

# 基于半导体等离激元的航空器光热除冰机理研究

李强 蒋红娜 张吉璇 张杰

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

**摘要:** 针对航空飞行器在复杂气象条件下易发生结冰、威胁飞行安全的技术难题,本文旨在探索具备红外响应能力的光热除冰材料设计方案。采用离子交换法制备了具有局域表面等离激元(LSPR)特性的 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结纳米棒,构建稳定的p-n结界面,并通过多种手段对其结构、光学与光热性能进行系统表征。结果表明,该异质结构在近红外区(980 nm)呈现明显LSPR吸收特征,并在808 nm处保持较高吸收强度。在红外激光照射下,材料表面温度可在10 min内迅速升高至70°C,显著优于对照组 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 。进一步结合瞬态吸收光谱分析发现,LSPR激发产生的热载流子在异质结界面实现高效分离与延长寿命,促进了非辐射能量弛豫并增强了光热转换效率。研究结果为发展高效、低能耗的飞行器红外光热除冰材料提供了新的思路与理论支持。

**关键词:**  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结;等离激元;光热转化;瞬态吸收光谱;载流子寿命;航空飞行器除冰

中图分类号: TN304; O482.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 430.4050

## Research on the photothermal de-icing mechanism of aircraft based on semiconductor plasmons

Li Qiang Jiang Hongna Zhang Jixuan Zhang Jie

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** To address the critical challenge of aircraft icing in complex atmospheric environments, this study aims to develop infrared-responsive photothermal materials for efficient de-icing applications. A  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  heterojunction nanorod structure with localized surface plasmon resonance (LSPR) characteristics was constructed via an ion exchange strategy, forming a stable p-n interface. The structural, optical, and photothermal properties of the material were systematically characterized. Results reveal a distinct LSPR absorption peak near 980 nm and a strong absorption tail extending into the near-infrared region, with considerable absorption retained at 808 nm. Under infrared laser irradiation, the heterostructure exhibits rapid surface temperature elevation up to 70°C within 10 minutes, significantly outperforming pure  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ . Furthermore, femtosecond transient absorption spectroscopy reveals that LSPR-excited hot carriers undergo efficient interfacial separation and extended lifetimes at the heterojunction, enhancing nonradiative energy dissipation and overall photothermal conversion. This work provides a promising strategy and mechanistic insight for the development of high-efficiency, low-power infrared photothermal de-icing materials for next-generation aerospace applications.

**Keywords:**  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  heterojunction; plasmon; photothermal conversion; transient absorption spectroscopy; carrier lifetime; aircraft de-icing

## 0 引言

航空飞行器在复杂气象条件下执行任务时,尤其在穿越云层、降雨、结冰区或高纬度寒冷地区飞行过程中,机体表面极易发生结冰现象<sup>[1-3]</sup>。结冰不仅改变飞行器表面的气动外形,增加飞行阻力、降低升力,而且可能导致控制面失灵、探测设备失效、传感器误差增加等问题,严重影响飞

行安全和任务执行能力。传统航空除冰技术包括热射流除冰<sup>[4]</sup>、电热除冰<sup>[5]</sup>、机械振动除冰及液体喷洒除冰<sup>[6]</sup>等方式,虽已广泛应用于民用和军用飞行器,但存在设备复杂、响应延迟、能源消耗高、维护成本大以及环境污染等问题,难以满足飞行器对高效、轻量、绿色、智能化除冰手段的迫切需求<sup>[7-9]</sup>。因此,研发基于新型材料的高效光热除冰技术,为解决航空器在极端环境下安全运行的关键技术瓶颈

提供了新路径。

近年来,随着纳米材料科学与光学工程的快速发展,基于光热转换机制的新型除冰材料逐渐成为研究热点<sup>[10-12]</sup>。光热材料可通过吸收光能并将其高效转化为热能,用于直接加热结冰区域,实现快速融冰除冰。相比传统方式,光热除冰具备远程激发、非接触操作、热响应快、结构简洁等优势,尤其适用于空间有限、重量敏感或对电磁干扰敏感的飞行平台<sup>[13-15]</sup>。为进一步明确光热除冰领域的关键科学问题与工程瓶颈,现对国内外相关研究进展进行简要梳理。

当前,国内外针对光热除冰技术的研究逐步由宏观加热手段向微纳尺度材料设计转变。已有研究表明,将高吸光材料负载于飞行器表面,可在红外光照射下实现快速升温与局域融冰<sup>[16-18]</sup>。早期研究多采用碳基吸光材料<sup>[19]</sup>,虽具备良好光热性能,但缺乏波段可调性和结构调控能力。随后,贵金属纳米颗粒(如 Au、Ag)因其独特的局域表面等离激元效应被广泛应用于光热除冰研究中<sup>[20-21]</sup>,如 Gao 等<sup>[22]</sup>报道了金纳米棒负载层在 NIR 波段的高效光热响应,实现快速除冰功能。然而,贵金属材料成本高、加工复杂,且热源局域性强、扩展性差,限制了其在大型飞行平台中的工程应用。相较之下,半导体等离激元材料因其具备较宽的红外响应波段、良好的结构可调性和成本优势,成为近年来研究的新焦点。如 p 型铜基硫属化物(CuS、Cu<sub>2-x</sub>S)因其高空穴浓度与亚带隙 LSPR 响应被用于光热催化和太阳能驱动系统<sup>[23-24]</sup>,但在光热除冰领域的系统研究尚不充分,特别是在微观能量转化路径、热载流子行为、界面协同机制等方面仍缺乏深入探讨。此外,当前多数光热除冰工作主要停留在升温性能验证层面,对于光热过程中的载流子演化机制缺乏时间分辨手段的支撑,不利于从根本上理解材料性能与结构之间的构效关系。

鉴于此,本文以具有近红外等离激元特性的 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub> 材料为核心,构建 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 全半导体型异质结,系统考察其红外光热升温行为及其在飞行器除冰场景下的潜在应用性能,创新性地引入瞬态吸收光谱手段,捕捉热载流子的产生、转移与复合过程,力图揭示等离激元诱导的热能转化路径及其与结构调控之间的内在关系。该异质结具有明显的红外吸收能力,在 980 nm 波长处存在强等离激元共振峰,能够高效响应红外激光照射并迅速实现温升。在本实验中,在相同激光条件下,异质结表面温度可快速升高至 70℃,而结构相似但缺乏等离激元效应的 Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 几乎无明显温升,这一结果验证了 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 异质结在红外光热转换中的显著优势。此外,其界面存在的内建电场与能带匹配不仅有利于光生载流子的分离,也为高能热载流子向 Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 的注入提供有效路径,从而进一步增强系统的光热转换效率。同时,本文采用飞秒时间分辨技术-瞬态吸收光谱,对 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 异质结构在光激发后的载流子产生、转移、弛豫与复合过程进行实时追踪,系统揭示热载流子的寿命与动力学路径,探索其与光热效应之间的内在耦合机

制。结合红外光热升温性能测试与瞬态吸收光谱分析,本文将从结构设计、性能验证到机理探究 3 个层面,全面评估等离激元异质结构 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 在飞行器光热除冰中的应用潜力,旨在为新型红外响应除冰材料体系的开发提供理论支持与实验依据。

## 1 方法与实验

### 1.1 Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 纳米棒的制备

首先,在三口烧瓶中加入 0.25 mmol 的 BiCl<sub>3</sub>、5 mL 油酸和 5 mL 十八烯,混合后在室温下抽真空 15 min 以去除体系中的水分和溶解气体。随后将反应体系加热至 90℃,并继续在减压条件下脱气 30 min,以进一步净化反应环境。完成脱气后,切换为氮气气氛保护,继续升温至 170℃。待温度稳定后,快速注入含有 1 mmol 升华硫的 2 mL 油胺溶液,迅速搅拌混合,维持反应 10 min。反应结束后,体系自然冷却至室温。最终产物通过离心分离得到,并依次使用无水乙醇和正己烷反复清洗三次,获得纯度较高的 Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 纳米棒粉体。

### 1.2 等离激元异质结构 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 的制备

该异质结构的合成为两步进行。第一步,将 1 mmol CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O、1 mL 油胺和 2 mL 十八烯依次加入三口烧瓶中,在氮气保护下加热至 60℃ 并保持反应 30 min。随后缓慢升温至 130℃,体系颜色由蓝色逐渐转变为亮黄色,表明铜前驱体已还原生成中间体,为后续反应提供活性源。第二步,将前期合成的 Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 纳米棒重新分散于 5 mL 油酸和 5 mL 十八烯的混合溶液中,并转移至另一洁净三口烧瓶中。在氮气气氛下加热至 70℃ 后,迅速注入第一步获得的亮黄色 Cu 前驱体溶液,维持反应 10 min。反应结束后,自然冷却至室温。最终产物通过离心方式收集,并分别使用无水乙醇和正己烷清洗 3 次,所得 Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 异质结构纳米棒最终分散于四氯乙烯中保存备用。

### 1.3 结构表征实验

样品的微观形貌采用透射电子显微镜(TEM, JEM-2100F)表征,高分辨图像及元素分布信息由带球差校正器的 FEI TITAN CUBED THEMIS G2 300 提供,用于分析晶格结构和元素空间分布。X 射线衍射(XRD)使用 Bruker D8 Advance 衍射仪,Cu K $\alpha$  辐射源( $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ ),扫描步长  $0.02^\circ/\text{s}$ 。样品通过将四氯乙烯分散液滴涂于无衍射干扰的硅基片上获得。紫外-可见-近红外吸收光谱在日立 UH4150 分光光度计上测定,测试溶剂为四氯乙烯,覆盖紫外至近红外波段。X 射线光电子能谱(XPS)采用 Thermo Scientific K-Alpha 系统,激发源为 Al K $\alpha$ ( $\hbar\nu=1486.6 \text{ eV}$ ),结合能校准基准为 C 1s( $284.8 \text{ eV}$ ),用于分析元素化学状态。紫外光电子能谱(UPS)由 ThermoFisher ESCALAB 250Xi 完成,激发源为 He I( $21.2 \text{ eV}$ ),样品偏压设为  $-5 \text{ V}$ ,用于测定价带顶位置与功函数。

## 1.4 光热转换实验

样品的光热响应性能通过红外激光照射升温实验进行表征。测试所用光源为波长808 nm的单色近红外激光,发射功率稳定,出射光束通过准直后垂直照射于样品表面。样品事先均匀滴涂在石英玻璃基片上,自然干燥成膜,用以保证热传导路径一致性及光吸收均匀性。照射过程中,样品持续受激10 min,期间温度变化由分辨率为512 pixel×512 pixel的红外热像仪实时记录。红外图像采集系统对样品表面进行逐帧扫描,通过热图像序列提取温度-时间变化曲线,并计算光热转换速率与温升稳定性。测试全程在空气环境下进行,室温维持在25±1℃,以确保数据可比性。

## 1.5 瞬态吸收光谱(TA)实验

本工作采用飞秒瞬态吸收(TA)系统(Ultrafast Systems HELIOS)开展载流子动力学研究。种子激光为800 nm、1 kHz重复频率的飞秒脉冲,经光参量放大器(OPA)产生1 200 nm泵浦光;近红外探测光通过将800 nm聚焦于YAG晶体产生NIR白光连续谱,在900 nm处取单色或窄带信号进行记录。泵浦/探测在样品处的1/e2光斑直径分别为300 μm、150 μm(刀口法标定),

泵浦能量密度控制小于等于 $(1-2) \times 10^2 \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,保证单光子激发工况并显著低于多光子/损伤阈值;探测光强远低于泵浦两个量级以上。样品为四氯乙烯分散体,置1 mm光程密封石英池中,缓慢流动或往复移动以避免同一点位重复激发导致的热积累。样品在1 200 nm的吸光度控制在0.2~0.5区间(本工作测得700~1 300 nm吸收谱),确保泵浦有效耦合且不过度吸收。本研究对泵浦能量做线性扫描( $\Delta A$ 随泵浦能量呈线性标度,动力学时标不随能量变化)并在不同延迟窗口比较基线稳定性,确认无热积累与无多光子激发/损伤的干扰。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构与物相表征

$\text{Cu}_3\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结构纳米棒采用离子交换法合成,以预先制备的的 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 纳米棒为模板,引入Cu离子实现表面相转化。图1(a)为 $\text{Cu}_3\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 纳米棒的TEM图像,可见其直径约10 nm,长度约120 nm,形貌均一、长径比较大。经离子交换反应后,产物的整体棒状结构保持完整,表明该反应条件对母相形貌具有良好的保持性,有利于维持一维结构所带来的载流子定向传输优势。

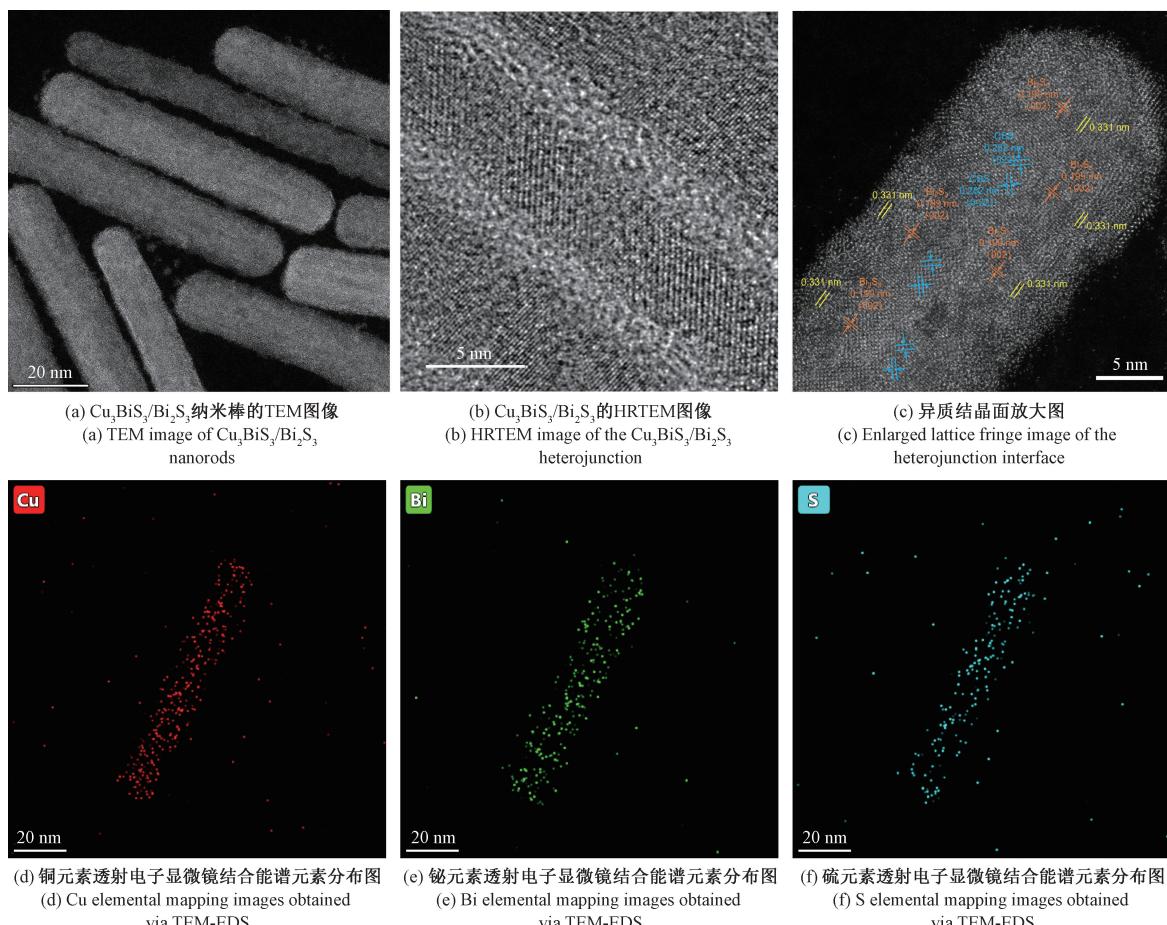


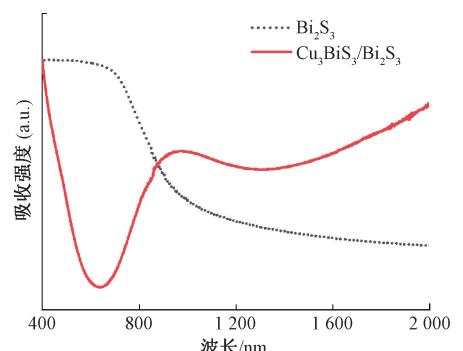
图1  $\text{Cu}_3\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结构的形貌与晶体结构分析

Fig. 1 Morphological and structural characterization of the  $\text{Cu}_3\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  heterojunction

高分辨透射电子显微镜(HRTEM)进一步揭示了相结构变化,图1(b)中纯相 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 纳米棒具有清晰且规则的晶格条纹,对应于 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 的(002)晶面,说明其晶体质量较高。经离子交换后,在纳米棒表面原位生成 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 相(图1(c)),导致 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 原有的长程有序结构局部被打乱。图1(c)中的HRTEM图中同时存在两组晶格条纹:间距1.99 Å对应 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 的(002)晶面,间距2.82 Å对应 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 的(022)晶面,二者在同一纳米棒中共存,表明 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 与 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 在纳米尺度上实现了紧密结合。这种一维异质结结构不仅有利于形成稳定的内建电场促进载流子分离,还可在等离激元激发下提供高效的热载流子注入通道,为光热转换性能的提升奠定基础。同时,图1(d)~(f)中透射电子显微镜结合能谱元素分布结果显示,Cu、Bi、S三种元素在单根纳米棒中分布均匀,未见明显元素富集或缺失,说明离子交换过程均匀且反应充分。这种均匀性对于确保局域表面等离激元效应的一致性至关重要,可避免因相分布不均导致的局部光热性能波动。

图2中X射线衍射(XRD)分析进一步验证了结构的双相特征。产物中既可检测到正交晶系 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ (PDF #17-0320)的衍射峰,也可观察到正交晶系 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ (PDF #71-2115)的特征峰,且峰形清晰,无明显杂相信号。这说明 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 的引入并未破坏 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 的主体晶格骨架,而是以外延或嵌入的方式形成了相对完整的双相共存结构。这种共存不仅保留了 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 良好的电子迁移通道,同时引入了 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 的等离激元响应特性,使其在近红外区具有更强的光吸收能力。

综上,TEM/HRTEM、EDS及XRD的综合表征结果



(a)  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  及  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  的紫外-可见-近红外吸收光谱图  
(a) Absorption spectrum of  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{S}_3$

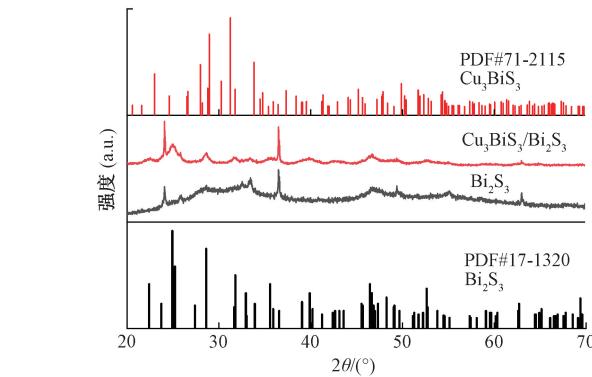


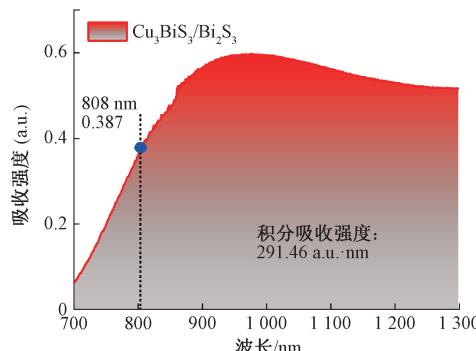
图2  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  异质结构及  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  的X射线衍射图

Fig. 2  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  heterostructure and X-ray diffraction pattern of  $\text{Bi}_2\text{S}_3$

表明,通过离子交换法可在一维 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 纳米棒表面构筑 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 相,形成形貌稳定、界面清晰、元素均匀分布的异质结结构。这种结构既有利于增强光吸收与光生载流子的分离效率,也为后续光热性能和瞬态吸收光谱分析提供了可靠的结构基础。

## 2.2 光学性质分析

如图3(a)所示,采用紫外-可见-近红外吸收光谱分析 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结构的光学响应特性。纯 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 纳米棒在约886 nm处出现明显吸收边,对应带隙约为1.4 eV,吸收主要集中在可见光区,近红外响应较弱。相比之下,构筑 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结后,吸收边显著向长波方向延伸,680 nm后吸收强度快速上升,整体吸收区间覆盖至2 000 nm以上,表现出显著的近红外响应能力。



(b)  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  在 700~1 300 nm 波段的吸收光谱  
(b) Absorption spectrum of  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  in the 700~1 300 nm

图3 样品吸收光谱图

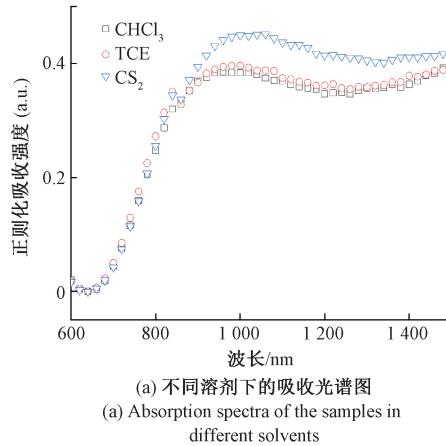
Fig. 3 Absorption spectrum of the samples

如图3(b)进一步放大所示,在700~1 300 nm区间内,该异质结构在981 nm处出现明显的等离激元主吸收峰,归因于 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 相中高浓度自由载流子所引发的局域表面等离激元共振行为。同时,材料在808 nm波段处虽非共振峰值位置,但仍具有较强吸收强度( $A \approx 0.387$ ),处于吸收带尾之内,具备良好的激发与能量耦合能力。此外,该

区段的积分吸收强度达291.46 A.U.·nm,进一步证明该异质结构在近红外范围内具备持续而强效的光能获取能力,为后续光热转化过程提供了稳定输入。

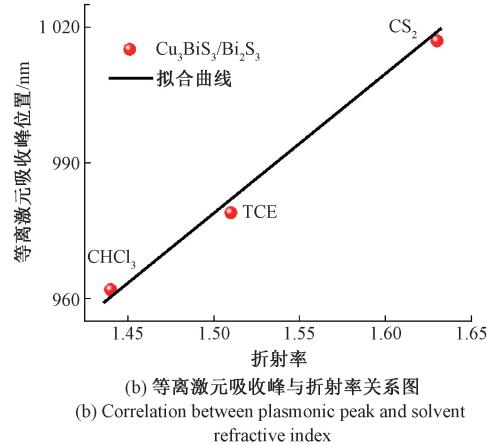
为进一步验证近红外区吸收确实来源于等离激元效应,将 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结构分别分散于折射率为1.43的氯仿( $\text{CHCl}_3$ ),折射率为1.51的四氯乙烯(TCE)中及折

射率为1.63的二硫化碳( $\text{CS}_2$ )测得其UV-Vis-NIR吸收光谱(图4)。结果显示,吸收峰位置随溶剂折射率呈线性红



(a) 不同溶剂下的吸收光谱图  
(a) Absorption spectra of the samples in different solvents

移,这一典型的等离激元特征规律明确证实了异质结体系的等离激元吸收机理<sup>[25]</sup>。



(b) 等离激元吸收峰与折射率关系图  
(b) Correlation between plasmonic peak and solvent refractive index

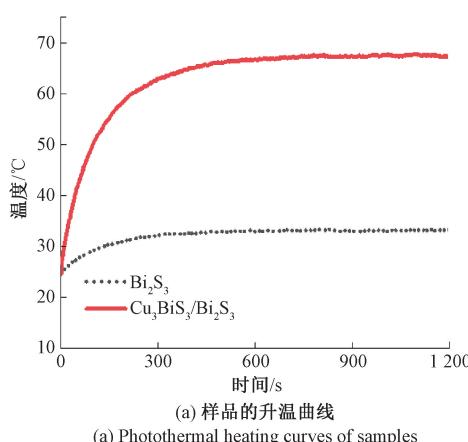
图4 等离激元吸收特性图

Fig. 4 Plasmon absorption characteristic

$\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结构的强等离激元吸收不仅拓宽了光谱响应范围,还显著增强了近红外光子捕获能力。这种特性在光热转化过程中尤为重要,可在808 nm甚至更长波长下实现高效光能吸收与转化,为后续的红外光热升温性能及瞬态吸收光谱中载流子动力学研究提供了直接的光学基础。

### 2.3 光热转化性能

为了比较不同材料在红外光照射下的光热转化能力,分别测试了 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 与 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 异质结纳米棒在808 nm单色红外光照下的表面温度变化情况(图5(a))。光源功率密度保持一致,样品均匀涂覆于石英基底表面,并使用分辨率为512 pixel×512 pixel的红外热像仪实

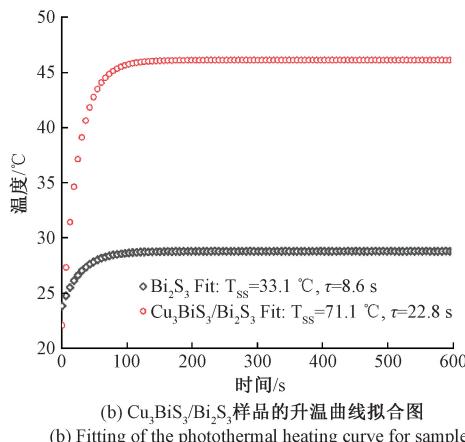


(a) 样品的升温曲线  
(a) Photothermal heating curves of samples

时记录温度变化曲线和热像分布。由图5(a)、(b)可知,两种样品在光照后的温度随时间迅速上升并趋于稳定,且 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 的稳态温度显著高于 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 。本研究采用指

$$T(t) = T_{ss} - (T_{ss} - T_0) \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

对升温曲线进行拟合,其中 $T_{ss}$ 为稳态温度, $\tau$ 为特征升温时间常数。拟合结果如图5(b)所示, $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 的稳态温度可达约70°C,升温时间常数显著小于 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ,说明其光热响应速度更快,热转换效率更高。相比之下, $\text{Bi}_2\text{S}_3$ 在相同条件下的温度升高幅度有限,且升温速率明显偏低,这与其缺乏明显等离激元吸收峰、光生载流子浓度较低有关。



(b)  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 样品的升温曲线拟合图  
(b) Fitting of the photothermal heating curve for samples

图5 光热转化性能图

Fig. 5 Photothermal conversion performance

由图6的红外热像可以看出, $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$ 样品区域的辐射亮度和中心温度显著高于 $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ,对应的热场分布更均匀且范围更广。这一现象可归因于异质结结构中等离

激元半导体 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 对近红外光的强烈吸收及其高效的光热转化能力。 $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ 的等离激元共振峰位于约980 nm,即使在808 nm光照下,仍能有效激发热载流子,并通过非

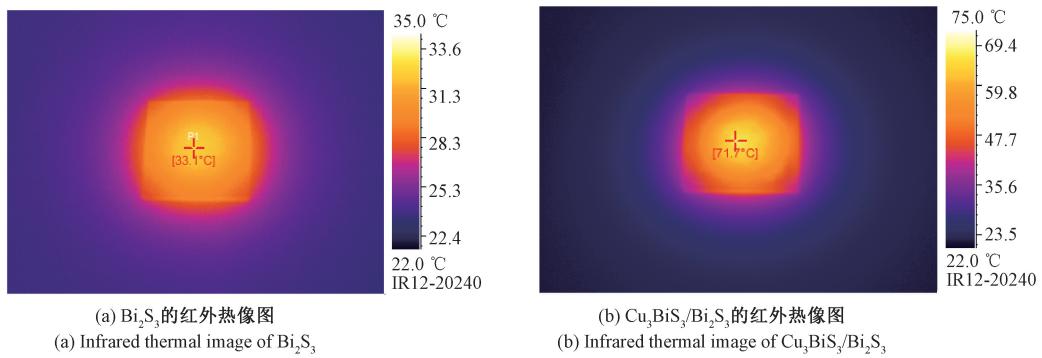


图 6 红外热像图

Fig. 6 Infrared thermal images

辐射弛豫过程迅速转化为热量。此外,异质结界面形成的内建电场有助于分离光生电子与空穴,抑制非辐射复合损失,从而进一步提高热量积累效率。

综上所述,Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>异质结在光热转化性能上明显优于Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,不仅表现出更高的稳态温度,还具备更快的响应速率。这一优势为其在航空飞行器红外光热除冰等应用中提供了良好的材料基础,并为后续载流子动力学机理探究奠定了实验依据。

#### 2.4 热载流子寿命研究

在前述光热升温实验中,Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>异质结表现出显著优于Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>的温升速率与稳态温度,提示其在近红外激发下具有更高的光热转化效率。为了进一步揭示这种

性能差异的根源,本节结合瞬态吸收光谱对载流子动力学过程进行分析。如图7(a)~(c)所示,在1200 nm激光激发、900 nm探测条件下,Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>的TA信号幅度整体较弱,二维谱图色彩分布均匀且变化不显著,动力学曲线快速衰减,反映出有限的光生载流子密度和较短的寿命,载流子在皮秒量级内迅速复合,导致能量难以有效沉积并转化为热。

与之相比,Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>异质结样品在同样条件下呈现更强的信号强度和明显的时间演化特征(图7(d)~(f))。动力学曲线显示其衰减过程由快慢两部分组成:快速分量对应等离激元激发后热载流子的电子-电子与电子-声子散射过程;慢速分量则归因于异质结内建电场驱动下的载流

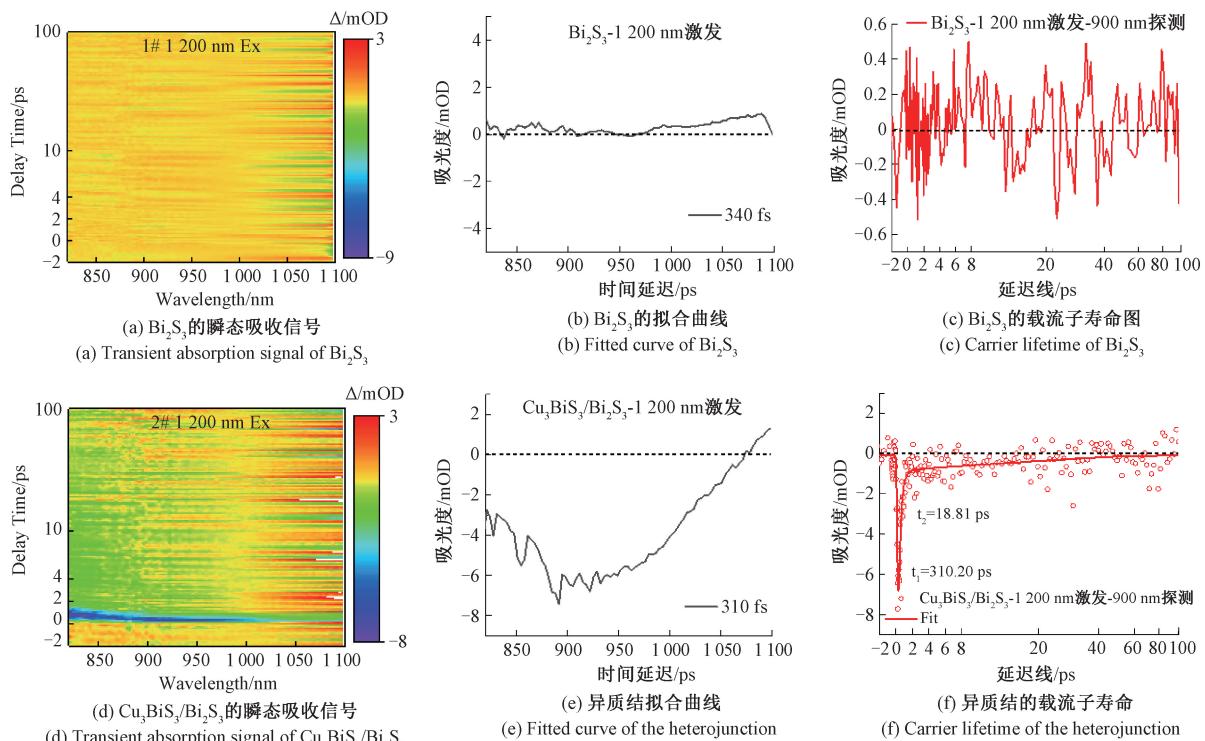


图 7 热载流子寿命图

Fig. 7 Hot carrier lifetime

子分离和陷阱态存储效应,显著延长了能量在体系中的停留时间。这一长寿命分量为持续的光热效应提供了稳定的能量输入。由此可知  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$  的等离激元吸收与异质结的协同作用,不仅拓展了材料的近红外吸收范围,还有效抑制了瞬时复合、延长了载流子寿命,并通过电子-声子耦合过程将光能高效转化为热能。

### 3 结 论

本研究构建了  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  等离激元异质结纳米棒体系,并系统研究了其结构特征、光学响应、光热转化性能及载流子动力学特性。主要结论如下:

采用离子交换法实现  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$  在  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  纳米棒表面的原位生长,形成晶相匹配的异质结,并保持纳米棒形貌稳定。

材料在近红外区域表现出强烈的等离激元吸收,且吸收峰位置随溶剂折射率呈线性变化,验证了其等离激元特性。

光热升温实验表明,  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  等离激元异质结在 808 nm 光照射下表现出显著优于  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  的温升速率和稳态温度,显示出优异的红外光热转化能力。

瞬态吸收光谱揭示,等离激元激发的热载流子在异质结界面实现有效分离并延长寿命,从而降低复合损失并增强非辐射弛豫过程,为高效光热转化奠定基础。

综上,  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3/\text{Bi}_2\text{S}_3$  等离激元异质结兼具优异的光捕获与光热转化能力,并通过载流子动力学优化实现了性能提升,在飞行器红外光热除冰及相关光热应用中具有广阔的应用潜力。

### 参考文献

- [1] 丁军亮,赵利利,杨涛,等.自然结冰飞行试验技术综述[J].航空学报,2023,44(17):45-60.  
DING J L, ZHAO L L, YANG T, et al. Review of natural icing flight test techniques [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(17): 45-60.
- [2] 徐浩军.专栏:飞机结冰致灾机理及飞行安全防护[J].空军工程大学学报(自然科学版),2020,21,124(5):5-10.  
XU H J. Column: Disaster mechanism of aircraft icing and flight safety protection[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21,124(5): 5-10.
- [3] CAO Y H, TAN W Y, WU ZH L. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 75: 353-385.
- [4] 郑小兵,李玉杰,罗振兵.合成热射流除霜除冰实验[J].气体物理,2018,3(5):56-63.  
ZHENG X B, LI Y J, LUO ZH B. Experimental study on synthetic jet defrosting and deicing [J]. Journal of Gas Physics, 2018, 3(5): 56-63.
- [5] 何舟东,朱永峰,周景锋.飞机电脉冲除冰技术探讨[J].实验流体力学,2016,30(2):38-45.  
HE ZH D, ZHU Y F, ZHOU J F. Discussion on aircraft electro-pulse deicing technology[J]. Journal of Experimental Fluid Mechanics, 2016, 30(2): 38-45.
- [6] 莫秋云,王国强,郭荣滨,等.风力发电机叶片覆冰状况及防冰除冰措施[J].科学技术与工程,2022,22(21):9017-9024.  
MO Q Y, WANG G Q, GUO R B, et al. Icing conditions of wind turbine blades and anti-/de-icing measures [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9017-9024.
- [7] 张海波,罗江海,徐志强,等.基于压电陶瓷及其复合材料的飞机除冰技术研究现状及发展趋势[J].航空制造技术,2025,68(3):32-40.  
ZHANG H B, LUO J H, XU ZH Q, et al. Research status and development trend of aircraft deicing technology based on piezoelectric ceramics and composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(3): 32-40.
- [8] 王瑜,王歆铖.飞机防除冰机理及超疏水材料的机载应用[J].科学技术与工程,2024,24(1):72-87.  
WANG Y, WANG X CH. Mechanism of aircraft anti-/de-icing and onboard application of superhydrophobic materials [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(1): 72-87.
- [9] 胡崇琳,高尚,王浩,等.嵌套型开口谐振环阵列设计及其在冰层检测中的应用[J].电子测量与仪器学报,2023,39(5):11-18.  
HU CH L, GAO SH, WANG H, et al. Design of nested open ring resonator array and its application in ice layer detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 39 (5): 11-18.
- [10] 刘黎明,陈盛龙,潘炜.光热自愈合超疏水膜的制备和防冰性能[J].复合材料学报,2024,42:1-12.  
LIU L M, CHEN SH L, PAN W. Preparation and anti-icing performance of photothermal self-healing superhydrophobic films[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 42: 1-12.
- [11] 王强,张业灿,刘少龙,等.石墨烯基光热除冰表面的激光制备[J].南京航空航天大学学报:英文版,2023,40(S01):129-37.  
WANG Q, ZHANG Y C, LIU SH L, et al. Laser fabrication of graphene-based photothermal deicing surfaces [J]. Journal of Nanjing University of

- Aeronautics and Astronautics(English Edition), 2023, 40(S01): 129-137.
- [12] 王璐. 微纳结构光热超疏水表面防/除冰性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2023.
- WANG L. Study on anti-/de-icing performance of photothermal superhydrophobic surfaces with micro-nano structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [13] 张海洋, 王优强, 郭浩冉, 等. 光热超疏水表面防覆冰/除冰原理, 策略和应用研究进展[J]. 表面技术, 2025, 54(4): 1-16.
- ZHANG H Y, WANG Y Q, GUO H R, et al. Research progress on anti-/de-icing principles, strategies, and applications of photothermal superhydrophobic surfaces[J]. Surface Technology, 2025, 54(4): 1-16.
- [14] SHI J, KE SH L, WANG F, et al. Recent advances in photothermal anti-/de-icing materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148265.
- [15] XIE ZH T, WANG H, GENG Y, et al. Carbon-based photothermal superhydrophobic materials with hierarchical structure enhances the anti-icing and photothermal deicing properties [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(40): 48308-48321.
- [16] 马学虎, 杨思艳, 李启迅, 等. 光热超疏水铜纳米线用于高效除冰除霜[J]. 极端制造, 2023, 5(4): 045501.
- MA X H, YANG S Y, LI Q X, et al. Photothermal superhydrophobic copper nanowires for efficient deicing and defrosting[J]. Extreme Manufacturing, 2023, 5(4): 045501.
- [17] 要鹏, 杨睿, 濩金欢, 等. 基于等离激元颗粒的透明光热防/除冰薄膜研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(9): 2767-2772.
- YAO P, YANG R, PU J H, et al. Study on transparent photothermal anti-/de-icing films based on plasmonic particles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(9): 2767-2772.
- [18] 王宁, 张鹏宁, 李坤诚, 等. 基于磁环自升温的纳米晶材料磁热特性测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 39(6): 78-87.
- WANG N, ZHANG P N, LI K CH, et al. Measurement method of magnetocaloric properties of nanocrystalline materials based on magnetic ring self-heating[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 39(6): 78-87.
- [19] 许兵, 周晶, 刘佳, 等. 基于太阳能驱动界面蒸发设计的碳基光热材料研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(10): 44-56.
- XU B, ZHOU J, LIU J, et al. Research progress on solar-driven interface evaporation-based carbon photothermal materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(10): 44-56.
- [20] YIN H, KUWAHARA Y, MORI K, et al. Properties, fabrication and applications of plasmonic semiconductor nanocrystals[J]. Catalysis Science & Technology, 2020, 10(13): 4141-4163.
- [21] 崔琳. 范德瓦尔斯半导体及表面等离激元的非线性效应研究及其应用[D]. 北京:北京科技大学, 2023.
- CUI L. Research on nonlinear effects of van der Waals semiconductors and surface plasmons and their applications[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [22] GAO H, YIN T J, MA J Y, et al. Research progress of photothermal superhydrophobic surfaces for anti-icing/deicing[J]. Molecules, 2025, 30(9): 1865.
- [23] LIAN Z CH, WU F, ZI J ZH, et al. Infrared light-induced anomalous defect-mediated plasmonic hot electron transfer for enhanced photocatalytic hydrogen evolution [J]. Journal of the American Chemical Society, 2023, 145(28): 15482-15487.
- [24] 王哲玮. n型掺杂半导体材料的表面等离激元性能及相关应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- WANG ZH W. Surface plasmonic properties and related applications of n-type doped semiconductor materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [25] PAUL S, GHOSH S, DALAL B, et al. Cation exchange mediated synthesis and tuning of bimodal plasmon in alloyed ternary  $\text{Cu}_3\text{BiS}_{2-x}\text{Se}_x$  nanorods[J]. Chemistry of Materials, 2018, 30(15): 5020-5031.

## 作者简介

李强(通信作者),博士,主要研究方向为飞行试验测试、先进光学技术。  
E-mail:1197975499@qq.com