

研究论文

基于亚波长聚醚酰亚胺/金属基复合涂层的波长选择性红外隐身技术研究

张旭阳^{1,2}, 潘亮^{1,2}, 李心如¹, 张璇², 蔡晓东², 文政绩^{2*}, 邵宇川^{1,2}

摘要 传统光学薄膜与超构表面难以满足低成本、大面积红外隐身需求。开发了一种基于聚醚酰亚胺(polyetherimide, PEI)/铬(Cr)的低成本红外隐身复合涂层。通过转移矩阵法(transfer matrix method, TMM)理论计算与时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)仿真结合工艺优化,确定最优结构为 4.5 μm PEI 层/Cr 层。实验验证该涂层在 3~5、5~8 和 8~14 μm 波段的平均发射率分别低至 0.26、0.61 和 0.47,同时实现探测波段隐身与非探测波段辐射散热。揭示了其红外响应机制源于 PEI 化学键振动吸收与法布里-珀罗共振的协同作用。PEI 材料的高机械性能与低成本工艺支持多场景应用。实验与仿真结果高度吻合,验证了设计方法的有效性,为低成本红外隐身材料开发提供了新思路,在军事隐身与热管理领域具有重要应用价值。

关键词 红外隐身;聚醚酰亚胺;发射率;选择性辐射;低成本涂层

热辐射作为自然界 3 大基本传热方式之一,其本质是物体通过电磁波辐射形式实现能量传递的过程。与传导和对流热传递方式不同,热辐射传热过程无须依赖介质,这一特性使其在空间热管理与辐射制冷等领域具有独特优势^[1]。然而在现代战争中,热辐射的方式虽然能帮助物体散热,但目标物体向外辐射的电磁波信号也会成为敌方探测系统的识别依据,这种矛盾催生了红外隐身技术的迫切需求。基于斯忒藩-玻耳兹曼定律

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

式中, E 为辐射通量, ε 为表面发射率, σ 为斯忒藩-玻

耳兹曼常数, T 为绝对温度。

调控物体表面红外发射率成为实现热辐射隐身的核心机制^[2]。

传统红外隐身技术采用金属镀层法,通过金属材料固有的低发射率特性($\varepsilon < 0.1$)实现辐射抑制。但该技术存在显著缺陷:全波段的低发射率导致目标表面热辐射受阻,造成严重的热量积聚问题^[3]。值得注意的是,大气层对红外辐射具有选择性透过的“大气窗口”(主要透射波段为 3~5、8~14 μm)^[4]。这一特性推动了波长选择性辐射隐身技术的发展方向:在大气窗口波段维持低发射率以降低可探测性,同时在大窗口外波段保持高发射率以促进热量耗散。这种光谱选择性调控策略既能实现有效隐身,又可规避传统技术带来的散热难题,已成为当前红外隐身领域的研究前沿。

随着光谱调控技术的发展,红外隐身材料体系经

1. 上海大学微电子学院,上海 201899

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学研发中心,上海 201800

收稿日期:2025-06-23;修回日期:2026-02-02

基金项目:中国科协青年人才托举工程项目(YESS20220355);上海市自然科学基金面上项目(24ZR1475000);国家自然科学基金项目(12504376)

作者简介:张旭阳,硕士研究生,研究方向为红外薄膜与红外有机涂料,电子信箱:zxyang@siom.ac.cn;潘亮(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为红外微测辐射热计,电子信箱:liangpanbjy@163.com;文政绩(通信作者),副研究员,研究方向为超构薄膜红外热辐射调控,电子信箱:wenzhengji@siom.ac.cn

引用格式:张旭阳,潘亮,李心如,等.基于亚波长聚醚酰亚胺/金属基复合涂层的波长选择性红外隐身技术研究[J].科技导报,2026,44(8):98-105;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.06.00106

历了从单波段散热窗口(主要为 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$)^[5-7]到双波段散热窗口(主要为 $5\sim 8$ 、 $14\sim 20\text{ }\mu\text{m}$),再到多波段选择性热辐射隐身薄膜^[8-10]的迭代演进。然而,基于无机多层膜结构的辐射调控器件或超构表面技术^[11-13]虽能实现精准光谱操控,但其纳米级加工精度要求和复杂的真空沉积工艺导致制造成本较高,而且难以实现大面积制备,严重制约了大规模工程化应用。在此背景下,具有低成本、可大面积加工等优势有机涂层技术,逐渐成为波长选择性热辐射领域的研究热点^[14-16]。但受限于有机聚合物的分子本征吸收特性,其在关键隐身波段($8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 对应指纹区)普遍存在强烈振动吸收,导致该波段发射率难以满足高效隐身需求。本研究发现,聚醚酰亚胺(polyethyleneimine, PEI)、聚酰亚胺(polyimide, PI)等芳香族聚合物在 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 波段表现出较高消光系数,显著高于其在 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段的吸收特性。基于此特性,通过精确调控涂层厚度至 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 范围,成功制备出兼具光谱选择性与热管理功能的红外隐身薄膜涂层:在 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 大气窗口保持低发射率,同时在 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 非探测波段实现高发射率,有效解决了传统金属镀层的热堆积难题。需要指出的是,有机聚合物的光热转换机制涉及分子振动模式($\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{N}$ 等官能团)、电子跃迁,以及薄膜干涉效应的多重耦合作用^[17-19]。现有研究多聚焦于材料筛选与工艺优化,对其内在的关联规律仍缺乏系统性认知。

本研究聚焦 PEI 这一典型芳香族聚合物,系统探究其红外辐射调控机制与工程应用潜力。研究采用“理论设计—工艺优化—性能验证”的多尺度研究范式:实验层面开发基于粉末刮涂的薄膜制备工艺,通过傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)定量表征 $3\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 中红外波段的发射率,结合扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)表征涂层厚度、X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)解析化学键合状态与热稳定性的关联机制。理论层面构建多物理场耦合模型,使用时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)模拟微纳尺度下的电磁场分布特征,通过转移矩阵法(transfer matrix method, TMM)解析薄膜厚度与干涉效应的定量关系。特别关注 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动(1720 cm^{-1})、芳香环面外弯曲振动(740 cm^{-1})等特征吸收峰对辐射特性的调制作用,建立分子振动

模式与宏观光学响应的构效关系模型。本研究旨在提出亚波长有机聚合物本征吸收与薄膜干涉效应的协同调控策略,突破了传统材料在“低发射率”与“热管理”间的性能平衡难题。

1 实验设计

本研究旨在探究以亚波长 PEI/金属薄膜为例的低成本有机聚合物涂层在红外隐身方面的应用。实验样品结构如图 1 所示。

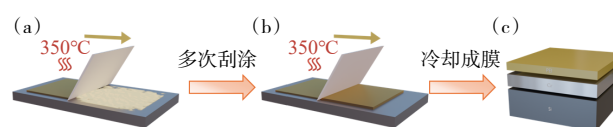


图 1 PEI 涂层多次刮涂示意(a)~(b)和样品结构示意图(c)

取常规的工业级 PEI 粉末原材料(购自上海亿塑减电子有限公司)、铬(Cr)蒸发料(购自中诺新材料科技有限公司)。采用单面抛光的本征硅片作为衬底,切割成约 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$,使用去离子水进行超声清洗,经清洗后,利用热蒸发法在硅片表面沉积 100 nm 厚的 Cr 薄膜作为金属反射层。PEI 涂层的制备流程如图 1(a)、(b)所示:首先将镀有 Cr 膜的硅片置于热板上,设置温度 $\geq 350^\circ\text{C}$ 并加热 5 min 以确保硅片均匀受热;随后使用静电喷枪在热硅片表面喷涂一层 PEI 粉末,待米白色粉末熔融形成琥珀色胶状物后,立即用刮板手动刮涂,形成厚度约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的均匀涂层。待第 1 次刮涂层完成后,使用手持式刮刀对样品进行以减薄为目的的多次刮涂,逐步将 PEI 涂层厚度降至约 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 。实验完成后,使用台阶仪测量涂层厚度以确保达到目标值,最终的样品结构示意图如图 1(c)所示。需要注意的是,由于熔融 PEI 黏度极高,当涂层厚度减薄至 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以下时,其均匀性会急剧下降(如图 2(a)所示),原因在于减薄刮涂过程中高黏度 PEI 易黏附并剥离下层 Cr 膜,或因受力不均导致厚度极度不均匀,甚至可能因操作不当刮伤表面 Cr 层。

2 结果与讨论

2.1 样品物性与光谱表征

相较于磁控溅射、电子束沉积、热蒸发镀膜等传

统物理沉积工艺,采用刮涂、喷涂或旋涂等方式制备的有机薄膜(如 PEI 涂层)其厚度控制更具挑战性。为实现对 PEI 涂层厚度的精准调控,样品制备完成后综合采用台阶仪和 SEM 进行厚度验证表征。如图 2(a)所示,样品表面右上角区域涂层厚度低于 $4\text{ }\mu\text{m}$,可观察到明显的均匀性下降;而中间 PEI 涂层厚度约为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$,则表现出较好的均匀性,该现象与前述 PEI 粉末刮涂成膜工艺的经验描述相符。此外,样品图片显示,涂覆 PEI 的区域呈现透明的淡黄色,且当涂层厚度低于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,在可见光波段仍能保持较高的透过率,表明较薄的 PEI 涂层具有良好的可见光透明性,这一特性也关联到聚酰亚胺类材料在透明显示领域的潜在应用。为精确测定 PEI 涂层厚度,如图 2(b)所示,选取中部均匀区域,SEM 结果显示界面较为均匀,PEI 涂层厚度测得约为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$,该结果与台阶仪的测量数据基本吻合,证实了厚度数据的可靠性。同时,在浅灰色(PEI 层)与黑色(Si 基层)区域的交界处可见一条深灰色的界面层,此即热蒸发沉积的 Cr 层。

在理论计算与仿真模拟部分,分别采用 TMM 进行理论计算,以及利用 FDTD 进行仿真分析。PEI 与 Cr 的光学参数分别取自参考文献^[20-21],通过对不同厚度样品的模拟光谱与实验光谱进行多次对比分析,结果表明,所采用的光学参数基本适用于本体系。计算与仿真均基于 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ PEI/ 100 nm Cr 的简化结构,省略了实验样品中的单抛硅片衬底。这是因为当 Cr 层

厚度大于 100 nm 时,薄膜结构透射率几乎为 0, Si 基底对样品吸收产生影响可以忽略,因此, Si 层在仿真模拟中可忽略不计^[22]。根据 TMM 计算结果得 $\epsilon_{3\sim5} \approx 0.28$ 、 $\epsilon_{5\sim8} \approx 0.63$ 、 $\epsilon_{8\sim14} \approx 0.40$ 。如图 2(c)所示,为了验证样品的红外发射率信息,使用 FTIR 测量样品的反射率(R),并据此计算吸收率。进一步依据基尔霍夫定律,即吸收率等于发射率,计算得到样品发射率,分别为 $\epsilon_{3\sim5} \approx 0.26$ 、 $\epsilon_{5\sim8} \approx 0.61$ 、 $\epsilon_{8\sim14} \approx 0.47$ 。实验结果与理论计算及仿真分析结果基本吻合,且实验观察到的各吸收峰均在计算仿真中得到体现。实验结果与仿真结果之间的差异,主要源于实验制备的 PEI 涂层非理想薄膜(存在均匀性差异),以及 Cr 层与 PEI 层表面杂质干扰等影响。

为获取样品表面元素信息,采用 XPS 进行表征,其全谱如图 3(a)所示。图 3(a)表明, PEI 涂层主要由 C、N、O 这 3 种元素组成。结合参考文献^[23-25]的 XPS 分析结果, PEI 涂层的化学成分基本固定,且 O 元素与 C 元素的含量比例接近,证明 PEI 涂层吸水及氧化污染程度较低。进一步分析 PEI 的化学键合状态:对 XPS 测试得到的 C、N、O 单元素谱图进行拟合,并以 C 元素的 C-H/C-C 标准结合能(284.8 eV)为参考进行荷电校正(移峰)。结果如图 3(b)~(d)所示: C 元素存在 3 个峰位,分别位于 284.8 eV (C-C/C-H)、 286.3 eV (C-N)和 288.7 eV (C-O); O 元素存在 2 个峰位,位于 531.8 eV (C-O)和 533.4 eV (C-O); N 元素仅存在 1 个峰位,位于 400.3 eV ,对应于 C-N 键,但其峰形展宽较大,推测与 PEI 中 N 元素存在形式有关。

实验测试的样品吸收图谱与 PEI 的 FTIR 光谱分析图基本对应,存在的轻微差异与 PEI 薄膜制备过程引起的误差相关联^[26]。在实验结果中,高频区($2800\sim3500\text{ cm}^{-1}$)对应 $3.37\text{ }\mu\text{m}$ 处出现的较弱吸收峰由羟基键(—CH)的伸缩振动导致。指纹区($600\sim1250\text{ cm}^{-1}$)对应 $11.7\text{ }\mu\text{m}$ 附近出现的宽带吸收峰则与芳香环的面外弯曲振动以及酰亚胺环的变形振动有关。对于 $5\sim8\text{ }\mu\text{m}$ 的辐射散热波段,羰基与酰亚胺特征区域($1650\sim1800\text{ cm}^{-1}$)对应 $5.5\sim6\text{ }\mu\text{m}$ 波段的较强吸收主要与羰基键($\text{C}=\text{O}$)相关。 $6\sim6.6\text{ }\mu\text{m}$ 的较高吸收峰则是由芳香环中的碳碳双键($\text{C}=\text{C}$)骨架振动产生的。在 C-N 键区域($1300\sim1400\text{ cm}^{-1}$),对应 $7.1\sim7.6\text{ }\mu\text{m}$ 波段出现的高峰则是由酰亚胺环中的 C-N-C

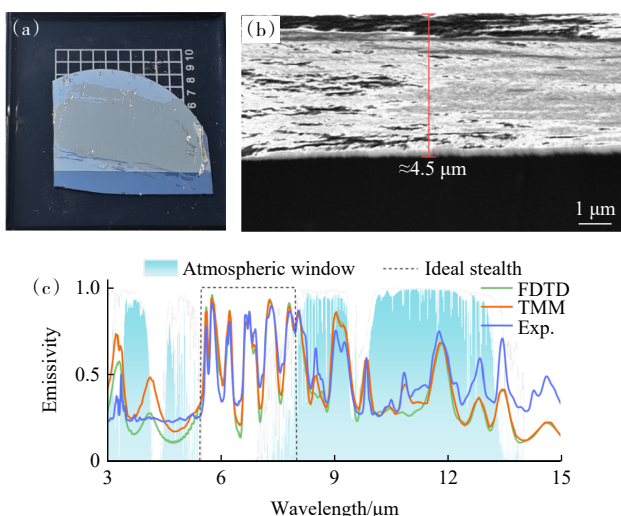


图2 PEI 涂层样品(a)扫描电子显微镜下的样品截面(b)和 FTIR 测试实验的实验光谱与仿真光谱结果(c)

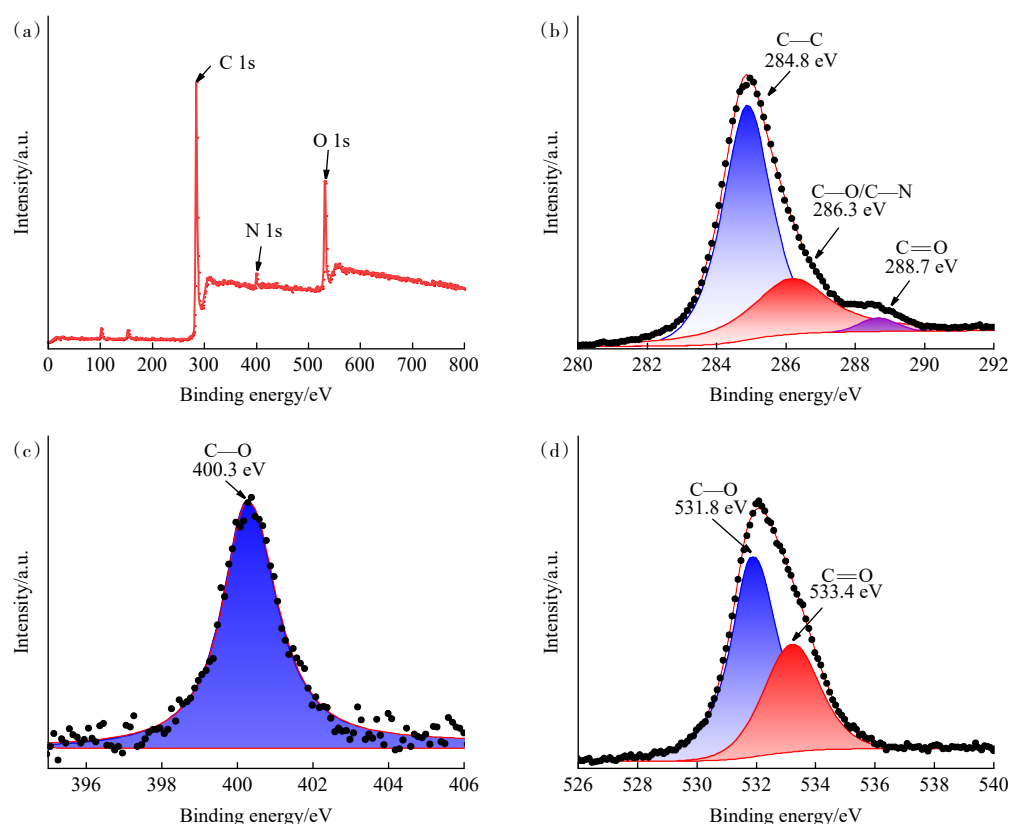


图3 XPS元素谱图(a)、C 1s谱(b)、N 1s谱(c)和O 1s谱(d)

伸缩振动导致的。这些化学键构成了 PEI 在红外非探测波段中的高辐射散热特性。此外, 7.6~8.3 μm 与 8.8~9.6 μm 波段出现的 2 个较高的吸收峰则与醚键 (C—O—C) 对称或不对称伸缩振动相关^[27-30]。

2.2 PEI 厚度优化与角度扫描

根据朗伯-比尔定律

$$A = K \cdot l \cdot c \quad (2)$$

式中, A 为吸光度, K 为摩尔吸光系数, l 为介质厚度, c 为吸光物质浓度。

有机物涂层在特定波段的吸收率通常与其厚度呈正相关^[31-32]。为探究 PEI 涂层厚度与红外光谱吸收/发射率的关系, 采用 FDTD 方法对涂层厚度进行参数扫描, 结果如图 4(a)~(b)所示。PEI 涂层厚度的变化对 3~8 μm 波段的发射率影响较小, 但会显著影响 8~14 μm 波段的发射率。当涂层厚度小于 4.5 μm 时, 8~14 μm 波段整体发射率较低, 且随厚度减小, 样品发射率进一步降低。当厚度小于 3 μm 时, $\varepsilon_{8-14} < 0.3$ 、 $\varepsilon_{5-8} \approx 0.55$, 隐身性能得到提升。然而, 受限于实际工艺条件的限制(如均匀性控制难度), 综合考量后选择 4.5 μm 作为实验样品的优化厚度。

为研究样品的光谱角度和偏振特性, 采用 TMM 方法, 在保持 PEI/Cr 结构不变的条件下, 分别对 2 种偏振状态(TE(transverse electric wave)和 TM(transverse magnetic wave))进行入射角度($0^\circ \sim 80^\circ$)扫描, 结果如图 4(c)~(e)所示。当入射角 $\theta < 60^\circ$ 时, PEI 涂层的发射率/吸收率对角度和极化选择性不明显。当 $\theta > 60^\circ$ 时, TM 极化波在整个 3~15 μm 波段的吸收显著增强, 这得益于 TM 波在布儒斯特角附近更显著的吸收增强效应, 导致更多电磁波能量耦合进入 PEI 涂层内部并被吸收^[33-34]。对于 TE 偏振, 在大角度($\theta > 60^\circ$)平面波入射时, 由于法布里-珀罗(Fabry-Pérot, FP)共振模式的破坏, PEI 涂层在全波段的吸收效率下降^[35-39]。同时, PEI 在 8~14 μm 波段的消光系数低于其在 5~8 μm 波段。因此, 在 TE 偏振大角度入射下, PEI 涂层在 8~14 μm 波段维持了相对较低的吸收/发射率(有利于红外隐身), 同时样品在 5~8 μm 波段仍能保持一定的辐射能力(有利于散热), 从而实现了隐身效果与散热需求的进一步协同平衡。根据图 4(e)所示结果, 本研究中所用样品的红外光谱随入射角度变化并未产生显著差异, 表现出良好的角度不敏感

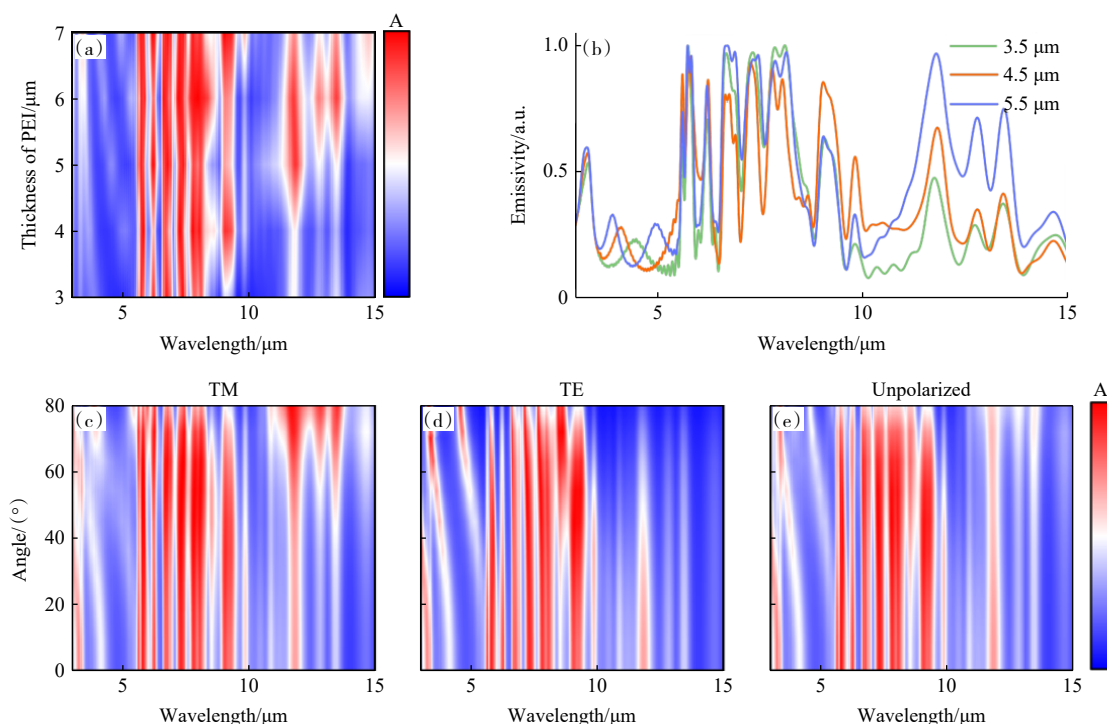


图4 FDTD模拟不同厚度下的PEI涂层的吸收图谱(a)~(b)和TMM计算不同入射角度下4.5 μm 的PEI涂层TM偏振与TE偏振及非偏振的吸收图谱(c)~(e)

性,因而能够满足多场景应用对红外隐身性能的需求。

2.3 PEI/Cr膜系的电磁与磁场分布

为深入探究PEI涂层厚度对电磁波传播的影响,采用FDTD对其电磁场分布进行数值模拟(图5)。图5(a)和图5(b)分别展示了5.8 μm 波长(强吸收波段)处平面波正入射时的电场和磁场分布。结合光谱数据分析可知:在该波段,PEI涂层对电磁波具有强损耗特性,导致电场与磁场强度显著衰减;同时受反对称法FP共振影响,在非主吸收区也观察到弱损耗现象。图5(d)和图5(e)则呈现了9.6 μm 波长(强吸收波段)处正入射下的电场与磁场分布。由于PEI在此波段的介质损耗较低,电场与磁场的衰减效应相对不明显;而FP共振模式的薄膜干涉效应则更为显著;进一步地,为了揭示电磁吸收损耗的物理机制,采用有限元法(finite element method, FEM)仿真相同条件下样品的时间平均功率耗散密度(在计算中忽略材料属性的温度依赖性)。如图5(c)和图5(f)所示,样品的电磁损耗主要源于2类机制:化学键共振吸收——有机物分子键的振动模式;入射电磁波耦合与FP共振模式——多层结构中的驻波场增强效应。

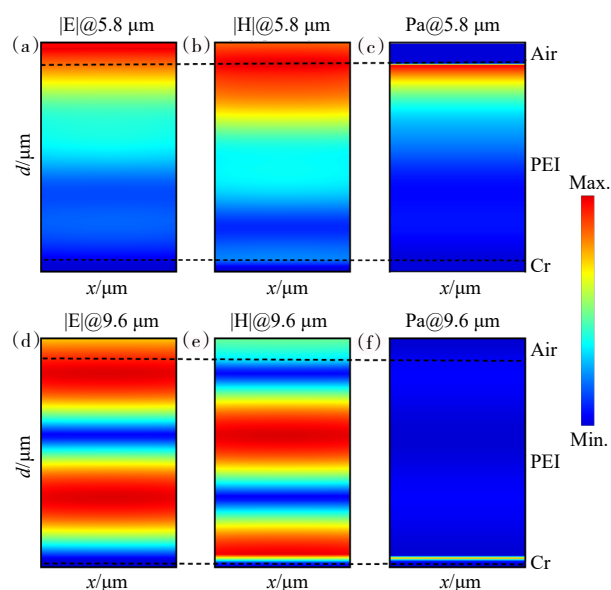


图5 FDTD模拟样品在(a)~(c)和5.8、9.6 μm 处的电场、磁场及电磁损耗分布图(d)~(f)

2.4 隐身性能评估

为定量评估样品在实战场景中的红外隐身效能,采用工作波段8~14 μm 的长波红外热像仪进行热成像测试。在恒温恒湿环境(25 ± 1 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度($50\%\pm 5\%$))下,将样品直接贴附于人体手掌表面,即基础温度(37.0 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$),进行动态热监测。如图6所示,热成像

数据清晰显示:裸露手掌区域呈现典型生物热特征(37℃),而金属 Cr 参照区表观温度降至 26℃($\Delta T=11^\circ\text{C}$);关键的是,4.5 μm PEI 涂层区域表观温度稳定维持在 28℃($\Delta T=9^\circ\text{C}$),与皮肤形成显著热隔离带。该温差值远超典型红外探测器识别阈值,证实涂层可有效阻断人体热辐射传导。9℃ 的稳定热梯度表明,材料在 8~14 μm 大气窗口波段实现超过 80% 的热信号抑制率,满足实战环境红外隐身核心指标要求。其热伪装机制源于 PEI 层对生物体热辐射的选择性阻隔与 Cr 层的红外反射协同作用。

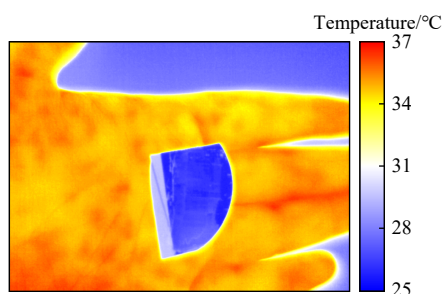


图6 样品在红外相机下的隐身效果展示

3 结论

本研究提出了一种基于 PEI/Cr 的低成本红外隐身功能涂层制备方法。通过理论计算与数值模拟相结合的方法,在满足工艺可行性的前提下,确定了金属反射层(厚度 100 nm)与 PEI 介质层(4.5 μm)的最佳组合厚度。实验结果显示,制备的样品在 3 个波段的平均发射率分别为 $\varepsilon_{3\sim 5} \approx 0.26$ 、 $\varepsilon_{5\sim 8} \approx 0.61$ 、 $\varepsilon_{8\sim 14} \approx 0.47$ 。光谱特性分析表明,涂层辐射分布的形成机制主要源于 2 方面:一是有机分子结构中 C=O 键和 C—N 键等化学键的红外特征振动吸收;二是亚波长结构中的 FP 共振效应。实验制备得出的样品兼具波长选择性辐射散热与红外隐身能力,同时由于 PEI 作为工程塑料自身优异的机械性能可大范围便捷地应用于多种隐身场景。

参考文献(References)

- [1] Zhao B, Hu M K, Ao X Z, et al. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 489–513.
- [2] 文政绩, 李晓温, 赵文超, 等. 亚波长薄膜堆栈超构材料: 理

- 论及应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(1): 2021348.
- [3] 湛玉莲, 李春海, 郭少云, 等. 红外隐身材料研究进展[J]. *红外技术*, 2021, 43(4): 312.
- [4] Zhang J G, Wen Z J, Zhou Z J, et al. Long-wavelength infrared selective emitter for thermal infrared camouflage under a hot environment[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 24132–24144.
- [5] Liu B, Shi J M, Zhang J K, et al. Infrared stealth performance analysis of photonic crystal with high heat dissipation[J]. *Optical Materials*, 2021, 111: 110689.
- [6] Kim J, Han K, Hahn J W. Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 6740.
- [7] Tan C, Wen Z J, Zhang J G, et al. Deep-subwavelength multi-layered meta-coatings for visible-infrared compatible camouflage[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(13): 2391–2400.
- [8] Hai W Q, Bi S Y, Yang L L, et al. Advanced multiphysics camouflage based on low-emissivity meta-surface coupled with wave-absorbing and thermal-insulating aerogel[J]. *Small*, 2025, 21(18): 2500155.
- [9] Zhao M, Zhu H Z, Qin B, et al. High-temperature stealth across multi-infrared and microwave bands with efficient radiative thermal management[J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 199.
- [10] Zhu H Z, Li Q, Tao C N, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1805.
- [11] Yang C, Guo H, Chang H C, et al. Infrared camouflage and radar compatible stealth structure based on metamaterial[J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(5): 1513.
- [12] Huang G, Yengannagari A R, Matsumori K, et al. Radiative cooling and indoor light management enabled by a transparent and self-cleaning polymer-based metamaterial[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 3798.
- [13] Fu Z C, Yang Z N, Wang F Q, et al. Inverse design of metamaterial for dual-band infrared camouflage along with dual-band thermal management[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131128.
- [14] Meng X, Chen Z C, Qian C L, et al. Durable and mechanically robust superhydrophobic radiative cooling coating[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 478: 147341.
- [15] Zhou L, Song H M, Liang J W, et al. A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(8): 718–724.
- [16] Pyun J, Norwood R A. Infrared plastic optics and photonic devices using chalcogenide hybrid inorganic/organic polymers via inverse vulcanization of elemental sulfur[J].

- Progress in Polymer Science*, 2024, 156: 101865.
- [17] Meador M A B, Alemán C R, Hanson K, et al. Polyimide aerogels with amide cross-links: A low cost alternative for mechanically strong polymer aerogels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(2): 1240–1249.
- [18] Butler J M, George M W, Schoonover J R, et al. Application of transient infrared and near infrared spectroscopy to transition metal complex excited states and intermediates[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2007, 251(3/4): 492–514.
- [19] Kaim W. Materials with electronic transitions in the near-infrared[J]. *Journal of Chemical Sciences*, 2019, 131(9): 95.
- [20] Zhang X N, Qiu J, Zhao J M, et al. Complex refractive indices measurements of polymers in infrared bands[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 252: 107063.
- [21] Rakić A D, Djurišić A B, Elazar J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5271–5283.
- [22] Li Q Y, Gong D Q, Cheng X D. Thickness dependence of structural and optical properties of chromium thin films as an infrared reflector for solar-thermal conversion applications[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Edit*, 2019, 34(6): 1239–1247.
- [23] Pasini S M, Batistella M A, de Souza S M A G U, et al. Thermal degradation and flammability of TiO₂-polyetherimide nanocomposite fibers[J]. *Polymer Bulletin*, 2020, 77(9): 4937–4958.
- [24] Feng M J, Feng Y, Yang Z J, et al. Effect of humidity on the microstructure and energy storage properties of polyetherimide[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(13): 132904.
- [25] Crist B V. XPS in industry: Problems with binding energies in journals and binding energy databases[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2019, 231: 75–87.
- [26] Chen B K, Su C T, Tseng M C, et al. Preparation of polyetherimide nanocomposites with improved thermal, mechanical and dielectric properties[J]. *Polymer Bulletin*, 2006, 57(5): 671–681.
- [27] Maiti K S. Ultrafast N–H vibrational dynamics of hydrogen-bonded cyclic amide reveal by 2DIR spectroscopy[J]. *Chemical Physics*, 2018, 515: 509–512.
- [28] Saito K, Xu T Y, Ishikita H. Correlation between C=O stretching vibrational frequency and pKa shift of carboxylic acids[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2022, 126(27): 4999–5006.
- [29] Zhang Z, Hong W Q, Wang X Y, et al. Meta-aramid film with both flexibility and strength: Combined effect of aromatic ether bond and micro-branched structure[J]. *Polymer*, 2024, 299: 126971.
- [30] Galván-Gómez S, Rodríguez-García G, Oliveros-Ortiz A J, et al. The vibrational circular dichroism exciton coupling in single-bond C–O stretching vibrations of p-menthene derivatives[J]. *Tetrahedron*, 2024, 167: 134298.
- [31] Zhang Z X, Wang Y Y, Chen X Y, et al. Absorption enhancement and shielding effect of brown organic coating on black carbon aerosols[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, 8: 102.
- [32] Li J Y, Yang T L, Chen P H, et al. Mechanistic insights into copper-catalyzed asymmetric cyanation of allylic C–H bonds[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(17): 14756–14768.
- [33] 岳舒啸, 张喆, 关放, 等. 广义Brewster效应的实现及其应用进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(16): 1623010.
- [34] Sreekanth K, ElKabbash M, Medwal R, et al. Generalized Brewster angle effect in thin-film optical absorbers and its application for graphene hydrogen sensing[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(7): 1610–1617.
- [35] Cao S H, Chen N, Jiang Y J. Angle insensitive filters based on Fabry–Pérot resonance structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(19): 193102.
- [36] Anzan-Uz-Zaman M, Song K, Lee D G, et al. A novel approach to Fabry–Pérot-resonance-based lens and demonstrating deep-subwavelength imaging[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 10769.
- [37] Cheng B, Jiang Z X, Zou Y X, et al. A highly efficient plasmonic polarization conversion metasurface supporting a large angle of incidence[J]. *Crystals*, 2024, 14(8): 694.
- [38] Ju S, Son J Y, Kang T, et al. Maximizing light absorption and photocurrent in organic solar cells by aligning intrinsic absorption peaks with Fabry–Perot resonances[J]. *Optical Materials*, 2024, 157: 116225.
- [39] Park G C, Park K. Critically coupled Fabry–Perot cavity with high signal contrast for refractive index sensing[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 19575.

Wavelength-selective infrared stealth via subwavelength polyetherimide/metal composite coatings

ZHANG Xuyang^{1,2}, PAN Liang^{1,2}, LI Xinru¹, ZHANG Xuan², CAI Xiaodong², WEN Zhengji^{2*}, SHAO Yuchuan^{1,2}

1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201899, China

2. Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Infrared stealth technology aims to avoid detection by suppressing a material's emissivity within the detection waveband. However, conventional optical films and metasurface technologies struggle to meet the demands for low-cost, large-area infrared stealth applications. This paper proposes a low-cost infrared stealth composite coating based on polyetherimide (PEI) and metal. Through theoretical calculations using the Transfer Matrix Method (TMM) and simulation via the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method, combined with process optimization. The optimal structural parameters were determined to be a 4.5 μm PEI layer on a chromium (Cr) metal layer. Experimentally fabricated samples demonstrated low average emissivity values in key infrared atmospheric transmission windows. Specifically, the average emissivities were measured at 0.26 in the 3–5 μm band, 0.61 in the 5–8 μm band, and 0.47 in the 8–14 μm band. This performance allows the coating to achieve infrared stealth within the typical detection bands. Simultaneously, it enables effective radiative heat dissipation in non-detection bands. The research elucidated the underlying infrared response mechanism of the composite coating. It was revealed that the wavelength-selective radiative properties are primarily governed by the synergistic interaction between the chemical bond vibrational absorption inherent to the PEI material and the Fabry-Perot (FP) resonance modes established within the layered structure. Furthermore, PEI contributes high mechanical performance to the coating. Its compatibility with low-cost manufacturing processes enhances its practicality. Consequently, this makes the coating highly suitable for diverse application scenarios. Notably, the experimental results showed excellent agreement with the simulation and calculation data, which effectively validates the design methodology employed in this study. Overall, this work provides a novel and promising approach for developing cost-effective infrared stealth materials. It holds significant potential application value in critical fields such as military stealth and thermal management.

Keywords infrared stealth; polyetherimide; emissivity; selective radiation; low-cost coatings ●



(责任编辑 王微)