中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 11 期: 114603
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 超材料: 新型力-热功能设计专题

多波段电致变色器件研究进展

张银玲[1,2†], 张婷[2†], 潘梦瑶[3], 郭小丹[2], 蔡国发[2*]

1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000
2. 河南大学纳米科学与材料工程学院, 开封 475004
3. 香港理工大学时尚与纺织学院, 香港 999077
†同等贡献
*联系人, E-mail: caiguofa@henu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-30; 接受日期: 2025-12-25; 网络出版日期: 2026-09-28
国家自然科学基金(编号: 62222402)、河南省自然科学基金(编号: 242300421213)和河南省高校创新团队建设计划(编号: 25IRTSTHN016)资助项目

摘要 电致变色器件能够通过外加电场可逆调控其光学性质, 发展具有可见光-近红外-中红外多波段协同或独立调控能力的新一代电致变色器件, 以实现对太阳辐射热量与红外辐射特性的智能管理, 已成为推动智能热管理技术与自适应伪装发展的重要方向. 本综述系统梳理了多波段电致变色器件的研究进展, 重点从材料创新与器件设计两个维度进行阐述. 文章深入剖析了通过极化子吸收、局域表面等离子体共振与发射率调制分别实现可见光、近红外及中红外调控的机制; 进而详细论述了从双波段同步/独立调控到三波段集成的先进器件设计, 涵盖了单组分缺陷工程、异质结构筑、电解质工程及器件结构演化等多种创新方案; 最后, 本文分析了多波段电致变色器件在智能温控与自适应伪装中的应用潜力, 并展望了其在光谱独立调控与循环稳定性、器件大面积制备等方面的未来发展方向.

关键词 电致变色材料, 多波段兼容响应, 协同调控, 智能热管理

PACS: 82.45.-h, 78.40.-q, 85.60.-q, 44.40.-a

1 引言

电致变色器件能够在电场驱动下可逆地调节材料的光学性质, 自其被发现以来, 已在智能窗、防眩后视镜等领域展现出广阔的应用前景[1–3]. 然而, 传统电致变色器件的设计研究主要聚焦于可见光波段(VIR, 380–780 nm)的调制, 对于近红外波段(NIR, 780–2500 nm)与中红外波段(MIR, 特别是3–5和8–14 μm的大气窗口)的调制关注相对有限[4,5], 这极大地制约了电致变色器件在建筑节能和自适应隐身等重要应用领域的进一步发展[6].

实现从可见光、近红外到中红外的多波段智能调控, 是电致变色技术迈向下一代应用的重要发展方向[7]. 其核心科学挑战在于如何整合这些不同的调控

引用格式: 张银玲, 张婷, 潘梦瑶, 等. 多波段电致变色器件研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 114603
Zhang Y L, Zhang T, Pan M Y, et al. Research progress on multi-band electrochromic devices (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 114603, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0599

© 2026《中国科学》杂志社

机制: 可见光调控通常依赖于电化学氧化还原反应引发的极化子吸收, 近红外调控则可借助自由载流子浓度变化诱导的局域表面等离子体共振效应(LSPR), 而对中红外波段的调控则本质上是动态调制材料表面的红外发射率[4]. 这些机制的显著差异性, 使得单一均质材料难以在可见及红外波段均展现出优异的性能, 因此, 当前的研究方向已转向通过材料创新与器件结构设计来构建高效的多波段调控体系[8].

本文旨在系统梳理多波段电致变色器件的最新研究进展. 首先深入剖析其多波段调控的内在调控机制与实现策略, 继而详细探讨其在智能温控建筑与多光谱自适应伪装等领域的应用前景与面临挑战, 最后对未来发展趋势进行展望, 为推动多波段电致变色技术的实用化进程提供理论参考.

2　多波段调控机理与策略

2.1　可见光-近红外双波段调控

为满足可见光波段视觉管理与近红外波段热管理的差异化需求, 依据调控自由度将其分为同步与独立两类模式, 已成为推动电致变色技术迈向重要应用的关键路径.

2.1.1　双波段同步调控

无机金属氧化物材料是研究最为广泛的双波段电致变色体系[8,9]. 目前普遍认为, 其对可见光的调制主要源于离子嵌入与脱出所引发的极化子吸收或能带结构变化; 而对近红外光的调控则主要依赖于LSPR效应[9]. LSPR是导带电子在特定频率光场驱动下发生共振激发的物理现象, 其本征振荡频率由材料的自由载流子浓度主导[10]. 二者之间的定量关系可通过Drude-Lorentz模型进行描述:

$$\omega_{\mathrm{LSPR}}=\sqrt{\frac{\omega_P^2}{1+2\varepsilon_m}-\gamma^2}, \tag{1}$$

$$\omega_P=\sqrt{\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m^*}}, \tag{2}$$

其中ω_p是等离子体频率(Hz), ε_m是材料的介电常数(F/m), n是自由载流子密度(cm^{-3}), e是元电荷(C), γ代表自由载流子的体振荡频率(Hz), ε_0是真空介电常数(F/m), m*为自由载流子的有效质量(kg). 由式(1)和(2)可知, 自由载流子浓度n是决定LSPR行为的核心变量. 具体而言, n的升高会直接导致等离子体频率ω_P升高, 进而引起LSPR共振频率ω_{LSPR}降低, 表现为LSPR吸收峰的红移; 同时, 共振吸收强度也因载流子数目的增加而增强. 这一物理关系确立了材料载流子浓度n与其近红外波段光学响应之间的直接联系. 因此, 通过引入氧空位(作为n型掺杂源)、进行元素掺杂或驱动离子嵌入等策略来提升n值, 已成为实现LSPR吸收峰增强的普适性设计原则. 相较于金属材料, 过渡金属氧化物纳米晶的载流子浓度适中, 可通过上述策略进行有效调控, 使其LSPR吸收峰恰好落在近红外至中红外波段, 从而成为构建多波段电致变色器件的关键材料[11].

在众多过渡金属氧化物中, WO_3因其优异的光热稳定性与变色对比度, 成为最具代表性的阴极电致变色材料[12]. 在外加电场作用下, 离子嵌入与脱出过程伴随着W^{6+}/W^{5+}价态转变, 引起材料能带结构与局域电子态密度的变化, 从而在可见光区产生明显的着色与褪色现象. 该过程可以表示为$WO_3 + xM^{n+} + xne^- \rightleftharpoons M_xWO_3$, 其中, M^{n+}代表注入的阳离子[13]. 值得强调的是, 离子的注入与脱出行为高度依赖于材料的微观结构, 合理的结构设计不仅能够提供更多的活性位点, 而且有助于构建高效的离子传输通道[14]. 例如, Zydlewski等人[15]通过研究不同尺寸阳离子在六方氧化钨(h-WO_3)晶体结构中的嵌入行为, 揭示了位点选择性嵌入对双波段电致变色的关键作用. 相较于离子没有明确迁移路径的非晶态WO_3薄膜, h-WO_3规整的晶体骨架内存在尺寸各异的离子迁移通道. 研究发现, 小尺寸阳离子(Li^+和Na^+)可嵌入晶体结构中方形通道, 并占据其中的四面体间隙位点, 该过程通过诱导局域化极化子态, 进而显著增强了材料在可见光波段的吸收; 而离子嵌入行为在整体上提升了材料中自由载流子浓度, 从而协同增强了近红外波段的LSPR响应. 这种由嵌入位点差异所调控的双重光学机制, 实现了可见与近红外光的同步调制.

除传统的WO_3体系外, 其他过渡金属氧化物通过合理的晶体结构与微观形貌设计, 同样展现出优异的双波段调制性能. 微观结构调控策略不仅能优化载流子传输路径, 更能有效调控材料的缺陷类型与浓度, 从而实现对载流子浓度的有效管理. Xing等人[16]通过胶体合成法制备了不同粒径的锐钛矿TiO_2纳米棒, 其

中高长径比的纳米棒(以下简称为L-TiO_2纳米棒)表现出更为突出的性能优势. 研究发现, L-TiO_2纳米棒因其更大的比表面积与特定的暴露晶面, 在合成过程中更易于形成并稳定氧空位缺陷. 这些氧空位作为有效的*n*型掺杂, 可向材料体系注入大量电子, 进而直接提升了材料的自由载流子浓度, 最终协同增强了可见光与近红外两个波段的调控能力: 一方面高载流子浓度强化了LSPR主导的近红外吸收, 另一方面促进了离子嵌入效率, 优化了极化子主导的可见光着色. 基于此, 由L-TiO_2纳米棒组成的薄膜在400, 600和800 nm波长处分别实现较高的透过率调制(图1(a)–(d)). 当施加电压从0 V变化至−4 V时, 器件可实现从完全透明态到着色态的动态可逆转换, 在可见光区和近红外波段均展现出超过60%的透过率调制, 如图1(e)所示. 除TiO_2外, 其钛基氧化物衍生物钛酸锂($Li_4Ti_5O_{12}$)凭借其独特的尖晶石结构, 在可见光至红外波段均表现出优异的电致变色性能. 该结构为Li^+的嵌入/脱出提供了稳固的三维通道, 且在反应过程中晶格参数变化极小, 从根本上保证了离子反复脱嵌时的结构完整性, 从而使该材料在电致变色过程中具备高度可逆性与长期循环稳定性. 其次, 从电子结构看, Ti^{4+}还原为Ti^{3+}的过程不仅引入了强烈的极化子吸收, 同时也向导带注入了大量自由电子, 显著提升了载流子浓度, 从而协同增强了基于自由载流子振荡的LSPR响应. 这种晶体结构稳定性与电子结构可调性的内在结合, 使$Li_4Ti_5O_{12}$成为一种理想的、本征具备宽光谱响应能力的电致变色材料. 例如, Mandal等人[17]基于$Li_4Ti_5O_{12}$材料构筑的电致变色器件在633 nm波长处的透过率调制为75.2%, 同时在1200 nm近红外波段保持81.6%的透过率调制. 这种宽波段调制特性伴随显著的极化子吸收与自由载流子浓度变化, 器件的着色效率在近红外波段表现较好, 可达128.6 $cm^2\ C^{-1}$.

尽管通过调控微观形貌可有效优化材料的电致变色性能, 但其光谱响应宽度与幅度常受限于材料本征的能带结构. 为突破此限制, 研究者转而通过构建多元异质结来发挥不同组分在不同波段的调控优势, 为实现优异的协同调制行为开辟了新思路. 例如, Huang等人[18]基于仿生学原理, 设计了一种具有松针多级结

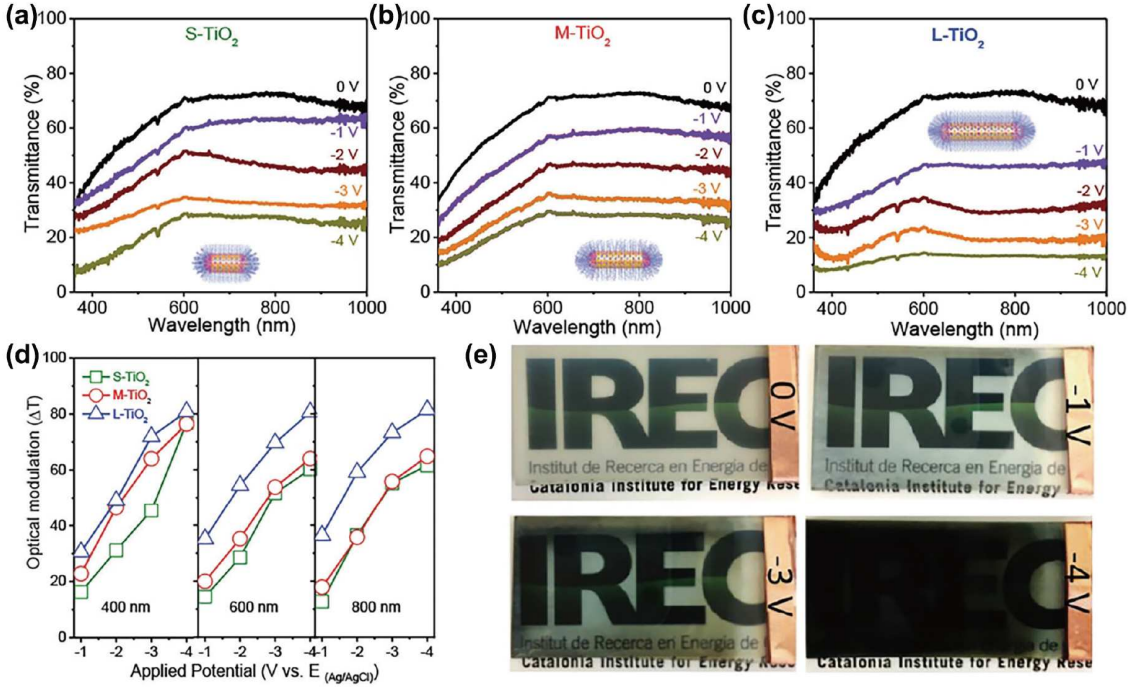


图 1　(网络版彩图) (a)–(c) 不同粒径TiO_2纳米棒的透射光谱; (d) 400, 600和800 nm波长处的光学调制; (e) 施加不同电压时L-TiO_2纳米棒薄膜电极的电致变色响应照片(图片取自文献[16], 已获授权)

Figure 1　(Color online) (a)–(c) Transmittance spectra of TiO_2 NRs with different particle sizes; (d) the optical modulation at the wavelength of 400, 600, and 800 nm; (e) the optical photographs of L-TiO_2 NRs thin film electrodes with different applied voltages (Reprinted with permission from ref. [16], Copyright©2023, John Wiley and Sons publishing).

构特征的三维分级异质体系，通过静电纺丝技术精确构筑TiO_2纳米纤维主干，并采用溶剂热法在其表面外延生长$W_{18}O_{49}$纳米刺分支，成功实现了材料介观结构的精准调控. 这一独特的多级微观结构不仅大幅增加了材料的比表面积，为离子交换与电荷转移提供了丰富的活性界面，而且通过分支结构间的协同效应，优化了载流子的分离与传输动力学过程. 其中，$W_{18}O_{49}$分支凭借其固有的氧空位主导近红外波段的LSPR吸收；而TiO_2主干则通过极化子吸收实现对可见光波段的调制. 得益于上述的微观结构设计，该异质结器件在633 nm可见光与1800 nm近红外波段的透过率调制分别为81.4%与91.3%，褪色/着色时间分别为0.9和1.2 s，并在20000次循环后仍保持最大调制的85%以上(图2).

结构水插层是另一种有效的双波段同步调控策略. 例如Wang等人[19]通过构建$WO_3{\cdot}2H_2O$纳米片体系，系统揭示了结构水在提升电致变色性能方面的关键作用(图3(a)). 结构水在晶格中形成了连续的离子传输通道，将Li^+扩散系数提升至无水WO_3的3.5倍，显著降低了离子迁移势垒. 得益于这一独特的结构优势，所制备的水合WO_3材料表现出优异的电致变色性能：其透过率调制高达90.4%，着色效率为322.6 $cm^2\ C^{-1}$，且在500次循环后仍能保持最大调制的93.7%. 该体系性能的改善主要源于结构水引入所引发的晶体结构与电荷存储机制的双重转变. 传统无水WO_3依赖于Li^+在致密晶格中的缓慢体相扩散. 而插层结构水的存在，不仅显著增大了晶体层间间距，为离子传输提供了更宽敞的物理通道，同时还可起到“分子润滑”作用，有效提升离子迁移速率. 这种结构转变将主导的电荷存储机制从体相嵌入转变为以表面及近表面为主的快速离子吸附/脱附过程. 该研究从离子传输与电荷存储机制层面阐明了结构水的作用，为设计高性能双波段电致变色材料提供了重要原理支撑.

基于结构水插层的优势，研究者们进一步探索了将其与其他改性手段协同的复合策略. 例如，Wang等人[20]在$WO_3{\cdot}H_2O$中同时引入了N元素和Mo元素，实现了性能的协同提升. 其中N元素掺杂通过引入额外自由电子，有效提升了材料的自由载流子浓度，从而直接增强了基于LSPR的近红外调制能力；而Mo元素则优化了材料能带结构，不仅提升了电子电导率，也为离子迁移提供了更低的扩散能垒. 得益于结构水固有的快速离子传输通道与多元掺杂的协同效应，该材料在可见光与近红外波段分别实现了75%与78%的透过率调制.

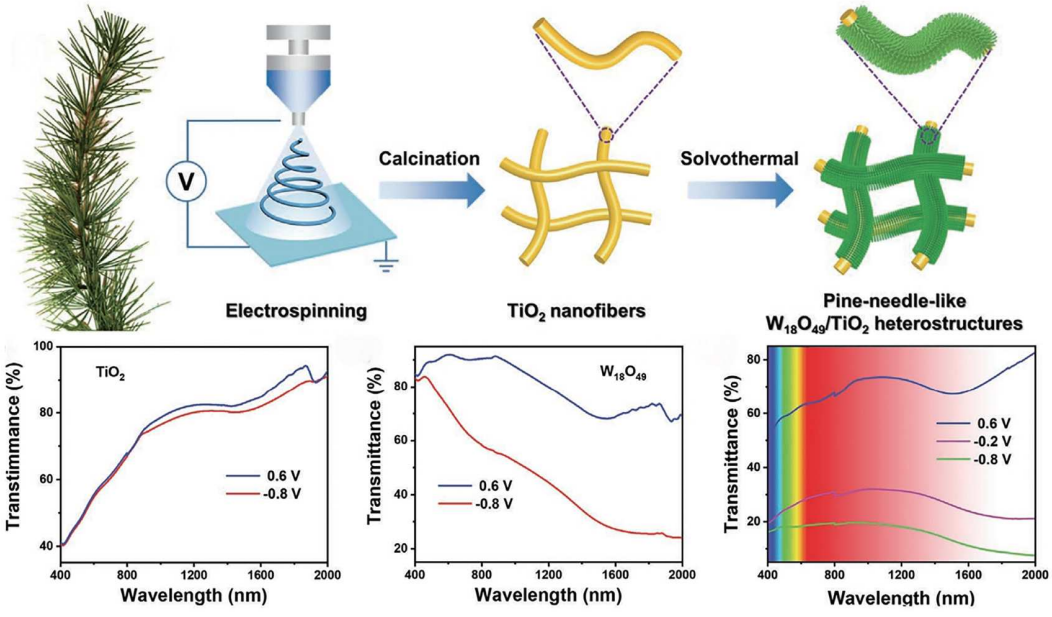


图 2　(网络版彩图) $W_{18}O_{49}/TiO_2$结构的合成与电致变色性能(图片取自文献[18], 已获授权)

Figure 2　(Color online) Synthesis and electrochromic performance of PNL-$W_{18}O_{49}/TiO_2$ heterostructure (Reprinted with permission from ref. [18], Copyright©2022, John Wiley and Sons publishing).

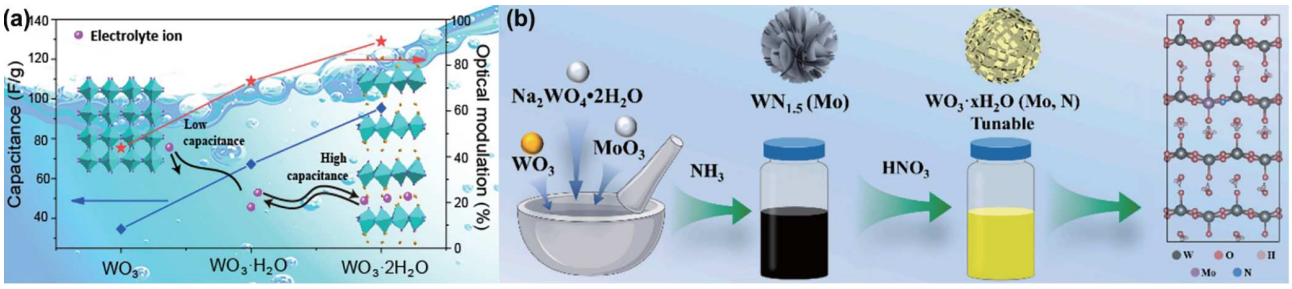


图 3　(网络版彩图) (a) WO_3, $WO_3·H_2O$, $WO_3·2H_2O$的电容及在NIR波段的光学调制性能(图片取自文献[19], 已获授权); (b) N, Mo共掺杂WO_3材料的合成示意图(图片取自文献[20], 已获授权)

Figure 3　(Color online) (a) Capacitance and optical modulation performance at NIR band of WO_3, $WO_3·H_2O$, and $WO_3·2H_2O$ (Reprinted with permission from ref. [19], Copyright©2020, American Chemical Society publishing); (b) schematic diagram of the synthesis of N, Mo co-doped WO_3 materials (Reprinted with permission from ref. [20], Copyright©2025, Elsevier publishing).

综上所述, 尽管上述调控策略可实现可见光与近红外波段的同步管理, 但这种同步响应模式难以满足个性化的光热管理需求, 从而制约了器件在复杂多变环境中的应用, 这一局限性推动了双波段独立调控策略的发展.

2.1.2　双波段独立调控

为满足光热管理的个性化需求, 实现可见光与近红外波段的独立精准调控, 是推动电致变色器件向“亮而不热”或“暗而保温”等智能管理模式发展的重要方向[21]. 现有研究主要围绕两条路径展开: 一是材料本征特性调控, 通过氧缺陷构建、过渡金属掺杂及异质结形成, 提升双波段独立调控能力; 二是器件结构/电解质工程, 借助器件结构设计与电化学环境调控, 实现多功能集成与协同.

实现双波段独立调控的电致变色材料, 按组分可分为单组分与多组分两类. 单组分材料的设计核心在于通过调控材料中的空位缺陷与能带结构, 使其在不同电压下可借助LSPR和极化子吸收机制, 实现对可见光与近红外波段的独立调控. 在该类体系中, 氧空位可作为缺陷能级的活性中心和离子吸附的关键位点: 在较低电压下, 离子因双电层电容效应优先吸附于氧空位处, 引起局域电子积累并诱发LSPR效应, 从而选择性增强近红外吸收; 在较高电压下, 离子则嵌入晶格内部引发极化子跃迁, 进而实现对可见光吸收[22]. 然而, 该策略面临的难题在于如何在原子尺度上精确控制氧空位的浓度——浓度过低将难以实现可见光与近红外波段的独立调制, 而浓度过高则可能引起晶格畸变, 降低材料的循环稳定性[23]. 针对这一问题, Chen等人[24]利用电子束蒸发法及后续退火工艺, 制备了富含氧空位的正交相氧化钨(o-WO_{3-x})薄膜. 相较于计量化学比氧化钨(s-WO_3)薄膜, 该方法所制备的薄膜具有更低的离子扩散能垒与更丰富的H^+吸附位点, 从而表现出更快的反应动力学与双波段独立调控能力(图4(a)). 在−0.2 V的电压下, H^+优先吸附于氧空位缺陷处, 诱导LSPR效应, 显著增强近红外波段吸收; 当电压调节至−1.0 V, H^+嵌入晶格内部, 引发W^{6+}还原为W^{5+}与极化子跃迁, 在可见光区产生强吸收. 具体表现为在633和1000 nm波长处的透过率调制分别为89.1%与84.1% (图4(b)和(c)).

在单一氧空位调控的基础上, 进一步引入过渡金属元素掺杂, 是提升材料光学调控性能的有效途径. Meng等人[25]正是应用这一综合策略, 通过在WO_3前驱体中引入聚乙烯吡咯烷酮, 有效调控了材料的氧空位浓度, 有利于构建多孔薄膜结构, 显著增加了电化学活性位点. 同时, 引入的Ti元素的掺杂可有效抑制Li^+离子嵌入/脱出行为并引发WO_3在单斜相与立方相之间的往复相变, 将其稳定在立方相结构, 从而减轻了由相变引起的晶格重组与结构疲劳, 提升了薄膜的循环稳定性. 研究表明, 在−0.3 V电压下, 富含氧空位的薄膜在1200 nm处透过率调制为65%, 而低氧空位薄膜调制为5%; −1.0 V电压下, Li^+嵌入晶格诱导极化子吸收, 使其在可见光波段表现出较强的吸收(图5(a)和(b)). 该多孔Ti掺杂WO_3薄膜在633和1200 nm波长处分别实现84.9%与90.3%的透过率调制, 同时兼具高着色效率、良好的双稳态特性及优异的循环稳定性(1000次循环后, 633和1200 nm处的调制衰减分别为11%和3.5%).

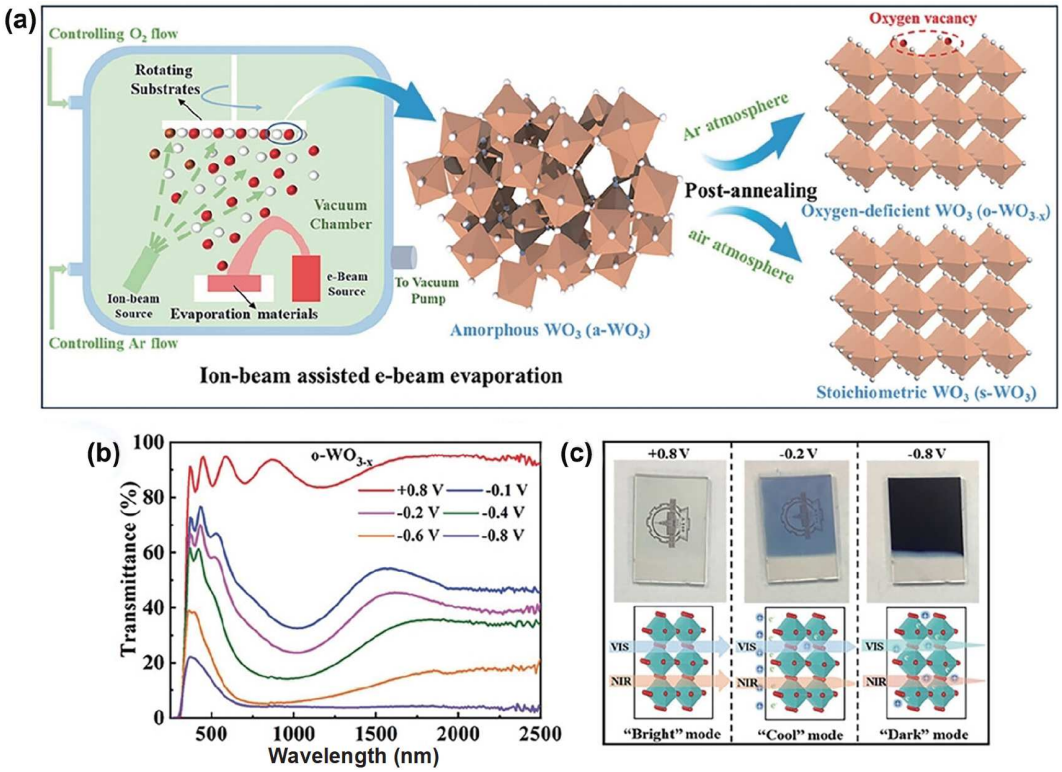


图 4　(网络版彩图) (a) 离子束辅助电子束蒸发方法制备o-WO_{3-x}和s-WO_3薄膜示意图; (b), (c) o-WO_{3-x}薄膜的双波段电致变色性能(图片取自文献[24], 已获授权)

Figure 4　(Color online) (a) Schematic diagram of an ion-beam assisted e-beam evaporation method for the preparation of o-WO_{3-x} and s-WO_3 films; (b), (c) dual-band electrochromic properties of the o-WO_{3-x} films (Reprinted with permission from ref. [24], Copyright©2025, John Wiley and Sons publishing).

相较于单组分材料体系，将多种材料复合是实现双波段独立调控的另一重要路径，该策略通过匹配不同光学带隙的材料，实现光谱区间的互补设计，展现出更灵活的光谱调控能力. 同时，材料间形成的异质界面可进一步优化电荷传输与界面稳定性，从而提升电致变色性能. 例如，Pugliese等人[26]通过微波辅助合成法，制备出以TiO_2锐钛矿纳米结构为核心、表面外延生长薄带状WO_{3-x}的异质结纳米晶. 在该体系中，TiO_2则主要调控可见光波段，WO_{3-x}主要调控近红外波段. 研究对比了TiO_2/WO_{3-x}复合薄膜与TiO_2@WO_{3-x}异质结薄膜的双波段独立调控能力，发现后者因组分间通过化学键合形成更强的界面作用，有效降低了光散射，从而展现出更高的初始透过率、更低的雾度, 以及更高的调制(可见光83%, 近红外76%, 图6).

尽管通过优化材料本征特性可实现一定程度的独立调控，但这类策略的潜力仍受限于材料自身. 最近Zhou等人[27]通过器件结构设计与电解质工程，采用Cu^{2+}/Mn^{2+}混合电解质体系构筑了含Pt-FTO电极、FTO/WO_3电极与铜电极的三电极器件，实现了亮-暖、暗-暖、亮-冷、暗-冷四种调控模式(图7). 该器件中，FTO/WO_3电极负责近红外波段的调制(影响"冷/暖"), Pt-FTO电极负责可见光的调制(影响"亮/暗"), 铜电极作为辅助电极，提供电流路径并促进电化学反应的可逆性. 在FTO/WO_3电极侧，电解质中的Cu^{2+}/Mn^{2+}离子凭借其与WO_3表面更强的静电吸引，能够优先于H^+吸附于电极界面. 这种静电吸附不仅有效促进了界面双电层的形成，极大增强了LSPR效应，从而实现对近红外波段的独立与高效调制; 更重要的是, 这些吸附的金属离子在WO_3表面形成了一层动态屏障，阻隔了H^+向材料体相嵌入的过程，使得可见光波段得以维持高透过率. 在Pt-FTO电极侧，施加+1.4 V的电压可驱动MnO_2沉积在Pt-FTO电极表面，通过控制MnO_2的沉积厚度，可动态调控可见光透过率，且不影响近红外光. 此外，H^+对于MnO_2的溶解具有促进作用，进一步增强了器件的可逆性. 由于上述这两种反应彼此独立可控，从而使该器件可以实现四种模式的独立调控.

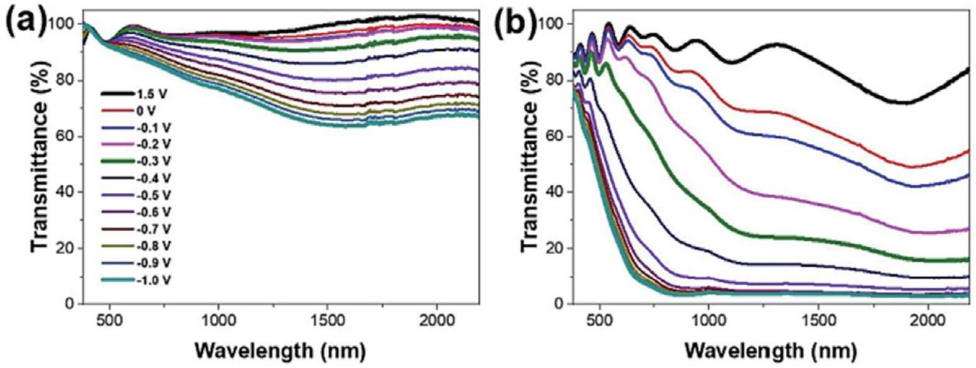


图 5　(网络版彩图)不同氧空位含量的薄膜在不同偏置电位下的透射光谱. (a) 低氧空位含量薄膜; (b) 高氧空位含量薄膜(图片取自文献[25], 已获授权)

Figure 5　(Color online) Optical transmittance spectra of thin films with different oxygen vacancy contents at different bias potential. (a) Thin film with low oxygen vacancy content; (b) thin film with high oxygen vacancy content (Reprinted with permission from ref. [25], Copyright©2023, John Elsevier publishing).

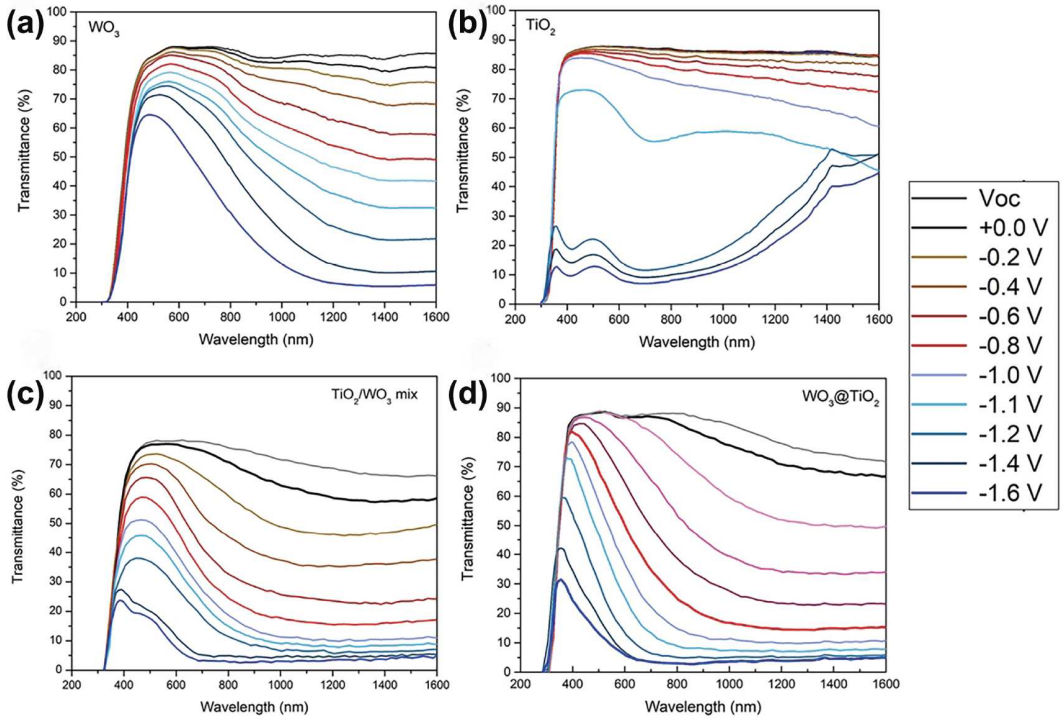


图 6　(网络版彩图)不同薄膜在1 M $LiClO_4$/PC电解质中的光谱电化学表征. (a) WO_{3-x}薄膜; (b) TiO_2薄膜; (c) TiO_2/WO_{3-x}混合薄膜; (d) $TiO_2@WO_{3-x}$薄膜(图片取自文献[26], 已获授权)

Figure 6　(Color online) Spectro-electrochemical characterization of investigated films in 1 M $LiClO_4$ in PC. (a) WO_{3-x}; (b) TiO_2; (c) TiO_2/WO_{3-x} mix; (d) $TiO_2@WO_{3-x}$ (Reprinted with permission from ref. [26], Copyright©2023, John Elsevier publishing).

材料本征策略与器件工程策略在实现双波段独立调控上各有侧重. 材料策略依赖于材料固有的光电特性, 虽在集成简便性上具有优势, 但其调控自由度受限于本征能带与缺陷结构. 器件策略通过多电极与电解质工程设计, 在调控自由度上更为灵活, 可实现可见光与近红外波段较完全的解耦, 但集成复杂度也随之增加. 稳定性是两类策略共同面临的挑战: 材料策略的衰减主要源于循环中的结构演变与界面失效; 器件策略则更易受电解质稳定性及界面副反应影响. 未来需致力于材料与器件层面的协同优化, 以兼顾性

能、可靠性与实用化需求.

在实现双波段独立调控的基础上, 为应对按需管理光热辐射的个性化需求, 发展能够同时对可见光、近红外乃至中红外等多波段进行独立调控的新一代电致变色器件, 已成为该领域的重要发展方向.

2.2　可见光-近红外-中红外三波段调控

对于可见-近红外波段的调控主要是针对太阳辐射热量的输入管理, 而中红外波段的调控则针对器件自身热辐射管理. 将电致变色器件的动态调控能力拓展至中红外波段, 可实现器件在无太阳辐射输入时(如夜间)动态抑制热散失, 这种三波段调控技术在智能温控领域展现出巨大潜力.

地表热量主要以中红外辐射的形式释放, 这些热量被大气中水汽、CO_2等气体强烈吸收, 该过程阻止热量向接近绝对零度的外太空(~3 K)传播, 导致近地表热量积累. 然而, 中红外波段存在的大气窗口波段, 大气吸收作用显著减弱, 这使得地表热辐射可以逸散

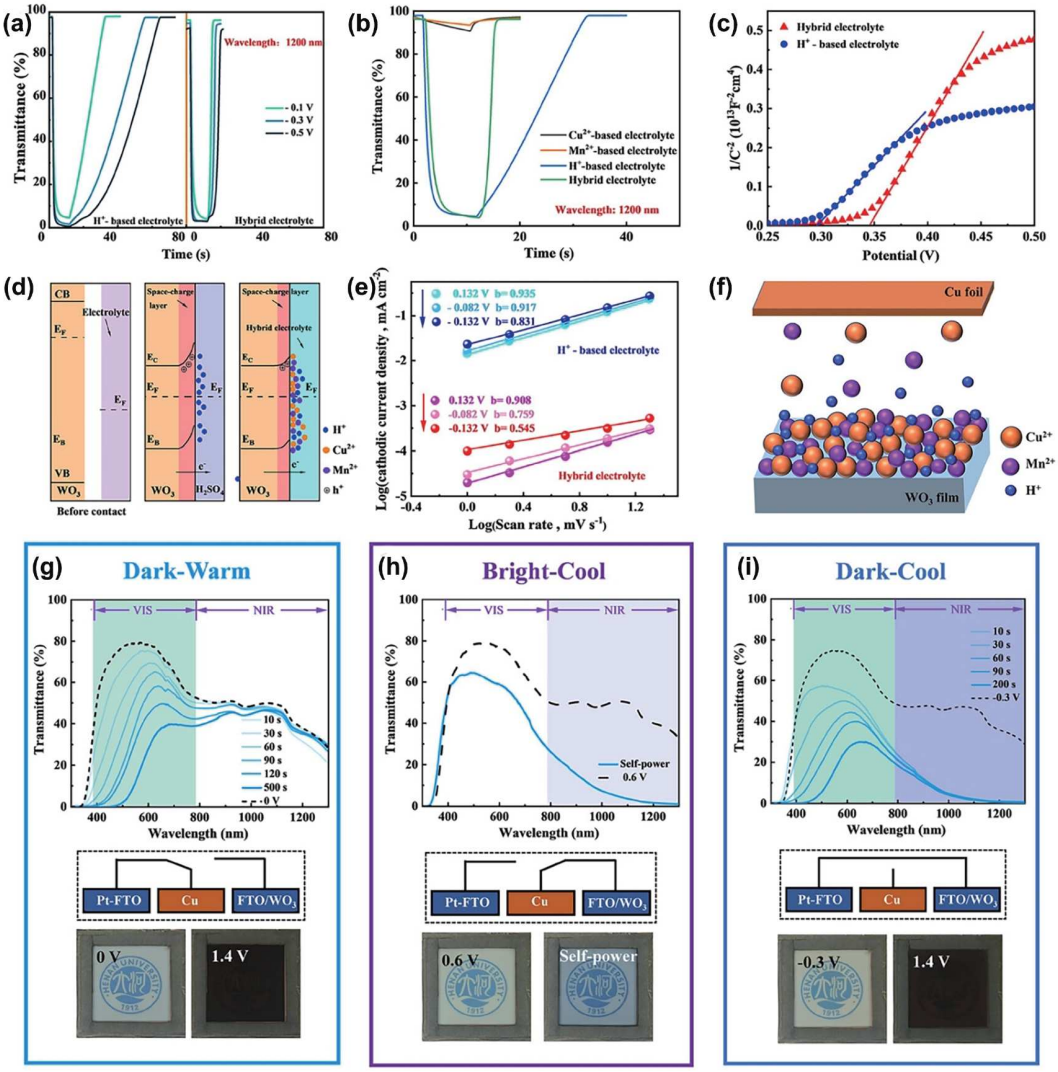


图 7　(网络版彩图) (a)–(f) 混合电解质中WO_3薄膜的近红外波段调控性能表征; (g)–(i) 电致变色智能窗四种光热调节模式的关键状态表征(注: 四种模式分别为"亮-暖""暗-暖""亮-冷""暗-冷", 子图展示核心调控状态)(图片取自文献[27], 已获授权)

Figure 7　(Color online) (a)–(f) Characterization of NIR regulation performance of WO_3 film in the hybrid electrolyte; (g)–(i) key state characterization of four-mode photothermal regulation for electrochromic smart windows (Note: the four modes are "bright-warm", "dark-warm", "bright-cold", and "dark-cold", with subfigures showing core regulation states) (Reprinted with permission from ref. [27], Copyright©2025, John Wiley and Sons publishing).

至外太空, 从而降低温度, 实现辐射制冷[28,29]. 因此, 将电致变色器件的调控范围拓展至中红外波段, 使其能够按需调节器件在该波段的热发射率, 是利用辐射制冷技术实现高效热量管理、应对全球变暖与温室效应的重要方案.

上述三波段调控的代表性结构为“电致变色材料/中红外高反射层”的法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)谐振腔结构[30], 通常采用中红外高反射层(如Au, Ag, ITO等)为高反射镜, 构建腔体的边界条件; 电致变色材料作为可调谐介质层, 精确调控其厚度以匹配目标波长的谐振条件. 在外加电场驱动下, 离子(如H^+, Li^+)可逆嵌入/脱出电致变色层, 引发电致变色层复折射率($\tilde{n}=n+\mathrm{i}k$)的显著变化. 其中, 实部n (折射率)变化调谐谐振波长, 虚部k (消光系数)变化调控吸收强度, 二者共同作用实现对中红外发射率的动态调制. 例如, Mandal等人[17]采用金属Al作为高反射镜, 将脱锂态LTO ($Li_4Ti_5O_{12}$)纳米颗粒涂覆于Al箔, 构建了F-P腔结构. 由于Al箔不透明性且具有高反射率, 使得器件在可见-近红外波段的光谱响应为反射率调制. 通过电压驱动Li^+的嵌入LTO使得其转变为金属态($Li_7Ti_5O_{12}$), 自由载流子吸收增强, 消光系数k增大, 实现了可见-近红外波段超过78%的反射率调制性和大气窗口区呈现超过0.3的发射率调制(图8). 在室外环境测试中器件展示出18°C的可调温度跨度以及低于环境温度4°C的主动温控能力.

此外, 金属可逆电沉积技术在三波段动态调控器件中也展现出独特的优势[31]. 该技术通过电压控制金属离子的沉积与溶解, 能够实现从“可见-近红外透明态、中红外高发射态”到“可见-近红外高反射态、中红外低发射态”的快速可逆切换, 从而同步调控可见-近红外光波段的反射率与中红外发射率. 例如, Zhao等人[32]将金属Ag可逆电沉积与机械翻转有机结合, 制备出了三波段动态调控器件(图9). 该器件采用独特的双模式设计: 在降温模式下, Ag^+被还原形成紧密堆积

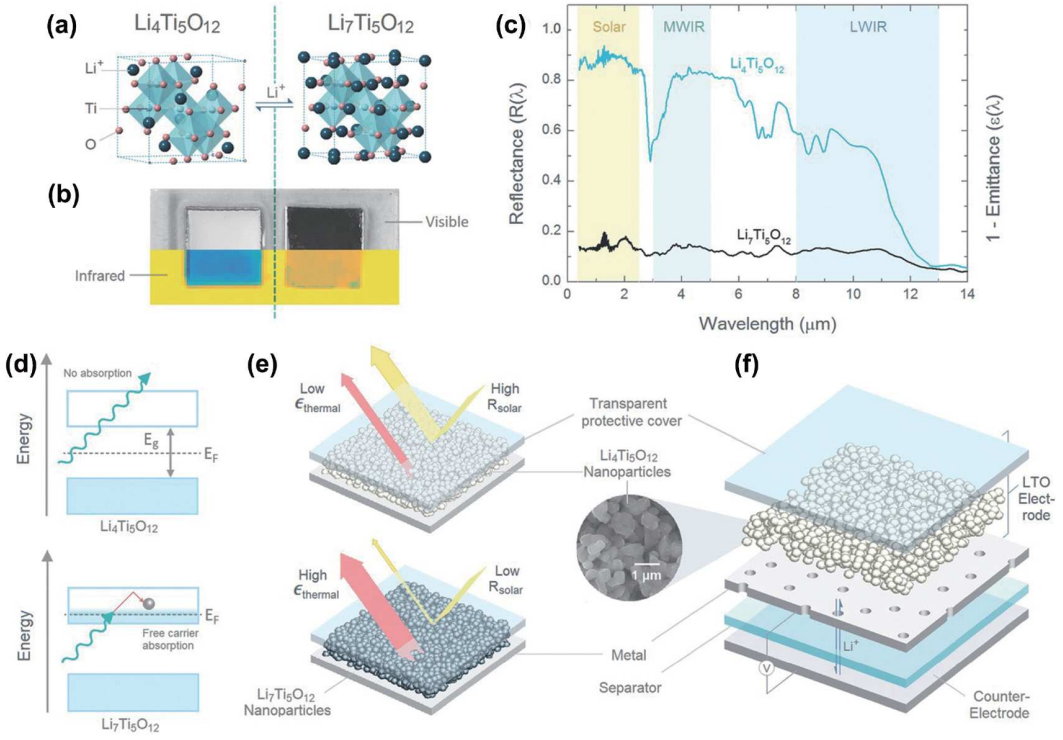


图 8　(网络版彩图) (a) $Li_4Ti_5O_{12}$和$Li_7Ti_5O_{12}$晶体结构对比; (b) 红外热成像特征; (c) $Li_4Ti_5O_{12}$和$Li_7Ti_5O_{12}$纳米颗粒沉积在铝箔上并被氟化钡覆盖的可见红外光谱反射率$R(\lambda)$; (d) 能带调控机制; (e), (f) LTO器件结构示意图(图片取自文献[17], 已获授权)

Figure 8　(Color online) (a) Crystal structures of $Li_4Ti_5O_{12}$ and $Li_7Ti_5O_{12}$; (b) MIR thermographic characteristics; (c) visible-to-infrared spectral reflectance $R(\lambda)$ of $Li_4Ti_5O_{12}$ and $Li_7Ti_5O_{12}$ nanoparticles deposited on Al foil and covered by barium fluoride (BaF_2); (d) band structure modulation mechanism; (e), (f) schematic diagram of LTO-based device structure (Reprinted with permission from ref. [17], Copyright©2018, John Wiley and Sons publishing).

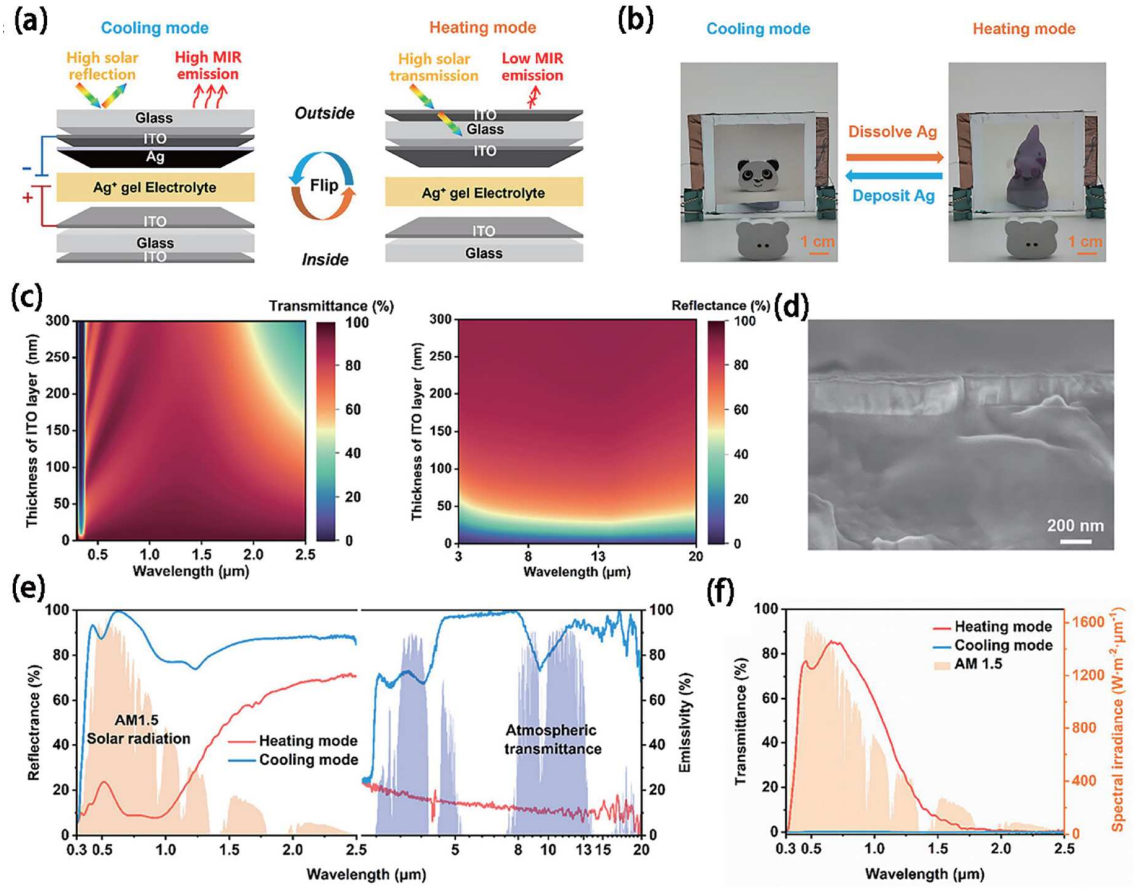


图 9　(网络版彩图) (a), (b) 基于ITO高反射特性的电致变色智能窗结构设计与实际展示; (c), (d) ITO层最佳厚度探究; (e), (f) 智能窗光谱(图片取自文献[32], 已获授权)

Figure 9　(Color online) (a), (b) Structural design and physical demonstration of the electrochromic smart window based on the high reflectivity of ITO; (c), (d) investigation of the optimal thickness of the ITO layer; (e), (f) spectroscopic characteristics of the smart window (Reprinted with permission from ref. [32], Copyright©2025, John Wiley and Sons publishing).

的纳米颗粒连续层, 实现可见-近红外波段高反射, 同时使中红外高发射的玻璃侧对准光源; 在保温模式下, Ag溶解实现可见-近红外波段的高透过率, 并通过翻转器件使中红外高反射的ITO侧对准光源. 上述切换机制使该器件在可见-近红外波段反射率和中红外发射率分别实现了68%和79.8%的调制.

透明导电层对不同波段光的透过能力直接决定了器件所能调节的波段宽度与调制幅度, 因此, 开发兼具高红外透过与低方阻的宽波段透明电极, 是提升三波段调控器件性能的关键. Rao等人[33]设计了由单层石墨烯、金微网格和聚乙烯薄膜组成的宽波段透明电极(TCE), 其中单层石墨烯和金微网格分别提供局部和长程导电通路, 确保了电场均匀性和低欧姆损耗. 该电极展现出优异的宽波段高透过率($T_{0.38–25\ \mu m}$ > 90%)、低方阻(22.5 Ω sq^{-1})、良好的机械强度与化学稳定性. 该团队将该宽波段透明电极与Ag^+/Cu^{2+}混合电解质、金属可逆电沉积技术结合, 研制的三波段调控器件可实现可见-近红外波段吸收率调制40%、中红外发射率调制0.82 (图10). Zhao等人[34]通过将MXene纳米片直接喷涂于BaF_2基底, 以低成本的简化工艺制备的宽波段透明电极在0.4–2和2.5–14 μm波段透过率分别为89%和71%, 方阻为500 Ω sq^{-1}.

将动态热管理能力与丰富的颜色变化集成, 可有效拓展三波段调控器件的应用. 例如, Zhao等人[35]开发了一种具有多种光热管理模式的器件, 该器件采用银纳米线与PP复合薄膜作为宽波段透明的工作电极,

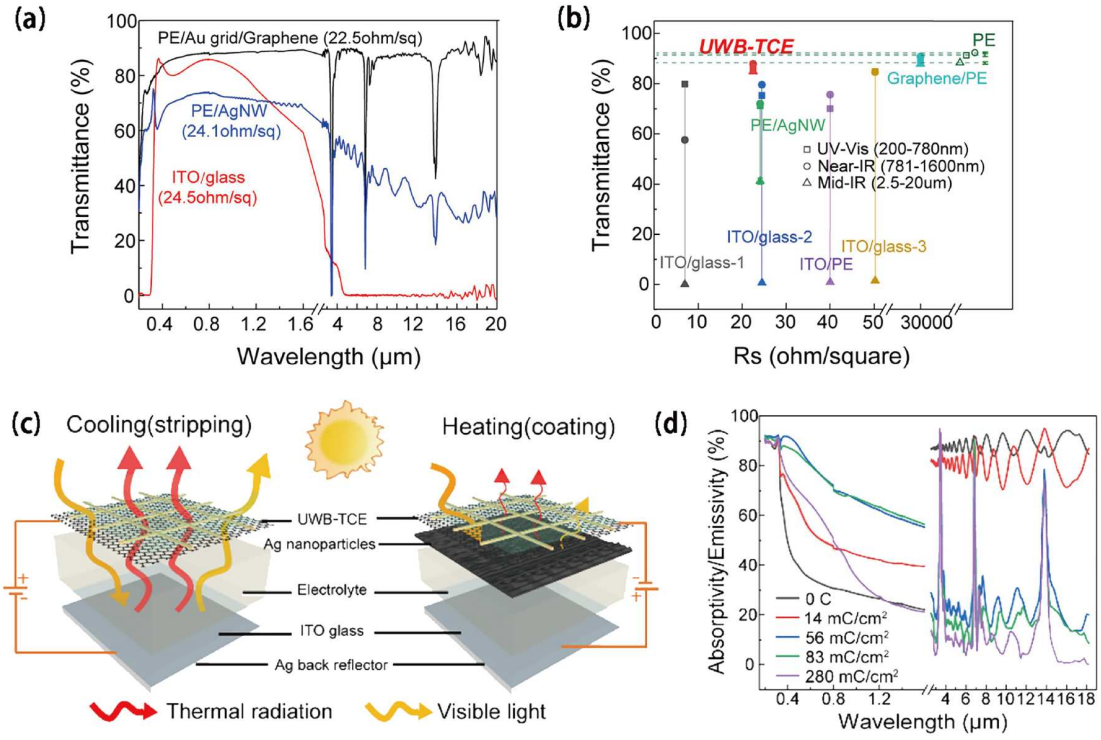


图 10　(网络版彩图) (a) PE/金网格/石墨烯TCE和其他类型TCE 0.2至20 μm波段的透过率光谱; (b) 该TCE与已有报道工作TCE的导电性能对比; (c) 电致变色器件工作原理示意图; (d) 太阳和中红外吸收率/发射率光谱(图片取自文献[33], 已获授权)

Figure 10　(Color online) (a) The spectra of PE/Au grid/Graphene and other types of TCE from 0.2 to 20 μm; (b) the comparison of the TCE performance in terms of sheet resistance between this work and previously reported works in the literature; (c) schematic of the electrochromic device working principle; (d) solar and MIR absorptivity/emissivity spectra (Reprinted with permission from ref. [33], Copyright©2021, American Chemical Society publishing).

在其表面制备普鲁士蓝(PB)薄膜作为电致变色层, 通过调控电压方向与大小, 可分别控制PB的变色状态(蓝色、白色、绿色、黄色)与金属铜的沉积位置, 从而实现四种制冷模式与一种加热模式. 即在正向电压下, PB根据电压不同呈现多色状态, 同时Cu^+在对电极被还原形成高反射纳米层, 使器件处于"可见-近红外高反射、中红外高发射"的制冷状态. 而在负向电压下, PB褪色至透明态, Cu则沉积在PB层表面, 使器件转为"可见-近红外高吸收、中红外低发射"的加热状态(图11)[35].

合理利用材料的对不同波段的调控行为, 融合热致变色(零能耗自适应)与电致变色(主动精确调控)的优势, 可弥补单一变色技术的局限. 其中, VO_2材料因其在热或电刺激下具有可逆绝缘态-金属态的相变特性, 成为研究最多的中红外热辐射调控材料[36–38]. 例如, Shao等人[39]利用WO_3与VO_2构成的复合薄膜为核心功能层, 设计了一种三波段调控器件. 通过调控不同电压下Li^+在复合薄膜中的嵌入深度, 实现对可见光与近红外波段的独立调控. 在0−−1.5 V电压范围内, Li^+优先嵌入VO_2层中, 诱导绝缘态VO_2转变为稳定的金属态Li_xVO_2, 产生LSPR吸收近红外光; 当电压进一步降低到−3.5 V时, Li^+进一步嵌入WO_3层, 同步吸收可见光与近红外波段(图12). 器件两侧采用中红外发射率差异较大的石英/SiO_2与PE/ITO材料, 优化了热辐射调控性能. 然而, 这种结构并没有充分利用VO_2在中红外的热调控特性.

当前主流的三波段调控技术, 因其原理与结构差异而展现出不同的性能特征. F-P腔技术能够实现较大的中红外发射率调制, 且循环稳定性优异, 但其制备依赖于高精度的薄膜沉积工艺, 导致成本偏高; 金属可逆电沉积技术虽响应速度偏慢, 但循环寿命长、成本适中, 尤其结合机械翻转机制时展现出良好的节能潜力,

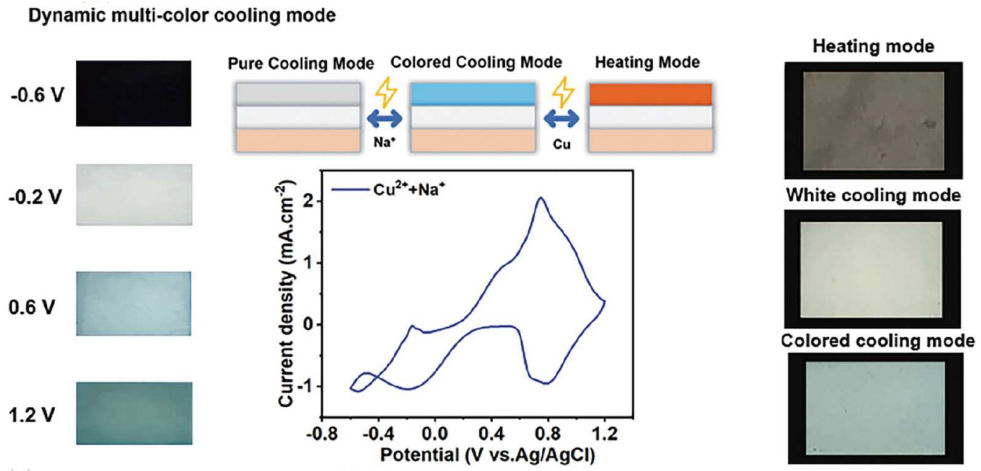


图 11　(网络版彩图) PB结合电沉积Cu器件的多模式效果展示、循环伏安曲线及对应状态照片(图片取自文献[35], 已获授权)
Figure 11　(Color online) Multi-mode performance display, cyclic voltammetry curves and corresponding state photos of the PB combined with electrodeposited Cu device (Reprinted with permission from ref. [35], Copyright©2024, John Wiley and Sons publishing).

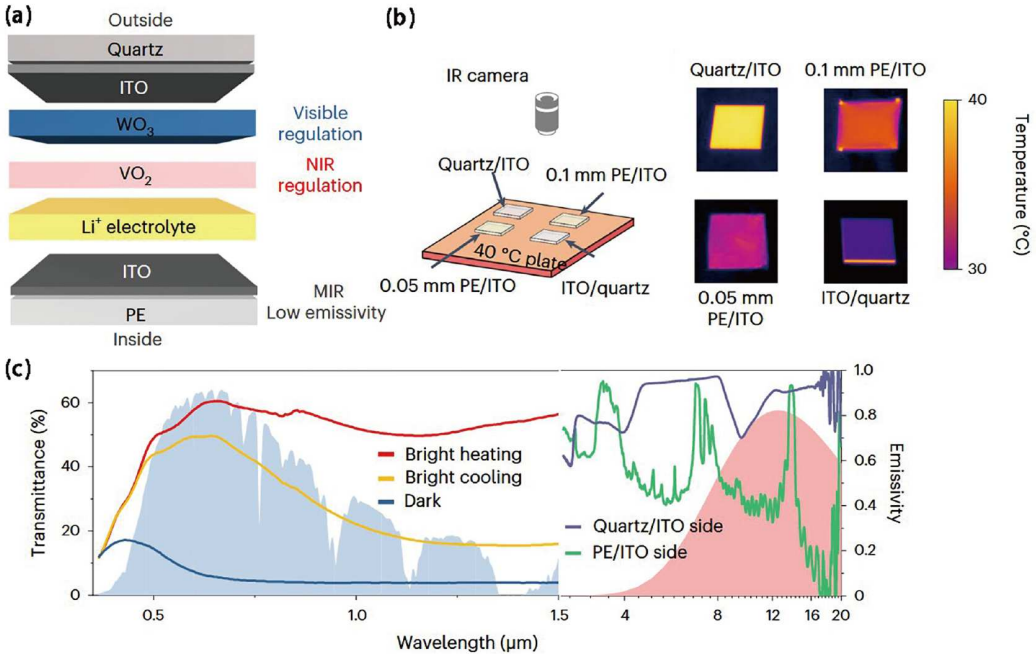


图 12　(网络版彩图) (a) 基于VO_2-WO_3三波段电致变色器件的设计; (b) 热台实验与热成像对比(石英/ITO、0.1 mm PE/ITO、0.05 mm PE/ITO、ITO/石英); (c) 多光谱电致变色器件透射谱 (0.35–2.5 μm) (图片取自文献[39], 已获授权)
Figure 12　(Color online) (a) Design of the VO_2-WO_3-based tri-band electrochromic device; (b) schematic of hot-stage experiment and thermal imaging comparison (Quartz/ITO, 0.1 mm PE/ITO, 0.05 mm PE/ITO, ITO/quartz); (c) transmittance spectra (0.35–2.5 μm) of the optimizing-multispectral EC device (Reprinted with permission from ref. [39], Copyright©2024, Springer Nature publishing).

将二者结合有望实现优势互补. 相比之下, VO_2相变技术发展相对成熟, 但其发射率调制幅度受相变温度阈值制约. 未来研究可聚焦于VO_2基多功能复合材料的设计, 实现温度驱动与电压驱动的协同调控, 进而拓展其在智能窗、红外伪装等领域的应用场景与实用潜力.

3　多波段调控器件应用前景

3.1　智能温控器件

在建筑领域, 实现可见光与近红外波段的按需、独立管理, 是智能温控建筑降低能耗的关键, 而具有

的宽光谱动态调控能力的多波段电致变色器件，为智能建筑满足该需求提供了可能[40]. 而推动该技术走向实用化，关键在于优化器件结构设计与深化材料体系创新. 其中，无机电致变色材料在环境稳定性和大面积制备方面已做出了系统性工作，而有机电致变色材料却凭借其分子层面的高度可设计性，形成了对无机体系的有力补充[30]. 其核心优势在于能够通过精准的分子工程对光学特性进行定制，不必依赖于离子嵌入与脱出所诱导的极化子或LSPR效应[41]. 例如，Gospodinova等人[42]通过低温聚合制备出结晶度高达具有70%的聚苯胺(PANI)薄膜，在褪色态下，该薄膜在633 nm波长处保持约60%的透过率调制，同时在900与1000 nm近红外波段的透过率调制分别降低至1.6%与5.7%，从而呈现出理想的“亮凉”模式(图13(a)).

除了上述基于高结晶度聚合物薄膜的策略，有机小分子因其可定制的分子结构，在实现更复杂的光热调控方面展现出独特潜力. Wu等人[43]设计合成的三嗪中心紫精衍生物TPPT即为一种典型代表. 该材料在

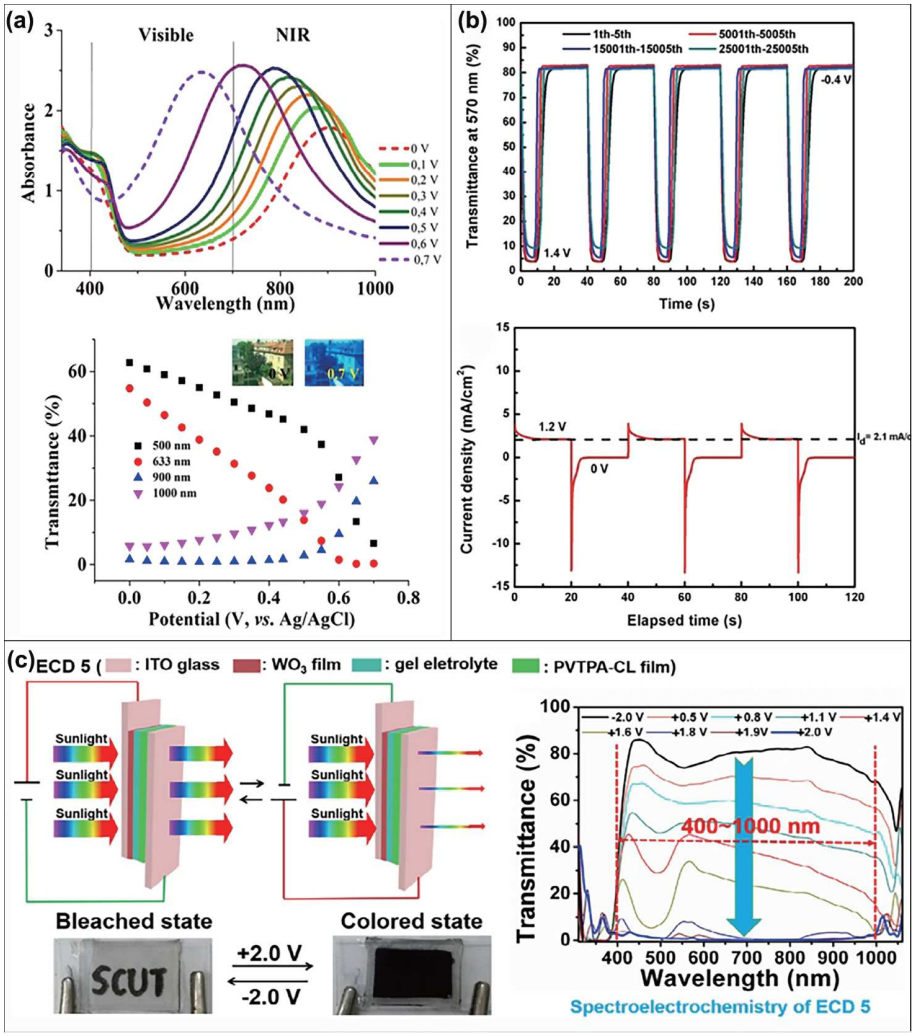


图 13　(网络版彩图) (a) 高结晶度PANI膜在太阳光谱可见光和近红外波段的透射率(图片取自文献[42]，已获授权); (b) 基于TMP的凝胶电致变色器件的透射率曲线随时间的变化(图片取自文献[44]，已获授权); (c) PVTPA-CL膜的数码照片、电致变色示意图及其电致变色器件的光谱电化学(图片取自文献[46]，已获授权)

Figure 13　(Color online) (a) The transmittance of the highly crystalline PANI film in the visible and NIR ranges of the solar spectrum in response to an applied potential at selected wavelengths (Reprinted with permission from ref. [42], Copyright©2018, American Chemical Society publishing); (b) transmittance curves changes versus time for TMP-based gel electrochromic device (Reprinted with permission from ref. [44], Copyright©2020, John Wiley and Sons publishing); (c) the digital photographs and electrochromic schematic of PVTPA-CL films and its spectroelectrochemistry of electrochromic device (Reprinted with permission from ref. [46], Copyright©2021, Elsevier publishing).

0–1.2 V的电压驱动下, 可以通过精准调控分子内电荷转移, 实现多种光热模式的灵活切换. 基于该材料构筑的器件在887 nm近红外波段表现出66.63%的调制与70.23 $cm^2\ C^{-1}$的着色效率. 除优异的动态光学调制能力外, 循环稳定性是决定有机多波段电致变色器件能否走向实用的另一核心挑战. 在这方面, Ling等人[44]基于具有A-D-A结构的噻吩中心紫精衍生物TMP, 构筑了全凝胶一体式器件, 该器件在570 nm可见光和910 nm近红外波段分别实现了81.7%和62.8%的透过率调制, 同时25000次循环后, 在570 nm处仍能保持70.6%的调制(测试调制值为79.2%), 展现出优异的循环稳定性(图13(b)). 近年来, 研究者们提出通过有机-无机复合策略, 来协同发挥有机与无机材料的各自优势. 例如, Yilmaz等人[45]通过构建PANI/ITO纳米复合电极, 将PANI在可见光波段的多变色特性与ITO纳米晶在近红外波段的LSPR特性相结合, 成功实现了光热独立调控四种模式, 同时此复合电极在超33 h的连续测试中仍表现出良好的稳定性, 证明了该复合策略在高性能、长寿命智能窗应用领域的潜力.

此外, 面向健康人居的光环境需求, 实现视觉舒适的“中性着色”是智能窗领域的另一重要发展方向. Zeng等人[46]报道了一种基于聚(4-乙烯基三苯胺)(PVTPA-CL)与WO_3的双极性互补电致变色器件, 该器件可以实现了从无色到黑色的可逆转变, 黑色态作为一种理想的中性色, 能均匀削弱整个可见光波段的光强, 有效避免色偏, 有助于减少视觉疲劳与眩光, 提升室内视觉舒适度, 同时该器件在700 nm可见光与900 nm近红外波段分别达到81.0%与75.6%的透过率调制(图13(c)).

3.2　多光谱自适应伪装

在多光谱自适应伪装领域, 为有效规避现代光电侦察, 要求伪装器件能够对可见光、近红外乃至中红外波段进行更为精细灵活的动态调控. 多波段电致变色器件凭借其可控性强、响应快及能耗较低等优势, 正成为构建下一代自适应伪装系统的重要发展方向之一[47–49]. 例如, Jeon等人[50]设计了一种WO_3/NiO电致变色单元与聚酰亚胺(PI)高红外发射基底集成的双波段电致变色伪装器件. 其中, 电致变色单元通过Li^+的嵌入/脱出诱导极化子吸收, 从而实现可见光波段的颜色切换; 而PI基底则在8–13 μm波段保持稳定的高发射率实现热伪装. 户外实验表明, 该器件可通过电压灵活匹配雪地、深色土壤等多种背景的视觉与热辐射信号, 即便在内部存在约50 W m^{-2}热源时, 仍保持优良的热伪装性能; 同时, 该高红外发射结构还兼具制冷功能, 可有效降低表面温度6°C–8°C(图14).

Ergoktas等人[51]报道了一种基于多层石墨烯的电致变色器件(图15(a)), 该器件具备从可见光至微波(波

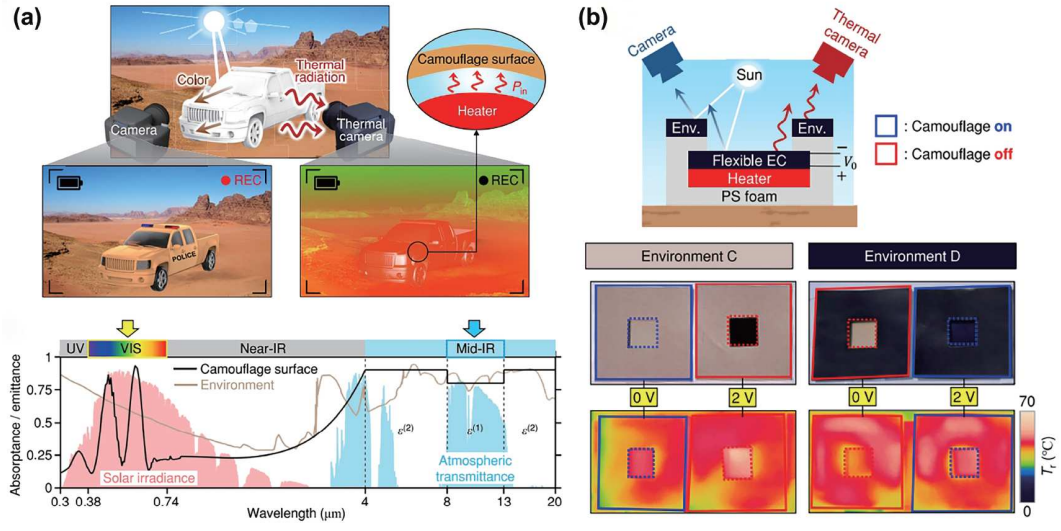


图 14　(网络版彩图) (a) 陆地环境中视觉伪装与热伪装的示意图; (b) 环境伪装的实验结果(图片取自文献[50], 已获授权)

Figure 14　(Color online) (a) Schematic for visual and thermal camouflages on the terrestrial environment underinternal heat expulsion of camouflage surface; (b) experimental results for dual-band dual-environmental camouflage (Reprinted with permission from ref. [50], Copyright©2023, De Gruyter publishing).

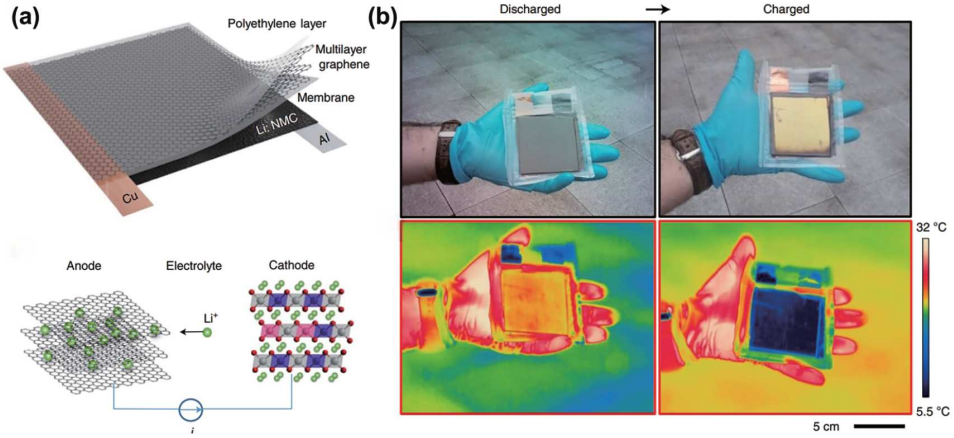


图 15　(网络版彩图) (a) 器件结构与工作原理; (b) 器件在放电与充电状态下的可见光和红外图像(图片取自文献[51], 已获授权)

Figure 15　(Color online) (a) Device structure and operation principle; (b) visible and infrared images of the device in fully discharged and charged states (Reprinted with permission from ref. [51], Copyright©2021, Springer Nature publishing).

长范围覆盖300 nm–3 mm)的超宽谱光学响应能力. 其工作机制依赖于Li^+在石墨烯层间的电化学插层, 通过调控自由载流子浓度, 实现LSPR频率从远红外连续迁移至紫外波段. 该器件在可见光波段反射率调制超过50%, 红外发射率可在0.25–0.7之间可逆切换, 并具备秒级响应速度与上千次循环稳定性. 另外, 该研究还设计了多像素伪装演示系统, 借助图案化电极实现区域选择性锂化, 在可见、红外与太赫兹波段同步完成信息编码与自适应伪装, 该技术成功实现了动态背景下的快速环境伪装, 证明了其多波段协同控制的突出优势(图15(b)).

4　总结与展望

多波段电致变色器件通过材料组成、微观形貌与器件界面的协同设计, 实现了从可见光到中红外波段的光热管理, 其调控策略具体体现为单组分缺陷工程、异质结界面优化以及器件结构演化. 这些进展为构建动态智能光热管理界面提供了技术指导, 为服务国家“双碳”战略下的建筑节能与热伪装等重大需求提供了有力支撑.

然而, 多波段电致变色器件的规模化应用仍面临多重挑战. 首先, 器件性能的稳定调控严重依赖于精密却易受串扰的电压序列, 导致其在复杂实际环境中可靠性不足. 其次, 在大面积制备过程中, 器件中复杂的纳米结构、异质界面与多层膜, 面临着性能均一性控制难与制造成本高的双重考验. 为突破上述瓶颈, 未来需聚焦三大方向.

(1) 探索新的材料响应机制: 设计具有特定光谱响应的光子晶体结构, 或开发具有多重离子响应通道的固态电解质, 为实现更稳定、更精确的多波段独立调控提供原理性突破.

(2) 革新器件制备工艺: 推动卷对卷印刷、喷墨打印等先进工艺在多功能薄膜制备中的应用, 重点解决大面积器件中膜层均匀性、界面稳定性与封装可靠性等核心工艺难题.

(3) 采用智能化的设计方法: 借助机器学习与高通量计算, 构建“材料成分-器件结构-光学调控性能”之间的映射关系, 快速筛选最优组合, 实现多目标性能的协同优化.

致谢　向评审人和对该文有帮助的人士表示谢意.

参考文献

1　Deb S K. A novel electrophotographic system. Appl Opt, 1969, 8: 192–195

2 Lampert C M. Electrochromic materials and devices for energy efficient windows. Sol Energy Mater, 1984, 11: 1–27

3 Qu S J, He Y, Yu W, et al. Application progress of electrochromic technology in biosensor detection and analysis (in Chinese). J Food Saf Qual, 2025, 16: 1–7 [瞿时佳, 何阳, 禹唯, 等. 电致变色技术在生物传感检测分析中的应用进展. 食品安全质量检测学报, 2025, 16: 1–7]

4 Zhu H, Li Q, Tao C, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling. Nat Commun, 2021, 12: 1805

5 Qin B, Zhu Y, Zhou Y, et al. Whole-infrared-band camouflage with dual-band radiative heat dissipation. Light Sci Appl, 2023, 12: 246

6 Huang A, Ji X, Cao X. Electrochromic building energy-saving device coupling photothermal conversion and radiative cooling. Energy Environ Mater, 2026, 9: e70155

7 Sun J, Chen Z, Zhang R, et al. Electrochromic smart windows with co-intercalation of cations and anions for multi-band regulations. Nat Commun, 2025, 16: 6993

8 Chen C, Yang G, Yang F, et al. Smart energy-saving windows using inorganic materials (in Chinese). Mater China, 2016, 35: 577–584, 568 [陈长, 杨光, 杨帆, 等. 无机智能节能窗. 中国材料进展, 2016, 35: 577–584, 568]

9 Zhai Y, Li J, Shen S, et al. Recent advances on dual-band electrochromic materials and devices. Adv Funct Mater, 2022, 32: 2109848

10 Agrawal A, Cho S H, Zandi O, et al. Localized surface plasmon resonance in semiconductor nanocrystals. Chem Rev, 2018, 118: 3121–3207

11 Kriegel I, Scotognella F, Manna L. Plasmonic doped semiconductor nanocrystals: Properties, fabrication, applications and perspectives. Phys Rep, 2017, 674: 1–52

12 Wang J, Guo X, Bian C, et al. Roadmap for electrochromic smart devices: From materials engineering and architectures design to multifunctional application. Prog Mater Sci, 2025, 153: 101461

13 Sun F, Pal R, Eom S Y, et al. Fast-switching dual-cathode electrochromic smart windows for year-round building energy savings. Nat Commun, 2025, 16: 9569

14 Nandre B K, Halder S, Dalapati S, et al. *In-situ* grown benzotrithiophene-containing covalent organic framework film for dual-responsive visible-to-near infrared electrochromic and bright-to-quenched electrofluorochromic smart windows. Sol Energy Mater Sol Cells, 2026, 295: 113979

15 Zydlewski B Z, Lu H C, Celio H, et al. Site-selective ion intercalation controls spectral response in electrochromic hexagonal tungsten oxide nanocrystals. J Phys Chem C, 2022, 126: 14537–14546

16 Xing C, Yang L, He R, et al. Brookite TiO_2 nanorods as promising electrochromic and energy storage materials for smart windows. Small, 2023, 19: 2303639

17 Mandal J, Du S, Dontigny M, et al. $Li_4Ti_5O_{12}$: A visible-to-infrared broadband electrochromic material for optical and thermal management. Adv Funct Mater, 2018, 28: 1802180

18 Huang Y, Wang B, Bai X, et al. 3D pine-needle-like $W_{18}O_{49}/TiO_2$ heterostructures as dual-band electrochromic materials with ultrafast response and excellent stability. Adv Opt Mater, 2022, 10: 2102399

19 Wang Z, Gong W, Wang X, et al. Remarkable near-infrared electrochromism in tungsten oxide driven by interlayer water-induced battery-to-pseudocapacitor transition. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12: 33917–33925

20 Wang Z, Guo X, Ma F, et al. Heteroatom co-doping engineering endows tungsten oxide with highly efficient dual-band electrochromic performance. Chem Eng J, 2025, 509: 161281

21 Wang J, Wang Z, Zhang M, et al. A semi-solid, polychromatic dual-band electrochromic smart window: Visualizing sunlight and solar heat transmission. Chem Eng J, 2024, 484: 149628

22 Wang J, Wang Z, Cui L, et al. Visible-near infrared independent modulation of hexagonal WO_3 induced by ionic insertion sequence and cavity characteristics. Adv Mater, 2024, 36: 2406939

23 Chen M, Zhang X, Yan D, et al. Oxygen vacancy modulated amorphous tungsten oxide films for fast-switching and ultra-stable dual-band electrochromic energy storage smart windows. Mater Horiz, 2023, 10: 2191–2203

24 Chen M, Deng J, Zhang H, et al. Advanced dual-band smart windows: Inorganic all-solid-state electrochromic devices for selective visible and near-infrared modulation. Adv Funct Mater, 2025, 35: 2413659

25 Meng Q, Cao S, Guo J, et al. Sol-gel-based porous Ti-doped tungsten oxide films for high-performance dual-band electrochromic smart windows. J Energy Chem, 2023, 77: 137–143

26 Pugliese M, Scarfiello R, Prontera C T, et al. Visible light-near-infrared dual-band electrochromic device. ACS Sustain Chem Eng, 2023, 11: 9601–9612

27 Zhou Y, Lv Y, Guo X, et al. Electrochromic smart windows with on-demand photothermal regulation for energy-saving buildings. Adv Mater, 2025, 37: 2502706

28 Ying Y, Yu J, Qin B, et al. Directional thermal emission covering two atmospheric windows. Laser Photon Rev, 2023, 17: 2300407

29 Wu X, Li J, Xie F, et al. A dual-selective thermal emitter with enhanced subambient radiative cooling performance. Nat Commun, 2024, 15: 815

30 Gong H, Li W, Fu G, et al. Recent progress and advances in electrochromic devices exhibiting infrared modulation. J Mater Chem A, 2022, 10: 6269–6290

31 Zhai H, Fan D, Li Q. Dynamic radiation regulations for thermal comfort. Nano Energy, 2022, 100: 107435

32 Zhao X, Chen Q, Fan F, et al. Dual-band electrochromic smart window for dynamic switching between radiative cooling and solar heating. Adv Sci, 2025, 12: e04483

33 Rao Y, Dai J, Sui C, et al. Ultra-wideband transparent conductive electrode for electrochromic synergistic solar and radiative heat management. ACS Energy Lett, 2021, 6: 3906–3915

34 Zhao J, Zhang S, Chang S, et al. A flexible electrochromic device with variable infrared emissivity based on $W_{18}O_{49}$ nanowire cathode and MXene infrared transparent conducting electrode. Chem Eng J, 2024, 480: 148010

35 Zhao S, Wu X, Guo Z, et al. An electro-driven dynamic and multicolored radiative thermal regulation material for all-year-round building energy saving. Adv Funct Mater, 2024, 35: 2419378

36 Kim H, Lahneman D, Rohde C, et al. VO_2-based thin-film radiators with variable thermal emissivity. Thin Solid Films, 2022, 759: 139455

37 Wang S, Liu M, Kong L, et al. Recent progress in VO_2 smart coatings: Strategies to improve the thermochromic properties. Prog Mater Sci, 2016, 81: 1–54

38 Jiang C, He L, Xuan Q, et al. Phase-change VO_2-based thermochromic smart windows. Light Sci Appl, 2024, 13: 255

39 Shao Z, Huang A, Cao C, et al. Tri-band electrochromic smart window for energy savings in buildings. Nat Sustain, 2024, 7: 796–803

40 Hu L, Zhu H, Lu K, et al. Theoretical investigation of VO_2 smart window with large-scale dynamic infrared emittance adjustment for adaptive thermal management. Sol Energy, 2024, 277: 112734

41 Bai T, Li W, Fu G, et al. Dual-band electrochromic smart windows towards building energy conservation. Sol Energy Mater Sol Cells, 2023, 256: 112320

42 Gospodinova N, Skorokhoda T, Lobaz V. Remarkable ability to modulate light transmittance and block heat in the bleached state combined in one electrochromic material: Highly crystalline polyaniline. Macromolecules, 2018, 51: 2227–2231

43 Wu N, Ma L, Zhao S, et al. Novel triazine-centered viologen analogues for dual-band electrochromic devices. Sol Energy Mater Sol Cells, 2019, 195: 114–121

44 Ling H, Su F, Tian Y, et al. A highly stable and tunable visible-near-IR electrochromic all-in-one gel device. ChemPhotoChem, 2020, 4: 357–365

45 Yilmaz P, Magni M, Martinez S, et al. Spectrally selective PANI/ITO nanocomposite electrodes for energy-efficient dual band electrochromic windows. ACS Appl Energy Mater, 2020, 3: 3779–3788

46 Zeng J, Yang H, Zhong C, et al. Colorless-to-black electrochromic devices based on ambipolar electrochromic system consisting of cross-linked poly(4-vinyltriphenylamine) and tungsten trioxide with high optical contrast in visible and near-infrared regions. Chem Eng J, 2021, 404: 126402

47 Feng F, Guo S, Ma D, et al. An overview of electrochromic devices with electrolytes containing viologens. Sol Energy Mater Sol Cells, 2023, 254: 112270

48 Huang Y, Zhu H, Zhou Y, et al. Adaptive visible-infrared camouflage with wide-range radiation control for extreme ambient temperatures. PhotoniX, 2025, 6: 25

49 Qin B, Zhu H, Zhu R, et al. Space-to-ground infrared camouflage with radiative heat dissipation. Light Sci Appl, 2025, 14: 137

50 Jeon S, Lee S E, Kim W, et al. Visual and thermal camouflage on different terrestrial environments based on electrochromism. Nanophotonics, 2023, 12: 3199–3209

51 Ergoktas M S, Bakan G, Kovalska E, et al. Multispectral graphene-based electro-optical surfaces with reversible tunability from visible to microwave wavelengths. Nat Photon, 2021, 15: 493–498

Research progress on multi-band electrochromic devices

ZHANG YinLing[1,2†], ZHANG Ting[2†], PAN MengYao[3], GUO XiaoDan[2] & CAI GuoFa[2*]

[1] *School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China*
[2] *School of Nanoscience and Materials Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China*
[3] *School of Fashion & Textiles, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China*
†*Equally contributed to this work*
**Corresponding author (email: caiguofa@henu.edu.cn)*

Electrochromic devices enable reversible modulation of optical properties under an applied electric field, allowing for dynamic control of solar heat and infrared radiation characteristics This review systematically summarizes recent progress in multi-band electrochromic devices, focusing on modulation mechanisms and device architectures. It elaborates on the physical principles of band-specific modulation: including polaronic absorption in the visible range, localized surface plasmon resonance in the near-infrared, and emissivity modulation in the mid-infrared. The evolution of device designs, spanning from dual-band (synchronized/independent) to triple-band systems, is thoroughly discussed, highlighting strategies such as single-component defect engineering, heterostructure construction, electrolyte engineering, and structural innovation. Finally, the application prospects in smart windows and adaptive camouflage are evaluated, and future challenges in decoupled spectral control, cycling stability, and scalable fabrication are outlined.

electrochromic materials, multi-spectral compatible response, collaborative modulation, intelligent thermal management

PACS: 82.45.-h, 78.40.-q, 85.60.-q, 44.40.-a

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0599