

Preparation and Performance Analysis of Periodic Nanostructure Infrared Stealth Material

Hui Yang¹, Wei Xie¹, Shuan-qin Zhang¹, Jia-liang Pan^{1,2}

¹The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department, Wuxi, China, 214035

²Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing, China, 210007

Email: interfigo@sina.com

Abstract: In this paper, periodic nanostructure material is proposed to suppress the infrared radiation characteristic of target with higher surface temperature. Periodic nanostructure material has the properties of low emissivity within the 8~14μm band and high transmission. In the working condition the thermal energy of the target can be released by using periodic nanostructure material. Physical vapor deposition method is used to fabricate periodic nanostructure materials on the surface of SiC. The emission rate test shows that periodic nanostructure material can effectively suppress infrared radiation within the 8~14μm band and don't change the radiation outside the 8~14μm band. In the further application of the experiment, fabricate periodic nanostructure on the surface of an ordinary cloth material. Through the experiment, which verify the effect of the infrared suppression of periodic nanostructure material, show that when the actual temperature of the cloth surface is 100°C, the infrared radiation temperature is 40°C.

Keywords: infrared stealth; periodic nanostructure

纳米周期结构红外隐身材料的制备及性能分析

杨辉¹, 谢卫¹, 张拴勤¹, 潘家亮^{1,2}

¹总装工程兵科研一所, 无锡, 中国, 214035

²解放军理工大学工程兵工程学院, 南京, 中国, 210007

Email: interfigo@sina.com

摘要: 本文针对热目标的红外隐身难题, 提出采用纳米周期结构材料调控目标的红外辐射特性, 实现目标在 8~14μm 波段的辐射抑制和 8~14μm 波段以外的辐射透过, 使目标热源处在工作状态下热能得到释放, 而红外辐射能量却相对较低, 达到红外隐身的目的。采用真空蒸发镀膜方法制备原理验证样品, 在 SiC 表面制备了纳米周期结构材料, 通过发射率测试表明其很好的抑制了 8~14μm 波段的红外辐射, 而在 8~14μm 波段以外是辐射透过的。在进一步应用实验中, 在普通布料表面制备了纳米周期结构材料, 通过实验验证了材料的红外抑制效果: 当布料表面实际温度为 100°C 时, 辐射温度为 40°C。

关键词: 红外隐身; 纳米周期结构

1 引言

红外隐身技术是对抗红外探测手段的一项综合技术, 通过采用一系列技术方法, 降低军事目标的红外热辐射, 减少被敌方红外探测器发现的概率, 达到保存自己, 消灭敌人的目的。目标与背景均有红外辐射, 它们红外辐射能量的差别是红外探测的基本依据, 而红外隐身技术正是致力于降低或消除这种辐射差别。对有源目标来说, 热源处在工作状态下温度不可能降得很低, 涂覆低发射率的涂料和使用隔热材料一定程度上可以起

到抑制热源红外辐射的作用。但是由于目标在工作状态下, 热源散发大量的热量, 而低发射率的涂料通常在全波段范围内发射率都较低, 容易造成热源处热量的积累。隔热材料的使用同样会产生这个问题, 可能会因为热源在工作过程中, 由于热量不能有效地散发出去, 而导致热量积累超过了装备工作的温区, 影响装备的正常工作。

本文采用纳米周期结构材料来实施红外隐身, 一方面能够有效的降低在红外探测器工作波段 (8~14μm) 范围内的辐射功率, 另一方面又能确保热量从 8~14μm 以外的波段辐射出去, 避免热量的积累。本文针对纳米

周期结构材料的特点,提出了其应用于红外隐身的可行性。

2 理论分析

纳米周期结构材料是一种折射率周期性变化的人工光学材料,这个折射率变化的周期与波长有着相同的数量级,当光在这种介质中传播时,某些频率范围内的光会受到抑制,形成光子禁带^[1]。多层纳米复合结构材料是由于周期势场作用,在半导体材料中电子会形成能带结构,带与带之间可能存在能隙。将具有不同折射系数的介质在空间按周期排列,当空间周期与光波长相当时,由于布拉格散射,该体系将会在一定频率范围内产生光子禁带,如果光子的能量落入光子禁带光谱范围内,就不能在介质中传播。利用纳米周期结构材料,可以使材料的发射率在特定波段内达到较低值,或者抑制材料在特定波段内的辐射,破坏物体原来的红外特征,使物体在红外探测中不易被发现,这些方法可以达到红外隐身的目的^[2-3]。

纳米周期结构辐射抑制是指通过纳米栅格结构或多层纳米复合结构材料调整材料固有的辐射特性,实现相干发射现象,改变材料在特定波段和特定方向上的发射率,使人们可以根据应用的需要来调整体系参数,人为地控制材料的辐射特性^[4-11]。通过纳米结构对材料辐射特性的改变,使材料的发射率在特定波段出现较低值,或者抑制材料在较宽波段内的发射。因此通过对材料进行纳米尺度的结构调控,可实现其在红外探测器工作波段(8~14 μm)的红外辐射抑制特征,而在其外具有高度透过的特性。

3 材料制备及分析

采用真空蒸发法在 SiC 平整基底表面制备纳米周期结构材料。采用 $A(L^1H^1)s^1|(L^2H^2)s^2|B$ 的结构,其中, A 表示空气, B 表示基底;膜系 1 禁带中心波长 $\lambda_1=10.0\mu\text{m}$,膜系 2 禁带中心波长为 $\lambda_2=4.0\mu\text{m}$; s_1 与 s_2 表示周期数, $s_1=s_2=5$;高低折射率介质分别采用 Ge 及 ZnS。图 1 为以 SiC 为基底制备的纳米周期结构材料的可见光照片。可以看出,样品在 SiC 平整基底表面上,可见光透明性很好,基本和 SiC 平整基底表面的颜色一致。

采用 Bruke 公司的 EQUINOX55 型傅立叶变换红外光谱仪(积分球附件为 A562),测定了其光谱半球向反射率 ρ ,发射率 $\epsilon=1-\rho$,如图 2:



Fig1 the sample of preparation of periodic nanostructure material on the surface of SiC

图 1 SiC 表面制备纳米周期结构材料的样品

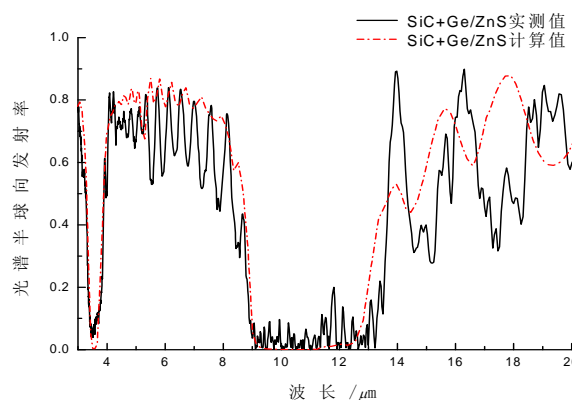


Fig2 comparison of tested ϵ to calculated ϵ of surface

图 2 组合表面的光谱半球向发射率 ϵ 实测值与计算值比较

通过图 2 可以看出,在 SiC 表面制备了纳米周期结构材料后,实际测试的光谱半球向反射率与理论计算结果是很吻合的,验证了理论模型的准确性。

4 红外抑制效果实验

通过以上研究,验证了纳米周期结构材料运用于红外隐身的作用,考虑到实际应用的可行性,选择了以普通的基础布为基底,使用真空蒸发镀膜的方法在其表面制备了纳米周期结构材料,并进行了可行性实验。

4.1 实验设计

通过使用相同的条件对普通基础布和镀膜后的基础布进行加热,通过分析其温度特性和辐射特性,表征纳米周期结构材料在 8~14 μm 波段范围内的辐射抑制效能。

4.2 实验说明:

实验台上水平放置 2 个样品, 采用相同规格的加热片在底部加热。左面的样品 A 为加热片上面覆盖普通基础布+纳米周期结构材料 (pc 材料), 右面的样品 B 为加热片上面覆盖普通基础布。通过交变电源进行加热, 使得两个样品中的加热片温度从室温升高到 100 摄氏度左右。采用型号为 HY6850 的红外热像仪(工作波段为 8~14 μm)分别在不同温度时拍摄了热图, 并进行了比较。利用热电偶分别对样品 A 中的 pc 表面、样品 A 中的加热片、样品 B 中的加热片进行了温度的测量。

4.3 实验结果:

图 3~图 8 给出了样品 A、B 在加热片不同温度下的热图照片:

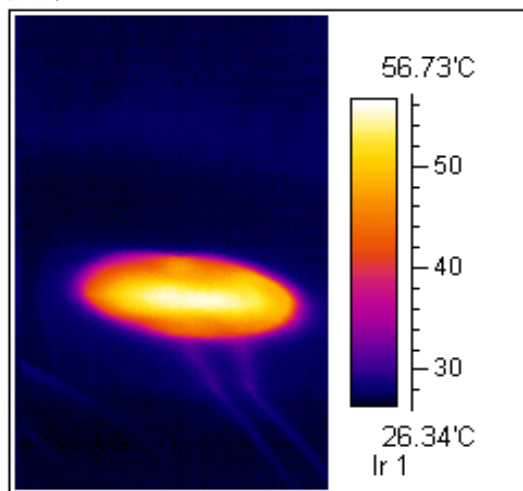


Fig3 60°C heating plate of sample B
图 3 样品 B 中加热片温度为 60°C

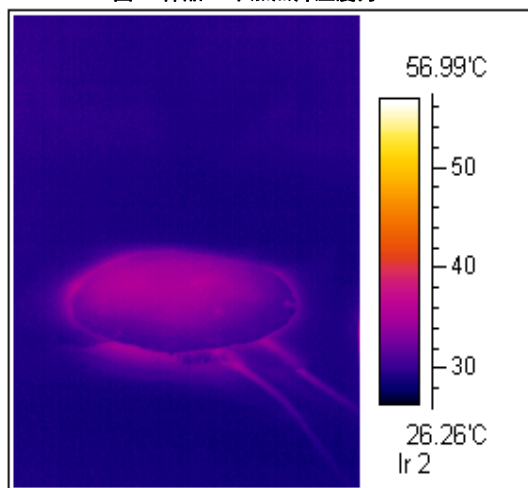


Fig4 60°C heating plate of sample A
图 4 样品 A 中加热片温度为 60°C

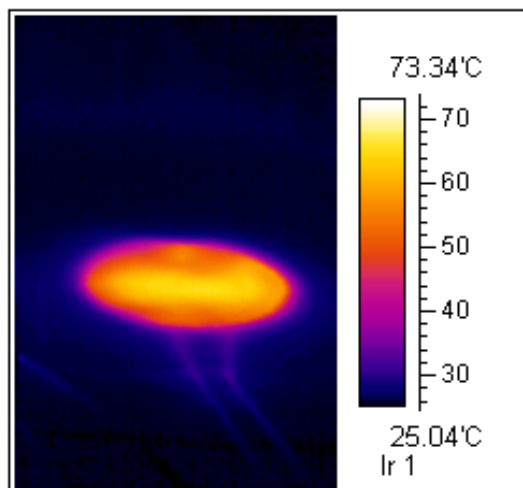


Fig5 80°C heating plate of sample B
图 5 样品 B 中加热片温度为 80°C

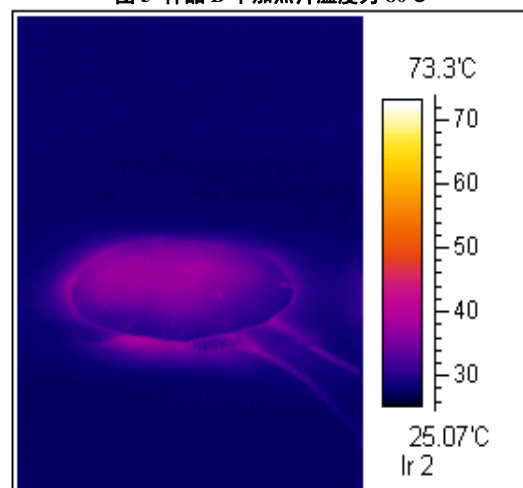


Fig6 80°C heating plate of sample A
图 6 样品 A 中加热片温度为 80°C

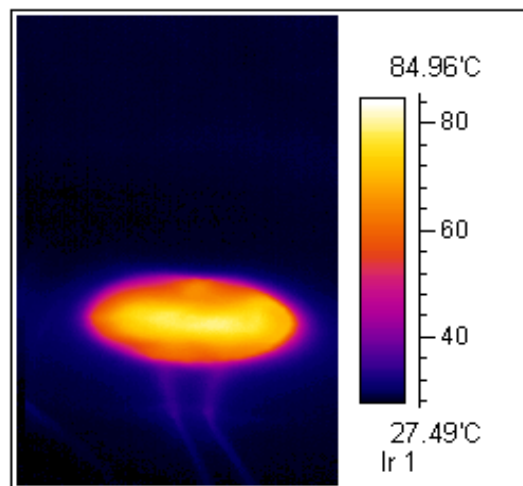


Fig7 100°C heating plate of sample B
图 7 样品 B 中加热片温度为 100°C

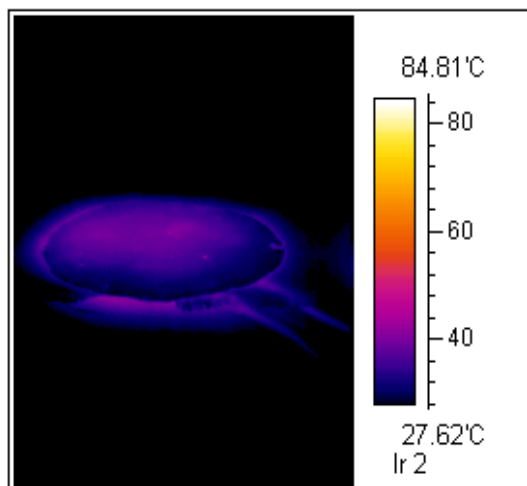


Fig8 100°C heating plate of sample A
图 8 样品 A 中加热片温度为 100°C

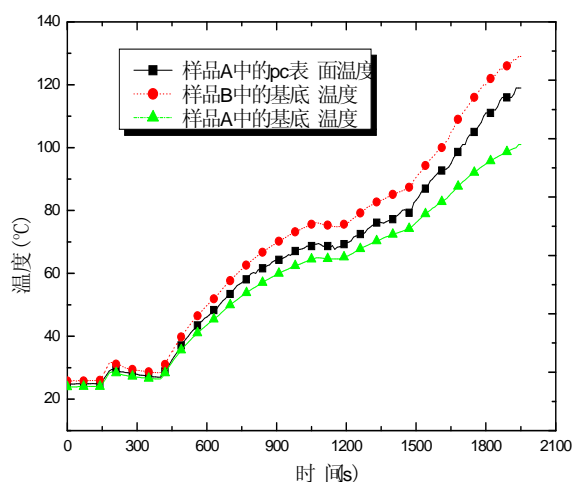


Fig9 changes of surface temperature with time
图 9 各个表面温度随时间的变化

通过对以上各相同温度时刻的样品 A 与样品 B 的热图进行比较,发现当加热片温度相同时,样品 A 的热图中显示的温度要低于样品 B,从而可以较为直观地看出加入了纳米周期结构材料后在红外探测器工作波段 8~14 μm 范围对目标的红外辐射抑制作用,达到隐真的目的。

图 9 表示的是所测得的各表面温度随时间的变化。

5 结论

本文理论分析了纳米周期结构材料调控辐射特性的特点,通过具体的材料制备进行了光谱半球向反射率测试,很好的验证了其在 8~14 μm 波段的辐射抑制和 8~14 μm 波段以外的辐射透过特性。在实际应用的可行性实验中表明,将制备了纳米周期结构材料的基础布温度升到 100°C 时,利用热像仪(工作波段为 8~14 μm)测得的辐射温度为 40°C,很好的起到了红外抑制的隐身效果。因此将纳米周期结构材料应用于红外隐身是非常有效可行的。

References (参考文献)

- [1] Rongchuan Fang, Spectroscopy of Solid [M], Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.
方容川.固体光谱学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [2] Liubi Liu, Jiaming Shi, A Kind of Infrared Camouflage Material Based on Photonic Crystals [J], Infrared Technology, 2008, 30(9): 512-515.
刘必臻,时家明等.一种基于光子晶体的红外伪装材料[J].红外技术,2008,30(9):512-515.
- [3] Dapeng Zhao, Jiaming Shi, Study on the Spectrum of the One-dimensional Metallo-dielectric Photonic Crystal [J], Laser & Infrared, 2008, 38(7): 688-691.
赵大鹏,时家明等.一维金属-介质光子晶体光谱特性研究[J].激光与红外,2008,38(7): 688-691.
- [4] E.R. Brown, C.D. Parker, and E. Yablonovitch, Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate, Opt. Soc. Am, 1993, 10(2):404-407.
- [5] A. Mekis et al., High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides, Phys. Rev. Lett.,1996, 77(18): 3787-3790.
- [6] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, Photonic crystals: putting a new twist on light, Nature, 1997, 386(6621): 143-149.
- [7] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, et al., Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. Science, 1999, 284 (5421):1819-1821.
- [8] S. Noda, A. Chutinan, M. Imada, et. al., Trapping and emission of photons by a single defect in photonic bandgap structure, Nature, 2000, 407(6804): 608-610.
- [9] D. Scymgeour, N. Malkova, S. Kim, et al, Electro-optic control of the superprism effect in photonic crystals, Appl. Phys. Lett., 2003, 82(19): 3176-3178.
- [10] E. Ward, D. Palik. Handbook of optical Constants of Solid [M]. Orlando: Academic Press, 1985.
- [11] E. Shiles, Taizo Sasaki, Motio Inokuti and D. Y. Smith. Self-consistency and sum-rule tests in the Kramers-Kronig analysis of optical data: Applications to aluminium [J]. Phys. Rev. B, 1980.