

基于多目标粒子群算法设计的双波段窄带热辐射器

邱千里^{1,2}, 章晋国³, 周东劫^{1,2}, 谈冲^{1,2}, 孙艳^{1*}, 郝加明^{3*}, 戴宁^{1,4}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 复旦大学 光电研究院, 上海 200433;

4. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 双波段窄带宽热辐射器在红外传感、加密、检测等众多领域具有重要的应用潜力。这种辐射器能够提供集中且精确的红外辐射能量, 从而提高红外技术的灵敏度和分辨率。不过, 在不同波段构建窄带辐射的条件通常会相互制约, 同时实现双波段窄带辐射仍具有一定的挑战性。本文提出了一种新型无需光刻的红外双波段窄带热辐射器。该辐射器由铝薄膜上非周期性的交替沉积 Ge 和 YbF₃ 薄膜组成, Ge 和 YbF₃ 薄膜组成的分布式布拉格反射镜和铝基底在一定条件下可以激发 Tamm 等离子激元 (Tamm plasmon polaritons, TPP), 从而实现窄带辐射。首先使用多目标粒子群优化算法对辐射器的结构参数进行优化, 以满足双波段 TPP 的激发条件。最后实验结果也验证了双波段辐射器在中波红外和长波红外具有窄带辐射的特性。本文提出的方法也可用于多波段辐射调控器件的设计, 从而可以应用于多气体传感和多带红外伪装等领域。

关键词: 双波段窄带热辐射器; 多目标粒子群算法; 长波红外

中图分类号: O432.1

文献标识码: A

Dual-band narrowband thermal emitter designed based on multi-objective particle swarm optimization

QIU Qian-Li^{1,2}, ZHANG Jin-Guo³, ZHOU Dong-Jie^{1,2}, TAN Chong^{1,2}, SUN Yan^{1*},
HAO Jia-Ming^{3*}, DAI Ning^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Optoelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

4. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: Dual-band thermal emitters with narrow bandwidths are important in various applications in the infrared field, such as in infrared sensing and infrared imaging. However, conditions for narrowband emission in different wavelengths can conflict with each other, making it difficult to achieve dual-band emitter. In this paper, a new type of lithography-free infrared dual-band thermal emitter is proposed, which consists of alternately deposited Ge and YbF₃ films on Al films. The narrowband emission characteristics stem from the Tamm plasmon polaritons (TPP) that can be excited by the distributed Bragg reflector and the Al substrate under certain conditions. The geometric parameters are optimized using multi-objective particle swarm optimization. The experimental results confirm that dual-band emitter can simultaneously exhibit narrowband emitter characteristics in both mid-wave infrared (MWIR) and long-wave infrared (LWIR) regions. The proposed method can be used in the design of multi-band emission modulation applications, which can be

收稿日期: 2024-04-16, 修回日期: 2024-09-28

Received date: 2024-04-16, Revised date: 2024-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFA1404701, 2017YFA0205800), 国家自然科学基金项目 (62075231), 上海市科委项目 (20JC1414603).

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2022YFA1404701, 2017YFA0205800), National Natural Science Foundation of China (62075231), Shanghai Science and Technology Committee (20JC1414603)

作者简介 (Biography): 邱千里 (1996—), 男, 湖南岳阳人, 博士生, 博士学位, 主要研究领域为堆栈结构热辐射调控. E-mail: qiuqianli@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: sunny@mail.sitp.ac.cn; jmhao@fudan.edu.cn

applied in the fields of multi-gas sensing and multi-band infrared camouflage.

Key words: dual-band narrowband thermal emitter, multi-objective particle swarm algorithm, long-wave infrared

引言

红外波段窄带热辐射器件因其在大气科学、军事和能源工程方面的应用前景而受到广泛关注。近年来,研究人员利用纳米光学结构的强电磁场操控能力精确调控红外波段的辐射行为,从而形成窄带辐射。如 Rinnerbauer 等使用多晶钽为基底制备的二维光子晶体在 $2\ \mu\text{m}$ 实现窄带辐射^[1-4]; Ikeda 等使用一维金属光栅与电介质界面的表面的等离子体极化子耦合,在 $5\ \mu\text{m}$ 外实现了 p 偏振的窄带辐射^[5-7]; Liu 等使用金属-绝缘体-金属结构中的磁偶极子共振,通过调节结构参数和材料选择,实现对红外辐射的高效控制^[8-10]。然而,这种图案化的纳米光学结构的制备通常依赖于复杂的光刻工艺,这限制了它们在实际应用中的推广。

基于表面态共振的平面多层结构可以在不增加复杂度的情况下进行大面积制造。例如,法布里-珀罗结构已被证明可用作波长选择性辐射器^[11,12],但是其禁带较短,容易产生多峰辐射,使得信噪比较低。另外一种结构是具有零面内波矢量的 Tamm 等离子激元(Tamm plasmon polaritons, TPP)结构,其激发的 TPP 共振出现在禁带中,因此通常具有高的信噪比和品质因子。如 Liu 等使用 TPP 结构制备了大面积的长波红外热辐射器,并采用耦合模理论对该结构的辐射特性进行了分析^[13]; Wang 等同通过混合金属和光学 Tamm 态,在中波红外实现近 2000 品质因子的窄带辐射峰^[14]。基于 TPP 结构的窄带热辐射器件也被广泛应用于激光器^[15-17]、气敏器件^[18-20]、光电探测器^[21]等许多应用中。

此外,可以在平面多层结构中激发多个 TPP 实现多波段窄带辐射。多波段辐射的优势在于可以与探测目标的多个吸收峰对齐,从而提高探测的灵敏度。同时,可以在单个器件上实现多种功能,从而简化器件架构并减少器件功耗^[22]。本文提出了一种无需光刻的大面积双波段热辐射器制备方法,其工作频率在中波红外和长波红外波段。该辐射器由铝薄膜上非周期性的交替沉积 Ge 和 YbF_3 薄膜组成。Ge 和 YbF_3 薄膜组成的(Distributed Bragg reflector, DBR)结构可以在一定条件下与铝薄膜激发

Tamm 等离子激元,在特定波长实现窄带辐射。使用智能算法对两种薄膜的厚度进行了优化,得到了同时在 $4.0\ \mu\text{m}$ 和 $8.2\ \mu\text{m}$ 处具有高品质因子的双波段热辐射器。利用时域有限差分方法分析了这两个峰处的电磁场分布,验证了其在两个波长处的窄带辐射特性均源于激发了 Tamm 等离子激元。结构设计后,利用电子束蒸发镀膜仪成功制备了双波段热辐射器。实验测量得到了 30° 入射角下的反射光谱和透射光谱,证实成功制备了双波段热辐射器,其辐射光谱特性与理论计算相一致。最后,测量了样品在不同温度下的辐射强度谱线和辐射率谱线,验证了样品具有双波段窄带辐射特性。

1 多目标算法优化流程

通过在 $200\ \text{nm}$ 铝基底上交替生长的 Ge 和 YbF_3 层来构建双波段热辐射器。在双波段热辐射器的设计过程中,两个波段的相位匹配条件会相互冲突,这增加了寻找解的难度。因此,采用了多目标粒子群优化(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)和转移矩阵法(TMM)相结合的逆向设计方法来优化每层薄膜的厚度。多目标粒子群算法是一种用于解决多目标优化问题的算法,它能同时处理多个优化目标,寻找在所有目标间取得平衡的解集,从而提供一组可行的解^[23-25]。图 1(a)为双波段热辐射器的 MOPSO 优化过程示意图。在该过程中,产生器首先会随机生成 N 个(N 一般设置为 $100\sim 300$)具有不同参数热辐射器。这些随机生成的热辐射器对应于多目标粒子群算法中的粒子,其几何参数对应于粒子在参数空间的位置,而其几何参数的变化量则对应着粒子的速度。因此,对热辐射器的优化过程可以抽象为粒子在参数空间中的运动过程。随后,为了对热辐射器进行评估,利用传输矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM),并通过公式 $E=A=1-R-T$,根据热辐射器的几何参数计算出了每个辐射器的辐射光谱(Designed Spectra, DS)。并且,针对长波红外和中波红外的目标辐射峰,都预先定义了一个由洛伦兹线性函数来描述的目标光谱(Target Spectra, $\text{TS}(\lambda_i)$, λ_i 是目标辐射峰峰值),表示为

$$TS(\lambda_i) = f(\lambda; \lambda_p, Q) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{Q}{(\lambda/\lambda_p - 1)^2 + Q^2} \right], \quad (1)$$

其中 λ 是辐射波长, Q 是共振峰品质因子。通过将热辐射器的辐射光谱与目标光谱进行对比,得到了每个粒子的适应度函数值,表示为 $Fitness = Mean((TS(\lambda_i) - DS)^2)$ 。在对每个热辐射器进行了评估之后,将单个热辐射器的非支配解记录为个人最佳位置,即 P_{best} 。之后,在这些非支配解的集合中,使用轮盘赌的方式选出全局最佳位置 G_{best} 。然后,根据个人最佳位置和全局最佳位置来更新每个粒子的速度和位置。这样,就完成了一次粒子的迭代搜索的过程。当达到预设的最大迭代次数,或者全局最佳位置的适应度函数值达到了要求,将终止算法的执行。

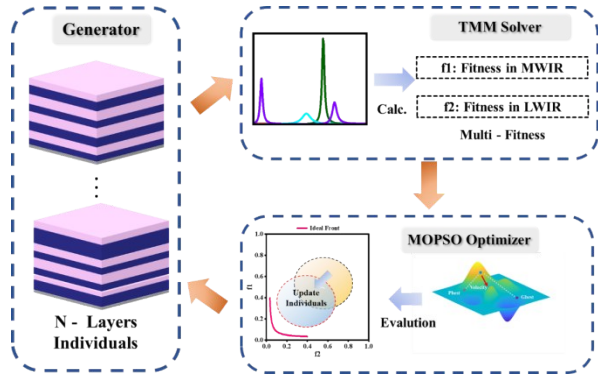


图1 使用MOPSO优化双波段窄带热辐射器的流程图

Fig. 1 Schematic of the MOPSO optimization process for the dual-band thermal

2 双波段热辐射器结构与电磁场分析

在图2中展示了使用多目标粒子群算法优化得到的最优解的集合。其中,横坐标是双波段热辐射器的中波红外(辐射峰值为 $4 \mu m$)的适应度函数值,而纵坐标则是长波红外(辐射峰值为 $8.2 \mu m$)的适应度函数值,红色圆形格点为该多目标问题的非支配解。图中A点对应的参数即为需要的多目标问题的最优解。在图3(a)中展示了其对应的结构,从上到下分别为 660 nm Ge , 800 nm YbF_3 , 379 nm Ge , 715 nm YbF_3 , 483 nm Ge , 580 nm YbF_3 , 411 nm Ge , 390 nm YbF_3 和 200 nm Al 。该结构的辐射光谱如图3(b)所示。从图中可以看出,其中波红外波段 $4.0 \mu m$ 和长波红外波段 $8.2 \mu m$ 处都具有一个高品质因子的窄带辐射峰,满足想要的双波段窄带辐射要求。图3(c)展示了B点对应的热辐射器的辐射

光谱。热辐射器B在 $8.2 \mu m$ 处具有一个接近于1的高品质因子窄带辐射峰,但是在 $4.0 \mu m$ 处并不具有窄带辐射特性。因此,尽管热辐射器B的长波红外适应度函数值优于热辐射器A,但并不满足双波段窄带辐射的要求。C点对应的热辐射器的情况刚好相反,其在 $4.0 \mu m$ 展现出优于热辐射器A的窄带辐射特性,但是在长波红外没有出现窄带辐射峰,同样也不满足双波段窄带辐射的要求。

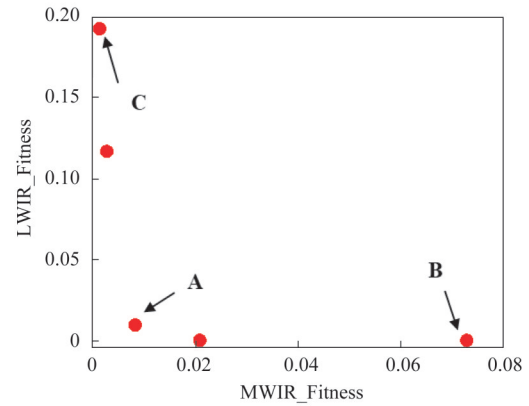


图2 使用MOPSO针对长波红外和中波红外优化得到的解集

Fig. 2 Solutions obtained using MOPSO for LWIR and MWIR

为了探究双波段窄带热辐射器的性质,采用时域有限差分方法对其电磁场分布进行了数值模拟研究。图4(a),(b)中显示了用波长为 $4 \mu m$ 的平面波正入射激发时的归一化电场和磁场模值。从图4(a)中可以看出,模拟计算的电场局域在从下往上数的第二个 YbF_3 薄膜中,并且在附近出现了次极大值。图4(b)中的磁场局域主要在底部两层 Ge 薄膜中。这样的电磁场分布则显示出高阶的Tamm等离激元共振特性。为了提供进一步的理论见解,研究了相同条件下的时间平均功率耗散密度,如图4(c)所示。在计算中,忽略了材料属性随温度的变化。从图4(c)可以发现,大部分的光能被底部的金属吸收,还有小部分被底部的 YbF_3 薄膜吸收。这是由于生长的 YbF_3 薄膜具有较小的消光系数(约为0.04)。而金属的消光系数更高,因此能量大多被金属吸收(约为40)。图4(d)和图4(e)展示了用波长为 $8.2 \mu m$ 的平面波正入射激发时的归一化电场和磁场模值。结果表明,模拟电场和磁场在金属表面附近高度局域化,并沿着垂直于 z 轴正方向呈指数衰减,表现出Tamm等离激元型表面波的特征。图4(f)中展示了相同条件下的时间平均功率耗散密度。通过计算

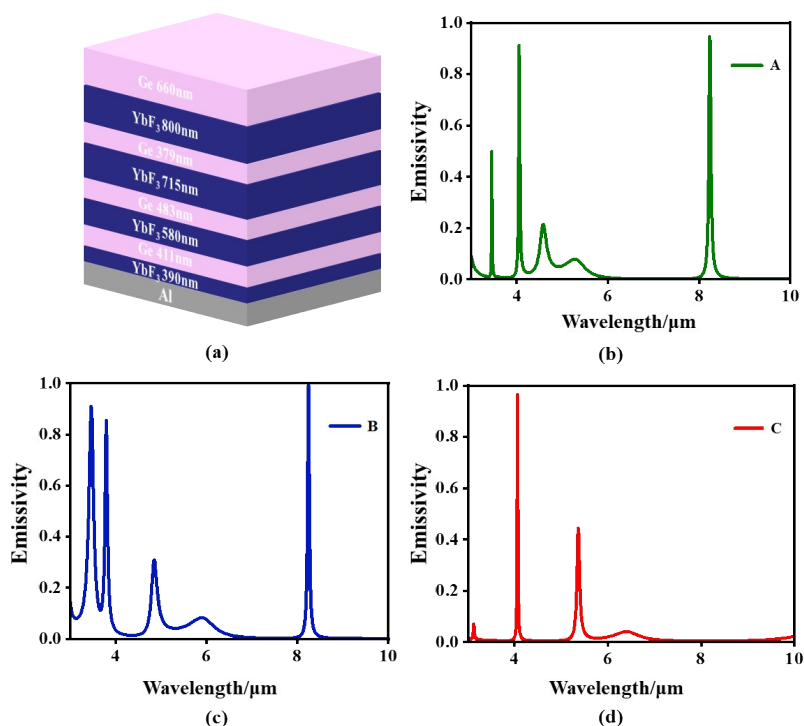


图3 最优解集中热辐射器的几何参数及辐射光谱:(a) 优化的双波段热辐射器示意图;(b) 热辐射器A的辐射光谱;(c) 热辐射器B的辐射光谱;(d) 热辐射器C的辐射光谱

Fig. 3 Geometrical parameters and emission spectra of thermal emitters in the set of optimal solutions: (a) Schematic of the optimized dual-band emitter; (b) emission spectrum of thermal emitter A; (c) emission spectrum of thermal emitter B; (d) emission spectrum of thermal emitter C

发现,当入射波长增长之后,双波段热辐射器中的电磁场分布发生了变化,导致入射光的光能仅被底部的金属层完全耗散。

3 实验验证

为了在实验中证明上述结果,本文利用电子束蒸发设备制备了近 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 大小的 Al/Ge/YbF₃ 结构的薄膜,样品如图 5(a) 中的插图所示。样品的截面图如图 5(a) 所示。可以看到沉积的 9 层薄膜界面清晰且薄膜表面平整,具有非常优良的品质。采用傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Scientific Nicolet isso),在室温下测量了样品在 30° 入射角下的 s 偏振光的反射率和透射率,并据此计算得到了其辐射率,结果如图 5(b) 中的黑色实线所示。使用时域有限差分方法,计算了在相同条件下,具有相同参数的热辐射器的理论辐射谱线,其结果以图 5(b) 中的红色虚线表示。从图 5(b) 可以看出实验测量与理论计算结果高度一致。二者之间的微小差异(实验测量得到的样品的辐射率的峰值及品质因子略低

于理论值)可能主要源于样品制作过程中的不完美。为了直接表征热辐射器的辐射特性,将制作好的热辐射器放置在热板上,并利用连接到样品上的热电偶记录其温度。使用傅里叶变换红外光谱仪测量了样品在不同温度下的热辐射光谱,如图 5(c) 所示。图 5(c) 展示了在法线方向上,从 50°C 至 150°C (以 10°C 为间隔)测得的样品辐射强度光谱。由于探测器未经校准,测量结果以任意单位显示。结果显示,热辐射器在波长 $8.2\text{ }\mu\text{m}$ 附近显现出明显的窄带热辐射特性。随着温度的升高,实验中的热辐射峰略微向长波方向移动,这主要归因于材料折射率对温度的依赖性,而波长 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 附近的辐射峰则较难观察到。为了进一步分析,测量了相同温度下黑体的辐射强度光谱,并据此计算得到了样品的辐射率,结果绘制于图 5(d) 中。由于低温下环境噪声较大,图 5(d) 中仅展示了 120°C 至 150°C 范围内样品的辐射率谱线。从图中可明显观察到样品在 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8.2\text{ }\mu\text{m}$ 处的窄带辐射峰,验证了样品的双波段窄带辐射特性。

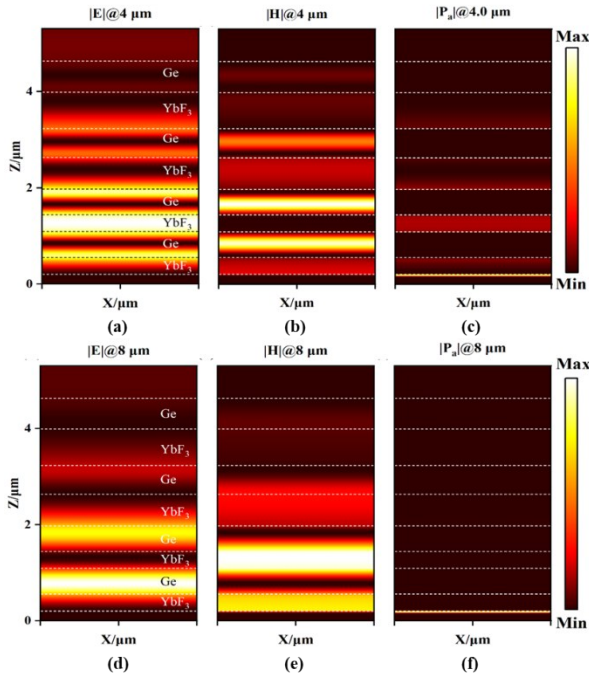


图4 双波段热辐射器的电磁场分布和时均功率耗散密度: 波长为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的平面波正入射时的(a) 归一化电场强度;(b) 归一化磁场强度;(c) 时均功率耗散密度。波长为 $8.2\text{ }\mu\text{m}$ 的平面波正入射时的(d) 归一化电场强度;(e) 归一化磁场强度;(f) 时均功率耗散密度

Fig. 4 The electromagnetic field distributions and time-averaged power dissipation density of the dual-band thermal emitter: (a) simulated normalized electric field intensity and (b) simulated normalized magnetic field intensity (c) time-averaged power dissipation density at $4\text{ }\mu\text{m}$; (d) simulated normalized electric field intensity and (e) simulated normalized magnetic field intensity (f) time-averaged power dissipation density at $8.2\text{ }\mu\text{m}$

4 总结

本文提出并通过实验证明了一种大面积无需光刻的双波段窄带热辐射器。该热辐射器主要由 Ge 和 YbF_3 薄膜组成的 DBR 结构与铝金属基底组成。通过使用 MOPSO 并结合 TMM 算法对其中 DBR 结构的几何参数进行了优化,得到了可以同时在这 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8.2\text{ }\mu\text{m}$ 实现高品质因子的双波段热辐射器。使用时域有限差分方法分析了这两个峰值处电磁场分布及时间平均功率耗散密度,发现电磁场主要局域在结构底部,电磁场能量主要被底部金属耗散,这验证了双波段窄带热辐射器的窄带辐射特性均源于 Tamm 等离子激元共振。利用电子束蒸发镀膜设备成功制备了双波段热辐射器。使用傅里叶

变换红外光谱仪在室温下,测量了样品在 30° 入射角下的 s 偏振光的反射率和透射率,并据此计算得到了双波段热辐射器的辐射光谱。与使用时域有限差分方法在相同条件下得到的辐射光谱进行对比,发现具有一致性。其中的微小差异可能主要是由于制作的样品不完善造成的。使用电加热热板加热样品,使用傅里叶变换红外光谱仪实验测量得到了其在 $50\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ ($10\text{ }^\circ\text{C}$ 为间隔)下的辐射强度光谱,并观察到了其在长波红外 $8.2\text{ }\mu\text{m}$ 处的窄带辐射峰。最后,测量了相同温度下黑体的辐射强度谱线,通过计算得到了样品在 $120\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ ($10\text{ }^\circ\text{C}$ 为间隔)的辐射率谱线,并成功观察到其在双波段 ($4.0\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8.2\text{ }\mu\text{m}$) 窄带辐射特性。

References

- [1] Rinnerbauer V, Yeng Y X, Chan W R, *et al.* High-temperature stability and selective thermal emission of polycrystalline tantalum photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 11482.
- [2] Chan W R, Bermel P, Pilawa-Podgurski R C N, *et al.* Toward high-energy-density, high-efficiency, and moderate-temperature chip-scale thermophotovoltaics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, **110**(14): 5309-5314.
- [3] Chan D L C, Soljačić M, Joannopoulos J D. Thermal emission and design in 2D-periodic metallic photonic crystal slabs [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(19): 8785.
- [4] Pralle M U, Moelders N, McNeal M P, *et al.* Photonic crystal enhanced narrow-band infrared emitters [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(25): 4685-4687.
- [5] Ikeda K, Miyazaki H T, Kasaya T, *et al.* Controlled thermal emission of polarized infrared waves from arrayed plasmon nanocavities [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(2): 021117.
- [6] Miyazaki H T, Ikeda K, Kasaya T, *et al.* Thermal emission of two-color polarized infrared waves from integrated plasmon cavities [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(14): 141114.
- [7] Biener G, Dahan N, Niv A, *et al.* Highly coherent thermal emission obtained by plasmonic bandgap structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(8): 081913.
- [8] Liu X, Tyler T, Starr T, *et al.* Taming the Blackbody with Infrared Metamaterials as Selective Thermal Emitters [J]. *Physical Review Letters*, 2011, **107**(4): 045901.
- [9] Mason J A, Smith S, Wasserman D. Strong absorption and selective thermal emission from a midinfrared metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(24): 241105.
- [10] Molesky S, Dewalt C J, Jacob Z. High temperature epsilon-near-zero and epsilon-near-pole metamaterial emitters for thermophotovoltaics [J]. *Optics Express*, 2012, **21**(S1): A96-A110.
- [11] Wang Z, Luk T S, Tan Y, *et al.* Tunneling-enabled spec-

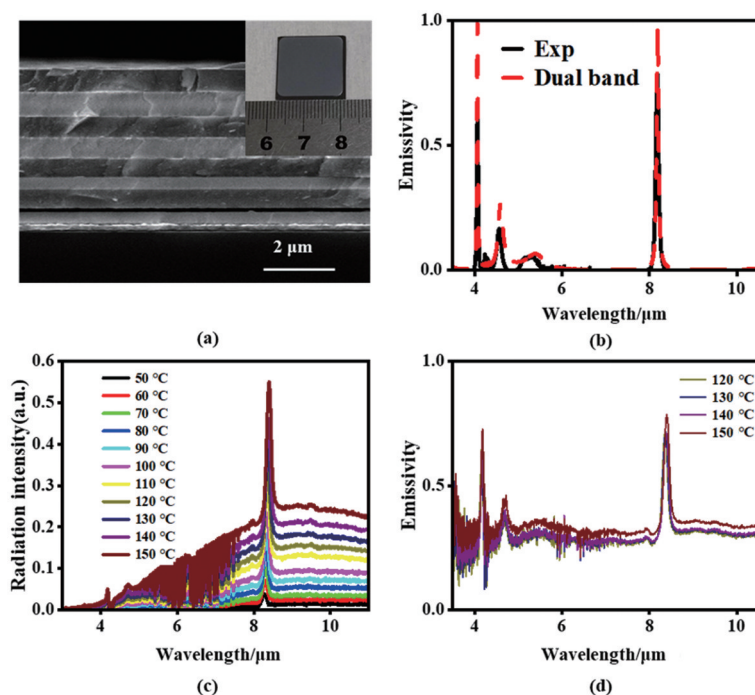


图5 双波段窄带热辐射器的实验表征:(a) 制备好的样品的扫描电镜图像。插图中为样品光学图像;(b) 辐射角为 30° 的 s 偏振下的双波段热辐射器的理论和实验辐射率光谱;(c) 样品在 $50\sim 150^\circ\text{C}$ 温度下测得的法线方向辐射强度光谱;(d) 样品在四个温度下测得的辐射率光谱

Fig. 5 Experimental characterization of the dual-band thermal emitter: (a) SEM image of part of the dual-band thermal emitter samples. An optical image of the sample is shown in the inset; (b) the theoretical (red dotted and dashed line) and experimental (black solid line) emissivity spectra of the dual-band thermal emitter samples with s polarization at 30° incident angle; (c) the measured emissivity intensity spectra in the normal direction for eleven different temperatures; (d) the measured emissivity spectra in the normal direction for four different temperatures

- trally selective thermal emitter based on flat metallic films [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(10): 101104.
- [12] Wang L P, Basu S, Zhang Z M. Direct Measurement of Thermal Emission From a Fabry - Perot Cavity Resonator [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2012, **134**(7): 072701.
- [13] Liu X, Li Z, Wen Z, *et al.* Large-area, lithography-free, narrow-band and highly directional thermal emitter [J]. *Nanoscale*, 2019, **11**(42): 19742-19750.
- [14] Wang Z, Clark J K, Ho Y L, *et al.* Ultranarrow and Wavelength-Tunable Thermal Emission in a Hybrid Metal - Optical Tamm State Structure [J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(6): 1569-1576.
- [15] Wu H, Gao Y, Xu P, *et al.* Plasmonic Nanolasers: Pursuing Extreme Lasing Conditions on Nanoscale [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(17): 1900334.
- [16] Symonds C, Lheureux G, Hugonin J P, *et al.* Confined Tamm Plasmon Lasers [J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(7): 3179-3184.
- [17] Ma R M, Oulton R F. Applications of nanolasers [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, **14**(1): 12-22.
- [18] Lochbaum A, Fedoryshyn Y, Dorodnyy A, *et al.* On-Chip Narrowband Thermal Emitter for Mid-IR Optical Gas Sensing [J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(6): 1371-1380.
- [19] Vlk M, Datta A, Alberti S, *et al.* Extraordinary evanescent field confinement waveguide sensor for mid-infrared trace gas spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, **10**(1): 26.
- [20] Lochbaum A, Dorodnyy A, Koch U, *et al.* Compact Mid-Infrared Gas Sensing Enabled by an All-Metamaterial Design [J]. *Nano Letters*, 2020, **20**(6): 4169-4176.
- [21] Zhang C, Wu K, Zhan Y, *et al.* Planar microcavity-integrated hot-electron photodetector [J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(19): 10323-10329.
- [22] He M, Nolen J R, Nordlander J, *et al.* Deterministic inverse design of Tamm plasmon thermal emitters with multi-resonant control [J]. *Nature Materials*, 2021, **20**(12): 1663-1669.
- [23] Hassan A K S O, Etman A S, Soliman E A. Optimization of a Novel Nano Antenna With Two Radiation Modes Using Kriging Surrogate Models [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(4): 1-17.
- [24] Nagar J, Campbell S D, Ren Q, *et al.* Multiobjective Optimization-Aided Metamaterials-by-Design With Application to Highly Directive Nanodevices [J]. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2017, **2**: 147-158.
- [25] Wiecha P R, Arbouet A, Girard C, *et al.* Evolutionary Multi-Objective Optimisation of Colour Pixels based on Dielectric Nano-Antennas [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, **12**(2): 163-169.