

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-28

基于发光学的高温传感材料、原理与性能评价方法

胡启凯¹, 陈 昕¹, 范玉涵¹, 张艳秋^{2*}, 陈宝玖^{1*}

(1. 大连海事大学 理学院, 辽宁 大连 116026;
2. 辽宁轻工职业学院 航空运输学院, 辽宁 大连 116100)

摘要: 随着科学技术的不断进步, 人们对温度测量提出了更高要求, 包括非接触式温度读出、温度场的空间分布测量以及快速响应探测等。发光学温度传感技术因其具备实现这些要求的潜力, 而受到广泛关注和研究。本文系统综述了基于发光学温度传感技术的材料方面, 介绍了近年来用于温度传感研究的主要发光材料, 包括有机化合物、量子点、金属纳米团簇、稀土及过渡金属离子掺杂材料、碳材料及杂化材料等, 并分析了各类材料的光学特性和温度传感的优缺点。本文还系统梳理了基于发光材料的光学温度传感核心机制, 如单一发射强度依赖型、发射带偏移与带宽展宽型、荧光强度比型以及荧光寿命型等温度传感机制。此外, 本文归纳了评估温度传感性能的关键品质因素, 包括线性度、绝对灵敏度、相对灵敏度、温度分辨率与可重复性等。最后, 总结了当前基于发光学温度传感技术面临的主要挑战, 如灵敏度受限、功能单一、生物相容性不足等, 并展望了未来在新型复合材料开发、多功能集成传感及生物医学应用等方向的发展潜力。

关键词: 发光材料; 光学温度传感; 温度传感机理; 温度传感材料; 温度传感性能

中图分类号: 0482.31

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260201

CSTR: 32170.14.CJL.20260201

Materials, principles, and performance evaluation methods for temperature sensing based on luminescence

HU Qikai¹, CHEN Xin¹, FAN Yuhang¹, ZHANG Yanqiu^{2*}, CHEN Baojiu^{1*}

(1. School of Science, Dalian Maritime University, Dalian 11606, China;
2. School of Air Transportation, Liaoning Vocational College of Light Industry, Dalian 116100, China)
* Corresponding Authors, E-mail: 1484106815@qq.com; bjchen@dlmu.edu.cn

Abstract: With the continuous advancement of science and technology, more stringent requirements for the temperature measurement have been put forward, for instance, non-contact temperature readout, spatial mapping of temperature field, and rapid response detection. Luminescence-based temperature sensing technology has received widespread attention and research due to its potential to meet these requirements. This article systematically reviews the material aspects of the temperature sensing technology based on luminescence, presenting the main luminescent materials used for temperature sensing, including organic compounds, quantum dots, metal nanoclusters, rare earth and transition metal ions doped materials, carbon materials, and hybrid materials. The optical properties of various materials, the advantages and disadvantages of the temperature sensing are also analyzed. This article also systematically outlines the intrinsic mechanisms of the temperature sensing based on luminescence, such as single emission intensity dependence, emission band shift and bandwidth broadening, fluorescence intensity ratio, and fluorescence lifetime. In addition, this article summarizes the critical quality factors for evaluating temperature sensing performance, including linearity, absolute sensitivity, relative sensitivity, temperature resolution, and repeatability. Finally, the main challenges faced by the

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(12274049); 中央高校基本科研业务费(3132023519)辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212514473001).
Supported by National Natural Science Foundation of China (12274049) and Fundamental Research funds for the Central Universities (3132023519) Basic Scientific Research Funding Project from the Educational Department of Liaoning Province (LJ212514473001).

temperature sensing technology based on luminescence were summarized, such as limited sensitivity, single functionality, and insufficient biocompatibility. The potential for future development in new composite material development, multifunctional integrated sensing, and biomedical applications was also discussed.

Keywords: Luminescent material; Optical temperature sensing; Temperature sensing mechanism; Temperature sensing materials; Temperature sensing performance

0 引 言

随着科学技术的不断发展,在很多领域中对于温度的精准控制受到了广泛的重视和研究。实现温度控制的前提是对温度的精确测量,因此,温度探测的地位在工业、科学研究和医学等领域中变得越来越重要。温度测量在现代社会中发挥着不可替代的核心作用,而且随着科学技术的不断进步,对于温度的测量也提出了更高的要求。在工业领域,温度传感器不仅实现了化工反应釜和半导体晶圆制造等关键工艺的实时控制,还可通过温度测量对工业系统进行预测,并及时维护降低设备故障率^[1]。在科研应用中,温度传感技术的重要性愈发凸显,如高精度实时温度传感技术为新能源电池安全预警和纳米材料可控合成提供关键保障^[2]。温度精确测量的重要性在医学领域中体现在三大方面:一是动态体温监测,如ICU(Intensive Care Unit)多参数监护仪;二是治疗设备的精准控温,如红外康复及光热治疗设备等;三是生物样本的超低温保存^[3]。

温度不能直接测量,只能通过测量某个对温度有依赖关系的可测量物理量,根据该物理量与温度的依赖关系得到待测温度值。当前,实现温度测量的传感技术已有很多,例如水银泡温度传感、温差电温度传感、光纤温度传感、红外热成像技术、超声温度测量、磁共振影像温度测量、光声技术测温及荧光测温等^[4-8]。无论哪种温度测量技术都必须首先进行定标,定标的过程就是建立温度测量产品测得的物理量与标准温度间的关系曲线或函数,即校准曲线或函数。当进行温度测量时,利用校准曲线或函数计算出相应温度^[9-11]。

从温度传感所测量的物理量来划分,温度传感可分为力学温度传感、电学温度传感、光学温度传感等^[12-23]。力学温度传感技术主要是测量力学量实现温度传感^[12, 13];电学温度传感是通过电信号的测量实现温度测量的^[14-17];光学温度传感是通过测量光学信号实现温度测量的^[18, 19]。还有通过

测量光谱线宽^[22]、荧光寿命^[23]等实现温度测量的,也属于光学温度传感。

根据传感器与被测对象的接触方式,温度传感方法可分为侵入式、半侵入式和非侵入式温度传感^[24-30]。侵入式温度传感器(如热电偶、水银温度计)通过将温度传感元件与被测目标直接接触实现温度测量,这类传感技术成熟,应用场景广泛,大多数该类传感器温度读出的速度慢。此外,温度测量的探头尺寸要尽量小(热容量要小),这样才能避免热平衡带来的误差^[24, 25]。半侵入式温度传感器一般无需将测温探头埋入待测物中,而是采用表面贴装等接触方式,这种传感器的应用领域也比较广泛,它的特点是响应相对较快、安装灵活、操作简单^[26, 27]。非侵入式温度传感器是通过光学、超声波等与被测物理相互作用,测量不同温度时光学(红外、Raman)信号的数值而获得待测温度,这种探测器的响应速度一般非常快,可以做实时测量,它的缺点是技术要求高,价格昂贵^[28-30]。

尽管温度传感技术种类繁多,并且测量精度也随着现代集成电路学技术的发展和信息处理技术的进步不断提高,但在一些特定领域对温度测量提出了更高要求,例如超高温温度传感,高空间分辨温度传感^[31-33],现有的温度传感技术不能满足这些温度测量的要求,因此,新型温度传感技术仍然吸引了众多学者的研究兴趣。近年来,温度传感研究已成为国际前沿研究领域,相关研究成果在学术期刊与科研报告中频繁呈现,特别是基于发光材料的温度传感备受青睐^[34-43],这是由于该类传感具有响应速度快、测量原理可靠、测量精度高、受环境影响小,以及可实现更高的空间温度分辨和非接触式温度读出等优点^[44-46]。Web of Science 核心数据库检索发现,2000年以前每年发表的有关温度传感的论文不足1000篇,而2025年发表论文已超过12000篇,比上一年增长近20%。由此可见温度传感的研究已成为了研究热点,并且研究热度逐年攀升。基于发光材料的光学温度传感是当前温度传感领域研究的一个重要研究方

向, 该方向的研究内容极其丰富: 从无机发光材料、有机发光材料到复合材料; 从利用热耦合能级荧光强度比(FIR, Fluorescence Intensity Ratio)技术, 到非热耦合能级的FIR方法; 从单一中心发光的FIR, 到多中心发光的FIR; 再从FIR、荧光线条宽度温度传感到荧光寿命温度传感; 从荧光猝灭发光材料的温度传感, 到反常猝灭发光材料的温度传感; 从可见波段温度传感到红外波段温度传感, 等等。鉴于此, 有必要对该领域近年来所取得的进展进行概括和总结。

本文主要综述和总结了发光材料温度传感的材料方面, 包括材料的分类, 列举了不同分类的代表性材料, 系统总结了利用发光材料进行温度传感的主要原理和方法, 包括单一发射强度法、发射带移法、发射带宽法、FIR法、荧光寿命法等。本文还阐述了评估传感性能的关键品质因素, 包括绝对灵敏度、相对灵敏度、温度分辨率与可重复性等最后, 总结了当前技术面临的主要挑战, 如灵敏度受限、功能单一、生物相容性不足等, 并展望了未来在新型复合材料开发、多功能集成传感及生物医学应用等方向的发展潜力。

1 光学温度传感用发光材料

发光材料的种类非常丰富, 不同的发光材料的特性不同, 应用领域也不同。从化学组成上分, 发光材料可分为有机发光材料^[47]、无机发光材料^[48]、有机-无机杂化材料^[49]和复合材料^[50]。有机发光材料包括有机小分子材料^[51]、大分子聚合物材料^[52]等; 无机发光材料包括无机半导体材料^[53]、自激活发光材料^[54]、发光中心掺杂的无机化合物材料^[25]、金属纳米粒子^[55]及碳材料^[56]等; 杂化材料是指有机和无机材料通过化学相互作用组成的材料, 该类材料可以集成有机和无机母体的性能于一身^[57]。复合材料是指多种功能和结构的材料通过物理混合成为一体, 实现多种功能的共存^[50]。由于发光材料的光学和光谱学性质与温度密切相关, 因此, 几乎以上提到的所有种类发光材料均被研究者们进行了光学温度传感的研究尝试, 表1概括了当前被研究较多的温度传感发光材料, 以及它们的特性和一些材料的代表。

表1中第一类温度传感用发光材料为有机化合物材料。有机发光化合物的种类繁多, 其激发和发射波长覆盖范围宽, 但一般发射在可见及近红外, 发光线宽一般较宽, 半高宽一般在20 nm以

上, 半高宽为10 nm以下的有机发光材料非常罕见^[58-60]。有机发光材料的光谱中心位置、强度、线宽及衰减时间均对温度具有较强的依赖性, 因此非常适合作为光学温度传感应用^[61, 62]。当前研究较多的用于温度传感的有机化合物包括有机荧光染料(如罗丹明类、荧光素类及7-硝基苯并-2-氧杂-1,3-二唑类等)^[63, 64]、含芳杂环的有机磷光体^[65]、金属有机聚合物、金属有机框架材料(MOF, Metal-Organic-Framework)等^[66-68]。

与无机发光温度传感材料相比, 有机温度传感材料的光谱性质可构建和操控空间大, 制膜性能优良, 易于实现柔性器件, 可实现发光量子效率接近100%和纳秒级的响应速度^[69], 此外, 通过分子设计可实现可靠的生物相容性^[70]。有机光学温度传感材料的缺点也非常明显, 例如热稳定性不如无机物, 不能工作在高温和极端的酸碱环境下; 发射光谱线宽较宽, 对于作为温度传感材料来说不算是优势; 发射光谱仅局限于可见及近红外波段^[60, 71]。

表1中第二类温度传感用发光材料是半导体发光材料, 包括半导体量子点(QDs, quantum dots)材料、一维半导体材料和二维半导体材料等^[72-78]。QDs是三个维度的尺寸都大于1 nm且一般小于20 nm的粒子, 这里的尺度不是一个绝对的物理概念, 它是以QDs的激子波尔半径为量度的, 当粒子的尺寸与激子波尔半径相当时, 粒子的性质已存在量子限域效应, 这个尺寸即定义为QDs的最大尺寸, 小于激子波尔半径的粒子才习惯上称为QDs^[79, 80]。当然, 粒子的尺寸也不能太小, 尺寸太小会出现介观效应, 因此, 定义1 nm为QDs的最小极限尺度^[81, 82]。用于发光温度传感的半导体纳米QDs主要包括II-VI族半导体QDs, 如CdSe、CdTe、ZnS等QDs材料^[83-86], III-V族半导体QDs, 如GaAs、InP、InAs等QDs材料^[77, 87-90], 以及IV-VI族半导体QDs, 如PbS和PbSe等QDs材料^[91, 92]。除此之外, 还有钙钛矿QDs, 钙钛矿QDs一般是指具有ABX₃型元素组成, 且具有钙钛矿晶体结构的QDs。其中, A位阳离子通常为碱金属离子, 如Cs⁺或Rb⁺, 也可以是有机离子集团, 如甲胺离子MA⁺^[93]或甲脒离子FA⁺^[94]等; B位阳离子多为正二价, 其中B位阳离子为Pb²⁺的钙钛矿QDs光谱性能最好^[95], 此外, B位阳离子可以用Sn²⁺、Bi³⁺、Cu⁺进行部分取代, 实现性能调控; X位为卤素离子Cl⁻、Br⁻和I⁻中的一种或者它们混合^[96-98]。

半导体 QDs 作为温度传感材料的优点是发射波长可调控,比有机物能够承受更高的传感温度,发光效率多数可做到较高,发射线宽较有机发光温度传感材料窄很多^[99,100]。半导体 QDs 也存在缺点,即个别含有 Cd 和 Pb 的 QDs 性能虽然非常出众,但是由于其毒性原因使应用受到限制。QDs 的生产成本相对较高,还有就是稳定性相对较差^[101,102]。

表 1 中第三类温度传感用发光材料为金属团簇材料。团簇是由少量原子组成尺寸限度在 1 nm 以下的粒子,是介于原子尺度与纳米尺度之间的原子聚集体,团簇材料一般表现出与原子和纳米材料不同的物理和化学性质^[103-105]。目前,报道较多的用于测温的金属团簇包括金团簇、银团簇和铜团簇等^[106-108]。

金属团簇作为一种新兴发光材料,其具备出色的发光特性,兼具良好的光稳定性、较大的斯托克斯位移,使其备受研究人员的关注^[109]。然而,与有机和半导体 QDs 测温材料相比,金属团簇的量子产率仍有待提高^[110]。合成具有光稳定性、低毒性的高温传感性能的金属团簇材料仍具有挑战性^[111]。

表 1 中第四类温度传感用发光材料为离子中心掺杂的无机发光材料,它是发光材料的重要组成部分。离子中心包括稀土离子中心,如二价 Sm^{2+} 和 Eu^{2+} ^[112,113],三价 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 和 Yb^{3+} ^[25,118];过渡金属离子中心,如 Cr^{4+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{4+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Cu^{+} ^[119-122];还有主族离子中心,如 Tl^{+} 、 Pb^{2+} 、 Bi^{3+} 、 Sn^{2+} 、 Sb^{3+} 等^[123-126];以及复合离子发光中心(阴离子集团),如 WO_4^{2-} 、 MoO_4^{2-} 、 VO_4^{3-} 和 NbO_4^{3-} 等^[127-129]。以上几类离子中心发光材料中均被应用于光学温度传感研究,并且实现温度传感的技术路径丰富。

离子中心掺杂无机发光温度传感材料可选择的发光中心丰富,因此通过基质、掺杂浓度、离子中心选择等可获得性能优异的温度传感用发光材料。此外,该类材料的理化性质稳定,因此适用条件宽泛^[130]。离子中心发光材料的激发和发射波长范围宽,几乎涵盖了从紫外到可见直至中红外波段,因此可以设计出满足不同激发和发射波长条件的需求的温度传感材料^[131]。然而,离子中心掺杂无机发光传感材料也存在一些不足,例如绝大多数离子中心发光材料都存在温度猝灭现象,

但猝灭温度不同,可根据需要选择^[132];三价稀土离子的绝大多数能级的吸收截面小,因此激发有效性差^[133];不等价取代和大失配离子半径取代时,掺杂浓度受限^[134,135];还有,一些具有变价的离子中心材料制备条件要求较苛刻^[136]。

还应该指出的是,这些离子中心必须掺杂到具体的基质材料中才能表现出它们的发光性质,并且基质的种类和形貌会影响发光中心的发光性质,或者说基于发光中心掺杂材料的温度传感性质可以通过选择基质材料的种类、组分和形貌进行调控,这些基质材料的分类已在前面进行了总结。用于温度传感的离子中心掺杂材料的形态包括荧光粉、单晶、玻璃、陶瓷等,离子中心掺杂的这些形态发光材料可满足不同应用场景的需要,可根据具体的应用需求进行选择。

表 1 中第五类温度传感用发光材料是碳材料,包括碳点、碳纳米管、石墨烯等^[137-139]。碳材料是一类新兴的发光材料,特别是碳点发光材料备受关注,这是由于碳点表现出了优异发光性能。碳材料的发光机理主要包括三种机制:一是碳材料中嵌入或者连接在其中的小分子荧光集团产生发射^[140-142];二是表面态发光,也就是碳材料表面富含 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 官能团形成的能级,这些能级俘获激子并导致光发射^[143,144];三是碳核激发态发光,石墨化碳核中的 π - π^* 跃迁可贡献发射,尤其在高碳化程度的碳点中,但通常需与分子态或表面态协同作用^[145,146]。

碳点的激发和发射波长可通过尺寸、表面官能团(如羧基、羟基和氨基等)和掺杂(氮和硫等)进行调控,发光光谱线宽较宽^[147,148]。碳材料的发光效率与结构类型和制备方法有关,接近极限效率 100% 的碳材料也常见报导^[149]。由于发光碳材料的性能依赖于合成工艺,因此制备条件要求相对严苛,发光性能的热稳定性不如离子中心掺杂的无机化合物荧光材料^[147,150-152]。虽然碳材料的生物相容性远好于其他类别的发光材料,但是碳材料在生物体内的代谢速度一般较慢^[153,154]。

表 1 中第六类温度传感用发光材料是杂化和复合发光材料。杂化材料是指两种以上组分在分子或纳米粒子在化学上“混合”,这种“混合”是基于组分间的化学键(也包括氢键和 π - π 堆叠)相互作用实现的,并且杂化材料的性质不再是各组分性质的简单集成,而是表现出与各组分具有本质

差异的特性^[155-158]。复合材料是指两种或两种以上组分在宏观尺度上的组合,组合后的复合材料具有加强的某种原有性质或者集成了各组分的性质,组分间不存在强的化学键的结合^[159-161]。不同组分材料的杂化和复合是开发新材料的重要途径^[162]。杂化材料和复合材料并不是完全对立的,二者之间存在模糊地带,因此很多情况下并不严格区分^[162-164]。作为发光温度传感的杂化或复合材料一般是一种或几种发光材料的组分通过物理或化学手段制备而成的,为获得更好的发光和温度传感性能而开发的^[165-168]。

组分杂化与复合为开发新型高温传感性能材料提供了一个有效途径,可以根据实际需要将有机的无机发光材料材料进行杂化和复合,获得具有二者优势的材料,或者克服单一组分材料某种致命缺陷而保留其优势性能的材料^[169]。杂化和复合材料的成本可根据性能需求控制,在满足性能需求的条件下可通过设计和生产流程降低成本^[170, 171]。一般来说,杂化和复合材料均为各向同性材料。杂化和复合材料存在内部的表面和界面,使其机械性能变差。还有,复合材料和杂化材料的回收再利用困难^[172-174]。

表 1 温度传感用发光材料的分类、特性、代表性材料

Tab. 1 Classification, characteristics, and typical examples of luminescent materials for temperature sensing

分类	种类	代表性材料	优缺点
有机发光材料	有机小分子	罗丹明及其衍生物 ^[64] ; 罗丹明 B 等 荧光素 ^[27, 63, 175] ; 5(6)-carboxyfluorescein, 5(6)-aminofluorescein, 5(6)-fluorescein isothiocyanate, and '4'-(aminomethyl) fluorescein '4'-AMF 等	优点: 光谱可控性强、成膜性好,易制备柔性器件,量子效率高、响应快,可实现良好生物兼容性。 缺点: 热稳定性相对较差;发射谱线较宽,影响测温精度;发光光谱范围较窄。
	有机大分子	含芳杂环的有机磷光体 ^[65] , 热致变色液晶 ^[176] 等	
	有机金属配合物	热致变色过渡金属配合物 ^[177] 等	
	MOF	MOF: 双镧系 MOF(Ln-MOFs) ^[178] 等	
半导体材料	II-VI 族半导体	量子点: CdSe ^[83] , CdTe ^[84] , ZnS ^[85, 86] 等	优点: 发射波长可控、耐温性优于有机物、发光效率高、发射线宽较窄。 缺点: 部分半导体量子点含 Cd、Pb 的量子点应用受限,生产成本较高、稳定性较差等问题。
	III-V 族半导体	量子点: GaAs ^[87] , GaN ^[88, 89] , InAs ^[90] , InP ^[77] 等	
	IV-IV 半导体	IV-VI 族半导体量子点: PbS ^[91] , PbSe ^[92] 等	
	钙钛矿量子点	钙钛矿量子点(Mn 掺杂 CsPbCl ₃ 钙钛矿量子点等 ^[93-98, 179])	
金属团簇材料	金属纳米团簇(单金属)	金纳米团簇(AuNCs) ^[18, 181] 、银纳米团簇(AgNCs) ^[182, 183] 、铜纳米团簇(CuNCs) ^[184, 185] 等	优点: 发光性能优异,光稳定性良好、斯托克斯位移大。 缺点: 合成量子产率偏低,且合成低毒、高稳定、高传感性能的金属团簇仍存在较大难度。
	合金纳米团簇(多金属)	合金纳米团簇(Au-Ag、Pt-Au 等 ^[186-188])	
离子掺杂材料	稀土离子中心	二价离子: Sm ²⁺ ^[112] , Eu ²⁺ ^[113] 等 三价离子: Er ³⁺ ^[25] , Ce ³⁺ ^[114] , Pr ³⁺ ^[115] , Dy ³⁺ ^[116] , Nd ³⁺ ^[117] , Eu ³⁺ ^[118] 等	优点: 发光中心选择丰富,可通过调控基质、掺杂离子及浓度实现优异发光性能;材料理化性质稳定,适用环境广泛;激发与发射波长覆盖范围宽,适应应用场景广。 缺点: 存在温度猝灭现象;三价稀土离子吸收截面小,激发效率较低;不等价或半径失配取代时掺杂浓度受限;部分变价离子中心材料制备条件苛刻。
	过渡金属离子中心	Mn ⁴⁺ ^[119] , Cr ³⁺ ^[120] , Co ³⁺ ^[121] , Cu ²⁺ ^[122] 等	
	主族离子中心	Pb ²⁺ ^[123] , Sn ³⁺ ^[124] , In ³⁺ ^[125] , Bi ³⁺ ^[126] 等	
	复合离子发光中心(阴离子集团)	WO ₄ ²⁻ ^[127] , MoO ₄ ²⁻ ^[128] , VO ₄ ³⁻ ^[129] 等	

续表

分类	种类	代表性材料	优缺点
碳材料	碳点	氮硫共掺杂碳点(BG-CDs) ^[189] 等	优点: 激发与发射波长可通过尺寸、表面官能团及元素掺杂调控,发光效率高,且生物相容性优异。
	碳纳米管	单壁碳纳米管 ^[190] , 多壁碳纳米管 ^[191] 等	缺点: 发射光谱线宽较宽,发光性能依赖合成工艺,制备条件严苛;热稳定性弱于离子掺杂无机荧光材料,同时在生物体内代谢速度较慢。
	石墨烯	石墨烯 ^[192] 等	
杂化材料与复合材料	杂化材料	杂化材料: CdTe @ SiO ₂ / PVA 杂化薄膜 ^[168] , 双铜系金属有机框架(Ln-MOFs) ^[178] , CDs @ ZrO ₂ ^[193] , 碘金属酸盐杂化材料 ^[194] 等	优点: 杂化与复合材料可整合有机、无机材料优势,弥补单一材料缺陷,实现高性能温度传感;成本可灵活调控,且多为各向同性材料。
	复合材料	复合材料: 碳纳米管 / 环氧树脂复合材料 ^[195] , 导电聚合物复合材料(CPCs) ^[196] 等	缺点: 材料内部存在界面,导致机械性能下降,同时回收再利用难度较大。

2 基于发光材料的温度传感原理

基于发光材料的光学温度传感技术也是通过测量与温度相关的光学和光谱学参量,通过确定的参量与温度间关系计算出待测温度。发光材料中与温度有关的参量包括吸收强度、FIR、光谱中心波长、光谱线宽、荧光寿命等,表2列出了基于发光材料的光学温度传感的光谱学参数、测量原理及相关参考文献。

2.1 基于单一发射强度的温度传感方法

绝大多数情况下,发光强度随着发光材料的温度上升而减弱。对于半导体材料来说,宽禁带半导体的带间跃迁发射强度对于温度不敏感,直接带隙半导体的带间跃迁强度对于温度较敏感,而间接带隙半导体的带间跃迁强度对于温度最敏感^[197-199]。半导体带间跃迁的强度 $I(T)$ 与温度的关系用下式描述^[200, 201]:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + Ae^{-\frac{E_a}{k_B T}}} \quad (1)$$

上式中 I_0 为温度趋近于0 K时的发光强度, E_a 为激活能, k_B 为玻尔兹曼常数, A 为与温度无关的常数, T 为绝对温度。除了半导体材料外,公式(1)也被一些研究人员用来解释能量间隙较大的两个能级中上能级发光的温度猝灭行为,例如Eu³⁺的⁵D₀能级的荧光猝灭行为^[202],但是越来越多的研究发现这种解释并不恰当^[203]。

对于孤立离子中心的发光过程,其强度对温度有如下依赖关系^[203]:

$$I(T) = a \frac{A_r}{A_r + A_{nr}(T)} \quad (2)$$

上式中 A_r 为辐射跃迁速率, $A_{nr}(T)$ 为无辐射跃迁速率,可以表示为

$$A_{nr}(T) = Ce^{-\alpha \Delta E} \left[1 + \frac{1}{e^{\left(\frac{\hbar \omega}{k_B T}\right)} - 1} \right]^p \quad (3)$$

公式(3)^[204]中 α 和 C 为与温度无关的常数, $\hbar$ 为普朗克常数, ω 基质的最大声子角频率, ΔE 为发射能级与其最近邻下能级间的能量间距, p 为产生声子数,由方程(2)和(3)可以得到:

$$I(T) = a \frac{A_r}{A_r + Ce^{-\alpha \Delta E} \left[1 + \frac{1}{e^{\left(\frac{\hbar \omega}{k_B T}\right)} - 1} \right]^p} \quad (4)$$

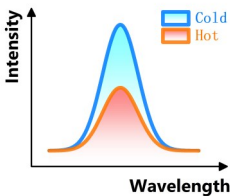
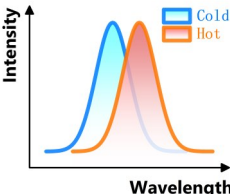
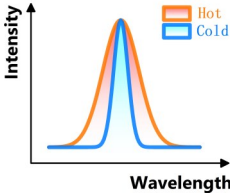
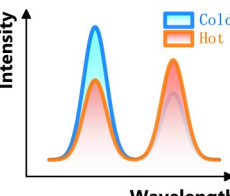
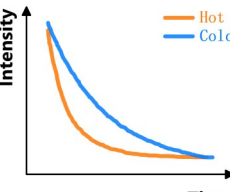
当发光中心间存在相互作用时,发光强度与温度的关系可以写成:

$$I(T) = a \frac{A_r}{A_r + A_{nr}(T) + A_{et}} \quad (5)$$

上式中 A_{et} 为消除发光能级布局的能量传递速率。如果这种能量传递相互作用是辐射再吸收过程,那么这时的能量传递与供体发光强度几乎无关,因此发光强度与温度的关系仍由公式(4)的数学形式描述。如果发光中心间的能量传递是通过电多极相互作用实现的Föster能量传递过程,并且光谱线型对温度依赖较小,此时能量传递速率可近似看作与温度无关^[205],因此,发光强度对温度依赖关系也可由公式(4)的数学形式描述,但 A_r 是辐射速率和能量传递速率之和。如果发光中心间的能量传递是通过声子参与实现的过程,发光强度与温度的关系可以写成^[206]:

表 2 基于发光材料的温度传感原理

Tab. 2 Temperature sensing mechanisms based on luminescence materials

测温技术	示意图	原理	公式	参考文献
发射强度		①半导体带间跃迁的强度与温度的关系: $I(T) = \frac{I_0}{1 + Ae^{\frac{E_g}{k_B T}}}$ ②孤立离子中心强度与温度的关系: $I(T) = a \frac{A_r}{A_r + C \cdot e^{-\alpha \Delta E} \left[1 + \frac{1}{e^{(\hbar \omega / k_B T)} - 1} \right]^p}$ ③发光中心间的能量传递是通过交换相互作用实现的 Dexter 能量传递过程, 发光强度与温度的关系: $I(T) = a \frac{A_r}{A_r + C \cdot e^{-\alpha \Delta E} \left[1 + \frac{1}{e^{(\hbar \omega / k_B T)} - 1} \right]^p} + B \left[\frac{1}{e^{(\hbar \omega / k_B T)} - 1} \right]^m$	[27, 176, 207, 208]	
发射带移		利用发光峰中心波长对温度的依赖关系实现温度传感, 仅有部分发光材料能实现这类温度传感。 ①半导体材料发射中心波长与温度的关系: $\bullet(T) = \frac{hc}{E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}}$ ②考虑电子-声子相互作用, 发射中心波长与温度的关系: $\bullet(T) = \frac{hc}{E_g(0) - \alpha B \left[\frac{2}{e^{(\hbar \omega / T)} - 1} + 1 \right]}$	[22, 27, 209, 210]	
发射带宽		①缺陷较少的半导体发光材料: $\Gamma(T) = \Gamma_0 + \gamma_{ac} T + \frac{\gamma_{LO}}{e^{(\hbar \omega_{LO} / k_B T)} - 1}$ ②窄带发射过渡族金属离子: $\Gamma(T) = \Gamma_0 + \frac{\alpha}{e^{(\hbar \omega_{LO} / k_B T)} - 1}$ ③宽带发射过渡族金属离子: $\Gamma(T) = \Gamma_0 \sqrt{\coth \left(\frac{\hbar \omega}{2k_B T} \right)}$ ④碳点材料: $\Gamma(T) = \Gamma_0 + \gamma T^n$	[22, 27, 211, 212]	
荧光强度比		利用发光峰间的 FIR 对温度的依赖关系实现温度传感, 不同发光机理的 FIR 对温度的依赖关系不同。 ①热耦合能级: $\frac{I_u}{I_l} = \frac{A_{u-0} N_u}{A_{l-0} N_l} = \frac{A_{u-0}}{A_{l-0}} e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}$ ②非热耦合能级: $\frac{I_l}{I_2} = a \cdot \frac{I + C_2 e^{-(\Delta E_2 / k_B T)}}{I + C_1 e^{-(\Delta E_1 / k_B T)}}$	[27, 65, 209, 213-216]	
荧光寿命		利用荧光寿命对温度的依赖关系进行温度传感, 不同发光机理的荧光寿命对温度的依赖关系不同。 半导体、碳点材料和离子中心的掺杂材料: $\tau(T) = \frac{\tau_0}{1 + Ce^{\frac{\Delta E}{k_B T}}}$	[23, 27, 65, 209, 217-222]	

续表

测温技术	示意图	原理	公式	参考文献
------	-----	----	----	------

色坐标



利用材料发射色坐标
随着温度的变化实现
温度传感

$$x(T) = \frac{X(T)}{X(T) + Y(T) + Z(T)}$$

$$I(T) =$$

$$a \frac{A_r}{A_r + C \cdot e^{-\alpha \Delta E} \left[1 + \frac{1}{e^{(\hbar \omega / k_B T)} - 1} \right]^n + B \left[\frac{1}{e^{(\hbar \omega / k_B T)} - 1} \right]^m} \quad (6)$$

上式中 m 为能量传递过程中产生或湮灭声子数, B 为与温度无关的常数。

与以上发光过程不同, 对于热激活延迟荧光过程的稳态发光强度对温度关系比较复杂, 在极低温条件时, 延迟荧光强度与温度无关, 当温度上升后, 延迟荧光强度可用下面经验公式表示^[223]:

$$I(T) = I_0 (1 + e^{\frac{\Delta E_{act}}{k_B T}}) \quad (7)$$

上式中 ΔE_{act} 为反向串越过程的激活能, I_0 为与温度无关的常数。

公式(1)、(4)、(6)和(7)给出了不同过程的发光强度与温度关系, 理论上讲, 只要确定了以上公式中的相关常量, 根据测量得到发光强度, 就可以利用上述公式计算出对应的温度。然而, 由于发光强度测量是相对测量, 因此公式中常数很难确定, 除非激发条件、测量条件以及样品几何等都完全确定, 才能利用单一发光强度进行温度测量, 可见, 利用这一机理进行温度测量比较困难。

还应当指出的是, 以上过程均是针对下移发光过程而言, 对于上转换发光过程、量子剪裁发光过程以及长余辉荧光过程的光发射强度与温度的关系依赖于具体的材料体系和发光的具体布居过程, 往往非常复杂, 需要具体问题具体分析^[224-226]。

2.2 基于发射峰移的温度传感方法

对于稀土离子掺杂材料来说, 在很大的温度范围内 f-f 跃迁的发射峰位置的移动非常小, 因此, 峰位无法作为温度传感的测量物理量^[210, 227]。对于半导体材料来说, 温度对峰位的影响主要是由于随着温度的变化, 带间跃迁发射能量中心值近似等于材料的带隙能 $E_g(T)$ 减去微小的激子结合能, 发射波长对温度依赖关系由下式表示^[228]:

$$\bullet(T) = \frac{hc}{E_g(T)} \quad (8)$$

上式 h 和 c 分别为普朗克常数和光速, $E_g(T)$ 由下面 Varshni 方程表示^[229]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (9)$$

公式(9)中 α 为与温度无关的常数, β 与德拜温度有关常数, 当高于一定温度时, 上式中 β 可以忽略, 当温度较低时, 带隙能与温度成二次函数关系。所以, 对于半导体材料, 发射中心波长对温度的依赖关系可以表示为:

$$\bullet(T) = \frac{hc}{E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}} \quad (10)$$

上述公式在极低和高温区存在较大偏差, 如果考虑电子-声子相互作用, Bose-Einstein 模型给出的带隙能与温度的关系可以表示为^[230]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha B \left(\frac{2}{e^{(\Theta_E/T)} - 1} + 1 \right) \quad (11)$$

αB 为电子-声子耦合常数, 单位为 eV, Θ_E 为爱因斯坦温度, 单位为 K, 将上式带入公式(10)可以得到:

$$\bullet(T) = \frac{hc}{E_g(0) - \alpha B \left(\frac{2}{e^{(\Theta_E/T)} - 1} + 1 \right)} \quad (12)$$

对于过渡族金属离子中心, 发射中心波长和温度的关系也可以用基于 Varshni 经验公式的公式(10)的形式表示。

还应该说明的是, 尽管半导体和过渡金属离子发射峰值随温度变化, 但是即使是强电子-声子相互作用系统的中心波长对温度的变化率也小于 2 nm/K, 因此利用中心波长随温度的变化进行温度传感一般不被看好^[22, 27, 209, 231-233]。

2.3 基于发射峰线宽的温度传感技术

温度变化会导致发光材料发射光谱线宽的改变, 对于不同类型的发光材料及不同温区光谱线

宽展宽的机制可能并不相同,利用发光材料发射光谱线宽随着温度变化进行温度测量是光学温度传感的重要方法。

对于半导体发光材料,如果材料中缺陷较少,线宽随温度的变化可用下式表示^[234]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 + \gamma_{ac}T + \frac{\gamma_{LO}}{e^{(\hbar\omega_{LO}/k_B T)} - 1} \quad (13)$$

Γ_0 为0 K时的线宽,是非均匀展宽,如杂质和尺寸分布导致展宽; $\gamma_{ac}T$ 为声学声子散射导致的展宽项;最后一项是光学声子展宽项,在高温下呈快速增长。当半导体材料的缺陷占主导时,线宽随温度的变化较为温和。

对于过渡金属离子,光谱线宽度的温度依赖于电子-声子耦合强弱和能级类型。如果发射带宽较窄,线宽主要来自声子带边的热激活,线宽温度依赖关系可以表示为^[235]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 + \frac{\alpha}{e^{(\hbar\omega_{LO}/k_B T)} - 1} \quad (14)$$

公式(14)中 α 为常数。在低温下线宽几乎不随温度改变,高温时线宽随温度增长相对显著。

如果是宽带发射过渡族金属离子,此时电子-声子相互作用较强,根据 Franck-Condon 原理可知,线宽随温度的变化关系表示为^[22, 27, 209, 212]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 \sqrt{\coth\left(\frac{\hbar\omega}{2k_B T}\right)} \quad (15)$$

对于碳点材料^[235],其发光通常源于表面态或 sp² 共轭域的带边电子跃迁,它的线宽对温度依赖关系与表面化学环境和尺寸分布有关,低温下线宽主要是源于尺寸分布的非均匀展宽,此时线宽对温度依赖较小;在高温下,展宽主要源于电子-声子耦合效应,此时为均匀展宽^[236],线宽与温度关系由下述经验公式表述^[237, 238]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 + \gamma T^n \quad (16)$$

公式(16)中 n 通常在1~2之间,取决于声学声子和光学声子耦合有关。

对于碳纳米管材料,发光源于一维激子,低温下线宽接近不变;中等温度调节下(50-300 K),线宽随温度呈现近似线性关系^[240],即:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 + \beta T \quad (17)$$

当高温时,线宽与温度关系与可以表示为^[240]:

$$\Gamma(T) = \Gamma_0 + \beta T + \frac{\gamma}{e^{(\hbar\omega_{LO}/k_B T)} - 1} \quad (18)$$

以上公式中 α 、 β 、 γ 是与温度无关的常数。公

式(18)与半导体材料的方程(13)类似。

2.4 基于 FIR 温度测量技术

在前面2.1节中阐述了不同发光材料的发光强度对温度的依赖,并指出了利用单一发射光强度随温度变化实现温度传感存在定标困难的问题,因为发光强度的测量是相对的。为了解决这一问题,研究者们提出了利用 FIR 进行温度传感的方法^[241, 242]。这一方法的思想就是,如果两个发射波长光的强度中有至少一个是温度有关的,那么用这两个发射的 FIR 就可以有效消除相对性测量问题。也就是说 FIR 是绝对值,并且是温度有关的函数,也就使温度探测成为了可能^[243, 244]。

利用 FIR 进行温度传感的技术可以分为两类:一类是两个发光能级是热耦合的情况^[245, 246],另一类是两个发光来自于不同种离子或者来自同一离子的非热耦合能级^[247, 248]。理论上讲,在离子中心掺杂的发光体系中,当达到热平衡时,离子的所有能级布居都处于一个玻尔兹曼分布,也就是任意能级 i 的布居 N_i 可以表示为 $N_i = Ne^{-\frac{E_i}{k_B T}}$,这里 E_i 为能级 i 的能量, N 为与温度无关的常数,这样任意两个能级的布居比都仅与温度有关,都可以作为温度传感的两个能级。但是实际上并不是这样,一是,当存在外界激发时,系统不能达到真正的热平衡;二是,两个能级能量差较大时,且系统温度有限时,下能级不能通过热激发布居到上能级。因此,在实际应用中判断两个能级能否用热耦合能级实现温度传感的条件是:温度适当,保证 $k_B T$ 与两个能级的能量差 ΔE 大小相当,同时下能级发光不被完全热猝灭。此时,这两个能级组成的系统看作是近似热平衡,这两个能级称为热耦合能级,否则为非热耦合能级。

对于热耦合能级情况, FIR 与温度的关系就可以表示为下式^[25, 209, 249]:

$$FIR = \frac{I_u}{I_l} = \frac{A_{u-0}N_u}{A_{l-0}N_l} = \frac{A_{u-0}}{A_{l-0}} e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (19)$$

公式(19)中 N_u 、 A_{u-0} 和 N_l 、 A_{l-0} 分别为上能级和下能级的布居和辐射跃迁速率, ΔE 为两个热耦合能级的能量差。通过测量几组不同温度下的发射光谱,就可以确定公式(19)中的参数 $\frac{A_{u-0}}{A_{l-0}}$ 和 ΔE ,也就得到了温度的定标函数的具体形式,进而就可以将测量得到的光谱强度比带入定标函数确定待测温度了。

对于非热耦合能级情况,如果发射能级的发光强度对温度的依赖关系是公式(1)、(4)、(6)和(7)所描述的任意情况的一种或两种,那么 FIR 就可以直接用两个函数比来表示,这个比也消除了发光强度测量相对性的影响,并且 FIR 一定只依赖于温度。例如,玻璃中 Ag 团簇和 Sm^{3+} 发射都满足公式(1)的情况,此时 FIR 就可以表示为^[250]:

$$\text{FIR} = \frac{I_1}{I_2} = a \cdot \frac{1 + C_2 e^{-(\Delta E_2/k_B T)}}{1 + C_1 e^{-(\Delta E_1/k_B T)}} \quad (20)$$

上式中的角标 1 和 2 分别代表 Ag 团簇和 Sm^{3+} 相关的物理量。对于基于非热耦合能级发射的 FIR,只要知道两个能级的热猝灭机理,也就是荧光强度对温度的依赖关系,就可以得到温度依赖的强度比的数学表达式,这样的材料就可以作为温度传感材料。

如果两个发光能级(可以是一个离子的两个能级,也可以是两个离子的发光能级)的发光强度与温度的关系有一个是未知的,此时就无法用解析表达式来描述 FIR 了。这种情况下,要用多项式函数或者有限项泰勒级数的形式近似地描述 FIR 对温度的依赖关系,也可以获得温度校准曲线,进而利用校准曲线进行温度的测量^[216, 250, 251]。

2.5 基于荧光寿命测量的温度传感技术

荧光寿命温度传感技术是基于荧光物质的激发态寿命对温度依赖实现的^[23, 27]。处于激发态的电子通过辐射和无辐射过程退激发过程是随机的,也就是说,对于一个激发态的电子来说其退激发的时间不是确定的,对于不同的发光过程,荧光衰减函数 $I(t)$ 是不同的,并且可能比较复杂。被广泛接受的荧光寿命有两种定义方法:第一种叫做 I/e 寿命,这是指当激发停止($t = 0$)后,荧光强度变为 $I(0)$ 的 I/e 所需的时间;第二种叫做平均寿命 τ ,是电子在激发态停留的平均时间,也是我们通常所说的荧光寿命,由下式表示^[218, 252]:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty I(t) dt}{\int_0^\infty I(t) dt} \quad (21)$$

上式中积分的上限是 ∞ ,但在实际应用中,荧光衰减的测量时间范围总是有限的,因此,只要测量荧光信号衰减到 0,或者出现白噪声信号即可,积分上限取这个时间就足够了。对于孤立的离子中心,一定温度下荧光衰减遵循单指数函数规律^[27, 65, 209]:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (22)$$

其中, I_0 为初始时刻($t = 0$)的光强, τ 为荧光寿命。在单指数情况下, I/e 寿命和平均寿命相等。如果存在无辐射消布居通道,寿命按下式关系减小^[218]:

$$\tau = \frac{1}{A_r + A_{nr}} \quad (23)$$

其中, A_r 和 A_{nr} 分别为辐射跃迁的速率和无辐射跃迁的速率。在绝大多数情况下,荧光衰减的函数比较复杂,与发光的具体激发态动力学过程有关,因此需要根据具体过程进行分析。例如,某一波长的发光源于两种不同的发光中心 1 和 2,并且时间常数(各自的不同寿命 τ_1 和 τ_2),此时发光衰减遵循双指数函数:

$$I(t) = I_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + I_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (24)$$

根据公式(21),此时的平均寿命可以表示为^[218, 252]:

$$\tau = \frac{I_1 \tau_1^2 + I_2 \tau_2^2}{I_1 \tau_1 + I_2 \tau_2} \quad (25)$$

如果发射源于 N 个发光中心,则上式可写成:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^N I_i \tau_i^2}{\sum_{i=1}^N I_i \tau_i} \quad (26)$$

只要上式中 N 值足够大,所有荧光衰减过程都可以用多中心衰减模型(多指数衰减)进行近似,所以(26)式就可以用来计算平均寿命。随着温度的升高,分子振动弛豫加剧,进而导致无辐射跃迁概率升高,绝大多数情况下荧光寿命会随着温度的增加而减小,因此可以用荧光寿命进行温度传感。无论是半导体、碳点材料和离子中心的掺杂材料,荧光寿命与温度的关系可以表示为^[218]:

$$\tau(T) = \frac{\tau_0}{1 + C e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}} \quad (27)$$

其中, τ_0 为绝对温度趋近 0 K 时的辐射寿命, ΔE 为热猝灭过程的活化能。由于寿命的测量为绝对测量,所以只要确定了公式(27)中参数 τ_0 、 ΔE 和常数 C ,就可以利用其进行温度传感。由公式(27)可以看出,如果 ΔE 较大,或者温度 T 较低时,分母值接近 1,此时寿命几乎不随温度改变,也就无法实现温度传感了。其他情况下, $\tau(T)$ 随着温度非线性递减。

2.6 基于色度坐标的温度传感技术

色坐标是定量描述颜色的物理量,当前比较

广泛使用的是国际照明委员会(CIE)在1931年制定的CIE 1931色度系统,该系统作为一个国际化的色度学标准。该标准规定颜色可以用一对坐标(x, y)表示,称为色坐标,用下式表示^[219]

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (28)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (29)$$

公式(28)和(29)中 X 、 Y 、 Z 称为三刺激值,由下式计算

$$\begin{cases} X = \int_{360}^{780} f(\bullet) \bar{x}(\bullet) d\bullet \\ Y = \int_{360}^{780} f(\bullet) \bar{y}(\bullet) d\bullet \\ Z = \int_{360}^{780} f(\bullet) \bar{z}(\bullet) d\bullet \end{cases} \quad (30)$$

上式中 $f(\bullet)$ 为强度校准的可见区(360~780 nm)发射光谱, $\bar{x}(\bullet)$ 、 $\bar{y}(\bullet)$ 和 $\bar{z}(\bullet)$ 为色匹配函数,在CIE1931标准中已规定了它们的数值,可以看作一个不随任何条件改变的依赖于人类眼睛属性的固有函数。从公式(30)可以看出,三刺激值得数值相相对值,因为 $f(\bullet)$ 是相对值,而由三刺激值得到的色坐标值 x 和 y 是绝对值,因为公式(28)和(29)中的比消除了光谱测量的相对性。如果 $f(\bullet)$ 随着温度变化,并且这种变化包括了谱线线宽、线形变化,或者发射峰值比例的变化(也可以认为是线形的变化),那么色坐标就一定随着温度变化,这样就可以得到 $x(T)$ 的实验结果,建立实验定标曲线,然后通过测量色坐标来获得温度。

从以上论述可知,如果光谱 $f(\bullet)$ 随温度的变化物理机制已知,那么就可以用前面第2.1~2.5节中阐述的技术进行温度传感,而没有必要采用色坐标进行温度传感,以免使本就清晰的物理意义变得模糊。如果 $f(\bullet)$ 随温度的变化机制未知,并且发射光谱包含了多个发射峰(带),可以采用2.4节中介绍的非热耦合能级FIR技术进行温度传感,也可以考虑采用色坐标进行温度传感。然而,从上面的分析可以看出,采用色坐标进行温度传感,在一些情况下似乎将简单问题复杂化了。

3 温度传感性能的评价方法

前面阐述了利用发光材料可测量物理量与温度关系进行温度传感的主要机理,从这些机理可以推断出,利用不同机理实现温度传感的性能是

不同的,本部分内容主要阐述如何对利用发光材料进行温度传感的性能进行评价。一般来讲,评价一个传感器件的性能主要包括三个方面:第一方面,所用的材料的性能,包括物理和化学稳定性,由于材料本身性能限制的可测量量的响应范围,制备工艺要求等;第二方面,与温度测量原理直接相关的性能,如线性度、灵敏度、分辨率及精度等;第三个方面,是器件方面的性能,包括受第一方面和第二方面影响的全部性能指标,还包括支持工作条件、动态响应、静态响应等等^[253, 254]。本部分内容主要关注第二方面的性能评价方法,包括线性度、绝对灵敏度、相对灵敏度、温度分辨率和重复性评价等几个方面^[231]。

3.1 线性度

最理想的传感器的可测量物理量和待测量间是线性关系,这种线性关系给理论分析、定标和数据处理都带来很大方便。线性度用非线性误差 γ_L 进行评价^[255],用数学公式表述如下:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (31)$$

上式中 $\Delta L_{\max}$ 为最大非线性绝对误差,它是指当可测量物理量与待测量为非线性关系时,在测量范围内用线性函数表述二者间的关系而产生的最大绝对误差。 Y_{FS} 为待测量的测量范围极限值,也就是最大量程。从表2中可以看出,五种利用发光材料的温度传感的技术中,只有利用碳纳米管荧光线宽测量温度在50-300 K范围时,可测量物理量线宽和待测温度间较好地接近线性关系(公式17),对于其他温度传感机制,可测量物理量和温度间关系都背离了线性关系,这也是利用发光材料进行温度传感的一个天然缺陷,它使数据分析和处理变得复杂。绝大多数情况下,利用发光材料实现温度传感时,可测量物理量与温度间均为非线性关系,因此忽略了线性度这一重要评价指标的讨论。寻找与温度间存在线性关系的发光材料可测量物理量是一个挑战,即使是在一定温度范围内接近线性关系也是非常有意义的。

3.2 绝对灵敏度

绝对灵敏度(S_a)是指待测量温度每改变单位值(一般为1 K)时,可测量物理量的改变值,它表示传感器对温度变化的响应能力。 S_a 用如下公式表示^[215, 231, 256, 257]:

$$S_a = \frac{\partial \Delta}{\partial T} \quad (32)$$

其中, Δ 为可测量的物理量, T 为温度, 绝对灵敏度的量纲由可测量物理量的量纲 ma 和温度共同决定, 为 $\text{ma} \cdot \text{K}^{-1}$ 。绝对灵敏度越高, 传感器对温度变化的感知能力越强。对于非线性误差接近 0 的系统, 绝对灵敏度即为可测量物理量和温度线性关系的斜率值, 并且不随温度变化; 对于非线性误差较大的系统, 绝对灵敏度是温度的函数。作为例子, 下面讨论两种基于不同机理的温度传感的绝对灵敏度与温度的关系。

3.2.1 FIR 温度传感的绝对灵敏度

对于利用热耦合能级 FIR 的温度传感技术, 由公式(19)和绝对灵敏度定义式(31)可推导出绝对灵敏度为^[256, 258]:

$$S_a = \frac{d(FIR)}{dT} = \frac{A_{u-0}}{A_{l-0}} \frac{\Delta E}{k_B T^2} e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (33)$$

可以看出, 当能级间距大时, 在较低温度下上能级热布居较少, 发光也就很弱, 甚至测量不到, 而温度较高时下能级的无辐射跃迁会很大, 使两个能级的发光强度降低, 降低温度传感测量的精度^[259]。此外, 还可以看出, 测量不同的温度时灵敏度是不同的, 温度越低, 灵敏度越高, 但是温度太低时上能级的布居较少, 发光强度弱, 也会降低测量精度。

对于非热耦合能级的 FIR 测温法, 例如公式(20)所描述的情况, 即被用于强度比的两种荧光发射分别来自于不同的发光中心。根据绝对灵敏度定义式(32)和公式(20), 此时的绝对灵敏度可以表示为:

$$S_a = \frac{d(FIR)}{dT} = \frac{C_2 \Delta E_2 e^{-\frac{\Delta E_2}{k_B T}}}{k_B T^2 (1 + C_1 e^{-\frac{\Delta E_1}{k_B T}})} - \frac{C_1 \Delta E_1 e^{-\frac{\Delta E_1}{k_B T}} (1 + C_2 e^{-\frac{\Delta E_2}{k_B T}})}{k_B T^2 (1 + C_1 e^{-\frac{\Delta E_1}{k_B T}})^2} \quad (34)$$

从式(34)可以看出, 此时的温度传感绝对灵敏度对温度依赖关系非常复杂。如果在实际应用中测量的温度范围较小, 可以考虑用线性依赖关系近似描述公式(20), 然后用公式(32)的非线性误差进行评价, 如果能够接受这一处理所带来的误差, 此时的灵敏度可以考虑是常数。

3.2.2 荧光寿命温度传感的绝对灵敏度

对于 2.5 节中阐述的基于荧光寿命测温法, 绝对灵敏度可以由公式(24)和绝对灵敏度定义公式(32)得到, 具体表示如下^[23, 258]:

$$S_a = -\frac{\tau_0 C \Delta E e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}}{k_B T^2 \left(1 + C e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}\right)^2} \quad (35)$$

若上式中 $C e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \gg 1$, 即无辐射跃迁速率非常大, 此时绝对灵敏度公式(35)可以简化为:

$$S_a \approx -\frac{\tau_0 \Delta E}{C k_B T^2} e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (36)$$

此时的发光强度会比较弱, 测量的精度会受到较大影响。如果 $e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \ll 1$, 从公式(27)可以看出, 荧光寿命几乎不随温度变化, 即无辐射跃迁可以忽略, 此时的绝对灵敏度也非常小, 此时已不再适合温度传感应用。

对于第 2 节中介绍的其它温度传感技术, 绝对灵敏度都可以用绝对灵敏度定义式(32)进行计算, 但是应该指出的是, 2.1 节中所描述的温度传感技术的灵敏度与激发功率直接相关。

3.3 相对灵敏度

相对灵敏度(S_r)是指温度改变单位值时(1 K), 可测量物理量的相对改变百分比, 也就是绝对灵敏度与可测量物理量的比值, 用百分数表示。 S_r 用如下公式表示^[216, 231, 256, 257]:

$$S_r = \frac{1}{\Delta} \left| \frac{\partial \Delta}{\partial T} \right| \cdot 100\% \quad (37)$$

与绝对灵敏度不同, 相对灵敏度说明的是单位温度改变的条件下, 可测量物理量的相对改变率, 而绝对灵敏度给出的是温度改变单位值时, 可测量物理量改变的绝对值。这两个灵敏度是从不同的角度描述了对温度测量的灵敏性, 对于不同温度传感机理的过程, 相对灵敏度更重要^[216, 231]。

3.3.1 FIR 温度传感的相对灵敏度

对于利用热耦合能级 FIR 的温度传感技术, 由公式(33)和公式(37)可推导出如下公式^[256, 258]:

$$S_r = \frac{1}{FIR} \frac{d(FIR)}{dT} \cdot 100\% = \frac{\Delta E}{k_B T^2} \cdot 100\% \quad (38)$$

由公式(38)可知, 相对灵敏度也是温度函数, 并且与温度的平方成反比, 也就是说测量的温度越高, 相对灵敏度越小。此外, 处于热平衡的两个能级的能量差越大, 相对灵敏度越高, 但是高温时下能级的无辐射跃迁会变大, 总的荧光强度会变弱。

对于利用非热耦合能级 FIR 的温度传感技术, 根据公式(20)、(34)和相对灵敏度的定义式(37), 此时的相对灵敏度可以表示为^[260]:

$$S_r = \frac{(1 + C_1 e^{-(\Delta E_1/k_B T)}) \left(\frac{\Delta E_2 C_2 e^{-(\Delta E_2/k_B T)}}{k_B T^2 (1 + C_1 e^{-(\Delta E_1/k_B T)})} - \frac{\Delta E_1 C_1 e^{-(\Delta E_1/k_B T)} (1 + C_2 e^{-(\Delta E_2/k_B T)})}{k_B T^2 (1 + C_1 e^{-(\Delta E_1/k_B T)})^2} \right)}{1 + C_2 e^{-(\Delta E_2/k_B T)}} \cdot 100\% \quad (39)$$

从上式可以看出,这种非热耦合能级荧光强比温度传感技术的相对灵敏度对温度的依赖关系具有非常复杂的形式,这对于实际应用是非常不利的,如果测量的温度范围较小,可以考虑用有限项多项式或者有限项级数展开的函数形式作为经验公式来描述相对灵敏度,但是这种处理使公式的物理意义变模糊。

3.3.2 荧光寿命测温法的相对灵敏度

对于2.5节中阐述的基于荧光寿命温度传感技术,由公式(27)、(35)和相对灵敏度的定义式(37),此时的相对灵敏度可以用下式表示^[23, 258]:

$$S_r = - \frac{C \Delta E e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}}{k_B T^2 \left(1 + C e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \right)} \cdot 100\% \quad (40)$$

公式(40)中,如果若上式中 $C e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \gg 1$, 此时的相对灵敏度可以表示为:

$$S_r = - \frac{\Delta E}{k_B T^2} \cdot 100\% \quad (41)$$

当然,如果 $e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \ll 1$, 温度传感失效,也就谈不上灵敏度了。

对于第2节中所讨论的其它温度传感技术,其相对灵敏度都可以由定义式(37)进行计算,这里不再详细描述。

3.4 温度分辨率、空间分辨率及时间分辨率

分辨率也是评价传感性能的重要指标。对于温度传感来说,温度分辨率是指利用某种温度传感技术所能实现的最小测量温度,它反映了传感器的测量精度,通常与传感器件的信噪比和电子学测量精度有关。在利用发光材料进行温度传感时,温度分辨率被定义为^[211, 231, 260]:

$$\delta T = \frac{1}{S_r} \cdot \frac{\delta \Delta}{\Delta} \quad (42)$$

上式中, S_r 为相对灵敏度, $\delta \Delta$ 是可测量物理量 Δ 的标准差。可以看出,传感器的相对灵敏度 S_r 越高,标准差 $\delta \Delta$ 越小,温度分辨率 δT 越高。而在实际应用中还需结合仪器的噪声和发光稳定性评估^[231, 260]。

此外,温度分辨率还根据不同测温要求划分出了空间分辨率和时间分辨率。空间分辨率是指传

感器能够分辨的最小空间尺度,通常用 δx 表示^[211]:

$$\delta x = \frac{\delta T}{\frac{dT}{dx}} \quad (43)$$

上式中 $\frac{dT}{dx}$ 为温度在空间坐标 x 方向的梯度。

空间分辨率决定了传感器在测量场景温度时能够区分更精细的空间细节。高空间分辨率对于需要精确测量温度分布的应用至关重要,例如微电子器件的热管理、生物医学成像等^[261, 262]。

时间分辨率是指传感器能够响应温度变化的最小时间间隔,通常用温度的时间分辨率 δt 可以表示为^[211]:

$$\delta t = \frac{\delta T}{\frac{dT}{dt}} \quad (44)$$

上式中 $\frac{dT}{dt}$ 为温度对时间的改变率。时间分辨率决定了传感器能够捕捉更快速的温度动态变化。高时间分辨率对于需要监测快速温度变化的场景至关重要,例如发动机燃烧过程、化学反应动力学研究等^[263, 264]。

3.5 可重复性

除了以上评价发光材料温度传感性能的参数外,可重复性指标也是用来评价发光材料温度传感性能必不可少的。可重复性是指在相同实验条件下,多次测量同一温度时,可测量物理量数值的一致性,高可重复性是保证传感器可靠性的重要指标。可重复性 R 可由如下公式定义^[257]:

$$R = 1 - \frac{\text{Max} |\bar{T} - T_i|}{\bar{T}} \quad (45)$$

上式中 $\bar{T}$ 为多次测量温度所求的平均值, T_i 为某次测量温度值。由公式(45)可以看出,单次测量值约接近平均值,可重复性指标越接近1,说明测量的稳定性和可靠性越高。

以上给出了对于发光温度传感性能评价的技术指标,这些技术指标对于在实际应用中评价和选择温度传感体系具有重要意义。此外,还应该注意的是,在温度传感定标曲线的建立和性能评价的过程中,都离不开数值拟合,无论是线形拟合还是非线性拟合,实验与理论公式的符合程度应

该从两个方面进行评价,一是自由参数的拟合误差,二是拟合度。在实际应用过程中,在符合物理意义的前提下要保证自由参数的拟合误差尽量小,同时,拟合度越接近1说明实验数据与理论公式越符合。

4 总结与展望

本文系统综述了基于发光材料的光学温度传感技术的研究进展,涵盖了从材料类型、测温原理到性能评价方法等几个方面。首先,文章归纳了当前用于温度传感的主要发光材料,包括有机化合物、QDs、金属纳米团簇、稀土/过渡金属离子掺杂材料、碳材料及其杂化与复合材料,分析了各类材料的光学特性、测温机制及其优缺点。其次,详细阐述了多种温度传感原理,包括单一发射强度依赖型、发射峰位偏移与带宽展宽型、FIR型以及荧光寿命型等,揭示了不同原理下可测量物理量与温度之间的函数关系。进一步,系统介绍了温度传感性能的关键评价指标,如线性度、绝对灵敏度、相对灵敏度、温度分辨率及可重复性,为材料优选与器件设计提供了理论依据。总体而言,基于发光材料的光学温度传感技术因其非接触、高空间分辨率、快速响应及适用范围广等优势,已成为温度测量领域的重要发展方向。然而,当前研究仍面临若干共性挑战,如灵敏度与温度范围之间的权衡、多种发光中心之间的相互干扰、材料在复杂环境中的稳定性不足、生物相容性有待提升,以及多功能集成能力欠缺等问题。

面向未来,基于发光材料的光学温度传感技术在以下几个方面有望取得突破性进展:

(1)新型高性能温度传感用发光材料的开发方面:

发光材料的物理和化学稳定性对于温度传感器件的应用领域和使用寿命具有重要意义,同时发光材料的高量子效率和窄光谱线宽均有利于光谱信号的探测。此外,发光材料的宽温度响应范围和高传感灵敏度也是作为高性能温度传感器所必须的。不同类型的温度传感材料面临不同的性能问题,例如,稀土掺杂发光材料的测温能级的热猝灭是一个亟待解决的问题,光热治疗用碳点材

料的生物代谢缓慢限制了其使用,有机材料的化学和热稳定性有待提高,因此,基于发光材料的高性能光学温度传感材料的研究将是一个热点。

(2)多物理量传感集成系统的研发方面:

发光材料除可以用于温度探测外,还可以进行压力、pH值以及一些生物标志物检测等的检测,而这种多功能集成的检测对于环境科学、生物医学等非常重要,因此,构建智能多参数传感平台,尤其是在微流控芯片、可穿戴设备及智能医疗诊断中,具备温度响应功能的多模态探针将具有广阔应用前景。

(3)人工智能辅助材料设计、数据处理与分析方面:

目前发光学的基本理论已非常完备,但是这些理论还不能完全指导材料设计,因为一些因素,如合成条件、微量掺杂、后处理等,会对材料的性能产生较大影响,因此发光学是一门实验科学。随着当前计算机的算力提高和人工智能算法的加持,使利用人工智能对已有海量实验结果进行分析成为可能,因此利用人工智能进行材料设计将是一个崭新的研究方向。此外,人工智能还能够对获得的实验数据进行深入分析,结合已有的研究经验和结论,给出更可靠的结论,推动温度传感器的智能化和标准化发展。

(4)温度传感器件的微型化及应用方面:

随着现代科技的发展,半导体及生物医学领域对温度的测量提出了空间分辨的要求,因此实现温度传感器件的小型化和微型化是基于发光材料温度传感的一个未来发展方向,这也是基于发光材料进行温度探测的一个优势。高空间分辨的温度测量与光热转换的高度集成在光热治疗方面具有广阔的应用前景,通过基质选择、掺杂、晶格调控及核壳结构设计协同调控发光与光热转换,实现精准的高质量光热治疗是一个具有吸引力的应用研究方向。

综上所述,基于发光材料的光学温度传感技术正处于快速发展阶段,未来通过多学科交叉融合,有望在基础研究与实际应用中实现更大突破,推动温度测量技术迈向更高精度、更广应用的全新阶段。

参 考 文 献:

- [1] COJOCARU IS., SOSHENKO VV., BOLSHEDVORSKII SV., *et al.* Optimization of the Sensitivity of a Temperature

- Sensor Based on the Germanium-Vacancy Color Center (GeV) in Diamond [J]. *Phys. Status Solidi RRL*, 2025, 19(4): 2400315.
- [2] LIU S J, ZHAO T Q, ABDURAHMAN R, *et al.* Persistent luminescence nanomaterials with up-/down-conversion modes for power battery temperature measurement [J]. *J. Alloys Compd.*, 2025, 1010: 177815.
- [3] HAJJI A, RODRIGUEZ P E D S, SOUEMTI A, *et al.* Optical ratiometric probes based on photoluminescent core-shell structured carbon dots@silica for temperature sensing [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2025, 109(1): e70278.
- [4] WELCH A J, VAN GEMERT M J. *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue* [M]. Berlin: Springer, 2011.
- [5] SEIP R, VANBAREN P, CAIN C A, *et al.* Noninvasive real-time multipoint temperature control for ultrasound phased array treatments [J]. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2002, 43(6): 1063-1073.
- [6] STEINER P, BOTNAR R, DUBNO B, *et al.* Radio-frequency-induced thermoablation: monitoring with T1-weighted and proton-frequency-shift MR imaging in an interventional 0.5-T environment [J]. *Radiology*, 1998, 206(3): 803-810.
- [7] PRAMANIK M, WANG L V. Thermoacoustic and photoacoustic sensing of temperature [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2009, 14(5): 054024-054027.
- [8] FIORENZO V, RAFIK N, ALICIA Z, *et al.* Temperature sensing using fluorescent nanothermometers [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(6): 3254-3258.
- [9] 王晶岚,刘怡麟,胡睿昕,等. 主动冷却对808 nm激光经颅照射小鼠头皮和下颌温度的影响 [J]. *激光生物学报*, 2025, 34(04): 312-318.
- WANG J L, LIU Y L, HU R X, *et al.* The effect of active cooling on scalp and mandible temperature of mice irradiated by 808 nm laser through skull [J]. *Laser Biol. J.*, 2025, 34(04): 312-318. (in Chinese)
- [10] ALJOHANI S B, ALSHUNAIFI I A, ALQAHTANI N B, *et al.* Comparison of a two-wavelength pyrometer system and spectral pyrometry for high-temperature measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2024, 63(13): 3648-3657.
- [11] 黄长江,肖家宾,李新堂. 光纤测温技术现状研究及发展趋势 [J]. *电力信息与通信技术*, 2022, 20(02): 102-108.
- HUANG C J, XIAO J B, LI X T. The research status and development trend of optical fiber temperature measurement technology [J]. *Electr. Inf. Commun. Technol.*, 2022, 20(02): 102-108. (in Chinese)
- [12] 李佳迪,徐柳,冯晓娟,等. 实用化气体声学温度计中圆柱共鸣腔尺寸特性研究 [J]. *计量学报*, 2026: 1-7.
- LI J D, XU L, FENG X J, *et al.* Study on dimensional characteristics of cylindrical resonant cavity in practical gas acoustic thermometer [J]. *Acta Metrol.*, 2026: 1-7. (in Chinese)
- [13] IMBRAGUGLIO D, STEUR P P M, GAVIOSO R M. Direct calibration of resistance thermometers between 10 K and 25 K by absolute acoustic gas thermometry in helium [J]. *Philos. Trans. R. Soc. A*, 2026, 384(2312): 20250043.
- [14] ZHANG N X, SHI X Y, DING S, *et al.* Screen-printed thin-film thermocouples for curved surface temperature monitoring and human-machine interaction [J]. *Flexible Printed Electron.*, 2026, 11(1): 015006.
- [15] WANG X T, GUO L, ZHANG Q H, *et al.* Printed Recyclable and Flexible Thermocouple Temperature Sensors [J]. *Adv. Sens. Res.*, 2025, 4(8): e70050.
- [16] 张立民,叶至壮,屈新芳,等. 多模态融合的洗浴环境舒适性智能感知方法研究 [J]. *家电科技*, 2025, (05): 42-46.
- ZHANG L M, YE Z Z, QU X F, *et al.* Research on intelligent perception method of bathing environment comfort based on multi-modal fusion [J]. *J. Appl. Sci. Technol.*, 2025, (05): 42-46. (in Chinese)
- [17] 孙建平,李婷,王光耀,等. 亚毫开级NTC热敏电阻温度计研制及校准方法研究 [J]. *计量学报*, 2025, 46(11): 1553-1560.
- SUN J P, LI T, WANG G Y, *et al.* Development of sub-millikelvin NTC thermistor thermometer and research on its calibration method [J]. *Acta Metrol. Sin.*, 2025, 46(11): 1553-1560. (in Chinese)
- [18] SAHOO K, KASHYAP P, SUPRIYA S, *et al.* Highly luminescent Zn^{2+} -doped $\text{CsPb}(\text{Cl/Br})_3$ nanocrystals: Flexible microfibers for applications in down-converted blue LEDs and temperature sensing [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2026, 203: 114217.
- [19] CHEN M, LI J, JIANG Z H, *et al.* Thermally enhanced up-conversion for optical temperature sensing in $\text{Na}_{1-3x-3y}\text{Tm}_x\text{Y}_y\text{NbO}_3$ ceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2026, 177: 118148.
- [20] BYALIK A D, GORIN A S, KAZANTSEV D S, *et al.* Study of Fiber Optic Temperature Sensors Using AWG Structures [J]. *Instrum. Exp. Tech.*, 2026, 69(1): 202-207.

- [21] GAO R, LIN Z T, ZHAO Y. Double microcavity channel MZ interference optical fiber temperature sensor based on femto-second laser [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2026, 101: 104678.
- [22] JAQUE D, VETRONE F. Luminescence nanothermometry [J]. *Nanoscale*, 2012, 4(15): 4301-4326.
- [23] LIU W, ZHAO D, ZHANG R J, *et al.* Fluorescence lifetime-based luminescent thermometry material with lifetime varying over a factor of 50 [J]. *Inorg. Chem.*, 2022, 61(41): 16468-16476.
- [24] JU Z, SHI Y, MENG F, *et al.* High-Sensitivity Optoelectronic Temperature Sensing Using Rare Earth Luminescent Materials for Antenna Radome Temperature Monitoring [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(28): 40729-40742.
- [25] ZHANG Y H, CAO Y Z, ZHAO Y, *et al.* Optical temperature sensor based on upconversion luminescence of Er^{3+} doped GdTaO_4 phosphors [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 104(1): 361-368.
- [26] BRITES C, MILLÁN A, CARLOS L. *Lanthanides in Luminescent Thermometry* [M]. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. Elsevier. 2016: 339-427.
- [27] RAMOLISE L A, OGUGUA S N, SWART H C, *et al.* Recent advances on visible and near-infrared thermometric phosphors with ambient temperature sensitivity: A review [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2025, 522: 216196.
- [28] 黄善杰, 赵劲松, 王岭雪, 等. 低辐射率物体红外测温的研究进展 [J]. *红外与毫米波学报*, 2025, 44(2): 241-257.
HUANG S J, ZHAO J S, WANG L X, *et al.* Research progress on infrared temperature measurement of low-emissivity objects [J]. *J. Infrared Millim. W.*, 2025, 44(2): 241-257. (in Chinese)
- [29] HARRINGTON B, YE Z, SIGNOR L, *et al.* Luminescence Thermometry Beyond the Biological Realm [J]. *ACS Nanosci. Au*, 2024, 4(1): 30-61.
- [30] ZHU D B, GUO K Y, YAO J C, *et al.* The single near-infrared upconversion luminescence of a novel $\text{KYb}(\text{MoO}_4)_2: \text{Er}^{3+}$ phosphor for the temperature sensing [J]. *J. Mol. Struct.*, 2024, 1310: 138304.
- [31] BALCI E, VAHID A F, ALTINDAL S. Al/(S: DLC)/p-Si/Au (MIS) structure-based temperature sensors for moderate and high temperatures at enough high frequencies (0.1, 0.5, and 1 MHz) [J]. *Diam. Relat. Mater.*, 2025, 154: 112229.
- [32] GOU L Y, XIAO M, ZHU T Y, *et al.* Physics-Informed Digital Twin for Predicting Permafrost Thermodynamic Characteristics Under an Embankment Road in Utqiagvik, Alaska [J]. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 2026, 131(4): e2025JF008787.
- [33] PAWŁOW J, KOZUBEK M W, CYBIŃSKA J. Temperature-responsive hybrid films combining rare-earth phosphors and thermochromic materials for optical sensing [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2025, 708: 139794.
- [34] CHEN S Y Z, SONG W H, CAO J K, HU F F, GUO H, Highly sensitive optical thermometer based on FIR technique of transparent $\text{NaY}_2\text{F}_7: \text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ glass ceramic, *Journal of Alloys and Compounds* [J], 825(2020) 154011.
- [35] CHEN J Y, CHEN J Q, LI L J, ZHANG W N, CHEN L P, GUO H, A four-mode high-sensitive optical thermometer based on $\text{Ca}_3\text{LiZnV}_3\text{O}_{12}: \text{Sm}^{3+}$ phosphors, *Materials Today Chemistry* [J], 29(2023)101409.
- [36] TONG Y, ZHANG W N, WEI R F, CHEN L P, GUO H, $\text{Na}_2\text{YMg}_2(\text{VO}_4)_3: \text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ phosphors: Up-conversion and optical thermometry, *Ceramics International* [J], 47(2021)2600-2606.
- [37] ZHENG Z, ZHANG J F, Liu X Y, WEI R F, HU F F, GUO H, Luminescence and self-referenced optical temperature sensing performance in $\text{Ca}_2\text{YZr}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}: \text{Bi}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ phosphors, *Ceramics International* [J], 46(2020)6154-6159.
- [38] JIANG Y C, TONG Y, CHEN S Y Z, ZHANG W N, HU F F, WEI R F, GUO H, A three-mode self-reference optical thermometry based on up-conversion luminescence of $\text{Ca}_2\text{MgWO}_6: \text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ phosphors, *Chemical Engineering Journal* [J], 413(2021)127470.
- [39] CHEN D Q, WAN Z Y, ZHOU Y, ZHOU X Z, YU Y L, ZHONG J S, DING M Y, JI Z G, Dual-phase glass ceramic: Structure, dual-modal luminescence and temperature sensing behaviors, *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 7(34) (2015): 19484-19493.
- [40] YU D C, ZHANG D W, ZHANG Q Y, MEIJERINK A, SUTA M, One ion to catch them all: Targeted high-precision Boltzmann thermometry over a wide temperature range with Gd^{3+} , *Light: Science & Applications* [J], 10(2021)236.
- [41] YU D C, ZHANG X S, ZHANG A R, HAN X X, SONG E H, ZHANG D W, Preparation and spectral properties of blue-to-UVB upconverting $\text{Y}_2\text{O}_3: \text{RE}^{3+}, \text{Gd}^{3+}$ (RE= Er, Ho) micro-/nano-phosphors, *Journal of Rare Earths* [J], 44(3)(2026) 755-763.
- [42] HUANG Y, ZHANG X S, LI Z H, JIN T T, CHEN D Q, ZHANG D W, YU D C, Study on self-crystallized $\text{Ba}_2\text{YF}_7:$

- Gd³⁺, Pr³⁺ glass-ceramics: Novel blue-to-UVB upconversion and dual-mode optical thermometry, *Journal of the European Ceramic Society* [J], 46(15)(2026)118528.
- [43] VAN SWIETEN T P, YU D C, YU T, VONK S J W, SUTA M, ZHANG Q Y, MEIJERINK A, RABOUW F T, A Ho³⁺-based luminescent Thermometer for Sensitive Sensing over wide temperature range, *Advanced Optical Materials* [J], 9(1)(2021)2001518.
- [44] LESLY J G, RADOSŁAW LB. S, *et al.* Temperature sensing properties of upconverted-emission materials based on a fluoroindate glass matrix [J]. *Sens. Actuators A Phys.*, 2023, 357.
- [45] LIU X L, MI X Y, GUO Y Y, *et al.* Highly sensitive and near-infrared excitable optical thermometer based on CaGdAl₃O₇: Tm³⁺, Yb³⁺, Zn²⁺ [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 929: 167240.
- [46] ZHANG W B, BAI G X, WANG J W, *et al.* Boosted sensitive optical thermometers utilizing synergistic effects of thermal enhancement and quenching in Er/Yb/Nd triply-doped Bi₄Ti₃O₁₂ nanosheets [J]. *J. Alloys Compd.*, 2024, 1005: 176133.
- [47] LIU X W, ZHU H S, SONG J Q, *et al.* Substituent effects on excited-state intramolecular proton transfer in 3-hydroxy-chromone derivatives [J]. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 2026, 480: 117342.
- [48] ZHAO S J, HAN Y, LIAN S X, *et al.* Research progress on the design and regulation of Eu²⁺/Ce³⁺-activated anti-/zero thermal quenching phosphors [J]. *Dalton Trans.*, 2025, 54: 8745-8763.
- [49] CHO J, PARK C H, SUNDHARBAABU P R, *et al.* Transformative Mechanical and Piezoelectric Properties in Organic-Inorganic Hybrid Materials for Biomedical Applications [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(41): 36035-36081.
- [50] GONG Z Y, YE N, WU Z C, *et al.* Microstructure and wear property of SiC_p/AlSi10Mg composites prepared by laser powder bed fusion [J]. *J. Cent. South Univ.*, 2026, 32(11): 4143-4158.
- [51] 史姝楠. 邻碳硼烷有机发光功能材料的研究及其应用 [D]. 南京:南京邮电大学, 2024.
SHI S N. *Study on o-Carborane Organic Luminescent Functional Materials and Their Applications* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2024. (in Chinese)
- [52] 孙璐. 活性层掺杂对聚合物太阳能电池的性能影响研究 [D]. 长春:吉林大学, 2014.
SUN L. *Study on the Effect of Active Layer Doping on the Performance of Polymer Solar Cells* [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [53] 李博文. 量子点显示用高水氧阻隔扩散板的制备与性能研究 [D]. 成都:四川大学, 2023.
LI B W. *Preparation and Properties of High Water and Oxygen Barrier Diffusion Plate for Quantum Dot Display* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2023. (in Chinese)
- [54] YANG H Y, GUO C, YIN J B, *et al.* Synergistic Modulation of Multimodal Luminescence in Self-Activated Phosphors for Advanced Anticounterfeiting and X-ray Imaging [J]. *Inorg. Chem.*, 2025.
- [55] LIN T, GAO J, SUN Y F. Redefining Metal-Ligand Interfaces: N-Heterocyclic Carbene Functionalization of Metal Nanoparticles [J]. *ChemPhysChem*, 2026, 27(7): e202500856.
- [56] WANG F X, ZHOU S J, ZHANG Y X, *et al.* On-Demand Regulation Afterglow Color of Carbonized Polymer Dot-Based Circularly Polarized Long Afterglow in Aqueous Solutions [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2025: 12485-12491.
- [57] RAFI R, SAHNI A, M A, *et al.* Fusing organic and inorganic materials: exploring enhanced optical limiting in a carmine-MoS₂ hybrid [J]. *Nanoscale*, 2026, 18, 2215-2227.
- [58] NGUYEN D P, LE Q M, TRAN H T P, *et al.* Enhanced Prediction of Absorption and Emission Wavelengths of Organic Compounds through Hybrid Graph Neural Network Architectures [J]. *ACS Omega*, 2025, 10(42): 50643-50651.
- [59] 喻杰奎, 陈宏刚, 张博, 等. 用于马赫-曾德尔结构硅光调制器正交和最小偏置点锁定的无抖动技术 [J]. *光学学报*, 2022, 42(20): 160-168.
YU J K, CHEN H G, ZHANG B, *et al.* Jitter-free technology for orthogonal and minimum bias point locking of mach-zehnder silicon optical modulators [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2022, 42(20): 160-168. (in Chinese)
- [60] 刘雪龙. NaGdF₄基纳米晶可控合成、发光性质与辐射再吸收研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.
LIU X L. *Study on Controllable Synthesis, Luminescence Properties and Radiation Reabsorption of NaGdF₄-Based Nanocrystals* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [61] TANAKA N, NISHIMURA K, MIYAZAKI A, *et al.* Seasonal variation and temperature-dependent emission of volatile organic compounds from a commercial swine shed in Japan [J]. *Asian J. Atmos. Environ.*, 2025, 19(1): 16.

- [62] NEGAR R, EMANUELE P, PAOLO C, *et al.* Temperature dependence of emission of volatile organic compounds (VOC) from litters collected in two Mediterranean ecosystems determined before the flaming phase of biomass burning [J]. *Environ. Pollut.*, 2023, 338: 122703.
- [63] GUAN X L, LIU X Y, SU Z X, *et al.* The preparation and photophysical behaviors of temperature/pH-sensitive polymer materials bearing fluorescein [J]. *React. Funct. Polym.*, 2006, 66(11): 1227-1239.
- [64] YANG X S, LIU W, LIU X G, *et al.* Construction of multifunctional luminescent lanthanide MOFs for luminescent sensing of temperature, trifluoroacetic acid vapor and explosives [J]. *Inorg. Chem.*, 2024, 63(8): 3921-3930.
- [65] WANG X D, WOLFBEIS O S, MEIER R J. Luminescent probes and sensors for temperature [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2013, 42(19): 7834-7869.
- [66] PSALTI A E, ELISEEVA S V, HATZIDIMITRIOU A, *et al.* Luminescent Lanthanide Metal-Organic Frameworks for Temperature Sensing in Two Distinct Temperature Regions [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2026, 148(4): 4020-4031.
- [67] ZHOU Q, REN G J, YANG Y H, *et al.* Fluorescence thermometers involving two ranges of temperature: coordination polymer and DMSP embedding [J]. *Inorg. Chem.*, 2023, 62(40): 16652-16658.
- [68] TOM L, KURUP M. A reversible thermo-responsive 2D Zn (ii) coordination polymer as a potential self-referenced luminescent thermometer [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(7): 2525-2532.
- [69] YANG R, ZHU T, XU J Y, *et al.* Organic fluorescent probes for monitoring micro-environments in living cells and tissues [J]. *Molecules*, 2023, 28(8): 3455.
- [70] WANG J W, NIU J N, SHA W, *et al.* Flexible high-resolution micro-LED display device with integrations of transparent, conductive, and highly elastic hydrogel [J]. *Nano Res.*, 2023, 16(9): 11893-11899.
- [71] XIANG D, WANG Z C, ZHENG H W, *et al.* Organic small-molecule NIR-II fluorophores for tumor phototheranostics [J]. *Light Sci. Appl.*, 2026, 15(1): 173.
- [72] AO R, XING L L, YANG W Q. A high-brightness phosphor based on Yb³⁺/Er³⁺ codoped Y₂O₃ micro-crystals and controllable temperature sensing sensitivity via rare earth ions [J]. *Opt. Commun.*, 2021, 492: 126967.
- [73] MEDINTZ I L, UYEDA H T, GOLDMAN E R, *et al.* Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing [J]. *Nat. Mater.*, 2005, 4(6): 435-446.
- [74] CHEN Y, LUAN W L, ZHANG S F, *et al.* Quantum-dots based materials for temperature sensing: effect of cyclic heating-cooling on fluorescence [J]. *J. Nanopart. Res.*, 2019, 21(8): 185.
- [75] LIU H L, FAN Y Y, WANG J H, *et al.* Intracellular temperature sensing: An ultra-bright luminescent nanothermometer with non-sensitivity to pH and ionic strength [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5(1): 14879.
- [76] GOSWAMI S K, KIM T S, OH E, *et al.* Optical properties and effect of carrier tunnelling in CdSe colloidal quantum dots: A comparative study with different ligands [J]. *AIP Adv.*, 2012, 2(3): 032132.
- [77] CHEN T, CHEN Y H, LI Y P, *et al.* A review on multiple I-III-VI quantum dots: preparation and enhanced luminescence properties [J]. *Materials*, 2023, 16(14): 5039.
- [78] TORCHYNSKA T, VOROBIEV Y. *Semiconductor II-VI Quantum Dots with Interface States and Their Biomedical Applications* [M]. *Adv. Biomed. Eng.*; IntechOpen. 2011.
- [79] JEMMALI W Q, HABCHI M M, FITOURI H, *et al.* Bohr radius and diamagnetic coefficients of confined charge carriers in strained spherical GaNAsBi-based quantum dots [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2026, 212: 110769.
- [80] 马婷婷, 唐璎, 王俊丽, 等. 量子点在食品中瘦肉精残留检测中的应用研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2026, 17(09): 217-224.
- MA T T, TANG Y, WANG J L, *et al.* Research progress on application of quantum dots in detection of clenbuterol residues in Food [J]. *J. Food Saf. Qual.*, 2026, 17(09): 217-224. (in Chinese)
- [81] 王晓琦. 半导体量子点/超导体异质结构中的 Andreev 反射及 Josephson 效应 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- WANG X Q. *Study on Andreev Reflection and Josephson Effect in Semiconductor Quantum Dot/Superconductor Heterostructures* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019. (in Chinese)
- [82] JOHNSON B L, KIRCZENOW G. Enhanced dynamical symmetries and quantum degeneracies in mesoscopic quantum dots: Role of the symmetries of closed classical orbits [J]. *EPL*, 2000, 51(4): 367-373.
- [83] MUNRO T, LIU L, GLORIEUX C, *et al.* CdSe/ZnS quantum dot fluorescence spectra shape-based thermometry via neural network reconstruction [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 119(21): 214903.

- [84] 马瑞丽. LDHs基复合材料的构筑、调控及其应用探索的研究[D]. 北京:北京化工大学,2020.
MA R L. *Study on Construction, Regulation and Application Exploration of LDHs-Based Composite Materials* [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020. (in Chinese)
- [85] HUANG W L, WANG T, HOU L H, *et al.* Visualized Stress-Temperature Sensor with the Zinc Sulfide and Perovskite Glass Ceramics Composite [J]. *Inorg. Chem.*, 2023, 62(47): 19350-19357.
- [86] HUANG L, HUANG S. Controllable preparation of CdSe@ ZnS quantum dots and their applications in high-performance LED digital dynamic color display [J]. *J. Opt.*, 2024, 53(4): 3829-3839.
- [87] 张兴宇. 基于GaAs晶体的热丝式流速和光纤温度传感技术研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2025.
ZHANG X Y. *Study on Hot-wire Flow Velocity and Optical Fiber Temperature Sensing Technology Based on GaAs Crystal* [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2025. (in Chinese)
- [88] 杨金准,高欢,周琦. 适用于GaN HEMT的片上分布式集成温度传感技术研究[J]. 微电子学, 2025, 55(06): 1056-1062.
YANG J H, GAO H, ZHOU Q. Research on on-chip distributed integrated temperature sensing technology suitable for GaN HEMT [J]. *Microelectronics*, 2025, 55(06): 1056-1062. (in Chinese)
- [89] PU T F, LI X B, WU J Y, *et al.* Recessed Anode AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diode for Temperature Sensor Application [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, 68(10): 5162-5166.
- [90] DENISOV A O, TIKHONOV E S, PIATRUSHA S U, *et al.* Strategy for accurate thermal biasing at the nanoscale [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(32): 324004.
- [91] So B, Heo J. Optical thermometry of Sm^{3+} on laser-induced local heating for precipitation of PbS quantum dots in glasses [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2018, 101(8): 3372-3376.
- [92] 王鹤林. PbSe胶体量子点温度传感效应及应用的研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
WANG H L. *Study on Temperature Sensing Effect and Application of PbSe Colloidal Quantum Dots* [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [93] 高黎黎,房沛,胡平,等. MACl助力MAPbBr₃钙钛矿单晶增强X射线探测性能[J]. 复合材料学报, 2026: 1-13.
GAO L L, FANG P, HU P, *et al.* MACl assisted MAPbBr₃ perovskite single crystals for enhanced X-ray detection performance [J]. *Acta Mater. Compos. Sin.*, 2026: 1-13. (in Chinese)
- [94] 温宏炎,匡中付,曾鹏,等. 钙钛矿太阳能电池大面积制备研究综述[J]. 云南化工, 2025, 52(12): 35-40.
WEN H Y, KUANG Z F, ZENG P, *et al.* Review on large-area fabrication of perovskite solar cells [J]. *Yunnan Chem. Technol.*, 2025, 52(12): 35-40. (in Chinese)
- [95] ADEL S E, SAYED I E T E, ALLAM E A, *et al.* Adsorption of Pb^{2+} and malachite green from water onto a newly developed nanocomposite of bentonite@perovskite Co-Ni oxide@bimetallic Mg/Cu MOFs and their adsorption and kinetic studies [J]. *Sci. Rep.*, 2026, 16(1): 13520.
- [96] 关明爽. 铅卤钙钛矿量子点氧化物玻璃的晶化行为与光学性能研究[D]. 杭州:中国计量大学,2024.
GUAN M S. *Study on Crystallization Behavior and Optical Properties of Lead Halide Perovskite Quantum Dots Oxide Glass* [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2024. (in Chinese)
- [97] 路洋. 溴化铅铯量子点微晶玻璃的制备与发光机理的研究[D]. 杭州:中国计量大学,2022.
LU Y. *Study on Preparation and Luminescence Mechanism of Cesium Lead Bromide Quantum Dots Glass-Ceramics* [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2022. (in Chinese)
- [98] 常乾洋. 碳量子点和钙钛矿量子点材料的制备及光学性能的研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2021.
CHANG Q Y. *Study on Preparation and Optical Properties of Carbon Quantum Dots and Perovskite Quantum Dots Materials* [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)
- [99] 赵正平. 量子信息技术与量子芯片的新进展(上) [J]. 电子与封装, 2026: 1-26.
ZHAO Z P. New progress of quantum information technology and quantum Chips (Part 1) [J]. *Electron. Packag.*, 2026: 1-26. (in Chinese)
- [100] SAMANTA K, DESWAL P, ALAM S, *et al.* Ligand Controls Excited Charge Carrier Dynamics in Metal-Rich CdSe Quantum Dots: Computational Insights [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(36): 24941-24952.
- [101] 程泓睿. 纤维素基表面等离子体光学标签在不可复制防伪领域的应用[D]. 福州:福州大学,2021.
CHENG H R. *Application of Cellulose-Based Surface Plasmon Optical Tags in Non-Replicable Anti-Counterfeiting Field*

- [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021. (in Chinese)
- [102] 张丽, 姬晨卉, 高俊芳, 等. 金属有机框架改性以提升其光催化性能的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2025: 1-21.
- ZHANG L, JI C H, GAO J F, *et al.* Research progress on modification of metal-organic frameworks for improving photocatalytic performance [J]. *Acta Mater. Compos. Sin.*, 2025: 1-21. (in Chinese)
- [103] LINDBLAD V, GRANBERG F. Effect of deuterium in vacancy type defects on defect production in tungsten under irradiation [J]. *J. Nucl. Mater.*, 2026, 630: 156710.
- [104] ZHANG Y, HAO X H, ZHANG M, *et al.* Grain boundary-engineered oxygen vacancy clusters size directs copper spatial distribution towards boosting ROS generation for photothermocatalytic toluene oxidation [J]. *Appl. Catal. B Environ. Energy*, 2026, 397: 126944.
- [105] ZHAO G Z, FENG X Q, JIA J F, *et al.* Stability and electronic modulation of Cu clusters on WO₃(001): A first-principles investigation [J]. *Comput. Theor. Chem.*, 2026, 1262: 115867.
- [106] WANG Y, LIANG S, MEI M L, *et al.* Sensitive and stable thermometer based on the long fluorescence lifetime of Au nanoclusters for mitochondria [J]. *Anal. Chem.*, 2021, 93(45): 15072-15079.
- [107] LIU H L, ZHOU Z L, WANG Z W, *et al.* Dual-Emission Au-Ag Nanoclusters with Enhanced Photoluminescence and Thermal Sensitivity for Intracellular Ratiometric Nanothermometry [J]. *Biosensors*, 2025, 15(8): 510.
- [108] REN J, WU W X, CHEN T Y, *et al.* Polyethylenimine-protected green-emission copper nanoclusters as highly effective fluorescent and colorimetric nanoprobe for selective cobalt ions and temperature sensing [J]. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2024, 304: 123438.
- [109] QIAN S Y, WANG Z P, ZUO Z X, *et al.* Engineering luminescent metal nanoclusters for sensing applications [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2022, 451: 214268.
- [110] YANG T Q, PENG B, SHAN B Q, *et al.* Origin of the photoluminescence of metal nanoclusters: from metal-centered emission to ligand-centered emission [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(2): 261.
- [111] ZHAO Y, ZHOU H M, ZHANG S J, *et al.* The synthesis of metal nanoclusters and their applications in bio-sensing and imaging [J]. *Methods Appl. Fluoresc.*, 2020, 8(1): 012001.
- [112] 李维欣. ZnS 修饰 CsPbBr₃ 纳米晶复合材料的制备及高压研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- LI W X. *Study on Preparation and High Pressure Research of ZnS Modified CsPbBr₃ Nanocrystal Composites* [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024. (in Chinese)
- [113] ASADOV E G. Temperature and excitation power dependence of photoluminescence kinetics and efficiency in Ca-Ga₂S₄:Eu²⁺ [J]. *Physica B*, 2026, 738: 418787.
- [114] RAKOV N, MATIAS F, DE OLIVEIRA H P. Effect of Ce³⁺ concentrations on fluorescence emission in Ce³⁺: Y₂SiO₅ ceramic powders excited by UV-LED light: Exploring the doping influence on temperature sensing behavior for thermal stability and thermometric sensing capabilities [J]. *Ceram. Int.*, 2026, 52(11): 15984-15997.
- [115] LONG M Z, LI C, LI B, *et al.* A multi-functional phosphor Ba₅La₃MgAl₃O₁₅: Pr³⁺ with diverse thermal responses for high sensitive temperature sensing, photothermochromism indicator and patterned anti-counterfeiting [J]. *Ceram. Int.*, 2025, 51(16): 22340-22350.
- [116] Anu, Rao A. Temperature sensing materials based on the fluorescence intensity ratio in Li₂Ba₅W₃O₁₅: Dy³⁺ phosphors [J]. *Sens. Actuators, A*, 2024, 372: 115336.
- [117]
- 张涛, 蔡玉东, 崔彩霞, 等. 基于 Er³⁺/Yb³⁺/Nd³⁺ 三掺杂 LiTaO₃ 多晶的光学温度传感研究 [J]. 黑龙江科学, 2025, 16(22): 10-15.
- ZHANG T, CAI Y D, CUI C X, *et al.* Research on optical temperature sensing based on Er³⁺/Yb³⁺/Nd³⁺ triple-doped LiTaO₃ polycrystals [J]. *Heilongjiang Sci.*, 2025, 16(22): 10-15. (in Chinese)
- [118] BAI Y D, WANG R, LI Y M, *et al.* Luminescence Temperature Sensing and First Principles Calculation of Photoelectric Properties in C12A7 Co-Doped Eu³⁺ Ions [J]. *ACS Omega*, 2023, 8(17): 15730-15740.
- [119] CHI F F, ZHANG J R, ZHENG Y N, *et al.* Luminescent properties and temperature sensing of Mn⁴⁺/Tb³⁺ doped CaAl₂Si₂O₈ phosphors [J]. *Ceram. Int.*, 2025, 51(2): 2556-2565.
- [120] REN Z C, YU H Q, ZHANG J S, *et al.* Remarkable near-infrared temperature sensing properties of Y₃Ga₅O₁₂: Cr³⁺

- and $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$: $\text{Cr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ nanotubes fabricated via a single-needle electrospinning technique [J]. *Inorg. Chem.*, 2024, 63 (44): 21155-21166.
- [121] JAHROMI H D, ZEIRI N, LAZAAR K, *et al.* An explainable AI framework for identifying photophysical signatures of nanomaterial maturation via transient absorption spectroscopy [J]. *Opt. Mater.*, 2026, 177: 118176.
- [122] LI C H, ZHOU J W, YU H, *et al.* Cellulose-based fluorescent materials for real-time visual detection of $\text{Fe}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ ions and anti-counterfeiting [J]. *Carbohydr. Polym.*, 2026, 385: 125370.
- [123] ZHU S Y, ZHAO D, ZHANG R J, *et al.* Study on energy transfer and temperature sensing properties of $\text{Pb}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ co-doped $\text{Ba}_2\text{MgY}_2(\text{BO}_3)_4$ [J]. *Ceram. Int.*, 2023, 49(11): 18654-18661.
- [124] BARANETS S, KANDABADAGE T, WANG X, *et al.* Quaternary Zintl Phases $\text{Ba}_2\text{InSnP}_3$ and $\text{Ba}_2\text{InSnAs}_3$ with Complex Structures and n-Type Semiconducting Behavior [J]. *Chem. Mater.*, 2024, 36(15): 7570-7580.
- [125] WU X T, DONG G K, YU H L, *et al.* Multicolor luminescence of $\text{In}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ alloying in K_3SbCl_6 synthesized via mechanochemistry [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(22): 6931-6934.
- [126] HUANG Z J, WU F G, ZHANG Q, *et al.* High sensitivity temperature sensing material $\text{In}_2\text{Li}_3\text{P}_3\text{O}_{12}$: Bi^{3+} , Eu^{3+} based on effective energy transfer from Bi^{3+} to Eu^{3+} [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(18): 32180-32186.
- [127] 张怡笑. 稀土掺杂矿物荧光材料的制备及性能研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2025.
ZHANG Y X. *Study on Preparation and Properties of Rare Earth Doped Mineral Fluorescent Materials* [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2025. (in Chinese)
- [128] AKOUBIA M, BALI B E, HASSANI H O, *et al.* New alluaudite-type $\text{Na}_{3.4}\text{Co}_{1.3}(\text{MoO}_4)_3$ for sodium-ion batteries and electrocatalytic hydrogen evolution [J]. *J. Solid State Electrochem.*, 2025, 29(11): 1-16.
- [129] MARINKOVIĆ D, RIGHINI G C, FERRARI M. Lanthanide-Doped REVO₄ (RE = Y, Gd, Lu, La) Phosphors: From Synthesis to Sensing Applications [J]. *Sensors*, 2026, 26(9): 2660.
- [130] 田野. Ho^{3+} 掺杂和 $\text{Ho}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ 共掺杂 $\text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$ 荧光粉光学温度传感性质研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学, 2022.
TIAN Y. *Study on Optical Temperature Sensing Properties of Ho^{3+} Doped and $\text{Ho}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ Co-Doped $\text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$ Phosphors* [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022. (in Chinese)
- [131] 朱灿灿. 基于 β -二酮配体的稀土配合物的合成及光、磁性能研究 [D]. 郑州:郑州轻工业学院, 2018.
ZHU C C. *Study on Synthesis, Optical and Magnetic Properties of Rare Earth Complexes Based on β -Diketone Ligands* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2018. (in Chinese)
- [132] AGEKYAN V F, SEROV A Y, FILOSOFOV N G, *et al.* Temperature quenching of intracenter luminescence of Mn^{2+} ions in diluted magnetic semiconductors [J]. *Opt. Spectrosc.*, 2016, 121(4): 507-510.
- [133] WANG X, HU Y C, KOU B G, *et al.* Dye sensitized NaErF_4 : Ce^{3+} , Yb^{3+} nanodisks achieve efficient near-infrared IIb region luminescence [J]. *Results Chem.*, 2025, 18: 102875.
- [134] LIU Q, TIAN J H, XIE J H, *et al.* Multi-site regulation and luminescence enhancement of narrow-band green-emitting $\text{Sr}_2\text{Li}(\text{Al}, \text{Ga})(\text{O}, \text{N})_4$: Eu^{2+} phosphors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2026, 1065: 188149.
- [135] 孔仕进. 白光 $\text{Ba}_2\text{TiP}_2\text{O}_9$ 发光材料的制备与发光性质研究 [D]. 武汉:武汉工程大学, 2019.
KONG S J. *Study on Preparation and Luminescence Properties of White-Light $\text{Ba}_2\text{TiP}_2\text{O}_9$ Luminescent Materials* [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [136] 毛韦达, 赵林. 溶胶凝胶法合成 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ 钙钛矿及其催化性质 [J]. 材料导报, 2021, 35(24): 24001-24005.
MAO W D, ZHAO L. Synthesis of $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite by sol-gel method and its catalytic properties [J]. *Mater. Rep.*, 2021, 35(24): 24001-24005. (in Chinese)
- [137] MENG M C, FU Q, ZHANG J Y, *et al.* Stimuli-responsive carbon dot-based luminescent materials: Optical properties, design and preparation strategies, and applications [J]. *Mater. Today Chem.*, 2026, 54: 103710.
- [138] DAR M S, ROSAIAH P, BHAGYALAKSHMI J, *et al.* Graphene quantum dots as nanotherapeutic agents for triple-negative breast cancer: Insights from 3D tumor models [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2025, 523(P1): 216247.
- [139] RIYAJUDDIN S, KUMAR S, SONI K, *et al.* Study of field emission properties of pure graphene-CNT heterostructures connected via seamless interface [J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(38): 385702.
- [140] MINTZ K J, ZHOU Y, LEBLANC R M. Recent development of carbon quantum dots regarding their optical proper-

- ties, photoluminescence mechanism, and core structure [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(11): 4634-4652.
- [141] LANGER M, PALONCÝOVÁ M, MEDVEĎ M, *et al.* Progress and challenges in understanding of photoluminescence properties of carbon dots based on theoretical computations [J]. *Appl. Mater. Today*, 2021, 22: 100924.
- [142] LIU M L, CHEN B B, LI C M, *et al.* Carbon dots: synthesis, formation mechanism, fluorescence origin and sensing applications [J]. *Green Chem.*, 2019, 21(3): 449-471.
- [143] XU R S, SHI X H, WANG P, *et al.* Mechanistic insights into methylene blue removal by boron-doped biochar derived from lycium barbarum stalks [J]. *Desalin. Water Treat.*, 2026, 325: 101647.
- [144] 何杏. 富磷碳量子点的绿色可控合成及其用于 Cu^{2+} 检测 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
HE X. *Study on Green Controllable Synthesis of Phosphorus-Rich Carbon Quantum Dots and Their Application for Cu^{2+} Detection* [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018. (in Chinese)
- [145] RAYPAH M E, JAMLOS M F, GIWA H S, *et al.* Green synthesis of carbon dots derived from biomass of *Polyalthia bullata* root extract as colorimetric sensor for selective detection of Fe^{3+} ions [J]. *Inorg. Chem. Commun.*, 2025, 174 (P1): 113944.
- [146] SALCEDO Á J G, PINZÓN T S, MEJÍA L T. Tuning the emissions of luminescent carbon dots according to the polarity of analytes eluted on a silica column [J]. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2025, 344(P2): 126704.
- [147] ĐAČANIN FAR L, DRAMIĆANIN M D. Luminescence thermometry with nanoparticles: a review [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(21): 2904.
- [148] RAVAL J B, KAILASA S K, MEHTA V N. An overview of optical, physical, biological, and catalytic properties of carbon dots [J]. *Carbon Dots in Analytical Chem.*, 2023: 31-41.
- [149] 徐家跃. 发光材料及其新进展 [J]. *无机材料学报*, 2016, 31(10): 1009-1012.
XU J Y. Luminescent materials and their new progress [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2016, 31(10): 1009-1012. (in Chinese)
- [150] ZHAO H G, VOMIERO A, ROSEI F. Tailoring the heterostructure of colloidal quantum dots for ratiometric optical nanothermometry [J]. *Small*, 2020, 16(28): 2000804.
- [151] BILGE S, AFTAB S, DONAR Y O, *et al.* Waste biomass derived carbon-based materials for electrochemical detection of pesticides from real samples [J]. *Inorg. Chem. Commun.*, 2025, 171: 113649.
- [152] CHENG P, LI Z K, ZHENG Y L, *et al.* Study on the regulation of performance and Hg^0 removal mechanism of MIL-101(Fe)-derived carbon materials [J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2025, 379(P2): 134939.
- [153] GARCÍA M V, RAJENDRAN A A, GARROTE B L, *et al.* From Free-Standing to Textile Electrodes: Carbonaceous Biocompatible Material for Wearable Sensing [J]. *Healthcare Technol. Lett.*, 2026, 13(1): e70071.
- [154] 汪星宇. 碳基类过氧化物酶的设计、性能调控及其肿瘤催化治疗 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
WANG X Y. *Design and Performance Regulation of Carbon-Based Peroxidase-Mimicking Enzymes for Tumor Catalytic Therapy* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2025. (in Chinese)
- [155] ZHANG S L, LI L J, XU S, *et al.* Tunable broadband carbon/NiFe-LDH hybrid materials with high-performance of electromagnetic wave absorption synthesized via facile microwave-hydrothermal reactions [J]. *Chem. Eng. J.*, 2026, 540: 177398.
- [156] KODAMBOEV P K, FERJANI H, ADINAEV K F, *et al.* An organic-inorganic hexachlorostannate (IV) hybrid: structure, dielectric properties, and third-order nonlinear optical response [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2026, 37(13): 1010.
- [157] ABEDI F, AKBARZADEH R, GHAEDI M, *et al.* Structural and electrochemical insights into a VC/Ag/Co₃O₄/PANI nanohybrid with superior hydrogen uptake [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2026, 241: 155515.
- [158] 夏宇. 三氮杂环席夫碱基功能材料的设计合成及其质子传导性能研究 [D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2025.
XIA Y. *Study on Design, Synthesis and Proton Conduction Properties of Triazacyclic Schiff Base Functional Materials* [D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2025. (in Chinese)
- [159] BAUDRIT J R V, LOPRETTI M. Mechanism-guided biomimetic calcium phosphate mineralization on agro-derived nanocellulose, chitosan, and pectin: Interfacial design rules for translation [J]. *Carbohydr. Polym.*, 2026, 385: 125306.
- [160] MEHENNAOUI R, MERZOUKI S, NACER S N, *et al.* Impact of Acid Dopants (HCl vs. H_2SO_4) on the Structure, Performance, and Reusability of Bio-Based Luffa/Polyaniline Composites for Methylene Blue Adsorption [J]. *ChemistryO-*

- pen, 2026, 15(6): e70185.
- [161] SUN Y H, HAN J K, XUE Y Y, *et al.* Lotus-leaf-inspired nanocellulose composite foam for multifunctional wearable wide-temperature sensors with thermal insulation and flame retardancy [J]. *Carbohydr. Polym.*, 2026, 385: 125371.
- [162] SHARMA S, MISHRA M, SHARMA H, *et al.* Polymeric Nanocomposites: Recent advances, Challenges, Techniques, and Biomedical applications [J]. *Ann. Pharm. Fr.*, 2025, 83(6): 1019-1039.
- [163] L6PEZ J M V, RAMOS J A C, ARIZAGA G G C. Revisiting the characteristics of nanomaterials, composites, hybrid and functionalized materials in medical microbiology [J]. *Colloids Surf., B*, 2025, 250: 114556.
- [164] SENURI K, IMALKA M, NILWALA K. Contemporary, Multidisciplinary Roles of Mesoporous Silica Nanohybrids/ Nanocomposites [J]. *ChemistrySelect*, 2022, 7(21): 202200574.
- [165] JIA J, WU J L, MIAO M Y, *et al.* A highly sensitivity temperature sensor based using $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}@\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ composite material allows accurate monitoring of human body temperature [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2026, 359: 132539.
- [166] SONG X, HAN L, YANG L, *et al.* Dual-emissive $\text{CsPbBr}_3@\text{NaGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$ nanocomposites for ratiometric temperature sensing and anti-counterfeiting applications [J]. *Dalton Trans.*, 2026.
- [167] HE Z H, LIU G F, ZHOU Z K, *et al.* Understand the Temperature Sensing Behavior of Solid-state Polymerized PEDOT Hybrid Based on X-ray Scattering Studies [J]. *Chin. J. Polym. Sci.*, 2024, 42(1): 105-112.
- [168] ZHANG P, PAN A Z, YAN K, *et al.* High stability temperature sensors by CdTe quantum dots encapsulated in SiO_2/PVA hybrids for bearing rotating elements [J]. *Mater. Today Commun.*, 2023, 34: 105456.
- [169] 孙龙超. $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 复合材料光催化有机小分子偶联反应的研究 [D]. 银川:宁夏大学, 2024.
SUN L C. *Study on Photocatalytic Coupling Reaction of Organic Small Molecules over $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Composite Materials* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024. (in Chinese)
- [170] 贾金萍, 周昊, 刘义忠, 等. 新型复合纳米材料保温性能测试 [J]. 管道技术与设备, 2026, (01): 5-8.
JIA J P, ZHOU H, LIU Y Z, *et al.* Thermal insulation performance test of new composite nanomaterials [J]. *Pipeline Tech. Equip.*, 2026, (01): 5-8. (in Chinese)
- [171] 陈源森, 李一坤, 沈龙飞, 等. 碳纳米材料增强铜基复合材料性能的研究进展 [J]. 铜业工程, 2026, (02): 43-54.
CHEN Y S, LI Y K, SHEN L F, *et al.* Research progress on properties of copper matrix composites reinforced by carbon nanomaterials [J]. *Copper Eng.*, 2026, (02): 43-54. (in Chinese)
- [172] ZHOU Z J, MA Z P, SUN Q Y, *et al.* Rapid construction of polyethyleneimine-polydopamine-based layer on recycled glass fibers for enhanced interfacial reinforcement in polyamide 6 composites [J]. *Colloids Surf., A*, 2026, 744: 140586.
- [173] 何跃龙, 王建, 何其超. 聚丙烯单聚合物复合材料的制备方法及应用研究现状 [J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(11): 169-174.
HE Y L, WANG J, HE Q C. Preparation methods and research status of polypropylene single polymer composites [J]. *Polym. Mater. Sci. Eng.*, 2022, 38(11): 169-174. (in Chinese)
- [174] LIMA M J, SAMPAIO M J, SILVA C G, *et al.* Magnetically recoverable $\text{Fe}_3\text{O}_4/g\text{-C}_3\text{N}_4$ composite for photocatalytic production of benzaldehyde under UV-LED radiation [J]. *Catal. Today*, 2019, 328: 293-299.
- [175] WU X L, TIAN M, FAN W T, *et al.* Synthesis, spectroscopic properties, and biological applications of eight novel chlorinated fluorescent proteins-labeling probes [J]. *J. Fluoresc.*, 2014, 24(3): 775-786.
- [176] SAKAKIBARA J, ADRIAN R J. Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence [J]. *Exp. Fluids*, 1999, 26(1): 7-15.
- [177] 李良, 赵修贤, 王彬彬, 等. 热致变色过渡金属配合物的变色机理及应用 [J]. 材料导报, 2023, 37(4): 21010049-21010011.
LI L, ZHAO X X, WANG B B, *et al.* Discoloration mechanism and applications of thermochromic transition metal complexes [J]. *Mater. Rep.*, 2023, 37(4): 21010049-21010011. (in Chinese)
- [178] HE T, GAO H, DIAO X H, *et al.* Ratiometric visualization fluorescence temperature sensing based on dual-lanthanide metal-organic frameworks [J]. *J. Mol. Struct.*, 2024, 1316: 139071.
- [179] GAO Y F, XU S, LI Y B, *et al.* Mn-doped CsPbCl_3 perovskite quantum dots: A dual-function probe for copper de-

- tection and temperature sensing [J]. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2025, 326: 125219.
- [180] CHEN X, ESSNER J B, BAKER G A. Exploring luminescence-based temperature sensing using protein-passivated gold nanoclusters [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(16): 9594-9598.
- [181] JIN R C, ZENG C J, ZHOU M, *et al.* Atomically precise colloidal metal nanoclusters and nanoparticles: fundamentals and opportunities [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(18): 10346-10413.
- [182] HAN B Y, HOU X F, XIANG R C, *et al.* Synthesis of highly luminescent Cu/Ag bimetal nanoclusters and their application in a temperature sensor [J]. *Anal. Methods*, 2017, 9(27): 4028-4032.
- [183] SHARMA P, GANGULY M, DOI A. Synergism between copper and silver nanoclusters induces fascinating structural modifications, properties, and applications [J]. *Nanoscale*, 2024, 16(40): 18666-18683.
- [184] HUANG H, LI H, WANG A J, *et al.* Green synthesis of peptide-templated fluorescent copper nanoclusters for temperature sensing and cellular imaging [J]. *The Analyst*, 2014, 139(24): 6536-6541.
- [185] CAI Z F, LI H Y, WANG X S, *et al.* Highly luminescent copper nanoclusters as temperature sensors and “turn off” detection of oxytetracycline [J]. *Colloids Surf., A*, 2022, 647: 129202.
- [186] SUN H L, LV Y T, ZHANG J B, *et al.* A dual-signal fluorometric and colorimetric sensing platform based on gold-platinum bimetallic nanoclusters for the determination of β -galactosidase activity [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2023, 1252: 341010.
- [187] YUAN L L, LIANG M N, HUMMEL M, *et al.* Rational Design Copper Nanocluster-Based Fluorescent Sensors towards Heavy Metal Ions: A Review [J]. *Chemosensors*, 2023, 11(3): 159.
- [188] PENG Y W, HUANG X Y, WANG F. Near-infrared emitting gold – silver nanoclusters with large Stokes shifts for two-photon in vivo imaging [J]. *Chem. Commun.*, 2021, 57(96): 13012-13015.
- [189] XU C H, WU S G. Bifunctional carbon dots based on Sorbic acid and 2,4-Diaminobenzenesulfonic acid: Application in chlortetracycline detection and temperature sensing [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2026, 894: 142851.
- [190] MONEA B F, IONETE E I, SPIRIDON S I, *et al.* Single Wall Carbon Nanotubes Based Cryogenic Temperature Sensor Platforms [J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2071.
- [191] 文杰. 基于多壁碳纳米管的紫外光/热双固化修复材料的力学及传感性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2025.
WEN J. *Study on Mechanical and Sensing Properties of UV/Thermal Dual Curable Repair Materials Based on Multi-Walled Carbon Nanotubes* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2025. (in Chinese)
- [192] LEE H J, AHN S E, JUNG M, *et al.* Flexible and wireless ‘stick-and-detect’ sensor node based on laser-induced graphene for real-time temperature monitoring toward cold chain applications [J]. *Chem. Eng. J.*, 2026, 535: 175415.
- [193] CHEN Q, HUANG Y K, WANG H F, *et al.* Time-dependent phosphorescence colors from carbon dots in zirconia for dynamic information encryption and ratiometric thermometry [J]. *Carbon*, 2026, 249: 121265.
- [194] 王未嫔. 溶剂化金属阳离子导向的碘金属酸盐的制备及其变色性质的研究 [D]. 太原: 山西师范大学, 2020.
WANG W P. *Study on Preparation and Chromic Properties of Iodometalates Directed by Solvated Metal Cations* [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2020. (in Chinese)
- [195] LEE S J, JUNG Y J, PARK J W, *et al.* Temperature Detectable Surface Coating with Carbon Nanotube/Epoxy Composites [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(14): 2369.
- [196] LIU Y, WANG T Q, SONG C M, *et al.* A new kind of flexible conductive polymer composites with positive temperature coefficient effect [J]. *Appl. Phys. A*, 2026, 132(5): 426.
- [197] ERKABOEV U I, RAKHIMOV R G, SAYIDOV N A. Modeling the temperature dependence of magneto-optical absorption coefficients in nanostructured semiconductors [J]. *Indian J. Phys.*, 2026, (prepublish): 1-7.
- [198] KRASNOV V A, SHUTOV S V, SHWARTS Y M, *et al.* Determination of Ultimate Output Characteristics of Wide Bandgap Recombination-Mode Diode Temperature Sensors [J]. *Sens. Imaging*, 2017, 18(1): 31.
- [199] DEY P, PAUL J, BYLSMA J, *et al.* Origin of the temperature dependence of the band gap of PbS and PbSe quantum dots [J]. *Solid State Commun.*, 2013, 165: 49-54.
- [200] ADACHI S. Review—Temperature dependence of luminescence intensity and decay time in Mn^{4+} -activated fluoride and oxyfluoride phosphors [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2021, 10(2): 026002.
- [201] 白海斌, 陈昕, 沙雪竹, 等. $NaGd(MoO_4)_2:Tb^{3+}$ 荧光粉的温度及浓度依赖发光与荧光动力学温度传感 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1770-1778.

- BAI H B, CHEN X, SHA X Z, *et al.* Temperature and concentration dependent luminescence and fluorescence kinetic temperature sensing of $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tb}^{3+}$ phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1770-1778. (in Chinese)
- [202] TIAN Y, CHEN B J, HUA R N, *et al.* Self-assembled 3D flower-shaped $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}$ microarchitectures; microwave-assisted hydrothermal synthesis, growth mechanism and luminescent properties [J]. *CrystEngComm*, 2012, 14(5): 1760-1769.
- [203] GAO D, LIU S Y, ZHANG X Z, *et al.* Tb^{3+} -sensitized Yb^{3+} downshifting emission, host-sensitized Yb^{3+} quantum-cutting emission, Yb^{3+} sensitized Tb^{3+} upconversion emissions, and special thermal quenching mechanism in $\text{Tb}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ phosphors [J]. *J. Korean Ceram. Soc.*, 2024, 61(5): 928-940.
- [204] 薛艳艳,徐晓东,苏良碧,等. 中红外波段激光晶体的研究进展 [J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(08): 1347-1360.
- XUE Y Y, XU X D, SU L B, *et al.* Research progress of mid-infrared laser crystals [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2020, 49(08): 1347-1360. (in Chinese)
- [205] 陈述春,茅森,戴凤妹,磷酸盐玻璃中 Yb^{3+} 和 Nd^{3+} 之间的声子参助能量转移 [J],《物理学报》33(4)(1984) 515-522.
- CHEN S C, MAO S, DAI F M, Phonon-assisted transfer between Yb^{3+} and Nd^{3+} in Phosphate glass, *Acta Physica Sinica* [J], 33(4)(1984)515-522. (in Chinese)
- [206] FENG N N, JIAO H, GUO X L, *et al.* Study on X-ray induced photoluminescence and radiation shielding characterizations of $\text{NaGd}(\text{PO}_3)_4:\text{Eu}^{3+}$ functional particles [J]. *Opt. Mater.*, 2026, 171: 117774.
- [207] ZHAO Y, WANG X S, ZHANG Y, *et al.* Optical temperature sensing of up-conversion luminescent materials: Fundamentals and progress [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 817: 152691.
- [208] LIN Y J, HUANG Y T, WU J S, *et al.* Relationship between rare earth fluorescence characteristic and temperature [J]. *Acta Photon. Sin.*, 2016, 45(1): 116002.
- [209] ZHANG C Z, YANG H J, ZHANG Y X, *et al.* Development and application of rare earth-doped fluorescent thermometry materials [J]. *Sci. China Mater.*, 2025, 68(6): 1702-1716.
- [210] JUNGHYUN W, SANGGEON P, YOUNGSEOK S, *et al.* Rare-Earth-Doped Barium Molybdate Up-Conversion Phosphor with Potential Application in Optical Temperature Sensing [J]. *Materials*, 2022, 15(22): 7917.
- [211] DRAMIĆANIN M D. Sensing temperature via downshifting emissions of lanthanide-doped metal oxides and salts. A review [J]. *Methods Appl. Fluoresc.*, 2016, 4(4): 042001.
- [212] BRITES C D, BALABHADRA S, CARLOS L D. Lanthanide-based thermometers: at the cutting-edge of luminescence thermometry [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(5): 1801239.
- [213] GUO H J, SHI Q F, IVANOVSKIKH K V, *et al.* High-sensitivity single-band ratiometric thermometry in $\text{Bi}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ co-doped La_2GeO_5 phosphors via temperature-dependent energy transfer [J]. *Ceram. Int.*, 2025, 51(21): 33538-33547.
- [214] 张莹莹. 稀土离子掺杂 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 上转换发光及温度传感性能研究 [D]. 昆明:昆明理工大学,2022.
- ZHANG Y Y. *Study on Upconversion Luminescence and Temperature Sensing Properties of Rare Earth Ions Doped $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [215] WANG C L, JIN Y H, ZHANG R T, *et al.* A review and outlook of ratiometric optical thermometer based on thermally coupled levels and non-thermally coupled levels [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 894: 162494.
- [216] WANG Q, LIAO M, LIN Q M, *et al.* A review on fluorescence intensity ratio thermometer based on rare-earth and transition metal ions doped inorganic luminescent materials [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 850: 156744.
- [217] PARK J, GAO L. Advancements in fluorescence lifetime imaging microscopy Instrumentation: Towards high speed and 3D [J]. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 2024, 30: 101147.
- [218] CHENNAPPA T, KAMATH S D. Review—Structural and optical interpretations on phosphor-based optical thermometry [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2024, 13(7): 077002.
- [219] 金伟其,王霞,廖宁放,黄庆梅,辐射度 光度与色度及其测量,第2版,[M] 北京,北京理工大学出版社,2016, ISBN 978-7-5682-2102-3.
- JIN W Q, WANG X, LIAO N F, HUANG Q M, *Photometry, Radiometry, Colorimetry & Measurement*, (2nd Edition), [M] Beijing, Beijing Institute of Technology Press, 2016, ISBN 978-7-5682-2102-3.

- [220] ZHOU J J, DEL ROSAL B, JAQUE D, *et al.* Advances and challenges for fluorescence nanothermometry [J]. *Nat. Methods*, 2020, 17(10): 967-980.
- [221] BEDNARKIEWICZ A, DRABIK J, TREJGIS K, *et al.* Luminescence based temperature bio-imaging: Status, challenges, and perspectives [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2021, 8(1): 011317.
- [222] FREITAG J, KOEPEL M, ROMODINA M N, *et al.* Flying particle thermosensor in hollow-core fiber based on fluorescence lifetime measurements [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2023, 30(6): 1-9.
- [223] PÉ E P, REBIERE Y, DUPUY F, *et al.* Time and temperature dependences of the delayed fluorescence in isotopically mixed naphthalene crystals [J]. *J. Phys. Chem.*, 1984, 88(5): 959-964.
- [224] 钟传声. 几种 Cr^{3+} 与稀土离子掺杂发光材料的合成与特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
ZHONG C S. *Study on Synthesis and Characteristics of Several Luminescent Materials Doped with Cr^{3+} and Rare Earth Ions* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2025. (in Chinese)
- [225] 李锐. $Li_2ZnGe_3O_8:Cr^{3+}$ 的长余辉发光及温度传感特性的研究 [D]. 保定: 河北大学, 2023.
LI R. *Study on Long Persistent Luminescence and Temperature Sensing Properties of $Li_2ZnGe_3O_8:Cr^{3+}$* [D]. Baoding: Hebei University, 2023. (in Chinese)
- [226] 张瑜. 铽钪共掺碲酸盐玻璃的制备及性能研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
ZHANG Y. *Study on Preparation and Properties of Yb/Er Co-Doped Tellurite Glasses* [D]. Chongqing: Southwest University, 2019. (in Chinese)
- [227] POLISADOVA E F, OTHMAN H A. Decay kinetics and energy transfer in ternary phosphate glass doped Eu and Eu/Dy [J]. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, 110(1): 012045.
- [228] PANKOVE J I. *Optical Processes in Semiconductors* [M]. North Chelmsford, MA: Courier Corporation, 2012.
- [229] LI X F, XU J M, WEI T S, *et al.* Enhanced Properties of Extended Wavelength InGaAs on Compositionally Undulating Step-Graded InAsP Buffers Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Crystals*, 2021, 11(12): 1590.
- [230] ALAM A Z A. A Comparative Analysis of the Effect of Temperature on Band-Gap Energy of Gallium Nitride and Its Stability Beyond Room Temperature Using Bose-Einstein Model and Varshni's Model [J]. *IJUM Eng. J.*, 2017, 18(2): 151-157.
- [231] 毛家珊. 几种稀土离子掺杂的铈酸盐发光特性及温度传感的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
MAO J S. *Study on Luminescence Characteristics and Temperature Sensing of Several Rare Earth Ions Doped Niobates* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [232] 刘水富. 稀土离子掺杂 $Ba_3Y_4O_9$ 上转换荧光粉的制备及其温度传感性能研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
LIU S F. *Study on Preparation and Temperature Sensing Properties of Rare Earth Ions Doped $Ba_3Y_4O_9$ Upconversion Phosphors* [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [233] LI S, ZHANG K, YANG J M, *et al.* Single quantum dots as local temperature markers [J]. *Nano Lett.*, 2007, 7(10): 3102-3105.
- [234] TANG L P, ZHANG Y Y, LIAO C, *et al.* Temperature-dependent photoluminescence of CdS/ZnS core/shell quantum dots for temperature sensors [J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8993.
- [235] ZHANG J, WU W Z. Temperature-Dependent Photoluminescence Properties of Mn: CsPbCl₃ Nanocrystals [C]. 2024 IEEE Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology (AISOMT), Harbin, 2024: 17-20.
- [236] YU P, WEN X M, TOH Y R, *et al.* Temperature-dependent fluorescence in carbon dots [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116(48): 25552-25557.
- [237] CALLIARI L, FANCHENKO S, FILIPPI M. Plasmon peak inhomogeneous broadening in reflection electron energy loss spectroscopy from carbon materials [J]. *Surf. Interface Anal.*, 2008, 40(3-4): 814-817.
- [238] HAZRA B K, RAJA M M, SRINATH S. Correlation between structural, magnetic and transport properties of Co₂Fe-Si thin films [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, 49(6): 065007.
- [239] 周文生, 许东. 重入自旋玻璃尖晶石系统 $Co_xZn_{1-x}(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$ 中的微波磁共振 [J]. 物理学报, 1992, (12): 2043-2048.
ZHOU W S, XU D. Microwave magnetic resonance in reentrant spin glass spinel system $Co_xZn_{1-x}(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$ [J]. *Acta Phys. Sin.*, 1992, (12): 2043-2048. (in Chinese)

- [240] YOSHIKAWA K, MSTSUNAGA R, MATSUDA K, KANEMITSU Y, Mechanism of exciton dephasing in a single carbon nanotube studied by photoluminescence spectroscopy, *Applied Physics Letters* [J], 94(2009)093109.
- [241] YANG X Z, LIU H, ZHU H Q, *et al.* Enhancing downshift luminescence of Sm^{3+} ions in $\text{Cs}_2\text{NaBiCl}_6$ double perovskites through alloy Sb^{3+} ions for thermometry and anti-counterfeiting [J]. *Ceram. Int.*, 2025, 51(29PA): 60565-60576.
- [242] ZHANG A Q, SUN Z, SONG J X, *et al.* Down-conversion and optical ratiometric thermometer based on $\text{Ca}_2\text{LaNbO}_6\text{:Ln}^{3+}$ ($\text{Ln} = \text{Eu/Tb/Dy}$) phosphors [J]. *Ceram. Int.*, 2026, 52(9PB): 12537-12547.
- [243] LI J Z, XU J, UEDA J, *et al.* Dual Luminescence of Eu^{2+} -Activated BaHfO_3 Perovskites for Effective Pressure and Thermal Sensing [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(49): 66833-66843.
- [244] YU Y Q, FENG L Z, LI R F, *et al.* Dual-mode optical temperature sensing and anti-counterfeiting based on multi-color downshifting luminescence of $(\text{KMg})_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{W}_3\text{O}_{12}\text{:Tb/Eu}$ phosphor with two-dimensional negative thermal expansion [J]. *Ceram. Int.*, 2025, 51(25PA): 43531-43542.
- [245] KAN K M, PAN S J, ZHANG M Y, *et al.* Structure-driven sensitivity boost in optical thermometry: enlarged Er^{3+} thermally coupled level splitting in monoclinic $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped $\text{KBi}(\text{MoO}_4)_2$ [J]. *J. Photochem. Photobiol. A*, 2026, 480: 117356.
- [246] DEGDA N, PATEL N, SHAH K, *et al.* Host emission driven high-sensitive thermometric performance of $\text{Eu}(\text{III})$ activated Mg_3WO_6 double perovskite [J]. *J. Lumin.*, 2026, 296: 121970.
- [247] LIU Q Y, WANG H, YANG C, *et al.* Simultaneous enhancement of red emission purity and intensity in self-sensitized $\text{Sr}_2\text{ErNbO}_6$ upconversion crystals via energy modulation for optical thermometry [J]. *Radiat. Phys. Chem.*, 2026, 246: 113948.
- [248] WU J X, WANG Z J, ZHANG T, *et al.* Research on temperature sensing characteristics of Ce^{3+} -doped NaYF_4 micro-crystals [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2026, 330: 119528.
- [249] PENG T X, CAO Y Z, CUI H Q, *et al.* Upconversion NIR luminescence negative thermal quenching and temperature sensing in $\text{LiYGeO}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Nd}^{3+}$ phosphors [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2023, 309: 128309.
- [250] ZHANG Y H, CHEN B J, ZHANG X Z, *et al.* Tunable and high-color-rendering white light emissions in full visible spectral range in Ag-aggregates/ Sm^{3+} co-doped germanate glass fluorophors [J]. *Ceram. Int.*, 2022, 48(16): 22994-23001.
- [251] 高晓青,袁兴,张星星,等. YSZ: Yb/Tm 纳米荧光粉的上转换荧光温度传感特性 [J]. *光学学报*, 2025, 45(03): 160-168.
- GAO X Q, YUAN X, ZHANG X X, *et al.* Upconversion luminescence temperature sensing properties of YSZ: Yb/Tm nano phosphors [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2025, 45(03): 160-168. (in Chinese)
- [252] SONG J, ZHOU J G, CHEN G H. $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped $\text{KBaGd}(\text{MoO}_4)_3$ luminescent materials: structure, UC luminescence and optical thermometry [J]. *J. Lumin.*, 2025: 121420.
- [253] SONG J Q, MENG Q Y, SUN W J. Optical temperature sensing characteristics of $\text{GdVO}_4\text{:Bi}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ nanophosphors [J]. *Sens. Actuators A Phys.*, 2026, 408: 117988.
- [254] CHEN Y H, ZHANG X S, LV M, *et al.* $\text{Zn}^{2+}/\text{Ge}^{4+}$ heterovalent co-substitution for enhancing upconversion luminescence and temperature-sensing properties of Er^{3+} -doped garnets [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2026, 202: 114198.
- [255] 胡向东,耿道渠,胡蓉,等. 传感器与检测技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2021.
- HU X D, GENG D Q, HU R, *et al.* *Sensors and Detection Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2021. (in Chinese)
- [256] 何彦妮. 稀土离子掺杂正/负热膨胀复合材料制备、上转换发光性质及温度传感特性研究 [D]. 昆明:昆明理工大学,2023.
- HE Y N. *Study on Preparation, Upconversion Luminescence Properties and Temperature Sensing Characteristics of Rare Earth Ions Doped Positive/Negative Thermal Expansion Composites* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [257] SUO H, ZHAO X Q, ZHANG Z Y, *et al.* Rational design of ratiometric luminescence thermometry based on thermally coupled levels for bioapplications [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, 15(1): 2000319.
- [258] ZHANG S L, ZHAO D, ZHANG R J, *et al.* A new luminescent material $\text{LaTiSbO}_6\text{:Mn}^{4+}/\text{Er}^{3+}$ with high optical tem-

- perature sensing sensitivity based on fluorescence intensity ratio [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(15): 7741-7749.
- [259] ZHOU T M, ZHANG Y Q, WU Z L, *et al.* Concentration effect and temperature quenching of upconversion luminescence in $\text{BaGd}_2\text{ZnO}_5: \text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ phosphor [J]. *J. Rare Earths*, 2015, 33(7): 686-692.
- [260] STEFANSKA J, MARCINIAK L. Single-band ratiometric luminescent thermometry using Pr^{3+} ions emitting in yellow and red spectral ranges [J]. *Adv. Photonics Res.*, 2021, 2(7): 2100070.
- [261] Chen J F, Sun N, Jin Z X. *Two-Dimensional Spatial Resolution in Plane Temperature Monitoring Based on Raman Distributed Temperature Sensor* [M]. London: SAGE Publications, 2020.
- [262] TSUKAMOTO T, ESASHI M, TANAKA S. High spatial, temporal and temperature resolution thermal imaging method using $\text{Eu}(\text{TTA})_3$ temperature sensitive paint [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, 23(11): 114015.
- [263] WANG Z Y, GONG H L, ZHUANG P, *et al.* Transient 2d junction temperature distribution measurement by short pulse driving and gated integration with ordinary ccd camera [J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5899.
- [264] LU Y Y, LIU L Y, GAO R Q, *et al.* Ultrafast near-infrared pyroelectric detector based on inhomogeneous plasmonic metasurface [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 241.



胡启凯,男,2001年生,本科毕业于黑龙江大学物理科学与技术学院,获得理学学士学位。现就读于大连海事大学理学院,攻读硕士学位,从事发光温度传感材料与物理研究。



张艳秋,女,1989年生,工学博士,辽宁轻工职业学院副教授。2012年本科毕业于大连民族大学,获得学士学位。2014年考入大连海事大学,硕博连读,2020年获得博士学位。主要从事稀土发光材料设计、合成与光谱性质研究。以第一作者和主要贡献作者发表SCI论文40余篇,他引1000余次,获得辽宁省优秀博士学位论文,主持中国博士后研究基金项目1项,参与多项国家级和省部级项目。



陈宝坎,男,1970年生,理学博士,大连海事大学教授/博士生导师。主要从事稀土离子发光物理研究。作为主要贡献作者发表学术论文200余篇,被同行他引8000余次,承担科技部“863”计划项目1项,国际自然科学基金项目6项,其它省部级项目多项。作为骨干成员获得省部级奖励4项。辽宁省优秀研究生导师团队负责人,指导研究生获得辽宁省优秀博士学位论文2篇,优秀硕士学位论文2篇。