引用格式：刘莹璐，余歆祎，王丹. 高折射率有机无机纳米复合透明光学胶材料研究进展[J]. 中国材料进展，2026，45(10)：1039-1046.

LIU Y L, YU X Y, WANG D. Progress on Optical Clear Adhesives of Organic-Inorganic Nanocomposites with High Refractive Index[J]. Materials China, 2026, 45(10): 1039-1046.

高折射率有机无机纳米复合透明光学胶材料研究进展

刘莹璐，余歆祎，王　丹

（北京化工大学 有机无机复合材料全国重点实验室，北京 100029）

摘　要：透明光学胶是光学制造与电子组装中的关键配套材料，是支撑新一代信息技术的关键基础产品，其折射率匹配度在镜头组装、滤镜贴合、光纤耦合、传感器封装等应用场景中直接决定着成像质量与信号传输效率。受有机分子与聚合物链固有结构特征制约，纯有机光学材料的折射率通常低于 1.7。将高折射率无机功能纳米粒子与有机聚合物复合，是制备兼具高透明度与高折射率光学胶材料的有效策略。围绕近年来高折射率有机无机纳米复合透明光学胶材料研究进展，系统总结设计策略、调控机理与制备应用方面的研究成果，并结合作者团队相关研究工作，提出了从实验室样品到企业产品应用亟需解决的关键科学与技术问题，展望了未来发展方向。

关键词：光学材料；新一代信息技术；折射率；有机无机复合；纳米材料

中图分类号：TB33；TQ324.8　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-3962(2026)10-1039-08

Progress on Optical Clear Adhesives of Organic-Inorganic Nanocomposites with High Refractive Index

LIU Yinglu, YU Xinyi, WANG Dan

(State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Optical clear adhesives (OCA) are key supporting materials in optical manufacturing and electronic assembly, which serve as critical supporting products for new-generation information technology, and refractive index of materials directly governs imaging quality and signal transmission efficiency in numerous application scenarios including lens assembly, filter lamination, fiber coupling and sensor packaging. Nevertheless, constrained by the structural properties of organic molecules and polymer chains, the refractive index of organic materials is usually below 1.7. Composites of polymers and inorganic nanoparticles have been proved to be an effective strategy to fabricate OCA featuring both high light transmittance and high refractive index. Focusing on recent research advances of organic-inorganic nanocomposites with high refractive index, this paper systematically summarizes research achievements covering design strategies, regulation mechanisms, preparation technologies and practical applications. Combined with relevant studies conducted by our research group, the future research direction toward transformation from lab-scale specimens to industrial commercial products is proposed.

Key words: optical materials; new-generation information technology; refractive index; organic-inorganic composite; nanomaterials

1　前　言

光学材料广泛应用于半导体、激光、通信、医疗、虚拟/增强现实、量子计算等前沿领域，其核心功能价值在于对光的传播、聚焦、调制等行为实现高精度、高稳定性、高效率的控制，从而支撑高端装备与系统的性能

收稿日期：2026-06-25　　**修回日期**：2026-07-23

基金项目：国家自然科学基金项目(22278027)

第一作者：刘莹璐，女，1998 年生，博士

通讯作者：王　丹，男，1988 年生，教授，博士生导师，Email：wangdan@mail.buct.edu.cn

DOI：10.7502/j.issn.1674-3962.202606027

极限[1-3]。透明光学胶是光学制造与电子组装中的关键辅助材料，其折射率匹配度在镜头组装、滤镜贴合、光纤耦合、传感器封装等应用场景中直接决定着成像质量与信号传输效率[4, 5]。光学胶材料的折射率匹配与调控已成为影响显示效率、光学损耗和器件结构设计的重要因素[6, 7]。图 1 展示了不同光学器件对材料折射率的差异化需求[8]。对于互补金属氧化物半导体(complimentary metal-oxide-semiconductor，CMOS)图像传感器，提高微透镜材料的折射率有助于增强光线汇聚能力并优化入射角分布；在液晶显示器(liquid crystal display，LCD)中，引入折射率可调的聚合物薄膜可改善界面光学匹配，降低反射损耗并提升光提取效率；而在棱镜增亮膜中，可通过精确调控膜层折射率以调制出射光的传播路径，使光线在特定角度范围内集中分布，从而实现增亮效果。

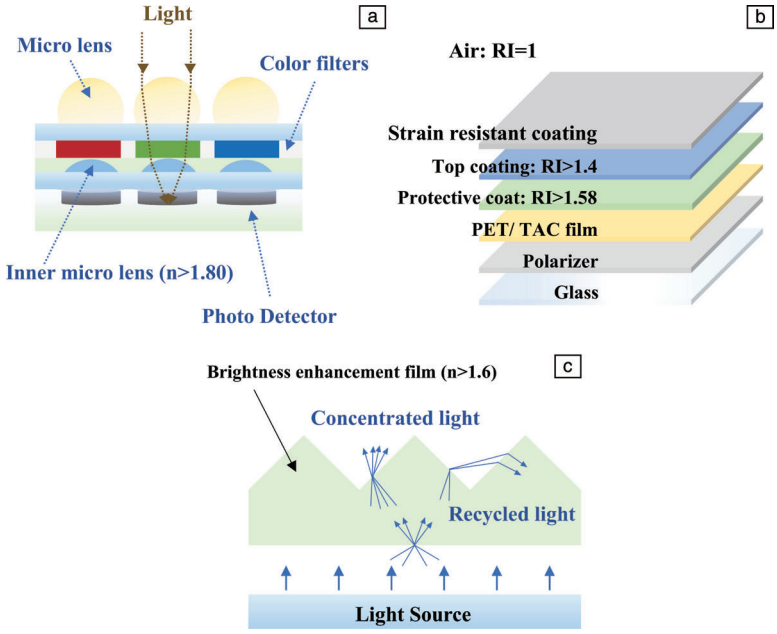


图 1 互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器中的微透镜阵列(a)，采用不同折射率薄膜的液晶显示器(LCD)结构示意图(b)，增亮膜的结构示意图(c)[8]

Fig. 1 Microlens array in complimentary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensor device(a), schematic diagram of the liquid crystal display (LCD) structure with different refractive index (RI) films (b), schematic diagram of the brightness enhancement film (c)[8]

本文综述了高折射率有机无机纳米复合透明光学胶材料研究进展，梳理了兼顾高透明度和高折射率的无机纳米粒子及其复合材料的设计思路及优化策略，重点阐述基于氧化钛、氧化锆等典型无机纳米粒子复合的高折射率透明光学胶材料的制备和应用性能，并结合作者团队的研究工作基础，提出光学胶材料未来产品化应用亟需解决的关键科学与技术问题，展望了未来发展方向。

2 高折射率纳米复合透明光学胶材料设计及优化策略

2.1 有机无机纳米复合材料折射率调控机理

折射率是描述光在介质中传播速度的物理量，其定义为光在真空中的传播速度与光在该介质中的传播速度之比，是光学功能材料设计中的核心参数之一。材料折射率的大小反映了其对电磁波的极化响应能力，从微观物理本质来看，材料的折射率与其分子或晶体结构的电子极化率及数密度密切相关[9]。根据洛伦兹-洛伦茨方程，介质的折射率与电子极化率成正比，高折射率光学树脂材料设计的核心思路是增加材料的极化率。传统方法是在聚合物分子链中引入硫、溴等重原子或大量苯环，但这极易导致分子链间产生强烈的 π-π 堆积，形成发色团或结晶区，吸收或散射可见光，降低材料的透明度[10]。此外，受有机分子与聚合物链结构特征的限制，纯有机改性聚合物的折射率通常难以超过 1.7，难以满足更高折射率(>2.0)光学材料的需求[11]。近年来，通过物理共混高折射率的无机纳米粒子(如氧化钛、氧化锆、硫化锌)已被科学证明是创制高透明、高折射率光学树脂材料的一条新颖且有效的途径[12]。例如，2024 年日本 NTT Advanced Technology 公司发布了折射率为 1.9 的紫外光固化胶产品[13]，尽管相比于折射率<1.8 的树脂材料存在耐光性劣化的问题，但在特定环境和条件下使用的元器件中已具有应用价值。京东方科技股份有限公司等报道了基于氧化钛纳米粒子的纳米复合光学胶，可通过压印工艺实现光学微结构的精密加工[14-16]。韩国 KCTech 公司通过在树脂中引

入质量分数为 60% 的 ZrO_2 纳米粒子，将体系折射率提升至 1.69；日本触媒公司依托 ZrO_2 填料开发出折射率为 1.67 的纳米分散液；美国 Pixelligent 公司分别采用超小粒径的 ZrO_2 和 TiO_2 填料，制备得到折射率分别为 1.77 和 1.92 的纳米复合材料。上述相关研究表明，有机无机纳米复合材料技术有望解决光学树脂高折射率与高透明度难以兼顾的瓶颈问题，高折射率无机纳米粒子的高质量可控制备是实现其产品化应用的关键。

2.2　高折射率无机纳米粒子设计及制备过程强化

折射率的物理本质是光入射介质时光波电场扰动原子分子外层电子，使电子云相对原子核发生偏移，形成电子极化，极化产生电偶极子辐射次波，次波与入射光叠加改变光的传播速度，宏观体现为折射率。因此，有机无机纳米复合材料的宏观光学折射率由有效电子极化率决定，微观上各相各自存在电子极化，叠加局域场耦合后得到整体等效极化率，主要受以下几方面因素影响：① 填料自身的本征电子极化率与折射率、化学组成及电子结构是影响复合材料折射率的核心因素，含重元素、具备离域电子的填料极化能力更强；② 填料体积分数直接调控体系整体极化强度，填充量越高复合折射率通常越大；③ 填料颗粒的尺寸、形貌与取向会改变内部局域电场，棒状、片状填料提升折射率效果优于球形填料，定向排布还会造成折射率各向异性；④ 纳米填料巨大的比表面积带来显著界面效应，界面电荷转移、极化层会提高等效极化，而界面孔洞则会降低折射率；⑤ 金属、量子点等特殊填料存在等离子共振、量子限域效应，多孔填料内部气孔也会削弱折射率提升效果，上述因素共同决定复合材料最终等效折射率。图 2 展示了纳米粒子对光学材料透明度的影响，当填料粒径远小于可见光波长时，体系以 Rayleigh 散射为主，可见光透明度高；而当粒径接近或超过可见光波长时，则为 Mie 散射，散射强度显著增强，材料呈现乳白或浑浊状态。因此，将粒径控制在小于可见光波长的 1/10 以下，是实现透明复合材料制备的技术路线之一[17, 18]。

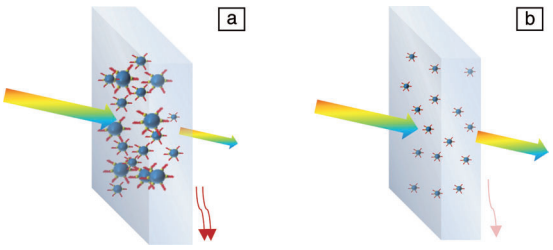


图 2　填料粒径接近或超过(a)和远小于(b)可见光波长时可见光的透过情况示意图

Fig. 2　Schematic of visible light transmission through the material when particle size of the filler comparable to or larger than (a) and far smaller than (b) the visible light wavelength

适用于光学材料应用的无机纳米粒子需要具有足够小的尺寸和良好的分散性，以便使复合材料与压印生产工艺和技术相匹配，能够实现高精度、高可靠性与低成本的量产制备[19]。溶胶凝胶法是制备超小尺寸(<10 nm)高折射率无机纳米粒子的常用方法之一。以氧化钛纳米粒子制备为例，其基本原理是钛源(如钛酸四丁酯或钛酸异丙酯)在水或有机溶剂体系中，在酸的催化作用下发生水解反应，随后钛羟基(Ti—OH)通过缩聚反应形成 Ti—O—Ti 网络结构，生成溶胶并转化为凝胶，经过干燥和热处理制备出纳米粉体，最后通过化学键合或物理吸附方法在颗粒表面引入有机小分子或高分子材料，赋予其在光学树脂材料中良好的分散性和稳定性。传统搅拌釜反应器内受到分子混合速度的限制，难以满足超小尺寸氧化钛纳米粒子反应成核与生长的精确可控，所得氧化钛纳米粒子的多分散指数大都在 0.2 以上[20, 21]。此外，传统搅拌釜反应器内存在热流不均、容器壁不平等不均匀性情况[22, 23]，难以实现表面改性分子与颗粒表面吸附反应过程的精准控制，导致颗粒表面改性不均，同样损害光学性能。超重力反应器是一种典型的化工过程强化装备，具有高度强化传质、微观混合、瞬间反应等特征。其内部的液相介质，在强度为地球重力场数百倍至千倍的超重力场作用下，于多孔介质内发生流动，并被剪切破碎为微米尺度的液膜、液丝与液滴，在纳米材料制备、高端化学品合成、反应与分离强化等工业生产中已实现商业化应用[24, 25]。对于钛源水解反应形成氧化钛溶胶纳米晶核过程，沉淀的形成依赖于溶液的过饱和状态，超重力反应器内高强高速微观混合有利于纳米晶的爆发式均匀成核，从而获得粒径小且分布窄的纳米颗粒。Guang 等[26]通过调控溶剂热过程中醇的种类、水醇比、溶剂热温度等，实现了不同长径比的 TiO_2 纳米粒子的可控制备(图 3)。采用超重力旋转填充床反应器强化反应传质和微观混合过程，可实现反应成核与生长均匀可控，与传统的釜式法制备 TiO_2 纳米粒子相比，超重力法制备的 TiO_2 纳米粒子具有更高的结晶度、更优的分散性以及更窄的粒径分布。

3　典型高折射率纳米复合光学胶材料性能

能够提升复合材料折射率的无机纳米填料主要分为两类：一类是以 TiO_2(锐钛矿，折射率 $n=2.45$；金红石，$n=2.70$)和 ZrO_2($n=2.10$)等金属氧化物为代表的纳米填料，依靠重金属原子带来强电子极化，纳米尺度下可兼顾高折射率与可见光透过率，是光学膜、LED 封装、光波导最常用的体系；二是以硫化铅、磷化铟等为代表的化合物半导体填料，具有更高的电子极化率，可实现折

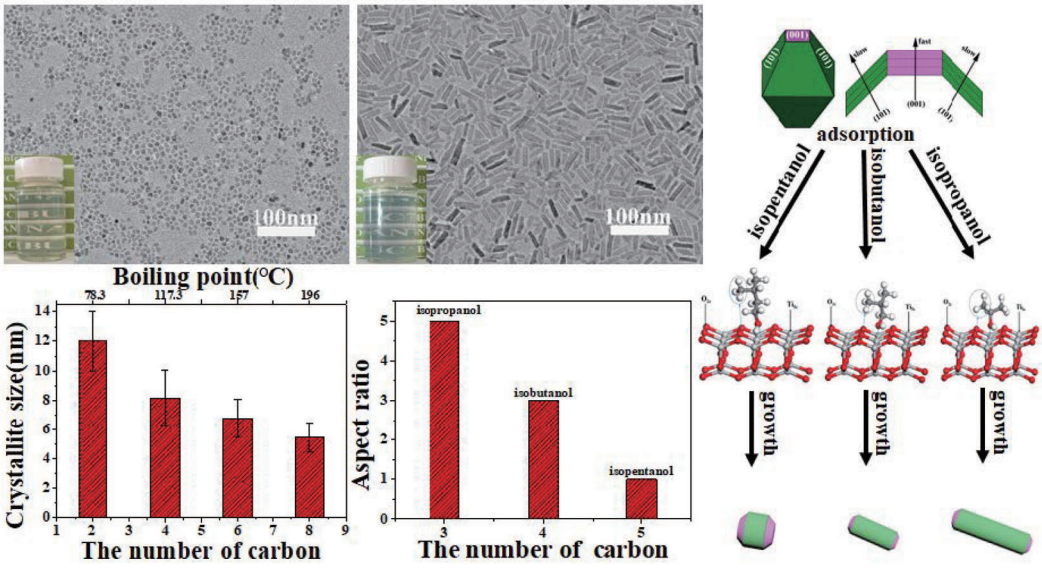


图 3 不同长径比的锐钛矿相 TiO_2 纳米粒子的可控合成[26]

Fig. 3 Controlled synthesis of anatase TiO_2 nanoparticles with different aspect ratios[26]

射率大幅增强，但在可见光波段存在明显的本征吸收，无法作为透明可见光高折射率树脂的填料。因此，本文主要介绍基于纳米 TiO_2 和 ZrO_2 的有机无机复合光学材料应用进展。

3.1 纳米 TiO_2 基高折射率有机无机复合光学材料

纳米 TiO_2 是指粒径在 1~100 nm 范围内的高纯二氧化钛颗粒相材料，是全球研究最广泛、商业化程度最高的纳米功能材料之一[27]。TiO_2 纳米材料本身具有较高的折射率(~2.6)，同时表面富含羟基等官能团，易与硅烷偶联剂、有机羧酸及磷酸酯类化合物等进行化学反应接枝改性，进而很好地分散在有机溶剂和塑料树脂中，为高折射率纳米复合光学树脂的制备提供成熟的工业化路径。例如，Takahashi 等[28]使用相转移法，在水分散 TiO_2 表面接枝磷酸酯表面改性剂，使之可以转移至有机相甲苯中透明分散，最后与环烯烃聚合物树脂复合，在氧化钛纳米粒子体积分数为 19.1%时得到了折射率达 1.83 的透明薄膜材料，表明合理的表面化学调控能够在较高无机纳米粒子填充量下实现折射率提升与光学透明性的兼顾。Zhang 等[29]采用溶胶凝胶法，将钛酸四丁酯前驱体、偶联剂以及环氧单体共同混合并进行水热反应，实现 TiO_2 在环氧体系中的原位成核与生长，通过引入偶联剂使 TiO_2 纳米填料表面与环氧聚合物链之间形成了有效的化学交联，提升了界面相容性及性能稳定性，所得纳米复合材料在可见光区的透过率超过 80%。在热塑性体系中，Guang 等[26]以聚苯乙烯塑料为基体制备纳米 TiO_2 粒子固含量在 0%~60%(质量分数)的透明复合涂层，实现复合涂层材料的折射率在 1.59~1.79 可调，同时保持透过率高于 90%。针对热固化的有机硅体系，He 等[30]通过溶剂热法结合锆酸酯偶联剂的表面主动设计，制备出折射率最高可达 2.01 的 TiO_2/有机硅复合材料。近年来，作者团队通过引入富醚硅烷偶联剂对纳米 TiO_2 粒子进行表面修饰，实现了其与多种 UV 固化单体的良好相容性(图 4a)[31]。在高填充条件下(90%，质量分数)，所得 UV 固化复合材料折射率可达 2.01(图 4b)，且在 3 μm 膜厚下仍保持超过 92%的透过率，并可满足卷对卷压印工艺需求[28]。进一步地，在器件应用层面，通过将 TiO_2 分散体与光 UV 固化树脂混合，制备出兼具高透明度、低雾度与高折射率的纳米复合膜，并利用 UV 光压印技术制备微结构，从而提高导光板的出光强度，实现其在导光板概念器件中的初步应用验证(图 4c 和 4d)[14]。

3.2 纳米 ZrO_2 基折射率可调谐有机无机复合材料

纳米 ZrO_2 具有单斜相、四方相和立方相 3 种晶型，在不同晶型之间转变时通常会伴随明显的体积变化，容易引起材料的脆裂，从而削弱其力学性能与应用稳定性。因此，有必要通过调控手段使 ZrO_2 保持稳定的晶型结构。当晶粒尺寸减小至 10 nm 以下时，四方相或立方相 ZrO_2 也能够在室温下稳定。Enomoto 等[32]通过己酸和甲基丙烯酸同时对纳米 ZrO_2 颗粒进行表面化学修饰，使其通过 Zr—O—C 键与聚苯乙烯树脂和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)形成稳定界面连接，成功制备出厚度达 10 mm 的透明纳米复合树脂块体材料。该材料折射率可连续调控，当 ZrO_2 含量达到 80%(质量分数)时，折射率提升至 1.73，且未出现明显光学浑浊。Ochi 等[33]以正丙醇锆为前驱体，将其与环氧单体及固化剂共混，并通过溶胶凝

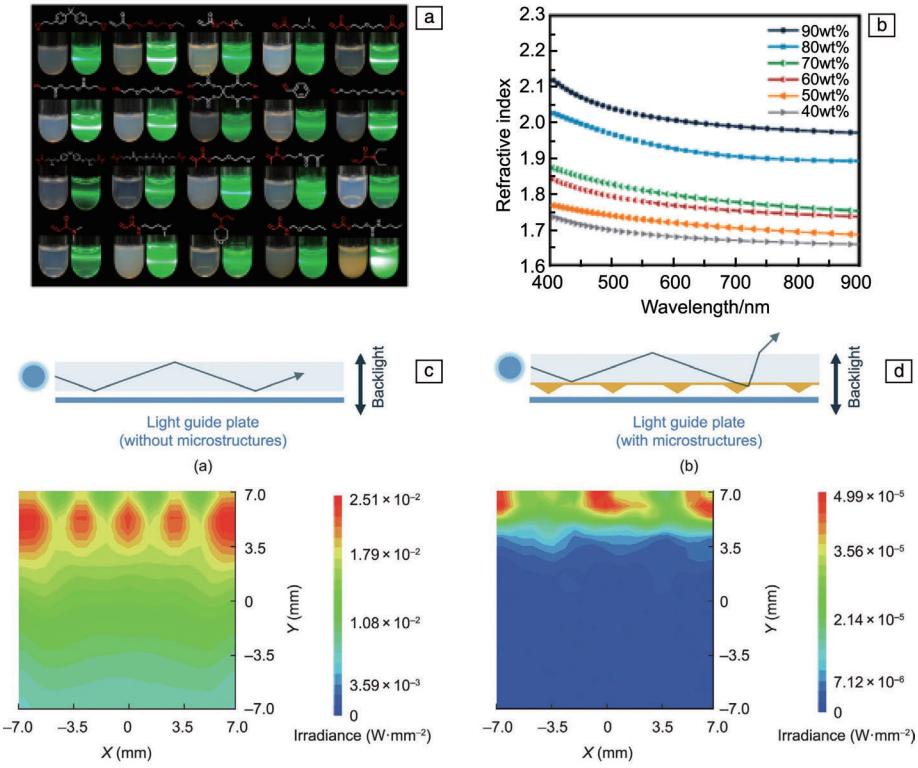


图 4　TiO_2@ MTE-TMS 粒子与不同单体形成的复合材料的光学照片(a)，不同粒子含量下纳米复合材料折射率(b)[31]；没有(c)和有(d)微结构的导光板上方的辐照度分布[14]

Fig. 4　Optical images of TiO_2@ MTE-TMS hybrid materials with different monomers (a), the refractive index of hybrid films with different contents of nanoparticles (b)[31]; irradiance distribution above the LGP without (c) and with (d) microstructures[14]

胶法实现 ZrO_2 在环氧体系中的原位生成。其中，六氢邻苯二甲酸既作为固化剂，又提供水解所需的酸性环境。结果表明，所得 ZrO_2 粒径小于 10 nm，复合材料可见光透过率大于 80%，折射率由 1.542 提升至 1.599。Xia 等[34]以氧氯化锆为前驱体，采用水热法制备了平均粒径为 7 nm 的 ZrO_2 粒子。通过调控水热温度，可实现单斜相与四方相之间的可控转变，同时，改变反应溶剂种类可有效调节粒子形貌(图 5)。在此基础上，采用超重力反

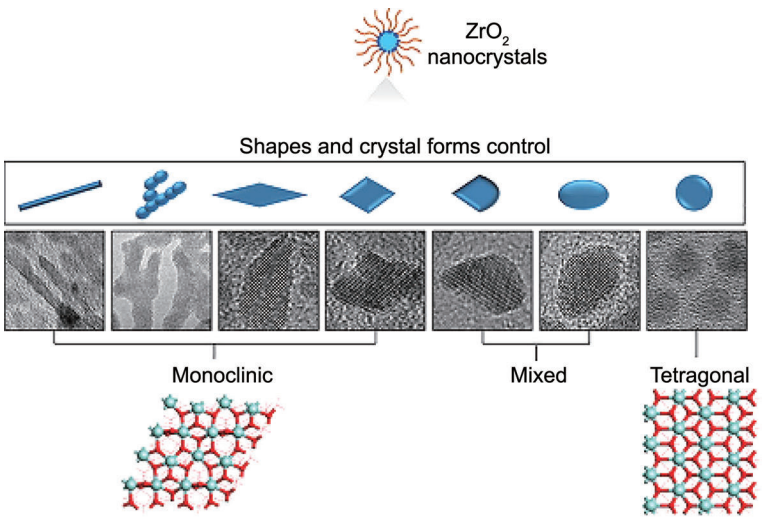


图 5　不同形貌和晶型纳米 ZrO_2 的可控合成[34]

Fig. 5　Controlled synthesis of ZrO_2 nanoparticles with different morphologies and crystal phases[34]

应沉淀结合水热工艺，对反应过程进行强化，获得了粒径分布更加均一、平均尺寸约 6 nm 的 ZrO_2 粒子。何相磊[35]以碱式碳酸锆为前驱体，在强碱性条件于 110 ℃下水热反应 10 h，成功制备出平均粒径约 4 nm 的立方相 ZrO_2 纳米粒子。该方法所用前驱体成本较低，具有一定的规模化制备潜力。

在纳米 ZrO_2 颗粒相材料可控制备的基础上，通过两步表面改性，实现其在有机光学树脂基材中的高度分散，可以制备具有可调折射率的有机无机纳米复合膜，将丙烯酸酯体系的折射率由 1.51 提升至 1.54[36]，环氧树脂体系的折射率在 1.51 至 1.56 范围内可调[37]。采用 ZrO_2/环氧树脂混合体系封装 LED 器件，可使其器件光提取效率提高 10%[37]。研究进一步将体系拓展至有机硅材料，借助超重力旋转填充床反应器实现 ZrO_2 纳米粒子在有机硅分子链上的原位合成。制备得到的 ZrO_2/有机硅复合薄膜在可见光波段透过率可达 90%以上，雾度较低，材料折射率由 1.58 提升至 1.63。相较于采用商用有机硅胶封装的 LED 器件，将该复合体系用作封装材料后，器件光通量由 13.28 流明提高到 31.34 流明，蓝光占比由 3.1%降至 1.8%，同时器件色温可低至 4573 K，表现出优异的光学调控性能(图 6a)[38]。此外，作者团队将 ZrO_2 纳米粒子与水性聚氨酯(WPU)复合，作为聚酯膜表面硬化膜的中间预涂层，通过折射率的梯度匹配获得消除彩虹纹的技术效果(图 6b)[39]。

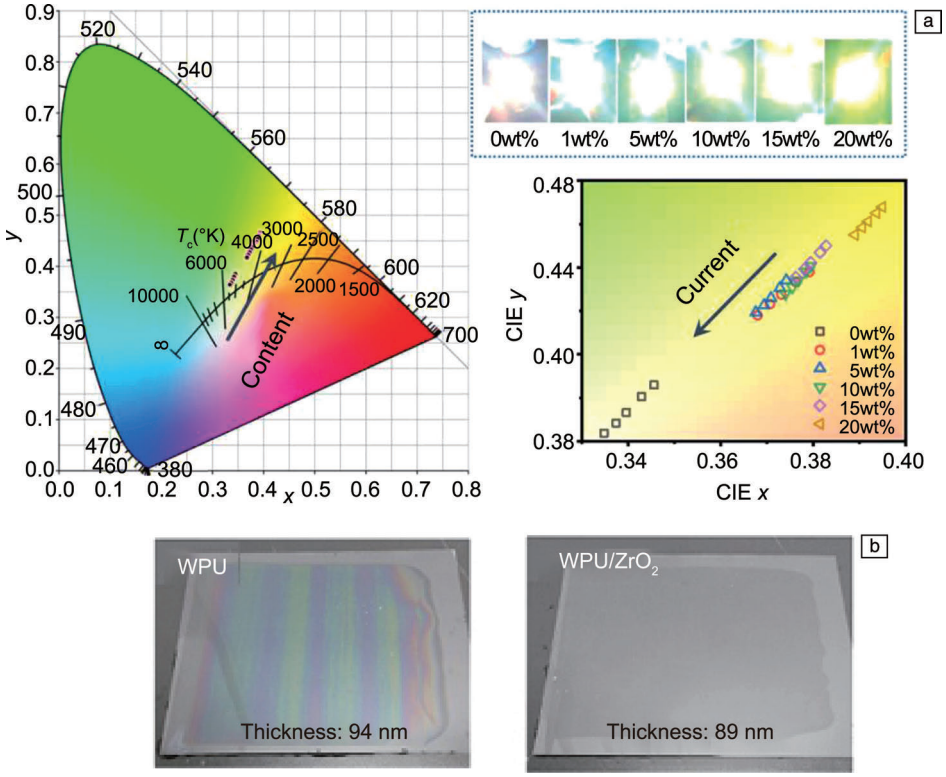


图 6 白光 LED 器件的 CIE 坐标数据及在发光状态下白光 LED 的光学照片(a)[38]，WPU 和 WPU/ZrO_2 分别用作预涂层的材料光学照片(b)[39]

Fig. 6 CIE coordinate data of white LED devices and optical images of encapsulated white LEDs in luminous state (a)[38], digital images of the overall appearance of materials with WPU and WPU/ZrO_2 emulsion as primer (b)[39]

上述研究表明，通过引入高折射率无机纳米粒子并结合界面调控与结构设计，可以在一定程度上实现材料折射率与光学透明性的协同优化，关键在于选择合适粒径的纳米粒子分散体、确保与树脂体系的相容性、在性能与加工性之间找到平衡点。作者团队所开发的基于纳米 TiO_2 和 ZrO_2 的多种纳米复合材料可实现折射率的高度可调谐，在新一代信息技术领域具有巨大的应用潜力。

4 结 语

本文系统介绍了折射率可调谐有机无机复合纳米材料的研究进展，从有机无机纳米复合材料的折射率调控机理、设计策略、典型材料制备与性能等方面进行了总结，并结合作者团队的研究工作，对具有工业化应用前景的 TiO_2 和 ZrO_2 基复合光学胶膜体系的研究进展进行了分析。通过本文的论述可以看到，尽管国内外学者已

经取得了很多研究成果，一些挑战性的问题仍然存在：① 实验室小尺度可通过精细改性实现单分散，放大后纳米颗粒易团聚形成微米散射中心，现有的有效介质模型难以定量描述高填充、界面梯度极化、颗粒偶极耦合共存体系，缺少可指导工程化的多相极化-散射统一理论，难以精准预测高填充下折射率、雾度协同变化规律；② TiO_2 等高电子极化率的纳米颗粒易提升折射率，但在实际显示器件应用验证过程长期光辐照、高低温循环、湿热环境下，填料-基体界面脱键、树脂光氧化、纳米颗粒表面缺陷演化，会引发折射率漂移、透过率下降、雾度上升等问题，界面应力、热膨胀失配带来的微裂纹、双折射劣化的微观动力学模型缺失，无法建立长期可靠性预测体系；③ 提升折射率需提高无机相纳米颗粒填料的体积分数，但高固含下体系粘度暴涨、流动性丧失，难以适配涂布、注塑、纳米压印量产，改性剂、分散助剂过量会造成黄变、析出，若用量不足则储存期短、静置分层，难以兼顾高填充、低粘度、长期分散稳定产品化的需求。未来，通过对高填充体系中多相电子极化、光散射耦合理论进行研究，揭示高折、低色散、高透光的本征材料矛盾及多场老化下界面性能衰减微观机理，突破高折射率无机纳米颗粒相材料批量制备以及有机无机界面力学热学匹配关键技术难题，有望打通基础研究到终端器件的产业化通道。

参考文献　References

[1] 纪学顺，孙永建，赵坤，等. 涂料工业[J]，2026，56(6)：86-92.
JI X S，SUN Y J，ZHAO K，*et al*. Paint & Coatings Industry[J]，2026，56(6)：86-92.

[2] LI K，CHEN J，LI H，*et al*. Nature[J]，2026，652：1195-1203.

[3] 王丹. 基于荧光纳米粒子的一些生物功能成像研究[D]. 杭州：浙江大学，2013.
WANG D. Some Studies of Functional Bioimaging based on Fluorescent Nanoparticles[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2013.

[4] SHAO Y，URBACH P. Light Science & Applications[J]，2025，14(1)：291.

[5] 顾梦旋，张自豪，梁鸿宇，等. 汽车文摘[J]，2026，5：1-24.
GU M X，ZHANG Z H，LIANG H Y，*et al*. Automotive Digest[J]，2026，5：1-24.

[6] JEON Y，CHOI J，SEO D，*et al*. Polymer Chemistry[J]，2023，14：1117-1123.

[7] PAN Z，LI S，CAI C，*et al*. Silicon[J]，2025，17：63-74.

[8] ZHAO Y，ZHANG J，ZHANG Y，*et al*. Macromolecules[J]，2025，58(20)：10949-10962.

[9] YANG C，CHU G W，FENG X，*et al*. Engineering[J]，2025，44：135-144.

[10] ZHAO Y，CUI L，ZHANG Y. Macromolecules[J]，2024，57(18)：8869-8876.

[11] KEYSER S P，TRUJILLO-LEMON M，SIAS A，*et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J]，2026，16(34)：45577-45588.

[12] YANG X，LI W，JIANG Z，*et al*. ACS Applied Optical Materials[J]，2026，4(4)：1190-1202.

[13] 材料世界网. 日本 NTT 开发出高折射率纳米压印树脂[EB/OL]. (2024-09-20)[2026-09-17]. https：//www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx? id=54466.
Materials World Network. Japan's NTT Develops High Refractive Index Nanoimprint Resin[EB/OL]. (2024-09-20)[2026-09-17]. https：//www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx? id=54466.

[14] LIU Y，WANG D，LIU C，*et al*. Engineering[J]，2024，37：96-104.

[15] LU Y，GUO K，ZHANG D，*et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J]，2026，18(15)：22323-22333.

[16] LU Y，ZHANG D，GUO K，*et al*. Applied Surface Science[J]，2025，686：162186.

[17] ALTHUES H，HENLE J，KASKEL S. Chemical Society Reviews[J]，2007，36(9)：1454-1465.

[18] 何相磊，蒲源，王丹，等. 中国材料进展[J]，2019，38(10)：1017-1022.
HE X L，PU Y，WANG D，*et al*. Materials China[J]，2019，38(10)：1017-1022.

[19] 李真，唐杰斌，龚禧，等. 中国材料进展[J]，2025，44(12)：1110-1119.
LI Z，TANG J B，GONG X，*et al*. Materials China[J]，2025，44(12)：1110-1119.

[20] GONZALEZ-RODRIGUEZ V，ZAPATA-TELLO D L，VALLEJO-MONTESINOS J，*et al*. Journal of Dispersion Science and Technology[J]，2025，686：1039-1045.

[21] YANG Y，YI C. Journal of Materials Science[J]，2019，54：9456-9465.

[22] WANG F，DUAN F，XU Z，*et al*. Chemical Engineering Science[J]，2026，323：123208.

[23] SHI B，LEI Q，WANG D，*et al*. Chemical Engineering Science[J]，2026，320：122691.

[24] 孙倩，曾晓飞，王丹，等. 化工进展[J]，2020，39(12)：4779-4797.
SUN Q，ZENG X F，WANG D，*et al*. Chemical Industry and Engineering Progress[J]，2020，39(12)：4779-4797.

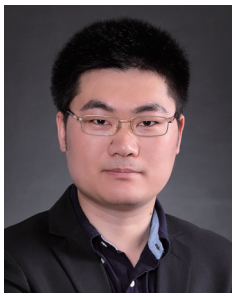
[25] 王淼，曾晓飞，王洁欣，等. 新材料产业[J]，2015(8)：52-57.
WANG M，ZENG X F，WANG J X，*et al*. New Material Industry[J]，2015(8)：52-57.

[26] GUANG M，XIA Y，WANG D，*et al*. Materials Chemistry and Physics[J]，2019，224：100-106.

[27] 周烽海，李伟，王绍聪，等. 中国材料进展[J]，2025，44(10)：945-953.
ZHOU F H，LI W，WANG S C，*et al*. Materials China[J]，2025，44(10)：945-953.

[28] TAKAHASHI S, HOTTA S, WATANABE A, *et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2017, 9(2): 1907-1912.
[29] ZHANG H, QI R, TONG M, *et al*. Journal of Applied Polymer Science[J], 2012, 125(2): 1152-1160.
[30] HE X L, PU Y, WANG J X, *et al*. Langmuir[J], 2021, 37(8): 2707-2713.
[31] LIU Y, WANG D, ZHANG J, *et al*. Composites Part B[J], 2026, 310: 113116.
[32] ENOMOTO K, ICHIJO Y, NAKANO M, *et al*. Macromolecules [J], 2017, 50(24): 9713-9725.
[33] OCHI M, NII D, HARADA M. Materials Chemistry and Physics [J], 2011, 129(1): 424-432.
[34] XIA Y, SHI J, SUN Q, *et al*. Chemical Engineering Journal[J], 2020, 394: 124843.
[35] 何相磊. LED 封装用有机无机复合材料的制备及其性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
HE X L. Study on the Preparation of Organic-Inorganic Composite Materials for LED Encapsulation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
[36] TANG R, YAO X, CHEN J, *et al*. Macromolecular Rapid Communications[J], 2021, 42(17): 2100134.
[37] HE X, WANG Z, PU Y, *et al*. Chemical Engineering Science[J], 2019, 195: 1-10.
[38] HE X, TANG R, PU Y, *et al*. Nano Energy[J], 2019, 62: 1-10.
[39] LIU Y, WANG X, ZHANG B, *et al*. Industrial & Engineering Chemistry Research[J], 2024, 63(1): 244-251.

(青年编委撰稿)



青年编委 王 丹

王 丹: 男, 1988 年生, 北京化工大学教授、博士生导师。分别于 2008 年和 2013 年获浙江大学材料科学与工程学士和光学工程博士学位, 2013 年 7 月至 2015 年 7 月在北京化工大学化学工程与技术博士后流动站工作, 随后留校历任副教授、教授, 期间作为访问学者在美国凯斯西储大学和哈佛大学开展合作研究, 2021 年入选教育部青年长江学者。主要从事超重力前沿科学与纳米材料工程应用基础研究, 主持完成国家自然科学基金项目、国家重点研发计划课题及企业委托技术攻关项目 20 余项, 发表学术期刊论文 100 余篇, 获授权发明专利 20 余件, 参与制修订国家和行业标准 6 项, 在急难险重的关键科技领域做出了贡献, 曾获全国科技系统抗击新冠肺炎疫情先进个人、中国工程前沿杰出青年学者、霍英东教育基金会高等院校青年教师奖一等奖、中国石油和化学工业联合会技术发明一等奖、广东省科技进步奖二等奖等荣誉奖励。兼任《中国材料进展》、《中国化学工程学报(英文版)》等期刊青年编委, 中国科协“科普中国”专家。