

一种基于光子晶体的远红外与 10.6 μm 激光兼容伪装材料的设计与制备

高永芳^{1,2} 时家明^{1,2} 赵大鹏^{1,2} 汪家春^{1,2}

(¹ 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037
² 电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要 现代探测系统由单一工作模式到复合工作模式的转变,对伪装材料的光谱特性提出了某些特殊要求。作为一种新型人工结构功能材料,光子晶体基于光子禁带的高反射特性可以实现热红外伪装。设计了一种基于一维掺杂光子晶体的远红外与激光兼容伪装材料,利用薄膜光学理论的特征矩阵法计算了透射光谱。制备的样品经测试,与理论曲线相吻合。结果表明,利用一维掺杂光子晶体可以实现远红外与激光兼容伪装。

关键词 材料;伪装;特征矩阵;光子晶体

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0616001

Design and Fabrication of a Kind of Far Infrared and 10.6 μm Laser Band Compatible Camouflage Material Based on Photonic Crystals

Gao Yongfang^{1,2} Shi Jiaming^{1,2} Zhao Dapeng^{1,2} Wang Jiachun^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China

² Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Due to the change of modern detecting systems from the single working mode to the compound workingone, materials with special spectral characteristics are required to meet camouflage demands. As a new kind of man-made structural function material, photonic crystals can realize thermal infrared camouflage because of its high-reflection photon forbidden band. Based on one-dimensional doped photonic crystal, a kind of far infrared and laser band compatible camouflage material is designed, then the transmission spectrum is calculated by characteristic matrix method of thin-film optical theory. The sample of photonic crystal is fabricated. It is found that the actual testing curve is coincident with the theoretic design curve. The result shows that one-dimensional doped photonic crystal can achieve far infrared and laser band compatible camouflage.

Key words material; camouflage; characteristic matrix; photonic crystals

OCIS codes 160.4670; 160.5293; 310.4165

1 引 言

在现代战争中,光电技术的广泛应用,使得交战双方随时有可能暴露在对方的侦察、监视和制导武

器系统的威胁之下。而伪装作为对抗高技术侦察和精确制导武器袭击的一个有力手段,受到各国军方的高度重视。这就要求伪装材料应能够对抗多波段

收稿日期: 2010-12-30; 收到修改稿日期: 2011-02-14

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0935)和安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(2007A005005E)资助课题。

作者简介: 高永芳(1983—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体的制备及应用等方面的研究。

E-mail: gaoyongfang830121@163.com

导师简介: 时家明(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事红外功能材料应用等方面的研究。

E-mail: sjmeei@yahoo.com.cn

探测,以降低伪装目标被发现的概率。目前广泛使用的伪装方法在波段兼容性和伪装效果方面还有待进一步提高,而采用传统材料尚难实现新的突破。于是,人们把目光转向新型材料。作为一种新型人工结构功能材料,光子晶体可以抑制或增强物体在特定波段的辐射,在伪装中具有潜在的应用价值。

自光子晶体的概念形成以后,人们就不断探索利用光子晶体来实现一些常规材料很难实现或无法实现的特性,如抑制或增强辐射等,这些研究成果都可以直接或间接地应用于红外伪装中^[1~7]。2005年,美国的 Aliev 等^[2]报道了他们使用 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 制备的反 Opal 结构光子晶体,通过适当的控制晶格参数和填充率,可以使该结构光子晶体在中远红外波段产生完全光子带隙。2006年,他们对这一可用作红外颜料的光子晶体进行了详细报道,给出了该光子晶体的制备方法,掀开了光子晶体伪装崭新的一页^[8]。2007年,刘广平等^[6]采用钨和二氧化硅设计了一维金属-介质光子晶体,从理论上研究了光子晶体的光谱选择控制特性,可用于实现热辐射控制。

当前,利用光子晶体进行热辐射控制的方法在能源领域已经掀起了一股研究热潮。但将光子晶体用于伪装时,不仅要实现热辐射控制,还要考虑多波段兼容等问题,所以难度更大。目前将光子晶体用于伪装的报道还很少,基本上处于理论设计阶段。因为将光子晶体用于热红外波段的伪装时,一般厚度很厚,而光子晶体,对厚度很敏感,稍有偏差就很难制备出来。本文则主要利用一维掺杂光子晶体的特性,设计并制备出了远红外与激光兼容伪装的光子晶体。

2 远红外和激光兼容伪装的机理

光子晶体是一种新兴的材料,它具有光子禁带和光子局域特性。当入射光的频率落在禁带内时,光会因干涉,无法在其中传播。特别地,对于具有完全带隙结构的光子晶体,所有方向的入射都会被全反射。此外,当在光子晶体的周期性或者对称性结构中引入缺陷,使得周期性或者对称性被破坏时,在其光子带隙中就会出现频率极窄的缺陷态。与缺陷态频率一致的光子就会被禁锢在缺陷附近,一旦离开缺陷位置,光就会大幅度衰减^[8~10]。利用光子晶体材料的带隙特性可以实现多波段伪装,其中最重要的是红外与激光兼容伪装。红外与激光兼容伪装是目前世界上尚未得到很好解决的难题,而利用光子晶体的特性,就有望解决这一问题。通过对光子

晶体结构和材料的合理设计,可以有效地控制其在不同波段的反射率,使它符合目标伪装的需求。考虑到目前激光探测系统的工作波长比较单一,且线宽很窄,针对军事上应用比较广泛的 $10.6\ \mu\text{m}$ CO_2 激光器,可采用“光谱挖孔”方案来实现远红外与激光的兼容伪装。即伪装材料的理想光谱应具备在激光波长附近的窄波段内有低反射率,而在远红外的其它波段有高反射率的形式,如图 1 所示。

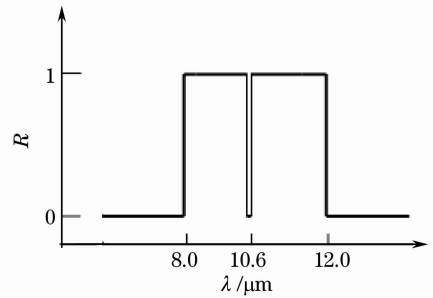


图 1 伪装材料的理想反射光谱

Fig. 1 Perfect reflection spectrum of camouflage material

3 理论设计

本文选择了在红外区工艺比较成熟的 A, B 两种材料进行光子晶体设计。为了能够更加真实的模拟材料的特性,本文选取的 A, B 两种材料折射率数据都是色散的。在选定了组分材料后,膜系的可调参量主要有:构成光子晶体的周期数 N , 介质层 A, B 的厚度 d_A, d_B , 掺杂层 C 的位置和厚度 d_C 。在本例中,掺杂层 C 也选用 B 物质。

在设计时,利用薄膜光学的特征矩阵来研究一维掺杂光子晶体的透射光谱。根据薄膜光学理论^[11,12],光在分层媒质中的传输特性可用一个 2×2 的特征矩阵表示。对于第 l 层媒质,其特征矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} \cos \delta_l & j \frac{\sin \delta_l}{\eta_l} \\ j \eta_l \sin \delta_l & \cos \delta_l \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\delta_l = \frac{2\pi}{\lambda} n_l d_l \cos \theta_l$, n_l, d_l 为第 l 层媒质的折射率

和厚度, $\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos \theta_l, & \text{TM 波} \\ n_l \cos \theta_l, & \text{TE 波} \end{cases}$, θ_l 为第 l 层媒质

中的折射角,它满足 Snell 折射定律,即 $n_l \sin \theta_l = n_{l-1} \sin \theta_{l-1} = \dots = n_0 \sin \theta_0$, 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

$$\mathbf{M} = \prod_{l=1}^k \mathbf{M}_l. \quad (2)$$

如果将特征矩阵记为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则入射光的反射率 R 为

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2, \quad (4)$$

透射率 T 为

$$T = \frac{4\text{Re}(\eta_{k+1}/\eta_0)}{|m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})|^2}, \quad (5)$$

吸收率 A 为

$$A = 1 - R - T. \quad (6)$$

考虑到现在制备工艺的制约,因此,在设计膜系时,在能够保证所需要的特性的前提下,要尽可能的精简膜系(为了减少膜层的厚度)。通过不断的优化,最终确定膜系为 ABABBABA,这种结构为一种镜像光子晶体结构,其结构类似于法布里-珀罗干涉腔,两侧的 ABA 结构为高反射低透射,中间两层连续的 BB 结构为引入缺陷,可以在低透射区中出现一个透射峰。其中 A 材料的单层厚度为 662.24 nm, B 材料的单层厚度为 1168.43 nm。图 2 和图 3 分别为利用特征矩阵法计算得到的该膜系的透射光谱图和反射光

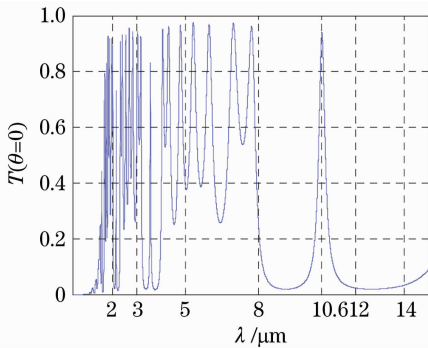


图 2 设计的光子晶体的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of the PC designed

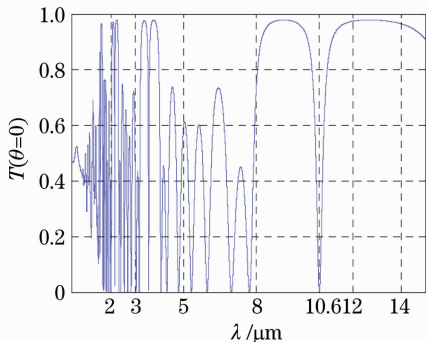


图 3 设计的光子晶体的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of the PC designed

谱图。从图 2 看出,光子晶体在 10.6 μm 处出现了一个透射峰,而在远红外的其它波段,光子晶体的透射率都很低。图 3 表征了该光子晶体的反射特性。从图 3 可以看出,该光子晶体在 10.6 μm 处的反射率接近为 0,而在远红外的其它波段都保持很高的反射率,表明设计的光子晶体符合远红外与激光兼容伪装的要求。

4 制 备

由于带隙位于红外波段的光子晶体一般很厚,因此制备是一个难题。尤其是含缺陷的光子晶体,其结构对厚度比较敏感,在制备过程中,厚底有偏差或者是引入了其他杂质,都有可能使光子晶体制备失败,没有缺陷模出现。通过不断的实验,确定了制备热红外波段光子晶体的工艺。本文设计的光子晶体的制备是在国投南光生产的 ZZX-700 型镀膜机上完成的。在整个镀制过程中,采用石英晶振监控的方法,实现对膜系的膜厚监控。通过不断的实验,确定了本文所选择的 A 和 B 两种材料的最佳的工艺参数:真空度为 1.0×10^{-3} Pa;镀制 A 材料时,沉积速率控制在 1.5 nm/s;镀制 B 材料时,沉积速率控制在 1.0 nm/s。

实际制备的一维光子晶体都是在某种基底上的,因此,在对制备出的光子晶体进行测试时,测出的光谱实际上为光子晶体与基底共同作用的结果。本文使用傅里叶变换红外光谱仪对制备的一维光子晶体进行透射率测试,为了测试方便,选择了在红外波段透明的材料 ZnSe 作为基底。为了能使制备出的样品的光谱能与设计的尽可能的吻合,对图 2 的光子晶体,考虑基底的影响,进行重新计算,图 4 为利用特征矩阵法计算得到的在 ZnSe 基底上的光子晶

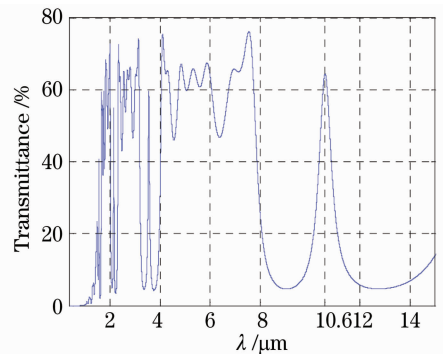


图 4 含 ZnSe 基底的光子晶体的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the PC with ZnSe substrate

体的透射光谱图。从图 4 可以看出,考虑基底的影响后,光子晶体的缺陷的位置不变,但是透射峰的峰值有所降低,原因是 ZnSe 基底虽然在红外波段透明,但并不是完全透过,波通过基底时,也有一定的损耗。

5 结果与讨论

图 5 为利用傅里叶变换红外光谱仪测试的在 ZnSe 基底上制备的用于远红外与激光兼容伪装的一维光子晶体的透射率谱。如图 5 所示,样品的透射率曲线与理论设计的曲线吻合得很好,尤其是在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段,样品的透射率光谱与理论设计的几乎重合,只是在 $15\ \mu\text{m}$ 以后,实测值略低于理论值,这主要是由于所选的材料在 $15\ \mu\text{m}$ 以后存在吸收造成的。

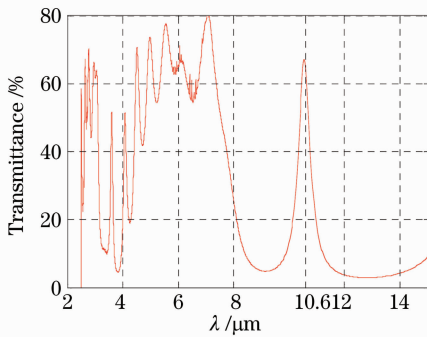


图 5 实际制备的样品的透射谱图

Fig. 5 Transmission spectrum of the sample actually prepared

6 结 论

本文选择红外波段透明的材料 A 和 B,利用薄膜光学理论中的特征矩阵模型,首先设计出可以用于远红外与激光兼容伪装的光子晶体。通过不断实验,利用镀膜机制备出了该光子晶体薄膜。经测试,样品的实测曲线与理论设计曲线吻合得很好,尤其是在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段,实测值与理论值几乎重合。其性能在一定程度上满足了远红外与激光兼容伪装的要求。

参 考 文 献

- Herman Hogstrom, Carl G. Ribbing. Polaritonic and photonic gaps in SiO_2/Si and SiO_2/air periodic structures[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2004, **2**(1): 23~32
- A. Aliev, E. Yabloovitch. Infrared photonic crystals on the base of chalcogenide glass inverse opal [C]. American Physical Society, APS March Meeting, 2005: 21~25
- A. Aliev, A. Zakhidov, R. Baughman *et al.*. Chalcogenide inverted opal photonic crystal as infrared pigments [J]. *Internat. J. Nanosci.*, 2006, **5**(1): 157~172
- S. Enoch, J.-J. Simon, L. Escoubas *et al.*. Simple layer-by-layer photonic crystal for the control of thermal emission[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 261101
- David L. Chan, Marin Soljacic, J. D. Joannopoulos. Thermal emission and design in one-dimensional periodic metallic photonic crystal slabs[J]. *Phys. Rev.*, 2006, **74**: 016609
- Liu Guangping, Xuan Yimin, Han Yuge *et al.*. Thermal radiation spectral control by one-dimensional metal dielectric photonic crystal [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2007, **28**(3): 475~477
刘广平, 宣益民, 韩玉阁等. 一维光子晶体热辐射光谱控制模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, **28**(3): 475~477
- Du Panpan, Xu Jing, Li Yujie *et al.*. Application of photonic crystal thermal emitters for thermal photovoltaic power generation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 062501
杜盼盼, 许静, 李宇杰等. 光子晶体热辐射器在光伏系统中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 062501
- Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2914~2919
王济洲, 熊玉卿, 王多书等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2914~2919
- Zhang Yajun, Han Peng, Lin Chao. Air defect in one-dimensional photonic crystal heterostructures with single-negative materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 193~197
张亚军, 韩鹏, 林超. 含空气缺陷层的单负材料一维光子晶体特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 193~197
- Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2041~2044
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2041~2044
- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 24~29
唐晋发, 顾培夫, 刘旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 24~29
- Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(11): 2172~2178
王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. *物理学报*, 2001, **50**(11): 2172~2178