 从而不具备激光隐身效果。而光子晶体可以在带隙中实现低发射率, 从而

不会影响其他波段,因此,通过合理的设计可以实现在中红外的隐身同时兼容 0.93 μm, 1.06 μm 和 10.6 μm 波段的激光隐身<sup>[7-8]</sup>,具有重要的意义。

### 1 中红外与激光波段兼容伪装的机理

光子晶体是一种折射率在空间内周期性变化的介电结构,可以实现在可见光和红外波段产生带隙,对于完全带隙,任何方向的入射光都将被反射,从而实现红外伪装上需要的低发射率。理想的中红外与激光隐身伪装材料发射率如图 1 所示。在中红外波段实现低发射,在激光波段和其他波段实现高发射,即低反射。这样光子晶体相比于其他的红外伪装材料,最为明显的优势是可以通过设计合适的光子晶体在不同的波段产生带隙,从而实现需要波段宽度和位置,在激光波段减小反射,在其他热辐射波段实现散热,这是光子晶体与激光波段兼容伪装的机理。

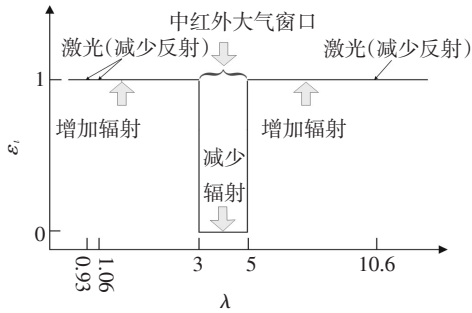


图 1 理想伪装材料模型

### 2 传输矩阵法推导

一维光子晶体由多层膜构成,波长为 λ 的光以角度 θ<sub>0</sub> 入射到薄膜上,在薄膜上方为折射率为 n<sub>0</sub> 的空气层,假设第 l 层的电场和磁场切向分量分别为 E 和 H,则第 l+1 层的电场和磁场切向分量可表示为

$$\begin{bmatrix} E_l \\ H_l \end{bmatrix} = M_l \begin{bmatrix} E_{l+1} \\ H_{l+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里的 M 为第 l 层媒质的特征矩阵,它可表示为

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos \delta_l & j \frac{\sin \delta_l}{\eta_l} \\ j \eta_l \sin \delta_l & \cos \delta_l \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\delta_l = \frac{2\pi}{\lambda} n_l d_l \cos \theta$ ; n<sub>l</sub>、d<sub>l</sub> 为第 l 层媒质的折射率和厚度;  $\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos \theta_l, & TM \text{波} \\ n_l \cos \theta_l, & TE \text{波} \end{cases}$ ; θ<sub>l</sub> 为第 l 层媒质中的

折射角,它满足 Snell 折射定律,即 n<sub>l</sub> sin θ<sub>l</sub> = n<sub>l-1</sub> sin θ<sub>l-1} = A = n<sub>0</sub> sin θ<sub>0</sub>, λ 为入射光在真空中的波长。当薄膜由 k 层组成时,其总的特征矩阵为</sub>

$$M = \prod_{l=1}^k M_l \quad (3)$$

如果将特征矩阵记为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则入射光的反射率 R 为

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2 \quad (5)$$

透射率 T 为

$$T = \frac{4 \operatorname{Re}(\eta_{k+1} / \eta_0)}{|m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})|^2} \quad (6)$$

吸收率 A 为

$$A = 1 - R - T \quad (7)$$

### 3 设计实例及分析

对于光子晶体而言,带隙宽度和峰值与折射率比值成正相关,利用缩放定理将带隙中心调整到需要的位置。较大的折射率比值可以获得较高的带隙率,为了使带隙较宽,选取的两种材料折射率高低相差应较大,在选取薄膜材料时,还要选取在中红外透明的材料。选取膜料 A 和 B 进行设计,A 的折射率为 4.0, B 的折射率为 2.2。其中可以调节的参量有:光子晶体的周期数 N,介质层的厚度 d<sub>A</sub>, d<sub>B</sub>。

图 2 是周期数对光子晶体的带隙的影响。图中分别是 2 周期、5 周期和 8 周期的光谱反射率曲线。可以看出,对于 2 周期的光子晶体,其中红外波段出现了一个高反射带,反射率有 70% 左右。随着周期数的增加,反射率趋于 1 的入射波的波长逐渐集中在以中心波长 (λ = 4 μm) 为中心的一个波长带 (3~5 μm) 中。而且光子晶体的反射带宽度随着周期数的增多而增宽,但是当周期数达到某一值后(文中周期数为 8 时),周期数再增加时,反射带宽度几乎没有变化,只是其两侧的振荡数逐渐增加。

在折射率为 n<sub>g</sub> 的基底上镀制光学厚度为 λ/4 的高折射率的膜层后,会提高材料的整体反射率。采用每层厚度均为 λ/4 的高、低交替的光子晶体结构,由于每层反射光束产生了相长干涉,所以能够得到更高的反射率。光子晶体的带隙特性,则可以在整

个带隙波段内实现较高的反射率。相关参数为厚度为  $n_a d_a = n_b d_b = 5/4 \mu\text{m}$ , 周期数  $N = 10$ 。



图2 不同周期数光子晶体的反射光谱

通过计算得到光子晶体的带隙图,如图3所示。横坐标为波长,纵坐标为入射角,图像灰度为反射率高低,白色反射率为1,黑色反射率为0,红线以内为完全光子带隙。可以看出,入射角度对带隙宽度和位置影响较小,其完全光子带隙为  $3\sim 5 \mu\text{m}$ , 覆盖了中红外波段,带隙率为50%。

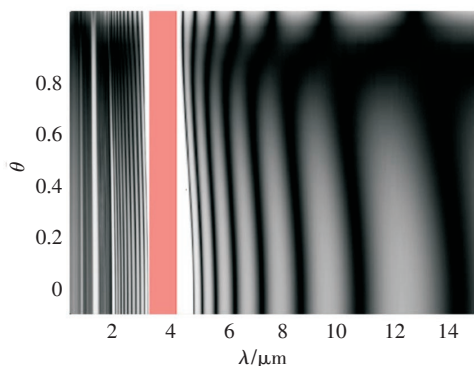


图3 光子晶体带隙图

#### 4 光谱实验测试

使用傅里叶红外光谱仪和紫外-红外-近红外分光光度计对制备的材料进行测试,测得的反射谱如图4、图5所示。图4和图5显示了波长的光谱发射率测量,一维光子晶体在  $3\sim 5 \mu\text{m}$  具有很高的反射率,即低发射率,在  $10.6 \mu\text{m}$  处仅有4%的反射率,在  $0.93 \mu\text{m}$  处发射率为2%,在  $1.06 \mu\text{m}$  处反射率为7%。测试的结果表明,所制备的一维光子晶体在中红外波段具有较低的发射率,在激光波段具有较低的反射率,基本上符合设计要求。

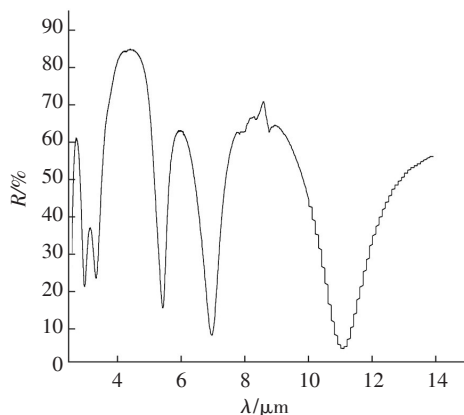


图4 光子晶体中红外光谱

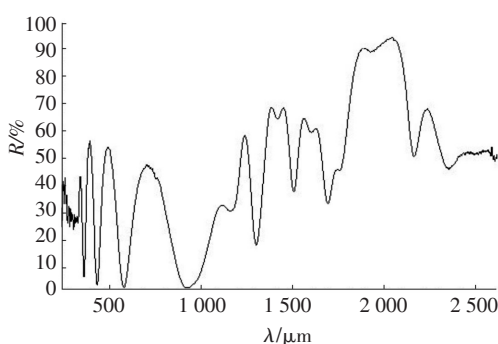


图5 光子晶体可见光近红外光谱

#### 5 结论

选取两种镀膜材料A和B,根据薄膜理论设计了光子带隙位于中红外的光子晶体。在此基础上考虑调制多个激光波段的反射率。解决了红外隐身和激光隐身相矛盾的问题,性能在一定程度上满足了中红外与激光兼容伪装的要求。本课题研制的光子晶体厚度薄、质量轻、柔韧性好,可贴在飞行器尾喷管表面,具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 姜海娇,来建成,王春勇,等.激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 2014.38(5):1-7.
- [2] ZHANG Wei-gang, XU Guo-yue, ZHANG Jian-chao, et al. Infrared spectrally selective low emissivity from Ge/ZnS one-dimensional heterostructure photonic crystal[J]. Optical Materials, 2014, 37:343-436.
- [3] Enoch S, Simon J J, Escoubas L, et al. Simple layer-by-layer photonic crystal for the control of thermal emission[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(26):261101-261101-3.

- [4] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic crystals: molding the flow of light, second edition[J]. Princeton Univ. Press, NJ, 2008.
- [5] Babrekar H A, Jog J P, Mathe V L, et al. Swift heavy ion induced formation of Al polymer composite layer for low thermal emissivity in the IR range[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms, 2012, 287(9):135-140.
- [6] MAO Zhi-ping, YU Xi-li, ZHANG Lin-ping, et al. Novel infrared stealth property of cotton fabrics coated with nano ZnO(Al, La)particles[J]. Vacuum, 2014, 104(6):111-115.
- [7] Osche G R, Young D S. Imaging laser radar in the near and far infrared[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 3: 10.1109/5.482225.
- [8] 王古常, 孙斌, 万强, 等. 军用脉冲激光测距技术与研究现状[J]. 2003, 1(4):55-59.

(上接第29页)

表2 不同氧化剂比例下多孔硅-硅界面的平均界面高度  $a$  和表面粗糙度  $\sigma$  的精确值

电流密度/ mA/cm <sup>2</sup>	33.33%	40%	50%	60%	66.66%	75%
平均界面高度/ $a$ /nm	220.16	353.34	296.16	546.68	453.012	578.45
表面粗糙度 $\sigma$ / nm	7.778	7.27	6.163	12.701	23.023	65.08

### 3 结 论

在电化学阳极氧化法制备多孔硅时,通过氧化剂(HF和乙醇)比例和电流密度等因素对多孔硅孔隙率和刻蚀速率以及腐蚀界面的粗糙度的影响研究发现:(1)在制备多孔硅时,刻蚀速率随HF含量和电流密度的增加而增加;(2)电解液中HF和乙醇体积比为2:3时,孔隙度随电流密度的增大而增大,当电流密度超过这一值后,孔隙度趋于恒定,电流密度过大将导致电化学抛光;(3)多孔硅-硅的界面粗糙度随电流密度的增加而增大;(4)当HF和乙醇体积比低于3:2时,随HF体积含量的增加,腐蚀界面的表面粗糙度逐渐增大,但均小于10 nm;当HF和乙醇体积比高于3:2时,多孔硅-硅的平均界面高度及表面粗糙度均很大而且孔发生龟裂现象。

所以在电化学阳极氧化法制备多孔硅的过程中,氧化剂含量和电流密度是相互配合和协调的。在电流密度和乙醇足够的情况下,要使孔隙度和刻蚀速率进一步提高,则必须同时提高HF的浓度;同理,在HF和电流密度一定的情况下,要提高孔隙度和刻蚀速率,则必须同时提高氧化体系中乙醇的含量以及时排除体系中的H<sub>2</sub>,使反应继续进行而不受

阻碍。

### 参考文献

- [1] Arriaga Z L a J. High Quality Porous Silicon Multilayer Structures for Infrared Applications[D]. Sweden:In PIERS Proceedings, 2013:1404-1408.
- [2] Lammel G, Schweizer S, Renaud P. MEMS infrared gas spectrometer based on a porous Silicon tunable filter[J]. IEEE, 2001:578-581.
- [3] Lammel G, Schweizer S, Renaud Ph. Microspectrometer based on a tunable optical filter of porous silicon[J]. Sensors and Actuators A, 2001(92):52-59.
- [4] 赵丽. 多孔硅的研究及其应用[J]. 科技创新导报, 2010(2):165-166.
- [5] 刘东来, 聂二勇, 张云森. 电化学阳极氧化制备多孔硅及其发光性能研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(3):375-379.
- [6] Kordás K, Beke S, Beke A E. Optical properties of porous silicon[J]. Optical Materials, 2004, 25(3):257-260.
- [7] 田云龙. 阳极氧化多孔结构的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] Foss S E. Graded Optical Filters in Porous Silicon for use in MOEMS Applications[D]. Norway: University of Oslo, 2005.
- [9] Smith R L, Collins S D. Porous silicon formation mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(8).
- [10] Smith R L, Collins S D. A theoretical model of the formation morphologies of porous Silicon[J]. Journal of Electronic Materials, 1988, 17(6):533-541.
- [11] Weinberg N L, Weinberg H R. Electrochemical oxidation of organic compounds[J]. Chemical Reviews, 1968, 68(4):449-523.