

# 中远红外隐身光子晶体薄膜的制备及隐身特性

刘瑞煌<sup>\*\*</sup>, 赵大鹏, 张继魁, 董海龙, 时家明<sup>\*</sup>

国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 采用传输矩阵法和蒸发镀膜工艺, 设计并制备了一种中、远红外双波段兼容隐身的光子晶体薄膜。测量了该光子晶体膜层的实际厚度和中、远红外光谱反射率, 所得结果与理论设计相吻合。研究表明, 与红外隐身涂层和常规迷彩布两种传统红外隐身材料相比, 光子晶体薄膜在中、远红外双波段抑制红外辐射的能力最强; 室外环境辐照对光子晶体薄膜在 8~14  $\mu\text{m}$  及 3~5  $\mu\text{m}$  波段隐身效果的影响较小。

**关键词** 材料; 光子晶体; 红外隐身; 薄膜制备; 隐身特性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0816001

## Preparation and Characteristics of Middle and Far Infrared Stealth of Photonic Crystal Film

Liu Ruihuang<sup>\*\*</sup>, Zhao Dapeng, Zhang Jikui, Dong Hailong, Shi Jiaming<sup>\*</sup>

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** A kind of photonic crystal (PC) film, which is compatible stealth in middle and far infrared bands, is designed and prepared based on the transfer matrix method and the evaporation film technology. The practical thicknesses and the middle and far infrared spectral characteristics of this kind of PC thin film are measured, which are in a good agreement with the theoretical design values. The results show that, compared with two kinds of conventional infrared stealthy material as the infrared stealth coatings and the conventional camouflage fabrics, the PC film has the strongest ability to suppress infrared radiation at both middle and far infrared bands. The influences of outdoor environment irradiation on the stealth effects of PC film at the bands of 8-14  $\mu\text{m}$  and 3-5  $\mu\text{m}$  are relatively weak.

**Key words** materials; photonic crystal; infrared stealth; film preparation; stealth characteristics

**OCIS codes** 160.5298; 310.1860; 130.3060

## 1 引 言

随着光电技术的发展, 光电探测系统从单一工作模式向复合工作模式转变, 对隐身材料提出了多波段兼容隐身的新要求。目前, 低红外发射率材料如纳米复合膜层<sup>[1]</sup>、树脂/金属复合涂层<sup>[2]</sup>和金属颜料<sup>[3]</sup>等在热红外隐身领域的应用已经得到了较大的发展。但是这些材料在多波段兼容隐身方面仍存在明显不足<sup>[4]</sup>。例如, 树脂/金属复合涂层和金属颜料虽然具有较低的红外发射率, 但是金属成分对电磁波固有的强反射特性影响了这些材料对雷达波隐身的性能。根据基尔霍夫定律, 低发射率的不透明材

料具有高反射率, 这就意味着新型隐身材料应具有对热红外高反射、低发射和对雷达低反射、高吸收的光谱特性。这种特殊的光谱对传统材料而言是难以实现的。相关文献表明, 新材料能有效克服传统材料固有的局限性, 表现出奇异的电磁特性。Zhao 等<sup>[5]</sup>基于光学变换原理研制的地毯斗篷不仅可以完美隐形, 还可以在内部对外界环境进行监测; Peng 等<sup>[6]</sup>通过准周期的  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  介电多层膜获得了完美的透射峰, 当破坏对称性结构时还能产生更窄的透射峰。新型光子晶体波导耦合器不仅遵循普通介质波导耦合的一般规律, 还有定向耦合的功能<sup>[7]</sup>。值得注意的是, 光子晶体<sup>[8-9]</sup>是一种介电常数呈周期

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: “十三五”计划预研项目(HJJ2017-0671)

\* E-mail: sjmeci@yahoo.com.cn; \*\* E-mail: liuruihuang2017@163.com

性排布的人工微结构材料,可以抑制或增强物体特定波段的辐射,这种特性为研制新型隐身材料提供了一种思路,在光电隐身中具有潜在的应用价值<sup>[10-11]</sup>。

光子晶体最基本的特征是具有光子带隙,频率落在带隙范围内的电磁波被禁止传播。特别是对于具有完全带隙结构的光子晶体,所有方向入射的电磁波都会发生全反射。周期性调制的微观结构可以把光子带隙置于特定的波段上,这样在热红外波段上就能得到具有高反射、低发射特性的光子晶体。Wang 等<sup>[12]</sup>利用 Ge 和 ZnS 材料设计并制备了一种红外与雷达兼容隐身的光子晶体薄膜,其样品对 2~18 GHz 雷达波几乎透明,在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  波段的发射率分别为 0.073 和 0.042。Zhang 等<sup>[13]</sup>利用 Te 和 ZnSe 材料设计和制备了一种中、远红外双波段兼容隐身的光子晶体薄膜,其样品在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  红外波段的反射率分别为 86.72% 和 72.91%。由此可见,光子晶体红外隐身材料对雷达波具有低反射率,对热红外电磁波具有高反射率。然而,隐身材料使用时通常暴露在外界环境中,会受到太阳、天空等较强热辐射源的照射,光子晶体红外隐身材料的高反射率特性会使照射在其表面的热辐射反射回去,从而被探测器接收,可能会使其成为红外波段的亮目标,这样反而容易被敌方发现和识别。目前,关于较强环境辐照条件下光子晶体薄膜红外隐身特性的研究还较少,尚需进一步开展对光子晶体红外隐身材料隐身特性的研究。

本文选择低折射率材料 ZnSe 和高折射率材料 Te 为原材料,利用传输矩阵法和电子束蒸发镀膜法,设计并制备出一种中、远红外双波段兼容隐身的光子晶体薄膜。以晴天的室外环境为实验场景,选取该光子晶体薄膜、常规迷彩布和红外隐身涂层为待测样品进行了对比实验,研究了该光子晶体薄膜在较强环境辐照条件下的红外隐身特性。

## 2 光子晶体红外隐身的理论基础

在热红外隐身方面,红外探测器通过接收来自不同物体的辐射功率来识别目标,而物体的辐射功率主要是由表面发射率和实际温度共同决定的。物体的实际温度与目标的工作状态有关,很难人为改变,因此通常采用降低物体表面发射率(即提高表面反射率)的方法降低物体的辐射功率,以达到热红外隐身的目的。光子晶体的带隙对频率落在其范围内的电磁波全反射,这样能实现在该波段的高反射。

如图 1 所示,在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  大气窗口波段内,电磁波反射率比较高,而在其他波段的反射率较低,这种光谱特征可以兼顾抑制辐射与散热的实际需求。

一维光子晶体的带隙理论一般用传输矩阵法<sup>[14]</sup>进行研究。根据薄膜光学理论,光在分层介质中的传输特性可以采用一个  $2 \times 2$  的特征矩阵来表示。对于第  $l$  层媒质,其特征矩阵可表示为

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

$$\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos \theta_l, & \text{TM wave} \\ n_l \cos \theta_l, & \text{TE wave} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\delta_l = 2\pi\lambda^{-1}n_l d_l \cos \theta_l$ ;  $\lambda$  为电磁波的波长;  $n_l$  和  $d_l$  分别为第  $l$  层媒质的折射率和厚度;  $\theta_l$  为第  $l$  层媒质的折射角,它满足 Snell 折射定律,即

$$n_l \sin \theta_l = n_{l-1} \sin \theta_{l-1} = \dots = n_0 \sin \theta_0. \quad (3)$$

若薄膜一共有  $k$  层,其总的特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \prod_{l=1}^{l=k} \mathbf{M}_l, \quad (4)$$

如果将特征矩阵记作

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则入射光的反射率  $R$  为

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2, \quad (6)$$

式中  $\eta_0$  为空气的导纳。透射率  $T$  为

$$T = \frac{4\text{Re}(\eta_{k+1} \eta_0^{-1})}{|m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})|^2}, \quad (7)$$

吸收率  $A$  为

$$A = 1 - R - T, \quad (8)$$

这样就可以计算出光子晶体薄膜在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  红外波段的反射光谱。

## 3 光子晶体隐身薄膜样本制备

### 3.1 材料选择及结构设计

光子晶体带隙的宽度正比于组成光子晶体材料的高低折射率之比,故选择在红外区具有高折射率的 Te 材料和低折射率的 ZnSe 材料,平均折射率分别为  $n_{\text{Te}} = 4.8$  和  $n_{\text{ZnSe}} = 2.4$ , 粒径尺寸为 2~8  $\mu\text{m}$ , 质量分数(纯度)都在 99.99% 以上。

根据特征矩阵法,结合图 1 中的反射光谱,设计

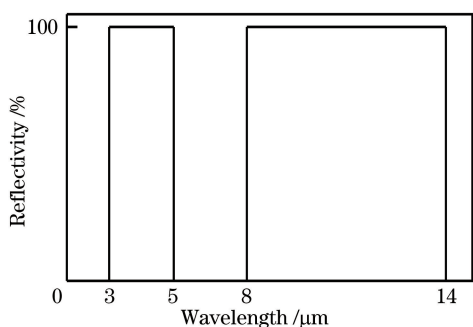


图 1 红外隐身材料理想反射率曲线

Fig. 1 Ideal reflection curves of infrared stealthy materials

出一种光子晶体薄膜结构。如图 2 所示,其膜系结构可表示为{Air|B<sub>1</sub>(A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>)<sub>3</sub>(A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>)<sub>3</sub>|Sub},其中Sub代表基底,Air代表空气,A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>代表厚度分别为1225 nm和225 nm的ZnSe材料;B<sub>1</sub>和B<sub>2</sub>代表厚度分别为620 nm和270 nm的Te材料。结合实际应用的情景,当入射光角度为0°、30°和60°时,经特征矩阵法计算可以得到该光子晶体的反射率曲线,如图3所示。当入射光角度为0°、30°和60°时,该光子晶体在3~5 μm中红外波段的反射率分别为93.6%、95.3%和95.2%,在8~14 μm远红外波段的反射率分别为86.6%、85.2%和81.1%。由此可见,不管是在中红外还是远红外波段,入射角对该光子晶体薄膜反射率的影响都很小。

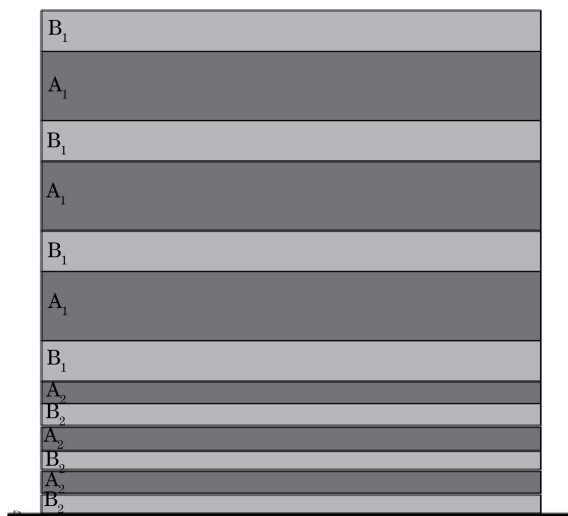


图 2 设计的光子晶体薄膜结构

Fig. 2 Designed PC thin film structure

### 3.2 隐身薄膜的制备与验证

以图 2 中所设计的膜层结构为基础,以柔性纺织布为基底,采用电子束蒸发镀膜法,在国投南光公司生产的 ZZX-700 型镀膜机上制备该光子晶体薄膜。在整个镀制过程中,采用石英晶振监控的方法,

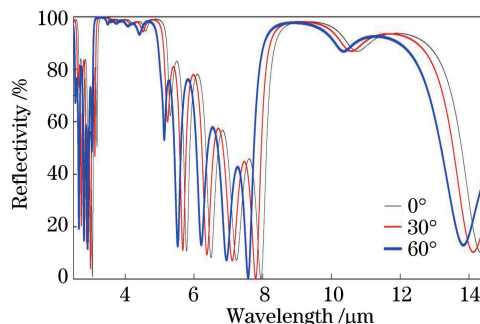


图 3 光子晶体理论反射率曲线

Fig. 3 Theoretical reflection curves of PC

实现对膜系厚度的监控。经过反复实验,最终确定了镀制 Te 和 ZnSe 两种材料的最佳工艺参数:真空度为 $1.0 \times 10^{-3}$  Pa;镀制 Te 材料时,沉积速率控制在1.5 nm/s;镀制 ZnSe 材料时,沉积速率控制在4.0 nm/s。

图 4 所示是利用日本日立公司生产的 S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜(SEM)拍摄的光子晶体薄膜的微观截面图,可以看出明显的分层结构,A 和 B 材料交替分布。上面 7 层对应{B<sub>1</sub>(A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>)<sub>3</sub>},A 材料厚度是 1228 nm,B 材料厚度是 619 nm,与设计相符;下面 6 层对应{(A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>)<sub>3</sub>},A 材料厚度是 223 nm,B 材料厚度是 268 nm,与设计膜层的厚度相差不大。

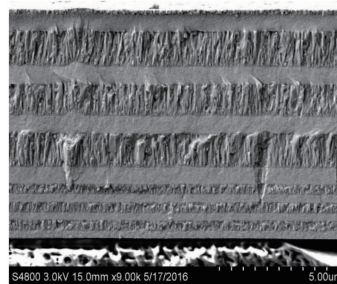


图 4 光子晶体样品横截面 SEM 形貌图

Fig. 4 Cross-sectional SEM image of PC

## 4 光子晶体薄膜红外隐身特性测试

### 4.1 红外隐身材料的选取

为了验证光子晶体红外隐身的实际性能,选取具有不同光谱特性的红外隐身涂层和常规迷彩布进行对比实验。利用傅里叶变换红外光谱仪分别测量了光子晶体薄膜(m1)、常规迷彩布(m2)和红外隐身涂层(m3)三种隐身材料的反射光谱曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,光子晶体薄膜在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段存在光子带隙,其反射率分别为 66%和 63%,比理论设计值低。这是因为承载光子

晶体的基底是表面较粗糙的纺织布,测量反射率时,出射光束在样品表面发生一定程度的散射,无法完全被处于镜像位置的探测器接收而损失了一部分能量。

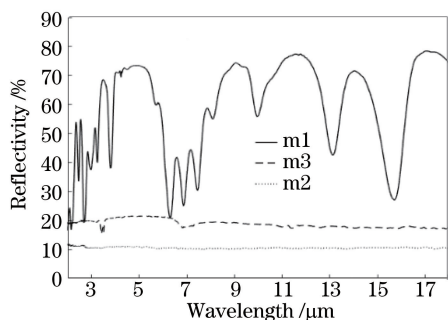


图 5 三种隐身材料的实际红外反射率曲线  
Fig. 5 Practical infrared reflection curves of three kinds of stealthy materials

表 1 三种隐身材料的中、远红外波段反射率

Table 1 Reflectivity of three kinds of stealthy materials at middle and far infrared bands

Wavelength band / $\mu\text{m}$	m1	m2	m3
3-5	0.66	0.11	0.21
8-14	0.63	0.10	0.19

这三种隐身材料在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  和  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段的反射率分别列于表 1。由图 5 和表 1 可知,无论是在中红外还是远红外波段,光子晶体薄膜的反射率最高,红外隐身涂层次之,常规迷彩布最低。

#### 4.2 红外隐身实验的内容和步骤

如图 6 所示,选择我国合肥市四月份的上午 9 时,晴天,温度大约为  $18\ ^\circ\text{C}$ ,以东、西两侧空旷,南、北两侧有房屋的室外区域为实验场地,把电热板水平放置于高  $0.5\ \text{m}$  的隔热平台上,把光子晶体薄膜(m1)、常规迷彩布(m2)和红外隐身涂层(m3)三种待测样品拼接并紧密贴在电热板表面,电热板表面

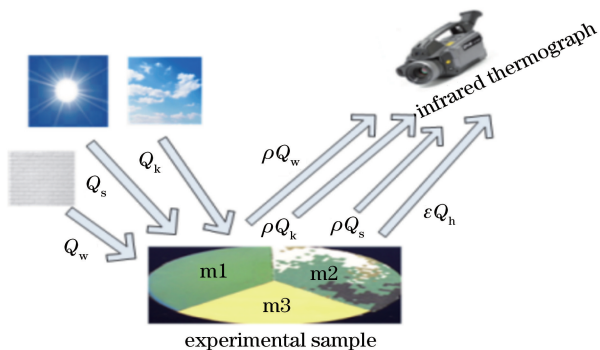


图 6 红外隐身特性测试实验模型

Fig. 6 Experimental model of testing infrared stealth characteristics

的温度设置并保持为  $60\ ^\circ\text{C}$ 。用中远红外热像仪,从东、南、西、北四个方位测量目标的辐射温度。观察点位于目标上方  $1.2\ \text{m}$ ,它与目标中心的连线和目标表面法线成  $60^\circ$  夹角。

电热板温度保持  $60\ ^\circ\text{C}$  是为了模拟目标内部热源,其能量可用  $Q_h$  表示。外部有三个主要的红外辐射源:天空、太阳和墙壁,提供的能量分别用  $Q_k$ 、 $Q_s$  和  $Q_w$  表示。假设样本表面的反射率为  $\rho$ ,发射率为  $\epsilon$ ,那么红外热像仪接收到的总辐射能量  $Q_{\text{all}}$  为

$$Q_{\text{all}} = \rho(Q_k + Q_s + Q_w) + \epsilon Q_h, \quad (9)$$

显然,总辐射能量  $Q_{\text{all}}$  是材料发射率和反射率的函数,当材料反射率较大且外部辐射较强时,外部辐射源的影响不可忽略。

#### 4.3 结果及分析

图 7 所示是上午 9 时中红外热像仪记录的热像图,观测方向分别是东、南、西、北(分别对应左上角字母 E,S,W,N 四个方向),图像辐射温度以灰度的高低表示,灰度越深,则温度越高。从图 7 可以看出,这三种材料在同一时刻和同一背景下,辐射温度各有不同。m1 和 m3 的辐射温度总是低于 m2 的辐射温度,其中 m1 的辐射温度最低。表 2 给出了三种样品在不同观测方向上中红外和远红外波段的辐射温度。值得注意的是,对比东、西观测方向的数据发现,从西侧观测时,三种材料的辐射温度都比从东侧观测的高一些,这是因为太阳位于东面,在西面的热像仪会接收到更多的样品所反射的辐射照度。图 7 左下角图中的光子晶体薄膜辐射温度较高,这是因为此时太阳与热像仪为镜像反射关系,高反射的光子晶体薄膜反射了更多的太阳辐照,导致这一区域亮度较大。但是,从整体上看,使太阳与热像仪恰好成为镜像反射关系的角度范围很小,一旦偏离镜像反射角,光子晶体薄膜的辐射温度仍然是最小的。这说明了在中红外波段,当高温热源与较强的太阳辐照同时存在时,光子晶体薄膜在绝大多数角度范围内的隐身性能优于红外隐身涂层和常规迷彩布。

图 8 所示是用远红外热像仪分别从东、西、南、北四个方向记录的热像图。与四张中红外热像图相似的是,光子晶体薄膜的辐射温度最低,红外隐身涂层次之,常规迷彩布最高;不同的是,在远红外波段,从东、西两侧观测,三种样品的辐射温度基本不变(见表 2)。这是因为,一方面,相对于中红外辐射量,太阳辐照中含有较少的远红外辐射量,另一方面,辐射源的温度决定了三种材料的远红外辐射量大于它们的中红外辐射量,使得太阳光对远红外隐



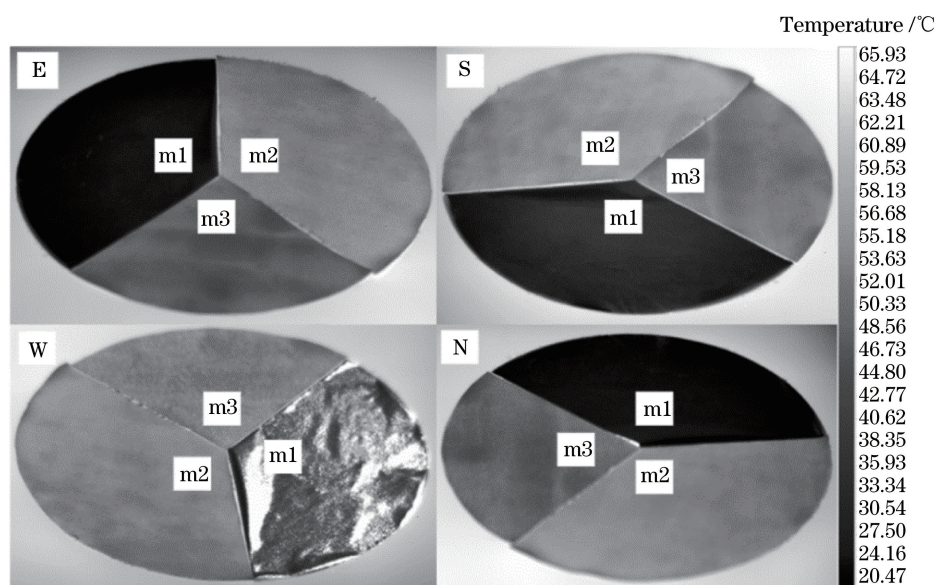


图 7 不同方向观察到的中红外热像图

Fig. 7 Mid-infrared thermograms along different observation directions

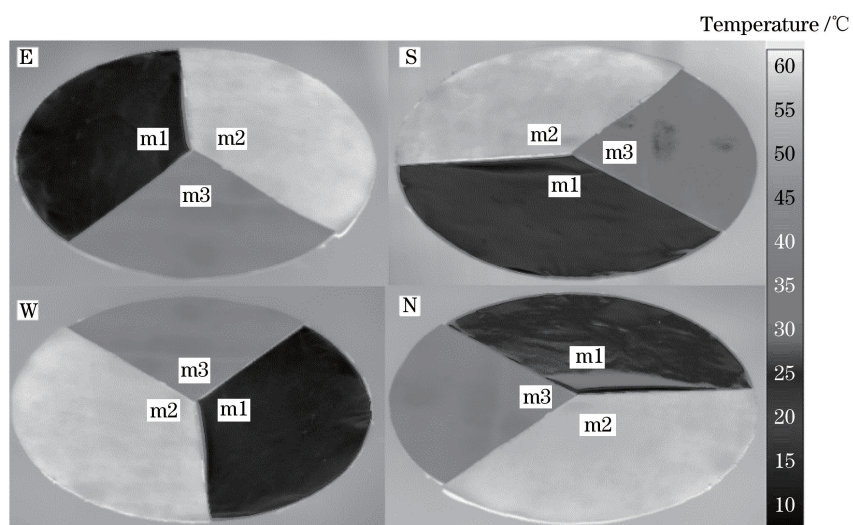


图 8 不同方向观察到的远红外热像图

Fig. 8 Far-infrared thermograms along different observation directions

表 2 四个方向的中、远红外热像图的辐射温度

Table 2 Radiation temperatures of mid- and far-infrared thermograms along four directions

Sample	Mid-infrared band				Far-infrared band			
	East	South	West	North	East	South	West	North
m1	24.5	28.8	34.5	25.1	9.01	33.1	10.7	21.8
m2	51.7	52.7	52.6	52.9	53.3	58.1	54.7	56.4
m3	47.1	47.4	51.7	46.7	35.6	42.8	37.2	39.2

身材料的影响不大。此外,从图 8 和表 2 可看出,南、北两侧的远红外辐射温度明显比东、西两侧的高,这是因为南北两侧的墙壁自身辐射的峰值位于远红外波段,位于南、北方向的远红外热像仪都能接收到对面墙壁的远红外辐射量。尽管如此,对于

60 °C 的目标,低发射率的光子晶体薄膜在远红外波段的降温效果最好。

以上结果与分析表明,光子晶体薄膜在远红外波段抑制目标红外辐射效果更明显,且其隐身效果受环境辐射的影响较小。相比较而言,在中红外波

段存在一个较小的角度范围,在该范围之内,光子晶体薄膜抑制红外发射的效果受太阳辐照的影响较为明显。这是由于光子晶体薄膜表面的颗粒尺度大于中红外波长,而与远红外波长相近似,故其对中红外是镜面反射,而对远红外是散射,从而形成了上述差异。在光子晶体的实际应用中,可以根据应用场景的不同而有选择地调整其表面颗粒度,即平整度,这样可以有效抑制外界辐射的不利影响。

## 5 结 论

利用传输矩阵法设计了一种在中、远红外双波段具有高反射率带隙特性的光子晶体膜系结构,并制备了微观结构和反射光谱特性都与理论设计相符的光子晶体样品。选择在中、远红外波段具有不同反射率的红外隐身涂层和常规迷彩布,与该光子晶体薄膜进行了对比实验。结果表明,在内部热源和外部环境辐射共同作用下,相对于红外隐身涂层和常规迷彩布,该光子晶体薄膜在远红外波段的辐射温度受太阳辐照的影响较小,其远红外波段的隐身效果最好;即使在特定的很小的角度范围内可以观察到太阳辐照的影响,光子晶体薄膜在中红外波段的隐身性能依然优于红外隐身涂层和常规迷彩布,具有明显的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang F Y, Zhou Y M, Sun Y Q, *et al.* Preparation and characterization of chitosan/konjac glucomannan/Cds nanocomposite film with low infrared emissivity[J]. *Materials Research Bulletin*, 2010, 45(7): 859-862.
- [2] Yu H J, Xu G Y, Shen X M, *et al.* Effect of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared emissivity coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009, 66(2): 161-166.
- [3] Yuan L, Weng X, Deng L. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 56: 25-29.
- [4] Li Y, Zhu H L, Zhang B Q, *et al.* Research status and development trend of stealth coating[J]. *Materials Review*, 2015, 29(S2): 358-360.
- [5] Zhao J Z, Wang D L, Peng R W, *et al.* Watching outside while under a carpet cloak of invisibility[J]. *Physical Review E*, 2011, 84(4): 046607.
- [6] Peng R W, Huang X Q, Qiu F, *et al.* Symmetry-induced perfect transmission of light waves in quasiperiodic dielectric multilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(17): 3063-3065.
- [7] Zhu Z H, Ye W M, Yuan X D, *et al.* Photonic crystal waveguide directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1237-1240.  
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东, 等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1237-1240.
- [8] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [9] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [10] Cornelius C M, Dowling J P. Modification of Planck blackbody radiation by photonic band-gap structures[J]. *Physical Review A*, 1999, 59(6): 4736.
- [11] Yu J, Shen Y, Liu X, *et al.* Absorption in one-dimensional metallic-dielectric photonic crystals[J]. *Journal of Physics Condensed Matter*, 2004, 16(7): L51.
- [12] Wang Z X, Cheng Y, Nie Y, *et al.* Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(5): 054905.
- [13] Zhang J K. One-dimensional photonic crystal with spectrally selective low infrared emissivity fabricated with Te and ZnSe[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 077110.
- [14] Zhang W F, Fang Q, Cheng Y H, *et al.* Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1695-1699.  
张文富, 方强, 程益华, 等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1695-1699.