

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202501009

碳化硅-金属四层膜结构的红外隐身性能研究

张明娣, 高海军, 罗李娜, 钟宇浩, 杨志勇

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为探索结构和制备工艺简单、成本低的高性能红外隐身材料, 在对碳化硅-金属四层膜结构进行理论研究的基础上, 分析了法布里-帕罗谐振腔 (Fabry-Perot Cavity, F-P 腔) 对红外发射率的影响。设计了基于 SiC 薄膜和金属 Ag 薄膜的四层膜结构, 并采用 FDTD Solutions 软件仿真了该结构的红外发射光谱。结果表明: 该结构在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段内, 红外发射率显著降低, 单个波长的红外发射率最高仅为 0.18 和 0.07, 在共振波长 4.3 μm 和 8 μm 处, 发射率分别降低了 85% 和 46%; 为降低加工成本, 采用 Fe 和 Cu 对特定 Ag 层进行替换后, 其红外发射率变化不明显。采用磁控溅射方法对该结构进行了制备, 与对照组进行对比发现, 该结构具有显著的低红外发射特征。

关键词: 红外隐身; 多层膜; F-P 共振腔; 碳化硅; 金属

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)01-076-08



听语音
与作者
聊科研

Infrared Stealth Performance of a Four-layer Silicon Carbide Metal Film Structure

ZHANG Mingdi, GAO Haijun, LUO Lina,

ZHONG Yuhao, YANG Zhiyong

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: To explore high-performance infrared stealth materials with a simple structure, simple preparation process, and low cost, the influence of an Fabry-Perot cavity (F-P) resonator on infrared emissivity was analyzed based on theoretical research on a four-layer silicon carbide metal film structure. Accordingly, a four-layer film structure based on a ceramic silicon carbide and silver metal films was designed. Furthermore, infrared emission spectroscopy of the proposed structure was simulated using the FDTD solution software. Results showed that the infrared emissivity of the structure significantly decreases in the 3~5 μm and 8~14 μm bands, with the highest infrared emissivity of a single wavelength being only 0.18 and 0.07 respectively. While at resonant wavelength of 4.3 μm and 8 μm , the emissivity decreases by 85% and 46% respectively. To reduce processing costs, replacing the specific silver layer with an iron or copper layer

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2023-JC-QN-0089)

第一作者: 张明娣 (1990—), 女, 讲师, 博士, 主要从事光场调控及探测研究。E-mail: zhangmingdi0816@163.com

引用格式: 张明娣, 高海军, 罗李娜, 等. 碳化硅-金属四层膜结构的红外隐身性能研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (1): 76-83. ZHANG Mingdi, GAO Haijun, LUO Lina, et al. Infrared stealth performance of a four-layer silicon carbide metal film structure[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (1): 76-83.

does not result in significant changes in the infrared emissivity. The structure is prepared by the magnetron sputtering method, and it has remarkably low infrared emission characteristics compared with those of the control group.

KEYWORDS: infrared stealth; multilayer film; F-P resonator; silicon carbide; metal

红外侦察探测技术的飞速发展给与之对抗的红外隐身技术提出了更高的要求。由于大气对红外波段中 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段的吸收率很低, 因此, 目前广泛使用的红外探测器主要在这两个波段。要实现红外隐身, 就需要降低目标在这两个波段的红外吸收率或者红外发射率^[1-2]。

调控红外发射率的方法有多种, 光子晶体作为一种新型的人工周期结构功能材料, 在雷达波段具有高透射率。其与雷达吸波材料相结合, 利用光谱挖孔原理以及准周期结构叠加等方式, 可同时实现对可见光、红外、激光及雷达多波段兼容隐身, 是目前实现红外隐身的常用方法。Zhang 等^[3]制备了 Ge、ZnSe 和 Si 组成的十二层膜一维光子晶体结构, 该结构在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段具有高达 89.5% 的平均反射率。Wang 等^[4]制备了由 SiO_2 、 TiO_2 和 Ge 3 种耐高温材料组成的十二层膜一维光子晶体结构, 该结构在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 2 个波段的红外发射率分别低至 0.14 和 0.21。这些光子晶体之所以可以调控光谱, 是因为其具有显著的禁带特性, 当电磁波的频率落入光子禁带时, 电磁波无法在结构中传播。但是, 这些光子晶体结构的层数多且厚, 高温下会发生膜层脱落现象, 且适用温度不高, 实际使用价值较低。超表面因其结构简单、尺寸小、损耗低、易集成等优点, 引起了红外隐身领域研究者的关注。作为二维超材料, 超表面的几何结构和周期尺寸与其对入射电磁波的响应高度相关, 使得波的振幅、相位和偏振可以通过自由变化的超表面设计来控制。Lee 等^[5]结合电子束蒸发和光刻技术在硅衬底上制备了由 Au 薄膜、ZnS 薄膜和 Au 圆盘组成的三层结构, 该结构具有优异的红外隐身性能。Kim 等^[6]设计了由 Ag 薄膜、PI 薄膜和 Ag 圆形环盘结构组成的三层结构, 该结构可将 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 2 个波段的红外发射抑制 92% 以上, 其隐身性能得益于金属-介质-金属超表面结构中产生的表面等离子体共振和磁共振。但是这些超表面加工复杂、成本高, 对于工程应用存在诸多限制。

与光子晶体和超表面相比, 介质-金属多层膜结构简单且加工难度低, 结合特殊性质的材料,

可设计出性能优异的红外隐身结构, 具备一定的实用性^[7]。Peng 等^[8-10]制备了一种由介质 Ge 和金属 Ag 组成的四层膜结构, 基于超薄金属薄膜和阻抗匹配实现了 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 2 个波段的低红外发射率。单文涵等^[11]利用相同的原理设计了由介质 Si 和 Ge 结合不同金属薄膜的四层膜结构, 也实现了 2 个红外波段的低发射率。但是 Ge、Si 等单晶半导体材料机械性能较差, 难以满足需要高硬度、高抗拉、高抗弯能力的应用场景。因此, 探索新型材料与金属组合的简单多层膜结构, 研究其红外隐身性能及红外发射调控机理是该领域研究的重点^[12-15]。基于此, 本文设计了陶瓷材料碳化硅 (SiC) 和金属材料 (Ag、Fe、Cu) 形成的四层膜结构, 采用 FDTD Solutions 软件仿真了该结构在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的红外发射光谱, 并测试了其红外隐身性能。运用 F-P 共振理论分析了金属-碳化硅-金属型 F-P 腔对多层膜红外低发射特性的影响规律。

1 SiC-金属四层膜结构设计理论与分析

1.1 SiC-金属四层膜结构设计

本文将高折射率红外透明介质材料 SiC 和金属材料 Ag、Fe、Cu 结合, 设计了碳化硅-金属四层膜结构。之所以选择 Ag、Fe、Cu, 是因为其在红外波段具有较高的消光系数, 且成膜性较好。该结构在 x - z 平面上的截面示意如图 1 所示。

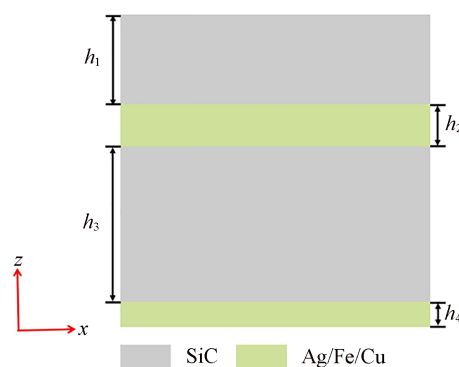


图 1 碳化硅-金属四层膜结构

Fig. 1 Schematic of the four-layer silicon carbide metal film structure

图 1 所示的整个结构在亚波长范围内, 沿着 x 和 y 方向无限延伸。可以看出, 四层结构中灰色的最上层和中间层为 SiC 层, 其厚度分别表示为 h_1 和 h_3 , 绿色的中间层和最底层为金属层, 其厚度分别表示为 h_2 和 h_4 。使用 FDTD Solutions 软件进行全波数值仿真。作为多层结构, 可以假设该结构在 x 和 y 方向上无限延伸, 因此, 取 x - z 方向的截面建立二维模型。仿真中使用波长为 $3\sim 14\ \mu\text{m}$ 的平面电磁波作为入射波, 沿着 z 轴的负方向传播。用单位 1 减去仿真得到的透射光谱和反射光谱, 得到四层膜结构的吸收光谱。根据基尔霍夫定律, 处于热平衡状态的物体的发射率等于吸收率, 因此可以认为, 上述仿真中得到结构的吸收率等于发射率。

1.2 SiC-Ag 四层膜结构理论分析

SiC-Ag 四层膜结构的整体隐身效果如图 2 所示。可以看出, 该结构在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 2 个波段, 大气透过率较高; 在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段普遍具有较低的发射率; 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段, 其发射率对膜层厚度具有较高的依赖性。

如图 2 中蓝色曲线所示, 对于设计的 SiC-Ag 四层膜初始结构, 当自上到下的膜层厚度分别为 $h_1=340\ \text{nm}$ 、 $h_2=10\ \text{nm}$ 、 $h_3=610\ \text{nm}$ 、 $h_4=10\ \text{nm}$ 时, 在 $4.3\ \mu\text{m}$ 处的发射率达到了 0.97, 在 $8\ \mu\text{m}$ 处的发射率为 0.13。如图中绿色曲线所示, 在对各个膜层厚度进行参数扫描优化后, 将各个膜层的厚度调整为 $h_1=360\ \text{nm}$ 、 $h_2=100\ \text{nm}$ 、 $h_3=620\ \text{nm}$ 、 $h_4=10\ \text{nm}$, 可以使 $4.3\ \mu\text{m}$ 波长处的发射率降低为 0.15, 与初始结构相比下降了 85%, 使 $8\ \mu\text{m}$ 处的

发射率降低为 0.07, 与初始结构相比下降了 46%。经过对膜层厚度进行优化, 在 2 个波段, 红外发射率都有所降低, 优化后的结构在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内单个波长的红外发射率最高仅为 0.18 和 0.07, 表明其红外隐身能力提升。

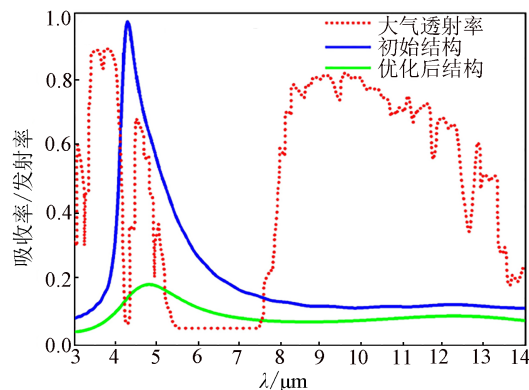


图 2 SiC-Ag 四层膜初始结构和优化后结构的红外发射光谱对比

Fig. 2 Comparison of infrared emission spectrum of the initial and optimized structures of SiC-Ag four-layer film

利用超薄金属的隧道效应, 结合 F-P 腔, 是设计具有光谱选择性发射特性隐身结构的常用方法^[9]。其中, F-P 腔使得特定频率的电磁波在膜层表面发生多次反射后相消干涉, 产生反射率波谷, 即吸收率波峰, 使某些波段具有较高的发射率, 而超薄金属在此过程持续对电磁波进行吸收, 在某些波段产生较低的发射率, 从而实现选择性发射的功能。图 3 为 $4.3\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 处 SiC-Ag 四层膜结构的内部电场分布。

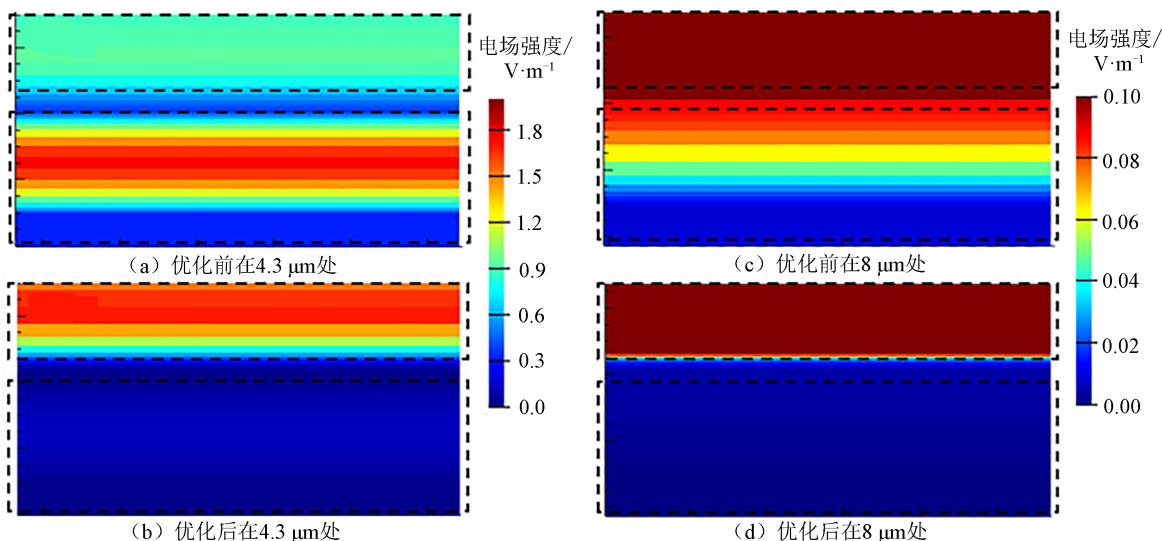


图 3 SiC-Ag 四层膜结构在谐振吸收峰处的电场强度分布

Fig. 3 Electric field intensity distribution of the SiC-Ag four-layer film structure at the resonant absorption peak

由图3可知, 相比于 $4.3\ \mu\text{m}$ 处, $8\ \mu\text{m}$ 处四层膜结构内部的电场强度更小, 与图2对应, 在此波长下多层膜对电磁波吸收更弱, 红外发射率更低。对比初始结构和优化后结构在 $4.3\ \mu\text{m}$ 处的电场分布情况, 初始结构中的电场主要分布在中间SiC内部, 此时由Ag-SiC-Ag形成的F-P腔吸收了较多的电磁波能量, 对应发射率高的情况; 优化后结构中的电场主要分布在上层SiC内部, 此时, 结构中并没有形成干涉相消的F-P腔, 对电磁波吸收较弱, 对应发射率低的情况。这表明在 $4.3\ \mu\text{m}$ 处, F-P腔是调控红外发射率高低的重要因素。对比初始结构和优化后结构在 $8\ \mu\text{m}$ 处的电场分布情况, 由于优化后结构中上侧SiC和Ag层变厚, 导致中间SiC层几乎没有吸收电磁波, 因此优化后结构的红外发射率降低。

为了研究SiC-Ag四层膜的各个膜层厚度对整体结构红外发射率的影响, 仿真了各层厚度改变时该结构的红外发射光谱, 如图4所示。其中, 图4(a)、(d)分别给出了阴影部分的放大图。图4

(a)中 $h_1=340\ \text{nm}$, $h_2=10\ \text{nm}$, $h_3=610\ \text{nm}$ 均为固定值, 只有底层Ag厚度 h_4 在变化, 4个厚度变量分别为 $5\ \text{nm}$ 、 $10\ \text{nm}$ 、 $15\ \text{nm}$ 、 $20\ \text{nm}$; 图4(b)中 $h_2=10\ \text{nm}$, $h_3=610\ \text{nm}$, $h_4=10\ \text{nm}$ 均为固定值, 只有顶层SiC厚度 h_1 在变化, 4个厚度变量分别为 $350\ \text{nm}$ 、 $360\ \text{nm}$ 、 $370\ \text{nm}$ 、 $380\ \text{nm}$; 图4(c)中 $h_1=360\ \text{nm}$, $h_3=610\ \text{nm}$, $h_4=10\ \text{nm}$ 均为固定值, 只有中间Ag层厚度 h_2 在变化, 4个厚度变量分别为 $10\ \text{nm}$ 、 $30\ \text{nm}$ 、 $50\ \text{nm}$ 、 $100\ \text{nm}$; 图4(d)中 $h_1=360\ \text{nm}$, $h_2=100\ \text{nm}$, $h_4=10\ \text{nm}$ 均为固定值, 只有中间SiC层厚度 h_3 在变化, 4个厚度变量分别为 $600\ \text{nm}$ 、 $610\ \text{nm}$ 、 $620\ \text{nm}$ 、 $630\ \text{nm}$ 。

由图4可见, h_1 、 h_3 和 h_4 的变化对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的红外发射光谱影响较小。 h_2 的变化对这2个波段的红外发射光谱影响较大, 尤其当厚度从 $30\ \text{nm}$ 增加到 $50\ \text{nm}$ 时, 红外发射率呈阶跃式下降, 在共振波长 $4.3\ \mu\text{m}$ 处, 红外发射率从 0.98 下降至 0.27 , 下降了 72% 。在 $8\ \mu\text{m}$ 处, 红外发射率从 0.16 下降至 0.08 , 下降了 50% 。

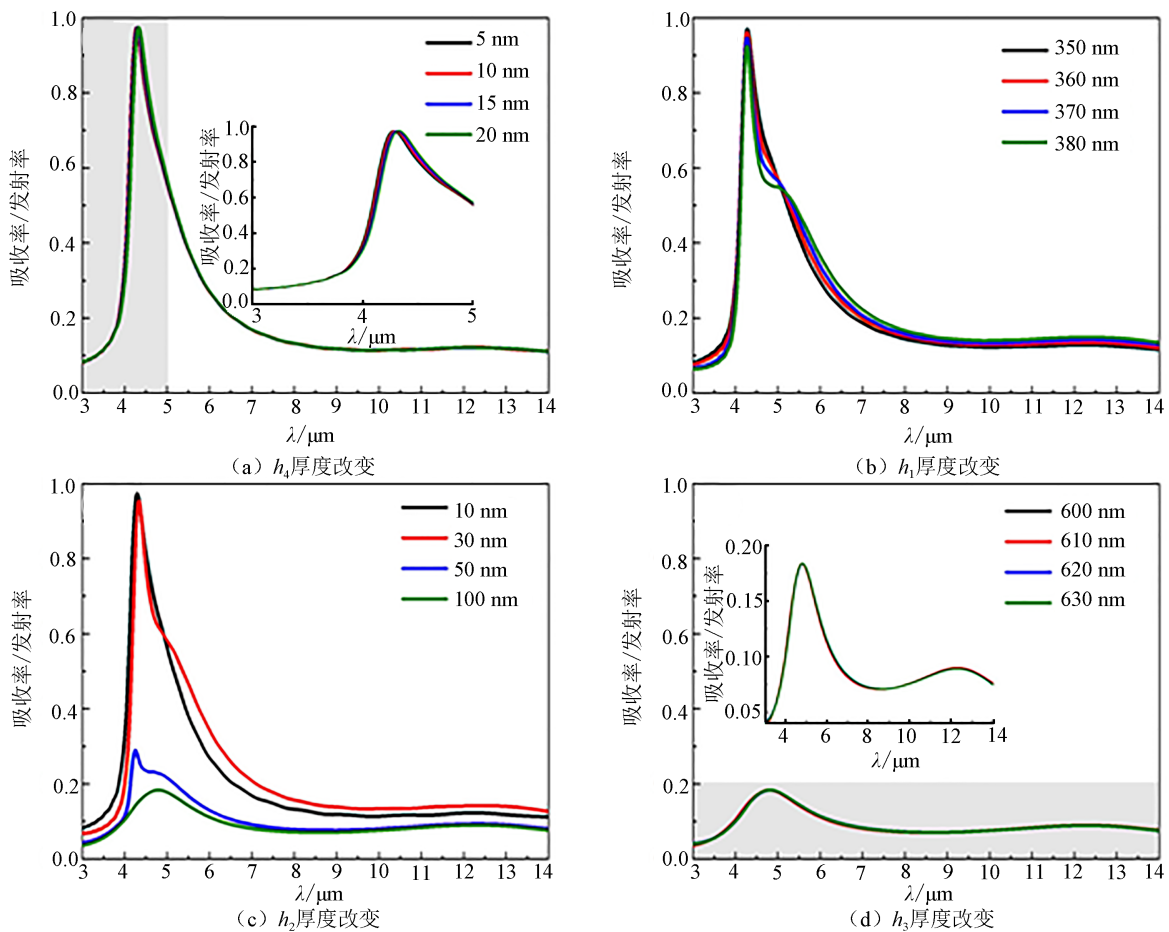


图4 各膜层厚度改变时SiC-Ag四层膜结构的红外发射光谱

Fig. 4 Infrared emission spectrum of SiC-Ag four-layer film structure with the thickness alteration of each film layer

进一步研究了中间 Ag 层分别为 30 nm 和 50 nm 时, 四层膜结构在 4.3 μm 和 8 μm 处的电场分布, 如图 5 所示。可以看出, 当中间 Ag 层厚度为 30 nm 时, F-P 腔体内部电场强度较大, 能量从该腔向外界发射, 呈现较大的红外发射率。当中间 Ag 层厚度增加到 50 nm 时, 谐振发生变化, 腔内电场变弱, 向外界发射的能量也减小, 呈现较小的红外发射率。由图 5 (c)、(d) 可知, 当 Ag 层厚度增加到 50 nm 时, 中间 SiC 层中电场减小, 红外发射率降低。

1.3 SiC-Fe/Cu 四层膜结构理论分析

考虑到样品制备时的经济性, 在膜层厚度分别为 $h_1=360$ nm、 $h_2=100$ nm、 $h_3=620$ nm、 $h_4=10$

nm 的结构上, 采用同样在红外全波段具有高反射性的 Fe 层和 Cu 层替换 SiC-Ag 四层膜结构中的 Ag 层, 研究了替换后四层膜结构的红外发射光谱变化, 如图 6 所示。图 6 (a) 为将 Ag 层替换为 Fe 层时的发射光谱对比, 可以看出, 将底层 Ag 替换为金属 Fe 以后, 发射光谱几乎不变; 当将中间 Ag 替换为 Fe 时, 在 4.3 μm 处, 发射率从 0.148 增加至 0.389, 在 8 μm 处, 发射率从 0.072 增加至 0.141, 分别提高了 163% 和 96%。当将两层金属 Ag 都替换为 Fe 后, 在 4.3 μm 处, 发射率从 0.148 增加至 0.339, 在 8 μm 处, 发射率从 0.072 增加至 0.156, 分别提高了 129% 和 117%。图 6 (b) 为将 Ag 层替换为 Cu 层时的红外发射光谱对比, 可以

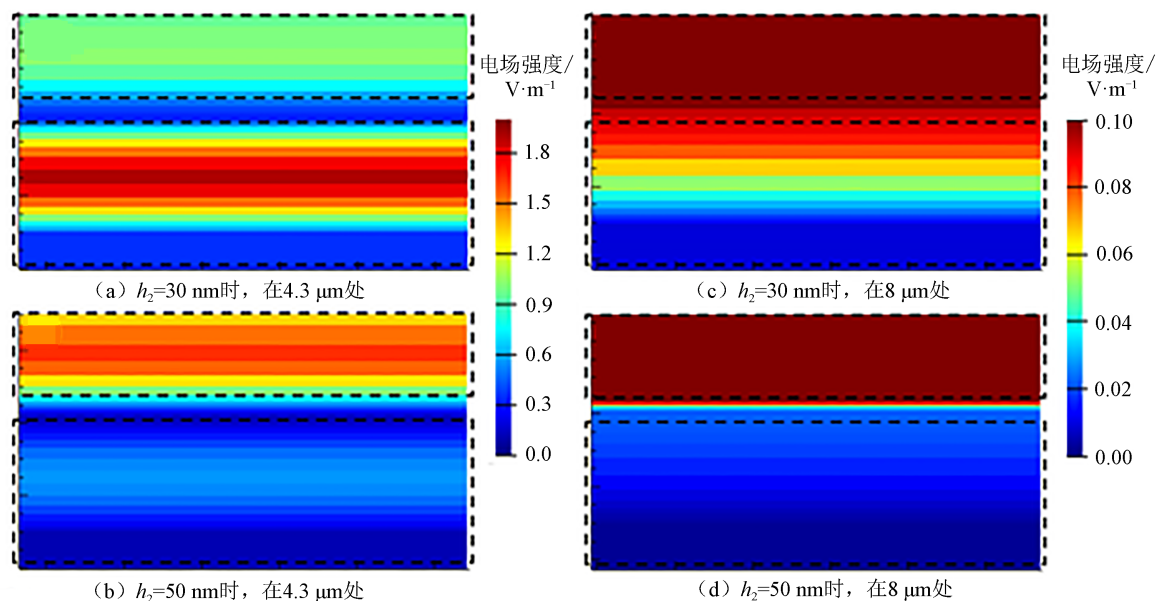


图 5 SiC-Ag 四层膜结构在谐振吸收峰处的电场强度分布

Fig. 5 Electric field intensity distribution of the SiC-Ag four-layer film structure at the resonant absorption peak

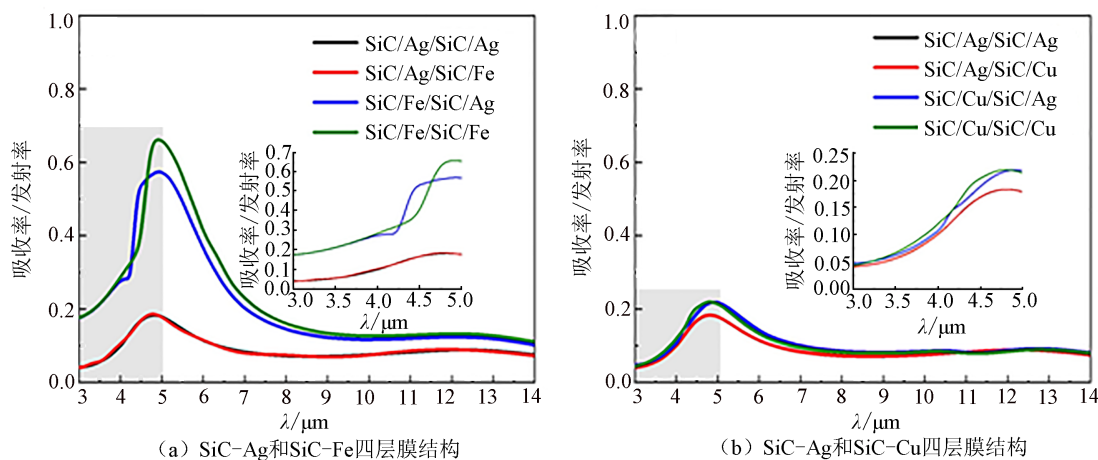


图 6 不同结构的红外发射光谱对比 (插图为图中阴影部分的放大图)

Fig. 6 Comparison of infrared emission spectrum of different structures (illustration is an enlarged view of the shaded area of the image)

看出, Cu层对底层Ag的替换对红外发射光谱没有影响, 只有替换中间Ag层或同时替换两层Ag后, 红外发射率才会提高。在 $4.3\ \mu\text{m}$ 处, 分别提高10%和20%, 在 $8\ \mu\text{m}$ 处, 分别提高18%和13%。

由以上分析可知, 采用Fe层和Cu层对底层金属Ag进行替换时, 红外发射率几乎无变化, 只有当替换中间金属Ag层或者同时替换两层Ag时, 两个波段的红外发射率才会增加, 并且Fe层替换带来的变化更为显著。由此可知, 对中间金属Ag层的替换是造成红外发射率变化的主要因素。

图7为将Ag层替换为Fe和Cu后, 四层膜结构在 $4.3\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 处的电场分布。由图7(a~c)可知, 采用Fe层替换底层Ag后, 与SiC-Ag四层膜结构相比, 电场没有显著变化, 中间和双层Ag的替换会使中间SiC处形成F-P共振腔, 增加能量发射, 增大红外发射率。由图7(d~f)可知, 采用Cu层替换底层Ag后, 电场也没有显著变化, 仅当Cu层替换中间和双层Ag后, 中间SiC处会形成F-P共振腔, 增加能量发射, 增大红外发射率。这些现象与图6中呈现的规律一致, 也表明在本文设计的四层膜结构中, 有无F-P共振腔对红外发射率起到关键的调控作用。在 $8\ \mu\text{m}$ 处, Fe和Cu对底层Ag替换并没有使电场发生明显变化。不同的是, 当用Fe对中间Ag和双层Ag进行替换后, 中间SiC层电场增加, 因此红外发射率增加; 在采用Cu进行替换的情况中电场变化不明显, 因此

红外发射率变化也很小, 与图6中呈现的变化规律一致。

2 SiC-Ag 四层膜结构制备及性能测试

为了获得具有红外隐身性能的四层膜结构, 进行了SiC-Ag四层膜结构制备, 并表征了其红外光谱和图像。各层薄膜的制备都使用了磁控溅射镀膜沉积系统(型号: PD-500C), 基底为硅片, 采用的Ag和SiC靶材纯度均为99.9%。实验时设置镀膜压力为0.5 Pa, 镀膜功率为71 W, 氩气流量为50 sccm, 在观察到靶材起辉后先预蒸镀10 min, 除去靶材表面的杂质, 再开始镀膜。为了使薄膜更均匀, 设置基底转速为10 rad/min。图8(a)和(b)分别为使用SiC和Ag靶材所得薄膜的扫描电子显微镜表征图(型号: Hitachi, 日立S-4800), 由图可见, 薄膜内部致密且厚度均匀。根据单层薄膜的镀膜时间和最终厚度, 可计算出镀膜速度, 进而通过控制每一层的镀膜参数和时间得到各种厚度的薄膜。图8(c)为从上到下各层镀膜时间分别为4.3 h、2 min、8.4 h和20 s所得四层膜的扫描电子显微镜表征图, 由图可见明显的四层结构, 颜色较亮的为金属Ag层, 颜色较暗的为SiC层, 各层厚度从上到下分别为350 nm、90 nm、690 nm、15 nm。

为了验证所制备四层膜的红外隐身性能, 测

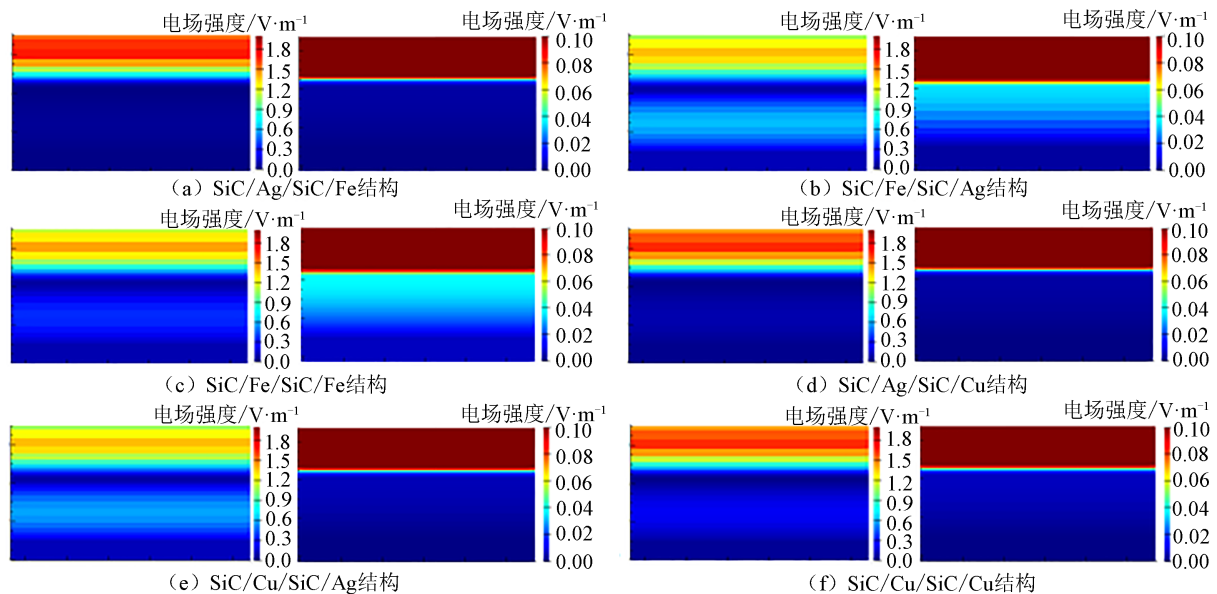


图7 不同结构在谐振吸收峰处的电场强度分布(各图左侧为 $4.3\ \mu\text{m}$ 处, 右侧为 $8\ \mu\text{m}$ 处)

Fig. 7 Electric field intensity distribution of different structures at resonant absorption ($4.3\ \mu\text{m}$ on the left and $8\ \mu\text{m}$ on the right in each figure)

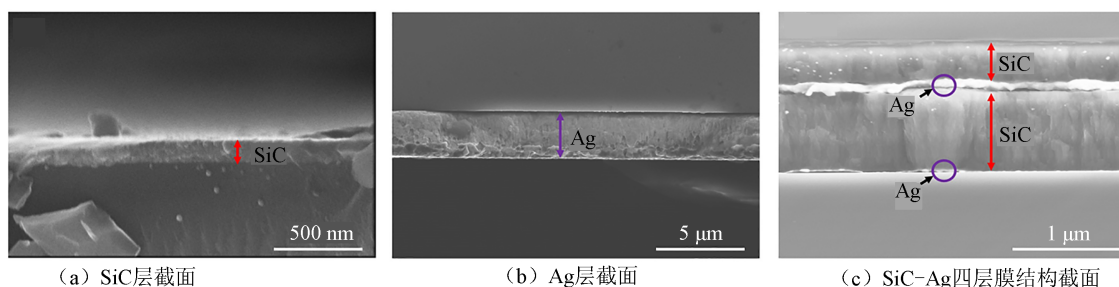


图 8 扫描电子显微镜表征图

Fig. 8 Phenogram of scanning electron microscope

试了四层膜在 $2.5 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内的红外反射率光谱和红外透射率光谱（型号：Nicolet IS50），根据反射率和透射率计算得到吸收率，即发射率的光谱曲线，如图 9 所示。可以看出，在整个谱段内，发射率都低于 0.2，表现出较低的红外发射率。

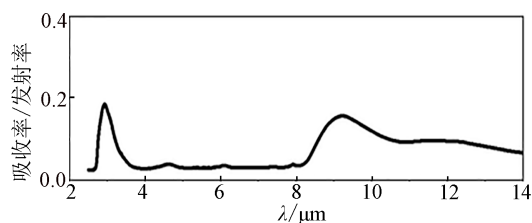


图 9 SiC-Ag 四层膜结构的红外发射率光谱

Fig. 9 Infrared emission spectrum of SiC-Ag four-layer film structure

为了对比明显，设置了空白硅片作为对照组，并测试了对照组和实验组的红外热成像性能（型号：FLIR T540）。测试时，将两组样品的基片台从室温均匀加热到 40°C ，待温度稳定后进行采集，结果如图 10 所示。

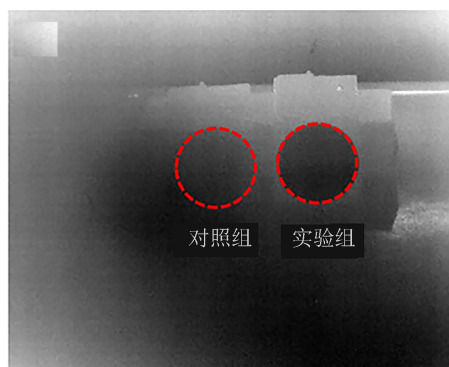


图 10 红外热成像图对比

Fig. 10 Comparison of infrared thermograph images

对照组上亮温为 35.0°C ，而四层膜样品上的亮温只有 25.8°C ，低于对照组 9.2°C ，整体红外发射率显著降低。根据前期的仿真， $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的红外发射率变化相比于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 不显著，因此，单独测试了对照组和实验组在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外发射强度图像（HP-C6510-BL），如图 11 所示。图中灰度值具有显著差异，四层膜结构上灰度值明

显较小，与仿真结果一致。

图 11 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外发射强度图像对比Fig. 11 Comparison of infrared emission intensity in $8 \sim 14 \mu\text{m}$ bands

3 结论

本文设计了一种由 SiC 层和金属层组成的四层膜结构，并用 FDTD Solutions 软件仿真了该结构在 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内的红外发射率。经过对膜层厚度进行优化，使其自上到下的膜层厚度分别为 340 nm 、 10 nm 、 610 nm 、 10 nm 时，该四层膜结构在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内的红外发射率显著降低，在 $4.3 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$ 共振模式处分别降低了 85% 和 46%，两波段内单波长发射率最高仅为 0.18 和 0.07。考虑到加工成本，用 Fe 层和 Cu 层对 Ag 层进行了替换。测试结果表明，仅替换底层 Ag 并不会影响整体结构的红外发射率，对隐身性能影响较小；替换中间层和双层 Ag 后，膜层中电场分布发生变化，红外发射率受到中间 SiC 层内形成的 F-P 共振腔的调控而增大，隐身性能受损。以 SiC 和 Ag 组合为例，制备了四层膜结构并对其红外发射率和热成像性能进行了测试，与对照组相比，四层膜结构上的红外发射率显著降低，表现出了优异的红外隐身性能。

参考文献

- [1] ROGALSKI A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(3): 136-154.
- [2] 文娇, 李介博, 孙井永, 等. 红外探测与红外隐身材料研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(3): 66-82.
- WEN J, LI J B, SUN J Y, et al. Research progress of infrared detection and infrared stealth materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(3): 66-82.
- [3] ZHANG J K, SHI J M, ZHAO D P, et al. Realization of compatible stealth material for infrared, laser and radar based on one-dimensional doping-structure photonic crystals[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 62-65.
- [4] WANG L, YANG Y, TANG X L, et al. Combined multi-band infrared camouflage and thermal management via a simple multilayer structure design[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(20): 5224-5227.
- [5] LEE N, KIM T, LIM J S, et al. Metamaterial-selective emitter for maximizing infrared camouflage performance with energy dissipation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(23): 21250-21257.
- [6] KIM J, HAN K, HANA J W. Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6740.
- [7] PENG L, LIU D Q, CHENG H F. Design and fabrication of the ultrathin metallic film based infrared selective radiator[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 193: 7-12.
- [8] PENG L, LIU D, CHENG H, et al. A multilayer film based selective thermal emitter for infrared stealth technology[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(23): 1801006.
- [9] 李彬. 红外隐身用辐射调控结构设计及性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- LI B. Research on the design and performance of radiation control structure for infrared stealth[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [10] 彭亮. 光谱选择性发射红外隐身多层膜的设计、制备与性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- PENG L. Design, Fabrication and characterization of the multilayer film based spectrally selective emission material for infrared stealth[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2019.
- [11] 单文涵. 基于Si、Ge介质层的红外隐身薄膜设计与性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2022.
- SHAN W H. Design and properties of infrared stealth thin films based on Si and Ge dielectric layers[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2022.
- [12] MOGHIMI M J, LIN G Y, JIANG H R. Broadband and ultrathin infrared stealth sheets[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(11): 1800038.
- [13] ZHANG L, WANG J, LOU J, et al. A thermally robust and optically transparent infrared selective emitter for compatible camouflage[J]. *Journal Materials Chemistry C*, 2021, 9(42): 15018-15025.
- [14] HUANG Y J, PU M B, GAO P, et al. Ultra-broadband large-scale infrared perfect absorber with optical transparency[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(11): 112601.
- [15] ZUO J K, PAN M Y, DUAN H G, et al. Review on new infrared stealth structural materials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(5): 220218.

(编辑: 于福兴)