

2种陶瓷阵列超结构表面的定向红外辐射

姜葳¹, 王志宏¹, 胡佚嵩¹, 徐剑盛², 罗发³

(1.中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110044; 2.陕西华秦科技实业股份有限公司, 陕西 西安 710119; 3.西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要:设计了2种陶瓷阵列超结构表面(A,B),并研究了该超结构表面的11 μm 红外辐射空间特征。二者均具有明显的定向辐射特征,对于阵列A,圆柱芯半径 R_1 与阵列厚度 t_1 对红外辐射定向特性影响明显,最优的定向结构参数:圆柱芯半径 $R_1=1.0\ \mu\text{m}$,阵列层厚度 $t_1\geq 1.2\ \mu\text{m}$,可实现辐射角度 $0^\circ\sim 50^\circ$,发射率 $\varepsilon\geq 0.7$ 的有效定向红外辐射调控。对于阵列B,当 $R_c=1.05\ \mu\text{m}$, $R_1=0.1\ \mu\text{m}$, $t_1=0.85\ \mu\text{m}$ 时,体系辐射集中在法向角 $\theta>10^\circ$ 区域,并在 $\theta>40^\circ$ 后呈现出明显的 ϕ 角度依赖性,当 $\phi=45^\circ$ 或 $135^\circ(\pm 45^\circ)$ 时,体系红外辐射明显增强, $\theta=65^\circ$, $\phi=45^\circ$ 时, ε 在0.4量级。阵列层厚度 t_1 对体系定向红外辐射有明显影响,在 $R_c=1.0\ \mu\text{m}$, $R_1=0.3\ \mu\text{m}$, $\phi=0^\circ$ 时,高效定向辐射的有效阵列层厚度为 $0.3\ \mu\text{m}\leq t_1\leq 1.7\ \mu\text{m}$,其最优值为 $t_1=1.2\ \mu\text{m}$, $\phi=0^\circ$ 时的特征辐射法向角为 40° ,发射率为0.7。

关键词:超结构表面;定向红外辐射;红外发射率

中图分类号:TN214

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)05-0891-04

超材料(metamaterial)是结构特征尺寸 l 在 $\lambda/10\sim\lambda$ 之间的复合材料体系。通过构建电磁波能带-禁带结构,获得传统材料或技术无法实现的超常规介质参数,实现常规材料无法实现的功能特性,如右手材料、左手材料、电负材料、磁负材料等^[1-3]。红外辐射作为电磁波的一种,也可通过超材料技术进行红外特性调控。美国圣地亚国家实验室Burckel等^[4]研究了硅衬底方孔镀金的超结构红外辐射行为,该超结构在波长 $>10\ \mu\text{m}$ 时,随波长增加,辐射角度逐渐偏离法线方向,呈现明显的辐射定向行为,在波长为 $15\ \mu\text{m}$ 时,辐射定向角度为 70° 。美国宾夕法尼亚州立大学的Bossard与Werner针对波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 红外辐射,优化设计了具有电磁带隙结构及介电谐振阵列结构的多种定向辐射表面超结构^[5],选用金、锗作为金属层与电介质层,优化设计具有四重对称或八重对称性的超结构表面,实现法向角 θ 为 40° 的TE-TM波定向辐射。香港中文大学王建方教授团队总结了基于纳米超结构的光辐射

定向研究进展^[6],通过纳米等离子体(金属)的超结构设计,可以有效实现可见光的定向辐射。浙江大学贺赛灵教授与美国普渡大学Kildishev教授研究了一种设计波长为 $1\ \mu\text{m}$ 的近红外超表面^[7],由Si衬底、Au膜、 SiO_2 介质层及表面Au阵列超结构组成,通过优化,结构周期 $600\ \text{nm}$,Au膜厚 $150\ \text{nm}$, SiO_2 层厚 $110\ \text{nm}$,Au阵列厚 $80\ \text{nm}$,可实现最高 30° 的辐射定向效果,并具有明显的TE-TM波特性。

本文选取金、硅作为超结构组元,设计具有阵列结构的 $11\ \mu\text{m}$ 红外定向辐射表面超结构,研究结构参数对辐射角度的定向作用。

1 模型与计算方法

本文设计2种超结构阵列A,B模型如图1~2所示。超结构单胞周期为 $5.5\ \mu\text{m}\times 5.5\ \mu\text{m}$,由基底层与阵列层组成,基底层为厚 $120\ \text{nm}$ 的Au。模型A阵列层由环-芯柱结构的无损陶瓷(Si)组成,中心圆柱半径为 R_1 ,外层圆环内径为 R_2 ,宽度为 w (本文中固定为 $0.25\ \mu\text{m}$),厚度均为 t_1 。模型B柱状阵列由无损陶瓷(Si)组成,含2种不同半径的圆柱,半径分别为 R_c,R_1 ,厚度均为 t_1 。采用有限元方法

计算模拟体系的稳态红外发射率空间(法向角 θ 、航向角 ϕ)特征,根据基尔霍夫(Kirchhoff)热辐射定律,热平衡状态下体系的红外发射率 ε 等于其红外吸收率 α ,模型的空间红外发射特性由空间红外吸收特性获得。理论模拟选取 $11\ \mu\text{m}$ TE 红外辐射(电磁波),Au 折射率 15.4、消光系数 80.5,Si 折射率 3.421 3、消光系数 0.019,阵列以 Floquet 周期处理,为简化计算与分析的复杂度,每次仅研究红外发射率对 2 个参数的依赖关系。

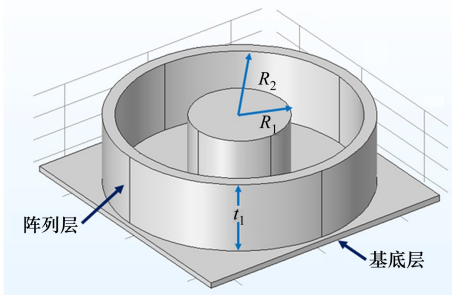


图 1 本文超结构阵列模型 A 示意图

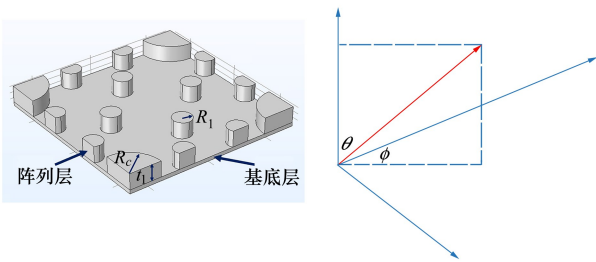


图 2 本文超结构阵列模型 B 及辐射角度示意图

2 结果与讨论

2.1 阵列 A 的辐射特性

1) 圆柱芯半径 R_1 对红外辐射的影响。选取 $R_2 = 2.4\ \mu\text{m}$, $t_1 = 1.5\ \mu\text{m}$, 研究阵列超表面的 $11\ \mu\text{m}$ 红外辐射 θ, R_1 空间特性,其红外发射率 $\varepsilon-\theta-R_1$ 关系如图 3 所示。当柱芯较小时($R_1 < 0.8\ \mu\text{m}$),体系红外特性主要由外层圆环主导,红外辐射定向在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 之间,辐射角 θ 受 R_1 影响较小,随着 R_1 增大,辐射角 θ 向低角度方向(法向)移动, $R_1 > 1.4\ \mu\text{m}$ 时,体系的 $11\ \mu\text{m}$ 红外辐射集中在法向周围 $0^\circ \sim 35^\circ$ 范围内,辐射的定向特性减弱。综合考虑定向特征与辐射强度,圆柱芯半径 R_1 为 $1.0\ \mu\text{m}$ 左右时,体系的红外辐射定向效果最优。

2) 圆环半径 R_2 对红外辐射的影响。选取 $R_1 = 1.0\ \mu\text{m}$, $t_1 = 1.5\ \mu\text{m}$, 研究阵列超表面的 $11\ \mu\text{m}$ 红外

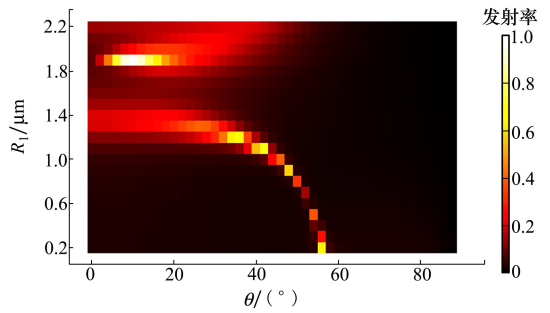


图 3 阵列 A 的 $11\ \mu\text{m}$ 红外发射率 $\varepsilon-\theta-R_1$ 关系图 ($R_2 = 2.4\ \mu\text{m}, t_1 = 1.5\ \mu\text{m}, \phi = 0^\circ$)

辐射 θ, R_2 空间特性,其红外发射率 $\varepsilon-\theta-R_2$ 关系如图 4 所示。体系的红外特性主要由芯柱主导,红外辐射定向在 $45^\circ \sim 50^\circ$ 之间,辐射的定向特性明显,辐射角 θ 受 R_2 影响较小, R_2 增大时,辐射角 θ 先向高角度方向移动,后向低角度方向(法向)移动, $R_2 = 1.3\ \mu\text{m}$ 时,辐射角 θ 最大,为 50° 。体系定向角度的最大发射率 ε 为 0.8。

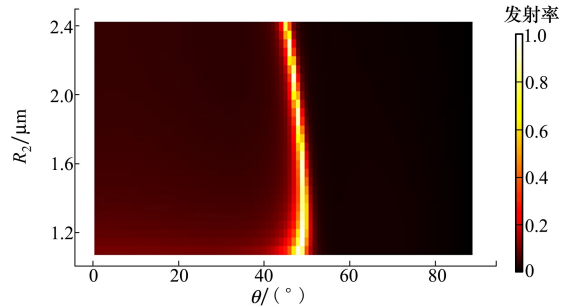


图 4 阵列 A 的 $11\ \mu\text{m}$ 红外发射率 $\varepsilon-\theta-R_2$ 关系图 ($R_1 = 1.0\ \mu\text{m}, t_1 = 1.5\ \mu\text{m}, \phi = 0^\circ$)

3) 陶瓷(Si)阵列厚度 t_1 对红外辐射的影响。选取 $R_1 = 1.5\ \mu\text{m}, R_2 = 2.0\ \mu\text{m}$, 研究阵列超表面的 $11\ \mu\text{m}$ 红外辐射 θ, t_1 空间特性,其红外发射率 $\varepsilon-\theta-t_1$ 关系如图 5 所示。体系的红外特性受阵列层厚度影响明显,随阵列层厚度 t_1 增加,红外辐射定向角度 θ 向法向移动,辐射覆盖范围逐渐增加,定向性逐渐变差,辐射强度也逐渐增加。阵列层作为红外辐射的功能层,当阵列层厚度 $t_1 \leq 0.4\ \mu\text{m}$ 时,体系红外辐射极弱, $\varepsilon < 0.1$ 。当 $t_1 \geq 0.5\ \mu\text{m}$ 时,体系表现出可观的红外辐射,辐射角 θ 由 75° 向低角度方向移动, $t_1 = 2.5\ \mu\text{m}$ 时,红外辐射定向在 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,发射率 ε 为 0.7。综合考虑定向特征与辐射强度,圆柱芯半径 $t_1 \geq 1.2\ \mu\text{m}$ 时,体系的红外辐射定向效果最优。

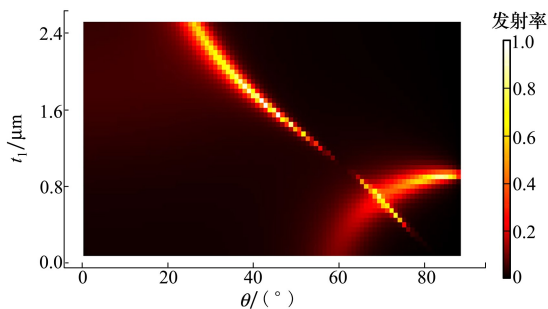


图 5 阵列 A 的 11 μm 红外发射率 ε - θ - t_1 关系图
($R_c = 1.0 \mu\text{m}, R_1 = 2.0 \mu\text{m}, \phi = 0^\circ$)

2.2 阵列 B 的辐射特性

1) 阵列 B 的红外辐射空间特性。选取并固定 $R_c = 1.05 \mu\text{m}, R_1 = 0.1 \mu\text{m}, t_1 = 0.85 \mu\text{m}$, 研究阵列超表面的 11 μm 红外辐射 θ, ϕ 空间特性, 其红外发射率 ε - θ - ϕ 关系如图 6 所示。此超表面的 11 μm 红外辐射具有明显的空间依赖性, 法线 ($\theta = 0^\circ$) 发射率 ε 在 0.1 量级, 且与平面内航向角 ϕ 无关, 与预期相一致。当法向角 θ 增大时, 体系的发射率也随之增加, 并在 $\theta > 40^\circ$ 后呈现出对航向角 ϕ 的依赖性, 当 $\phi = 45^\circ$ 或 135° (即 $\pm 45^\circ$) 时, 体系红外辐射明显增强, 对应图 1 超结构的面对角线方向, 如 $\theta = 65^\circ, \phi = 45^\circ$ 时, ε 在 0.4 量级。当法向角进一步增大至 85° 以上时, 此时 11 μm 红外辐射最为强烈 ($\varepsilon > 0.5$), 几乎平行于超结构阵列平面, 且对航向角 ϕ 的依赖性再次减弱。一般而言, 法线方向材料的红外辐射功率最大, 因此, 此超结构设计具有明显的定向辐射特征, 可实现对体系红外辐射的定向调控。

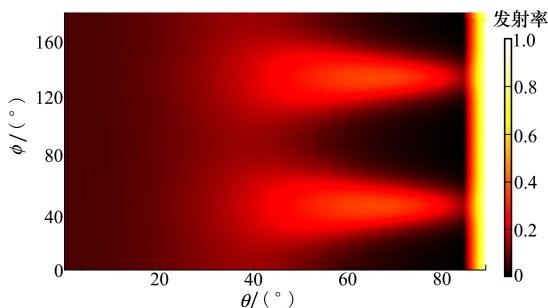


图 6 阵列 B 的 11 μm 红外发射率 ε - θ - ϕ 关系图
($R_c = 1.05 \mu\text{m}, R_1 = 0.1 \mu\text{m}, t_1 = 0.85 \mu\text{m}$)

2) 陶瓷 (Si) 阵列层的厚度对红外辐射的影响。进一步研究了陶瓷阵列层厚度 t_1 对体系红外辐射的影响。选取并固定 $R_c = 1.0 \mu\text{m}, R_1 = 0.3 \mu\text{m}, \phi = 0^\circ$, 体系的 ε - θ - t_1 关系如图 7 所示。如 2.1 节所

述, 当法向角大于 85° 时, 体系 11 μm 红外辐射最强烈, 几乎平行于超结构阵列平面, 这是电介质超结构的普遍特征, 此处不作为研究讨论重点。当阵列层厚度 $t_1 \leq 0.3 \mu\text{m}$ 时, 陶瓷 (Si) 阵列层在超结构中比例很小, 体系红外辐射由 Au 基层层主导, 因金属红外发射率普遍较低, 超表面的红外辐射整体处于较低水平 ($\varepsilon < 0.1$), 且定向辐射特征不明显。随着陶瓷阵列层厚度增加, 尤其是 $t_1 \geq 0.8 \mu\text{m}$, 体系 11 μm 红外辐射强度也逐渐增加, 并表现出明显的定向辐射特征, 其特征法向角 θ 随 t_1 增加而逐渐向低角度移动。当阵列层厚度 $t_1 \geq 1.7 \mu\text{m}$ 时, 红外辐射基本处于法向方向, 定向调控特征已不明显。总之, 要实现高效的定向辐射, 此电介质阵列超结构设计, 需控制阵列层厚度在一定范围内, 此处为 $0.3 \mu\text{m} \leq t_1 \leq 1.7 \mu\text{m}$, 定向辐射的最优值为 $t_1 = 1.2 \mu\text{m}, \phi = 0^\circ$ 时的特征辐射法向角为 40° , 发射率为 0.7。

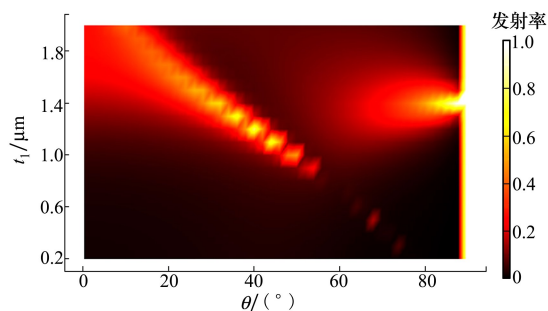


图 7 阵列 B 的 11 μm 红外发射率 ε - θ - t_1 关系图
($R_c = 1.0 \mu\text{m}, R_1 = 0.3 \mu\text{m}, \phi = 0^\circ$)

3 结 论

本工作设计了 2 种阵列超结构表面 A, B, 并研究了该超结构表面的 11 μm 红外辐射空间特征。研究表明, 设计的 2 种超结构表面具有明显的定向辐射特征, 对于超结构阵列 A, 圆柱芯半径 R_1 与阵列厚度 t_1 对红外辐射定向特性影响明显, 最优的定向结构参数: 圆柱芯半径 R_1 为 $1.0 \mu\text{m}$, 阵列层厚度 $t_1 \geq 1.2 \mu\text{m}$, 可实现辐射角度 $0^\circ \sim 50^\circ$ 的发射率 $\varepsilon \geq 0.7$ 的有效定向红外辐射调控。对于超结构阵列 B, 当 $R_c = 1.05 \mu\text{m}, R_1 = 0.1 \mu\text{m}, t_1 = 0.85 \mu\text{m}$ 时, 体系辐射集中在法向角 $\theta > 10^\circ$ 区域, 并在 $\theta > 40^\circ$ 后呈现出对航向角 ϕ 的依赖性, 当 $\phi = 45^\circ$ 或 135° (即 $\pm 45^\circ$) 时, 体系红外辐射明显增强, 对应超结构的面对角线方向, $\theta = 65^\circ, \phi = 45^\circ$ 时, ε 在 0.4 量级。陶瓷阵列层厚度 t_1 对体系定向红外辐射有明显

影响,在 $R_c = 1.0 \mu\text{m}$, $R_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $\phi = 0^\circ$ 时,要实现高效的定向辐射的有效阵列层厚度为 $0.3 \mu\text{m} \leq t_1 \leq 1.7 \mu\text{m}$,其最优值为 $t_1 = 1.2 \mu\text{m}$, $\phi = 0^\circ$ 时的特征辐射法向角为 40° ,发射率为 0.7。

参考文献:

- [1] BRENER Igal, LIU Sheng, STAUDE Isabelle, et al. Dielectric metamaterials: fundamentals, designs, and applications[M]. Sawston Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2020
- [2] ASKARI Meisam, HUTCHINS David A, THOMAS Peter J, et al. Additive manufacturing of metamaterials: a review[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101562
- [3] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley Online Library, 2000
- [4] Bruce D BURCKEL, Paul S. DAVIDS, Patrick S. FINNEGAN, et al. Directional emissivity from two-dimensional infrared waveguide arrays[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107: 121902
- [5] BOSSARD J A, WERNER D H. Metamaterials with angle selective emissivity in the near-infrared[J]. Optics Express, 2013, 21: 5215
- [6] LI N, LAI Y, LAM S H, et al. Directional control of light with nanoantennas[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9: 2001081
- [7] DING Fei. Broadband high-efficiency half-wave plate: a supercell-based plasmonic metasurface approach[J]. ACS Nano, 2015, 9: 4111

Directed infrared emissions of two designed metasurfaces with ceramic arrays

JIANG Wei¹, WANG Zhihong¹, HU Yisong¹, XU Jiansheng², LUO Fa³

(1. Shenyang Aero Engine Research Institute, Shenyang 110044, China;
2. Shaanxi Huaqin Technology Industry Co., Ltd., Xi'an 710119, China;
3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Two metasurfaces of ceramic arrays (A and B) were designed and the $11 \mu\text{m}$ infrared emission behaviors of them were studied. Both metasurfaces show obvious directed IR emissions. For array A, the radius of inner cylinder R_1 and thickness t_1 of the ceramics dominate the directional behavior of the IR emissions. The optimized structural parameters are $R_1 = 1.0 \mu\text{m}$ and $t_1 \geq 1.2 \mu\text{m}$ with an effective IR emission angle θ in $0^\circ \sim 50^\circ$ and emissivity $\varepsilon \geq 0.7$ achieved. For array B with $R_c = 1.05 \mu\text{m}$, $R_1 = 0.1 \mu\text{m}$, $t_1 = 0.85 \mu\text{m}$, the IR emission is mainly constrained in $\theta > 10^\circ$, and an obvious ϕ dependence is observed as $\theta > 40^\circ$. The IR emission is higher at $\phi = 45^\circ$ or 135° ($\pm 45^\circ$) as $\theta > 10^\circ$ with $\varepsilon = 0.4$ at $\theta = 65^\circ$. The IR emission is affected by the thickness t_1 obviously, with an effective thickness $0.3 \mu\text{m} \leq t_1 \leq 1.7 \mu\text{m}$ at $R_c = 1.0 \mu\text{m}$, $R_1 = 0.3 \mu\text{m}$, and $\phi = 0^\circ$. For array B with the optimized $t_1 = 1.2 \mu\text{m}$ ($\phi = 0^\circ$), the IR emission is directed at $\theta \sim 40^\circ$ with the emissivity 0.7.

Keywords: metasurface; directed IR emissions; infrared emissivity

引用格式: 姜巍, 王志宏, 胡佚嵩, 等. 2种陶瓷阵列超结构表面的定向红外辐射[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(5): 891-894
JIANG Wei, WANG Zhihong, HU Yisong, et al. Directed infrared emissions of two designed metasurfaces with ceramic arrays[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(5): 891-894 (in Chinese)