

# 基于光子晶体的热红外迷彩

张继魁 赵大鹏 汪家春 王启超 李志刚 时家明

中国人民解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 低发射率光子晶体(PC)具有高反射特性,在高温环境的强烈照射下,高反射光子晶体会成为亮目标。为了使光子晶体具有环境适应性,使之在相当宽的照度范围内都能与背景融合,对光子晶体的特性进行了深入研究。采用改变光子晶体周期数的方法,设计并制作了发射率分别为0.116、0.212、0.307、0.519、0.606、0.718的6种光子晶体,拼接成4块光子晶体迷彩(PCpp),并将其覆盖在仿真目标上。用8~14  $\mu\text{m}$ 热像仪观察目标和背景,并记录各个时间点的平均辐射温度数据,利用辐射温度来计算目标和背景之间的欧式距离和目标在此背景下的伪装效率。对比结果发现,发射率为0.212、0.307和0.606的光子晶体迷彩在温度范围为292~302 K的条件下,该光子晶体迷彩的平均温度与草地背景温度的欧式距离为12.55 K,极限温差 $\Delta T_0$ 为4 K时的伪装效率为76.92%,能够使目标和背景很好地融合。

**关键词** 材料;光子晶体;发射率;热红外;迷彩

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1216001

## Thermal Infrared Pattern Painting Based on Photonic Crystals

Zhang Jikui Zhao Dapeng Wang Jiachun Wang Qichao Li Zhigang Shi Jiaming

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute of  
Chinese People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** Photonic crystals (PC) with low emissivity have high reflectance, and they will become bright targets under strong radiation from high temperature environment. Further researches on PC characteristics are made in order to let PC have adaptive capacity to environment and fuse with background well within a pretty broad luminance range. Six PCs, with emissivity of 0.116, 0.212, 0.307, 0.519, 0.606 and 0.718, are designed and made by the method of changing PC period. PCs are jointed into four PC pattern paintings (PCpp), and they are covered on the surface of simulation target. The target and background are observed by the 8~14  $\mu\text{m}$  thermal imager, and their mean radiant temperatures of each time point are recorded. Euclidean distance between target and background and camouflage efficiency of the target under this background are calculated by radiant temperature. Compared with the results, it is found that camouflage efficiency is 76.92%, when the temperatures of PCpp with emissivity of 0.212, 0.307 and 0.606 are in the range of 292~302 K, the Euclidean distance between the mean temperature of PCpp and the temperature of the grass background is 12.55 K, and the limit temperature difference  $\Delta T_0$  is 4 K, which can make the target and the background fuse well.

**Key words** materials; photonic crystals; emissivity; thermal infrared; pattern painting

**OCIS codes** 160.4760; 160.4670; 160.5298

## 1 引 言

光子晶体<sup>[1]</sup>(PC)材料又称为光子带隙(PBG)材料,指介电常数(折射率)周期性变化的材料。由于光子晶体具有光子带隙<sup>[2]</sup>和光子局域<sup>[3]</sup>两大优越特点,因此,其在发光二极管、多功能传感器、光通信、光开关、光子晶体激光器等现代高新技术领域有着广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。利用光子晶体进行红外伪装是其应用的重要方面,这涉及到光子晶体的光子带隙特征。由于介质层对光子的周期性调制,会使某段频率范围内的光子态密

收稿日期:2016-06-20;收到修改稿日期:2016-08-08

基金项目:国家863计划(2015AA0392)

作者简介:张继魁(1992—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: m17718130921@163.com

导师简介:时家明(1966—),男,博士,教授,主要从事红外等方面的研究。E-mail: sjmeei@yahoo.com.cn(通信联系人)

度为零<sup>[5]</sup>,这段频率范围称作光子带隙。在带隙频率范围内的光子,在光子晶体的某些方向上是不能传播的,这就大大增强了这段频率范围的反射率。在不考虑透射的情况下,反射率越大,吸收率越小,即光子晶体对该频率范围内光子的吸收占全部入射光子数的比例越小。发射率是指物体在指定温度下时的辐射量与同温度下黑体相应辐射量之比,由理想黑体的基尔霍夫定律<sup>[6]</sup>可知,吸收率在数值上是和发射率相等的,综上所述,反射率越大的波段对应的发射率也就越小。因此,光子晶体对频率落在其带隙内的电磁波具有低发射率。

目标与背景在热红外波段辐射差异主要是温度和发射率两个因素决定的。温度一般与物体本身的工作状态有关,很难进行人工控制,而各种物体的发射率则可以通过在表面覆盖人工涂层的方式进行调控<sup>[7]</sup>。运用低发射率的光子晶体可以抑制高温物体的热辐射,使其在低温背景下更难被发现,实现红外伪装。

但在实际应用时,由于背景的复杂性,伪装材料的发射率并不是越低越好,必须根据具体情况进行选择。例如,在晴天时,太阳和大气的热辐射会使具有低发射率特性的光子晶体温度升高,变成一个亮目标。单一发射率的光子晶体对样品进行伪装,不论发射率高低,效果都是有限的。因此在设计光子晶体进行红外伪装时,既要考虑目标自身的热辐射,也要顾及外界对目标的辐射照度,合理选取发射率,构成红外迷彩,既能够对目标红外热图像的分割,使目标的红外图像分割到难以分辨的程度,又能够使目标和背景实现融合。

## 2 理论基础

### 2.1 光子晶体理论

光子晶体是由 2 种或 3 种折射率不同的介质材料周期排列而成的,理论上光子晶体的周期是无限的,但是现实制作时可以人为调整其周期数,以达到人们期望的效果,图 1 中是 6 周期,2 种介质材料组成的光子晶体结构示意图。

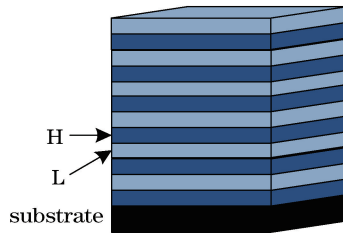


图 1 光子晶体结构模型

Fig. 1 Structural model of PC

图 1 中最下面的黑色部分是基底,它对电磁波的传播特性没有影响,只是起到承载光子晶体的作用;上面深蓝色和浅蓝色的 2 种色块分别代表高、低折射率的介质材料,它们周期性排列,对入射电磁波有调制作用。交替排列的介质材料可以视为一个个基本单元,电磁波在其中的传播可以等效为在若干个基本单元中传播的叠加,而每个基本单元都可以看作一个普通的双端口器件,它的传播特性采用一个  $2 \times 2$  复矩阵描述,整个结构的传播特性也可以采用一个  $2 \times 2$  的复矩阵进行表示,该矩阵为各单元矩阵的乘积。该方法称为传输矩阵法(TMM)<sup>[8]</sup>。

当横电(TE)[或横磁(TM)]波以角度  $\theta_0$  入射时,光子晶体中第  $k$  层材料的折射角  $\theta_k$  满足斯内尔折射定律,即

$$n_k \sin \theta_k = n_{k-1} \sin \theta_{k-1} = \dots = n_0 \sin \theta_0. \quad (1)$$

其特征矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \cos \delta_k & j \frac{\sin \delta_k}{\eta_k} \\ j \eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中

$$\delta_k = 2\pi\lambda^{-1} n_k d_k \cos \theta_k, \quad (3)$$

$$\eta_k = \begin{cases} n_k / \cos \theta_k, & \text{TM} \\ n_k \cdot \cos \theta_k, & \text{TE} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $\eta_k$  和  $d_k$  分别为第  $k$  层材料的折射率和几何厚度。此时, 光子晶体总的传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \prod_{k=1}^N \mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由此可以得到反射率  $R$  的表达式为

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

透射率  $T$  的表达式为

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

## 2.2 辐射温度与真实温度以及发射率之间的关系

辐射源单位面积向半球空间内辐射的功率, 称为辐射出射度, 用来表示物体的辐射本领。目标处于户外环境中, 其红外辐射特征不仅包含自身的辐射, 还包括自身对环境辐射的反射。另外, 由于地面目标的温度大多不超过  $100^\circ\text{C}$ , 其红外辐射的峰值波长为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ , 所以针对地面目标的红外探测器的工作波段一般也为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>, 则根据普朗克公式<sup>[6]</sup>, 目标在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  的有效辐射出射度可以表示为

$$M_{\text{tiff}} = \epsilon_t \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_t}\right) - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_t) E_0 = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{\text{tr}}}\right) - 1} d\lambda, \quad (8)$$

式中,  $\epsilon_t$  为目标在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  的平均发射率,  $c_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8\ \text{W} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $c_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ,  $E_0$  为目标单位面积接收的处在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段内的辐射功率, 称为辐射照度, 包括太阳的辐射照度和大气辐射照度,  $T_t$  是目标的真实温度,  $T_{\text{tr}}$  是目标的辐射温度, 其用与目标有相同辐射出射度的黑体真实温度来表征。同样地, 背景的有效辐射出射度为

$$M_{\text{biff}} = \epsilon_b \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_b) E_0 = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{\text{br}}}\right) - 1} d\lambda, \quad (9)$$

式中  $\epsilon_b$  为背景在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  的平均发射率,  $T_b$  是背景的真实温度,  $T_{\text{br}}$  是背景的辐射温度, 同样地, 其用与背景有相同辐射出射度的黑体真实温度来表征。一般来说, 目标和背景的辐射温度之差越小, 融合效果越好。

## 2.3 伪装效果的评判标准

为了使伪装效果有一个量化的标准, 引入了欧氏距离  $L$ <sup>[10]</sup> 和伪装效率  $\eta$ <sup>[11]</sup>, 它们在表征伪装效果时各有其优势。欧氏距离  $L$  表示目标和植被背景辐射温度的接近程度, 若  $L$  越小, 则说明目标和背景的辐射温度越接近。欧氏距离可以表示为

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{ti} - T_{bi})^2}, \quad (10)$$

式中,  $T_{ti}$  和  $T_{bi}$  分别表示目标和背景在不同时刻的辐射温度,  $n$  表示温度的取样数。

伪装效率  $\eta$  则是另一个对目标红外隐身效果评估的量化指标, 其定义为在一定时间内伪装目标与背景的辐射温差小于一定温差  $\Delta T_R$  所占的时间百分比, 即

$$\eta = \frac{(\Delta T_R \parallel \Delta T_R \leq \Delta T_0)}{n} \times 100\%, \quad (11)$$

式中,  $\Delta T_R$  为目标与背景的辐射温差,  $n$  为温度的取样数,  $\Delta T_0$  为实现伪装的极限温差。根据有关标准的要求,  $\Delta T_0$  可以取  $4, 7, 10\ \text{K}$  3 个不同等级, 如果超出这一数值, 则可以认为在这种要求下, 目标没有达到伪装效果。显然  $\Delta T_0$  取值越小, 所达到的伪装效果越好。

### 3 设计与实验

理想的光子晶体周期数是无限大的,但是实际制备出来的光子晶体都是有限周期数的,因此实际光子晶体的带隙也不是严格意义上的全反射带,它的反射率会随着周期数的减少而降低<sup>[12]</sup>,这就为不同发射率光子晶体的设计提供了基础。

图 2 和图 3 分别展示了 8 个周期和 4 个周期的光子晶体的反射光谱曲线,可以看出,在 8~14  $\mu\text{m}$  波段范围内,8 周期光子晶体在带隙(8~14  $\mu\text{m}$ )范围内反射率为 1,而且带隙边界十分陡峭,与理想光子晶体带隙很接近,据此可以设计低发射率的光子晶体;反观 4 周期光子晶体,其在 8~14  $\mu\text{m}$  波段范围内的反射率整体降低,而且长波处的反射率下降得更多,14  $\mu\text{m}$  波长处的反射率已经低至 0.24,带隙边界走势趋缓,带隙特征不再明显,带隙内的平均发射率也降低,这使得高发射率光子晶体的制备成为可能。

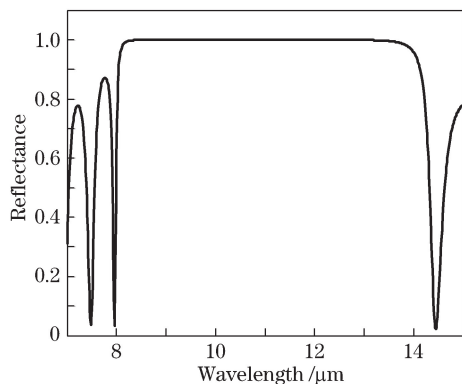


图 2 8 周期光子晶体反射率曲线

Fig. 2 Reflectivity curve of 8 periods PC

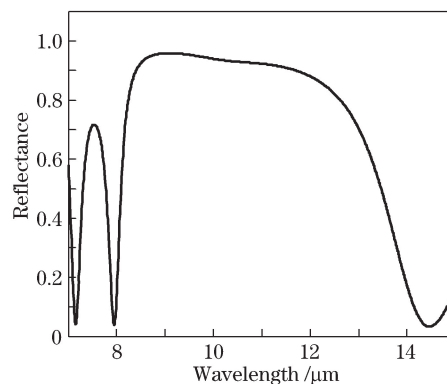


图 3 4 周期光子晶体反射率曲线

Fig. 3 Reflectivity curve of 4 periods PC

为了实现外界不同照度下的红外伪装,设计了 4 块由 3 种发射率光子晶体组成的光子晶体迷彩,不同发射率光子晶体面积相等,发射率呈梯级分布。为了在可见光波段也有一定的迷彩效果,每块光子晶体的颜色也有所不同。

由图 4 可知,光子晶体迷彩由绿、黄、灰 3 种颜色的斑块构成,放在复杂背景中,会对可见光目标具有一定的图像分割功能,图 5 是在外界热辐射比较低的情况下,对覆盖有该种迷彩的目标加热的情形,从图 5 可以看出,裸露的被加热目标温度达到 68  $^{\circ}\text{C}$ ,而光子晶体迷彩由于发射率比较低,在高温背景中显示出非常清晰的轮廓,而且不同发射率之间的光子晶体辐射温度也明显不同。绿色斑块温度最低,为 31.6  $^{\circ}\text{C}$ ;黄色光子晶体次之,为 42.2  $^{\circ}\text{C}$ ;发射率最高的灰色光子晶体辐射温度最高,为 49.1  $^{\circ}\text{C}$ 。这种表观温度的不同会使一些热目标的特征红外图像变形,甚至达到难以辨认的程度。由图 5 也可以看出,低发射率(高反射率)光子晶体对环境的反射不强,与左上角未加热部分温度相近。



图 4 光子晶体迷彩可见光图

Fig. 4 Visible light picture of PCpp



图 5 光子晶体迷彩红外热像图

Fig. 5 Infrared thermal picture of PCpp

为了探索最佳发射率值,根据伪装效率和发射率的关系<sup>[13]</sup>,制作了 4 块光子晶体迷彩,分别命名为 A、B、C、D,每块迷彩的发射率取值如表 1 所示。

表 1 4 种光子晶体迷彩的发射率  
Table 1 Emissivity of four kinds of PCpp

PCpp	High emissivity	Middle emissivity	Low emissivity
A	0.307	0.212	0.116
B	0.519	0.307	0.116
C	0.606	0.307	0.212
D	0.718	0.519	0.307

选取我国南方夏季环境作为实验背景,最高温度 302 K,最低温度 292 K,用加热器对覆盖有光子晶体迷彩的金属板进行加热,模拟处于工作状态下的目标,由于坦克、装甲步兵车等重要地面机动目标在运动状态下,排气口附近区域能达到 60~100 °C 以上,因此取目标温度 80 °C,背景温度随外界照度的变化而变化。用 8~14 μm 红外热像仪记录从早上 6 时到晚上 18 时的光子晶体迷彩平均辐射温度及背景温度,为了使测得的温度更加直观地表示伪装效果,制作了温度变化折线图,如图 6 和图 7 所示。

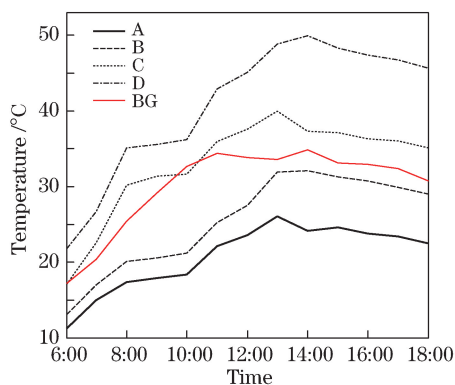


图 6 以草地为背景的温度曲线

Fig. 6 Temperature curves with grass background

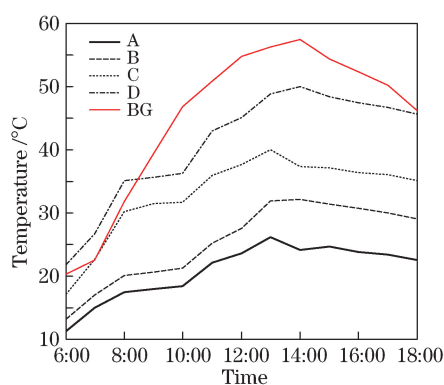


图 7 以砂砾为背景的温度曲线

Fig. 7 Temperature curves with gravel background

## 4 分 析

图 6 和图 7 基于辐射温度这一物理量,展现了不同时刻、不同光子晶体迷彩和背景的温度变化以及之间的接近程度(用  $L$  和  $\eta$  表示)。接近的程度与伪装效果直接相关,光子晶体迷彩和背景辐射温度在变化过程中越接近,说明目标的融合效果越好,也就代表该光子晶体迷彩的伪装效果越好;反之,如果光子晶体迷彩和背景辐射温度在变化过程中相差越大,则表明该光子晶体迷彩的伪装效果越差。图 6 展示的是 4 块光子晶体迷彩和草地背景的温度折线图,可以看出,温度大致呈先上升后下降的趋势,在中午 13 时左右达到最高点,随后开始缓慢下降,与一天中的温度变化趋势吻合。用不同的线型表示 4 种光子晶体迷彩和背景(图 6 中红色细线表示,下同),在一天当中,光子晶体迷彩 D 温度最高,最高时达到 49.9 °C,与背景温差较大,欧式距离为 41.66 °C,在 4 块光子晶体迷彩中最高;考虑伪装效率,当极限温差  $\Delta T_0$  为 4 K 时,伪装效率为 0,7 K 时为 30.76%,10 K 时为 46.15%;光子晶体迷彩 A 温度最低,即使在中午 13 点温度和光照度最高的时刻也才 26.1 °C,与背景曲线同样距离较远,欧式距离为 34.34 °C,极限温差  $\Delta T_0$  为 4 K 时,伪装效率为 0,10 K 时为 61.53%;相对来说,B 和 C 与背景曲线比较接近,光子晶体迷彩 C 甚至与背景曲线有交叉,B 和 C 的欧式距离分别为 20.3 °C 和 12.55 °C,当极限温差  $\Delta T_0$  分别取 4,7,10 K 时,B 的伪装效率分别是 53.84%,76.92%和 92.3%,而 C 的伪装效率分别是 76.92%,100%和 100%,从欧式距离和伪装效率这 2 个指标来看,C 都要优于 B,而且 C 在极限温差  $\Delta T_0$  取最低的情况下,仍然能够达到 76.92%的伪装效率。综合看来,在温度变化 19~28 °C,光照度范围 410~816  $W \cdot m^{-2}$  环境下,应该选取光子晶体 C 作为地面机动车辆的伪装迷彩。

在同样的条件下,测定一天当中砂砾背景的温度,与图 5 中的 4 块光子晶体迷彩温度结合,制作了图 7 所示的折线图。从图 7 可以看出,砂砾背景的温度也是呈先上升后下降的趋势,但是与草地背景相比,它的

变化更加明显,线型更加陡峭,变化范围也更大,这是因为草地是有生命的有机体,其对温度变化有一定的适应能力。与背景曲线最接近的D的欧式距离为22.26℃,相差较大;取极限温差 $\Delta T_0$ 最大时,A、B、C、D4块光子晶体迷彩的伪装效率分别为23.07%、15.38%、30.76%和92.3%,这说明即使是允许存在10℃的温差,也不能实现对砂砾背景的完全伪装。

从图6与图7的对比当中可以得知,背景不同时,光子晶体迷彩的发射率也要做相应的调整。

## 5 结 论

针对恒温目标在不同温度下的伪装效果做了探讨性研究,设计并制作了4块光子晶体迷彩,通过对目标和背景的欧式距离以及目标在特定背景下的伪装效率的分析比较后发现,发射率分别为0.212、0.307和0.606的光子晶体迷彩,极限温差 $\Delta T_0$ 取最低时,一天当中伪装效率能达到76.92%,当 $\Delta T_0$ 取7K和10K时,伪装效率能达到100%,实现完全伪装;当把背景换成砂砾后,这4种光子晶体迷彩的欧式距离最短为22.26℃,极限温差 $\Delta T_0$ 取10K时,最大伪装效率为92.3%,伪装效果大幅下降,说明背景对光子晶体发射率的选取至关重要。

## 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 Fink Y, Winn J N, Fan S, *et al.* A dielectric omnidirectional reflector[J]. Science, 1998, 28(2): 1679-1682.
- 3 Wiersma D S, Bartolini P, Lagendijk A, *et al.* Localization of light in a disordered medium [J]. Nature, 1997, 390(6661): 671-673.
- 4 Bayindir M, Tanriseven S, Ozbay E. Propagation of light through localized coupled-cavity modes in one-dimensional photonic band-gap structures[J]. Appl Phys A, 2001, 72(1): 117-119.
- 5 Sakoda K. Optical properties of photonic crystals[M]. Beijing: Beijing World Publishing Corporation, 2013: 1-2.  
迫 田. 光子晶体的光学性质[M]. 北京: 世界图书出版公司北京公司, 2013: 1-2.
- 6 Zhang Jianqi, Fang Xiaopin. Infrared physics[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2007: 115-124.  
张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 115-124.
- 7 Luo Zhiyong. The theory study on radiance coefficient of infrared coating[J]. Infrared Technology, 2000, 22(5): 23-25.  
罗志勇. 红外涂层发射率的理论研究[J]. 红外技术, 2000, 22(5): 23-25.
- 8 Liu Qineng. A new method for bandgap study of one-dimensional photonic crystal[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(4): 531-532.  
刘启能. 一种研究一维光子晶体能带的新方法[J]. 半导体光电, 2008, 29(4): 531-532.
- 9 Chen Yongfu. Infrared radiation infrared devices and typical applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 1-227.  
陈永甫. 红外辐射红外器件与典型应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 1-227.
- 10 Wu Guofu, An Wanfu, Liu Jinghai. Methods of practical data analysis[M]. Beijing: China Statistics Press, 1992: 1-324.  
吴国富, 安万富, 刘景海. 实用数据分析方法[M]. 北京: 中国统计出版社, 1992: 1-324.
- 11 Jacobs P A. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds[M]. Wu Wenjian, Hu Biru, Transl. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 186-206.  
雅各布斯. 地面目标和背景的热红外特性[M]. 吴文建, 胡碧茹, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004: 186-206.
- 12 Cheng Yang. Effects of basic period of one-dimensional holographic photonic crystals on photonic band gap[J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(1): 38-40.  
程 阳. 一维全息光子晶体基本周期对光子禁带的影响[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 38-40.
- 13 Yu Dabin, Tang Kun, Zou Jiwei, *et al.* Effect of infrared emissivity of coatings on the camouflage effectiveness of targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 195-197.  
余大斌, 唐 坤, 邹继伟, 等. 红外迷彩伪装涂料发射率对目标伪装效率的影响[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 195-197.