

# 光热调控器件最新研究进展

欧阳勇, 嵇海宁\*, 王逸, 陈永星, 陶俊东

湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年4月9日; 录用日期: 2024年5月25日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

光热调控器件是通过调控器件的光学性能, 进而有效地管理器件的表面或内部温度, 从而提高能源利用效率。智能热控器件和热致变色智能窗是最常见的两种光热调控器件。这些器件在航天器、建筑和汽车等领域发挥着重要作用, 为节能减排和提高舒适度等方面提供了有效的解决方案。基于此, 本文综述了近年来光热调控器件在航天器热控和智能窗领域中的最新研究进展, 总结了当前研究面临的挑战, 并展望了光热调控器件在未来的应用潜力, 旨在为相关研究和技术发展提供参考和启示。

## 关键词

光热调控器件, 航天器热控, 智能窗, 节能

# The Recent Progress of Photothermal Regulation Devices

Yong Ouyang, Haining Ji\*, Yi Wang, Yongxing Chen, Jundong Tao

School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 25<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Photothermal regulation devices effectively manage the surface or internal temperature of devices by regulating their optical performances, thereby improving energy utilization efficiency. Intelligent thermal regulation devices and thermochromic smart windows are the most common photothermal regulation devices. These devices play an important role in fields such as spacecraft, buildings and automobiles, providing effective solutions for energy conservation, emission reduction, and improved comfort. Based on this, this article reviews the recent research progress of

\*通讯作者。

**photothermal regulation devices in the fields of spacecraft thermal control and smart windows in recent years, summarizes the challenges faced by current research, and looks forward to the potential applications of photothermal regulation devices in the future, aiming to provide reference and inspiration for related research and technological development.**

## Keywords

**Photothermal Regulation Devices, Spacecraft Thermal Regulation, Smart Windows, Energy-Saving**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

光热调控器件通过调节器件的吸收、反射或透过率等，有效管理器件的表面或内部温度，为节能和环保提供了可持续的解决方案，已在多个领域展现出了其独特的应用价值[1] [2] [3] [4]。目前，光热调控器件在智能窗和航天器热控等领域的应用尤为引人关注，其应用前景备受瞩目。在智能窗领域，光热调控器件的应用推动了建筑节能和舒适度的提高。同时，在航天器热控领域，光热调控器件的应用则是确保航天器在极端环境下的正常运行，实现对其温度的控制，保证内部设备的稳定工作和航天任务的顺利执行。因此，深入研究光热调控器件在智能窗和航天器热控领域的应用，不仅有助于推动建筑节能和舒适度的提升，同时也能够促进航天技术的发展与进步。

航天器在太空中运行时，面临着极端的温度条件，对其热控系统提出了严峻挑战。长期以来，科学家们一直在努力研究和开发能够有效控制航天器温度的热控技术。传统的航天热控技术包括表面涂覆和增加隔热材料[5] [6] [7]等。表面涂覆是通过选择合适的材料和颜色来调节热量的吸收和反射，从而降低航天器表面的温度。增加隔热材料能够在航天器外部形成隔热层，减少热量向内部传导，保护航天器内部设备。然而，这些传统技术存在一个共同的限制是其红外发射率无法调整，导致航天器的子系统需要大量的热补偿功率来维持内部温度的稳定，严重限制了航天器的寿命和可靠性[8]。因此，具有可调发射率的智能热控技术成为了当前航天热控技术的研究重点。根据国内外研究现状，目前发射率可调技术可分为两大类：主动型和被动型[9]-[13]。主动型通常需要外部能量或人为控制来实现发射率的调节，而被动型则是指利用材料本身的特性或结构来实现发射率的调控，无需外部干预。这些技术的发展对于改善航天器的热控性能，提高其寿命和可靠性具有重要意义。

智能窗是一种由玻璃和可响应外界刺激的调光材料组成的复合器件，能够在外界刺激或人为主动控制下动态调整对太阳光的透射、反射和吸收，从而有效降低建筑能耗[14] [15]。根据外界刺激不同，智能窗可以分为电致变色[16] [17] [18]、光致变色[19] [20] [21]和热致变色智能窗[22] [23]。其中，具备自动调控功能的热致变色智能窗凭借其出色的节能效果受到广泛关注。当外界环境温度发生变化时，热致变色智能窗中的调光材料会因温度变化而改变其光学性质，进而对太阳光选择性透过。这种特性有助于降低建筑物内部能量损失，提高能源利用效率。然而，传统的热致变色智能窗仍然存在一些挑战，如低可见光透光率、高相变温度、颜色不美观、太阳能调制能力有限以及较少关注其发射率调节能力等[24]-[30]。为了克服传统热致变色智能窗的限制，学者们致力于设计新型智能窗，以拓展其应用范围。

基于此，本文就光热调控器件在这两个领域的最新研究进展进行了综述，并探讨了其未来发展趋势

和面临的挑战。

## 2. 智能热控器件的研究进展

### 2.1. 主动型智能热控器件

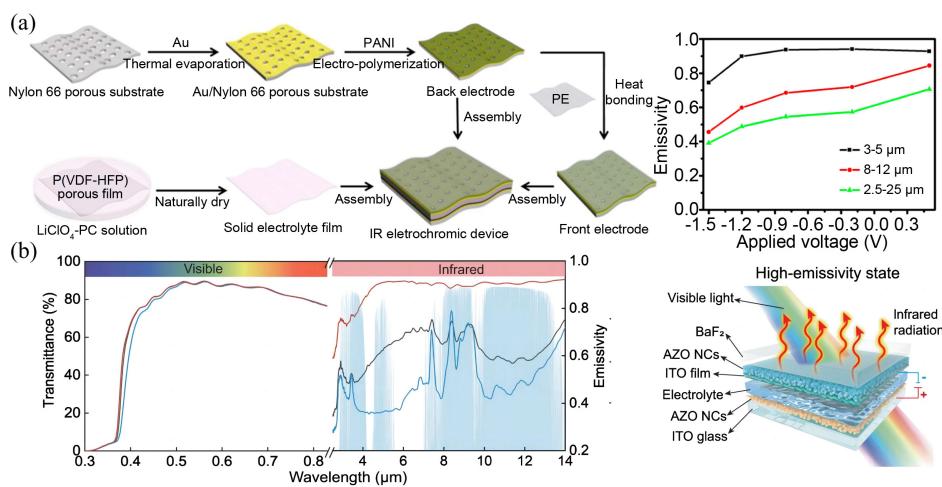
主动型智能热控器是一种自适应性器件，能够根据环境温度的变化主动调节自身的发射率。其工作原理基于对环境温度的实时感知和响应，通过内置的控制算法或外部驱动信号，实现对发射率的快速、精准调控，以满足不同场景下的温度控制需求，在航天器热控中得到了广泛的应用。

#### 2.1.1. 电致变色器件

电致变色器件是一种能够通过施加电场改变其颜色和光学性能的器件[31][32][33]。这种改变可以导致材料对特定波长的光吸收增加或减少，或者改变其反射率，从而影响其发射率。这种机制使得电致变色器件能够根据外部环境或应用需求，通过调节电场强度自主调控其光学性能，从而实现热控功能。

Tian [32]等采用了电化学沉积法，在金/多孔柔性衬底上合成了掺杂十二烷基苯磺酸(DBSA)的聚苯胺(PANI)薄膜。这种薄膜被用作电致变色器件的前后电极，并将固体聚合物电解质薄膜用作两个电极之间的中间层，形成了一种夹层结构器件，如图 1(a)所示。随着施加电压的增加，该器件的发射率调节能力( $\Delta\varepsilon$ )表现出了从正向到负向的反转趋势。在  $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim12\text{ }\mu\text{m}$  和  $2.5\sim25\text{ }\mu\text{m}$  三个波段范围内，该器件的发射率调节能力分别为  $0.183$ 、 $0.388$  和  $0.315$ 。这种电致变色器件在军事伪装和航天器热控等方面具有相当大的应用潜力，但目前仍然存在发射率调节能力过低的问题。

为了拓展电致变色器件的应用范围，学者们进一步设计并研究了兼具高发射率调节能力与高可见光透过率的器件。Jia [34]等设计了一种基于掺铝氧化锌(AZO)纳米晶体(NCs)的全透明动态红外发射器(TDIE)调节器，如图 1(b)所示。该器件可以通过调节 AZO NCs 表面耗尽层的载流子浓度，增加或降低 AZO NCs 的表面等离子共振的吸收强度，从而对发射率进行调控。在  $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$  和  $7.5\sim13\text{ }\mu\text{m}$  大气窗口范围内，该 TDIE 调节器的发射率调节能力分别为  $0.51$  和  $0.41$ ，同时可见光透过率保持在  $84.7\%$ 。



**Figure 1.** (a) Schematic diagram of the fabrication process for DBSA doped-PANI porous film and electrochromic device, the evolution of emissivity in the wavelength ranges of  $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $8\sim12\text{ }\mu\text{m}$  and  $2.5\sim25\text{ }\mu\text{m}$  versus applied voltage [32]; (b) Transmittance and emissivity spectra of TDIE regulators at various applied voltages, schematic diagram of the TDIE regulator structure [34]

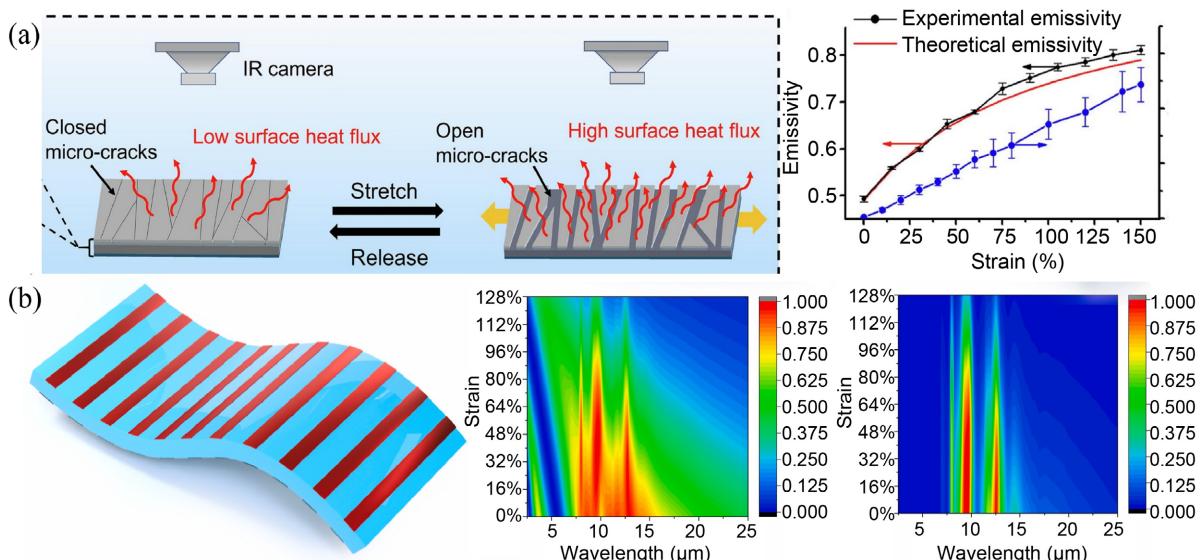
**图 1.** (a) DBSA 摻杂 PANI 的多孔薄膜和电致变色器件的制备工艺示意图，发射率在  $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim12\text{ }\mu\text{m}$  和  $2.5\sim25\text{ }\mu\text{m}$  的波长范围内随施加电压的变化[32]；(b) TDIE 调节器在不同施加电压下的透过率和发射率光谱，TDIE 调节器结构示意图[34]

### 2.1.2. 机械应变器件

机械应变器件是一类具有弹性特性的器件，其主要特点是能够在外部施加力或变形后快速恢复原状。这些器件通常采用弹性材料或特殊结构设计，包括聚二甲基硅氧烷(PDMS)、介电弹性体、液晶弹性体、橡胶、水凝胶和纤维素等材料。由于这些材料可通过简单的机械应力调节其光学性能，因此被广泛应用于医疗、生物科学、机器人技术和航天器热控等领域。

Zeng [35]提出了一种新型仿头足类动物的可逆热调制系统，该系统由一个具有低发射率( $\epsilon = 0.49$ )的热辐射屏蔽刚性薄膜和一个具有高发射率( $\epsilon = 0.98$ )的软基底组成。该系统能够通过拉伸或收缩实现发射率调节，在机械应变下实现高发射率状态，并在去除机械应变后恢复到低发射率状态，如图 2(a)所示。根据实验结果，该系统在 60%、105% 和 150% 的应变下，分别具有 0.68、0.77 和 0.81 的发射率。在 150% 的应变范围内，发射率调节范围可达 0.32。尽管该系统能够通过软基底的拉伸和收缩实现发射率的调节，但其存在发射率调节能力过低的问题，需要进一步进行优化。

基于此，本课题组[36]提出了一种由二氧化钒(VO<sub>2</sub>)、PDMS 和银组成的辐射冷却器，如图 2(b)所示。PDMS 的可拉伸性使得该器件能够通过施加不同水平的应力来实现发射率的调节。在高温状态下，对器件施加拉应力会导致吸收峰的降低，但对器件发射率特性的影响可以忽略不计。在低温状态下，VO<sub>2</sub> 处于绝缘状态，器件的光损耗主要取决于 PDMS 层。拉应力引起的器件厚度减小直接影响了 PDMS 层的光吸收能力，导致器件发射率整体降低。该器件采用 PDMS 材料做弹性基底，增强了器件的灵活性和可控性，并且在拉应力的作用下，实现了高温高发射率，低温低发射率的智能热控能力，在热伪装和航天器热控等领域具有潜在应用。



**Figure 2.** (a) Schematic diagram of the thermal modulation systems, experimental and theoretical emissivity spectra [35]; (b) Schematic diagram of the radiative cooler structure, the influence of stretching and shrinking on the emissivity spectra at high and low temperatures [36]

**图 2.** (a) 热调制系统示意图，实验和理论发射率光谱[35]；(b) 辐射冷却器结构示意图，拉伸和收缩对高温和低温状态下发射率光谱的影响[36]

### 2.2. 被动型智能热控器件

被动型智能热控器件是一种基于环境温度的变化，通过自动调节自身发射率来实现对热量控制的器件。这种器件不依赖外部驱动信号，而是根据环境条件自主作出响应，从而有效地调节热量的传输和产

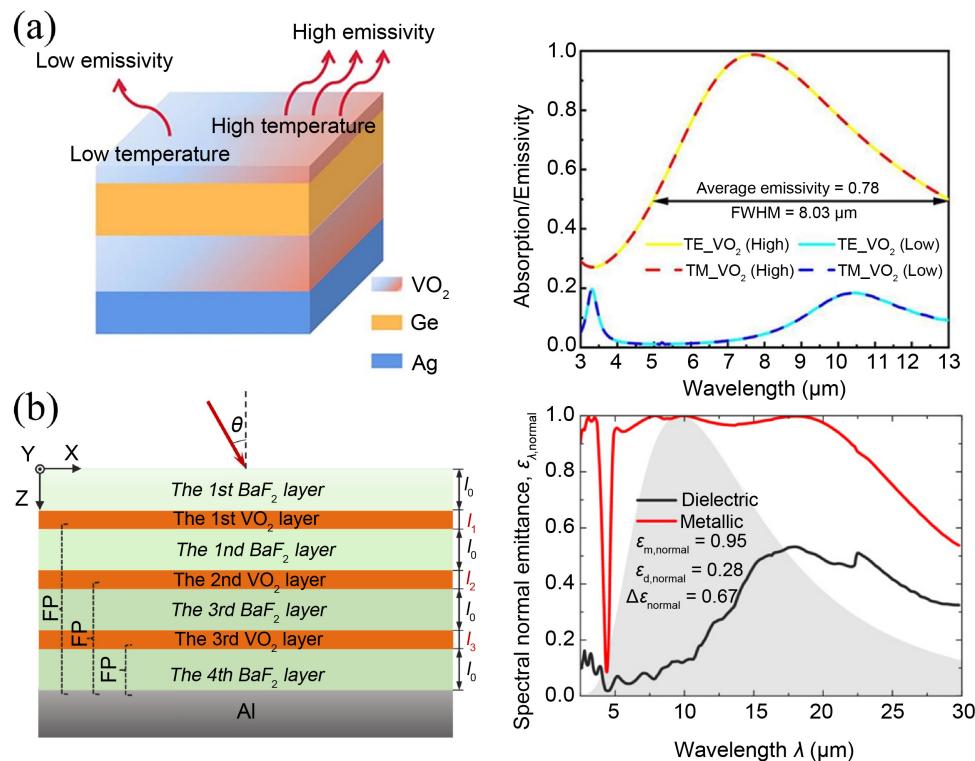
生。相较传统的主动型热控器件，被动型智能热控器件无需复杂的控制电路、驱动装置以及能源供给系统，具有更为简洁高效的设计。这种器件有望应用于航天器等空间探测设备，也能在地球各种环境条件下发挥重要作用，为人类科学的研究和工程实践提供更为可靠和智能的热控解决方案。

### 2.2.1. 基于二氧化钒的被动型智能热控器件

$\text{VO}_2$ 是一种热致变色材料，其在  $68^\circ\text{C}$ 时会发生由低温介电态向高温金属态的快速可逆转变，导致其光学、电学和磁场性质发生突变[37]-[43]。在单层  $\text{VO}_2$  薄膜中，当厚度超过一定值时，其表现出高温低发射率、低温高发射率的特性。通过设计法布里珀罗谐振器结构(由  $\text{VO}_2$ /介质层/高反射基底组成)，可以实现相反的特性，广泛应用于热控器件中[44]。

Liang [45]等设计了一种复合多层结构，由银、 $\text{VO}_2$ 、锗和 $\text{VO}_2$ 依次叠加排列组成，如图 3(a)所示。在这个结构中，当银层厚度为  $10\text{ nm}$ ，底层  $\text{VO}_2$  厚度为  $320\text{ nm}$ ，锗层厚度为  $350\text{ nm}$ ，顶层  $\text{VO}_2$  厚度为  $10\text{ nm}$  时，高温发射率为  $0.78$ ，低温发射率为  $0.10$ 。这种简单易制备的多层结构设计，呈现出优异的发射率调节性能。

Xie [46]等提出了一种叠加型的热致变色复合薄膜，该薄膜以铝为基底，由氟化钡和  $\text{VO}_2$  周期叠加而成，如图 3(b)所示。值得注意的是，薄膜的发射率可通过调整其膜层厚度进行灵活控制。此外，薄膜中的最外层氟化钡层被设计为抗反射层，以进一步提升光的吸收效率。这种设计使得该薄膜在红外发射方面表现接近完美，并具有高度可调性。当薄膜的厚度  $l_0 = 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $l_1 = l_2 = 10\text{ nm}$ 、 $l_3 = 30\text{ nm}$  时，其高温发射率达到了  $0.95$ ，发射率调节能力为  $0.67$ 。



**Figure 3.** (a) Schematic diagram of intelligent thermal control emitter structure, absorbance spectra at high and low temperatures [45]; (b) Schematic diagram of superposed F-P composite film structure based on  $\text{VO}_2$ , emissivity spectra at high and low temperatures of composite films with thicknesses  $l_0 = 1.5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $l_1 = l_2 = 10\text{ nm}$ , and  $l_3 = 30\text{ nm}$  [46]

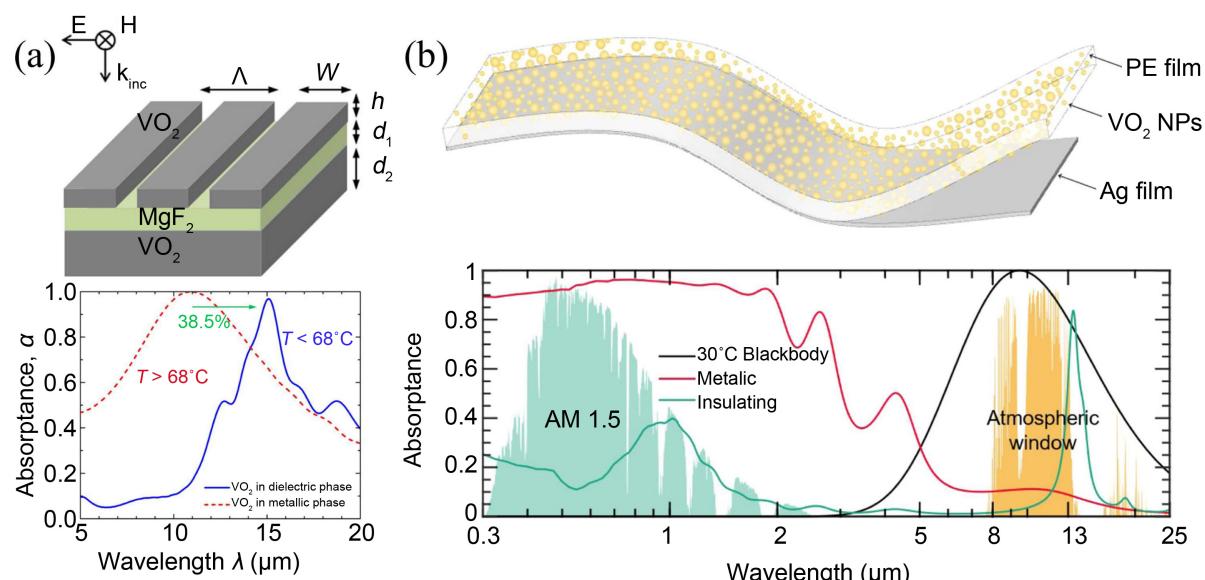
**图 3.** (a) 智能热控发射器结构示意图，高温和低温下的吸收率光谱[45]；(b) 基于  $\text{VO}_2$  的叠加 F-P 复合薄膜结构示意图，在复合薄膜的厚度  $l_0 = 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $l_1 = l_2 = 10\text{ nm}$ 、 $l_3 = 30\text{ nm}$  时，高温和低温下的发射率光谱[46]

### 2.2.2. 基于超材料的被动型智能热控器件

超材料是一种具有特殊结构和性质的人工合成材料，其结构尺度通常在微观或纳米尺度范围内。其设计和制备旨在实现对电磁波的特殊控制，包括反射、透射、吸收和散射等，以实现一系列新颖的功能和应用。

Wang [47]等设计了一种可调谐的红外超材料，在 $\text{VO}_2$ 的相变过程中实现共振波长的可调谐。研究团队利用这一特性设计了一种可调谐吸收器，该器件由 $\text{VO}_2$ 周期光栅结构、氟化镁和 $\text{VO}_2$ 组成，如图4(a)所示。在高温下，该超材料在波长为 $10.9 \mu\text{m}$ 时表现出宽吸收带，吸收率接近100%。然而，在低温下，吸收带变窄且向 $15.1 \mu\text{m}$ 的峰值波长移动，导致相对38.5%的峰值波长偏移，从而实现了发射率的调控。通过微结构设计，该器件成功实现了在低温下吸收峰的偏移，在一定程度上降低了低温发射率。然而，该设计存在发射率调节能力较低的问题，需要进一步改进以提高其调节性能。

通过将 $\text{VO}_2$ 与其它材料进行复合改性，也能提高 $\text{VO}_2$ 的光学性能。Yan [48]等基于一种相变超材料，设计了一种能够调节发射率的动态热调节器。该器件由嵌入 $\text{VO}_2$ 纳米颗粒的聚乙烯(PE)薄膜和高反射银(Ag)基底组成，如图4(b)所示。通过调整 $\text{VO}_2$ 纳米颗粒的体积百分比和聚乙烯的厚度，可以改变器件的光学性能。在 $\text{VO}_2$ 高温相变之后，该器件发射率可从0.18自动调节至0.9。该器件利用嵌入 $\text{VO}_2$ 纳米颗粒改变其光学性能，显示出较高的发射率调节能力。



**Figure 4.** (a) Schematic diagram of tunable absorbers structure, absorbance spectra at high and low temperatures [47]; (b) Schematic diagram of dynamic thermal regulators, absorbance spectra at high and low temperatures [48]

**图 4.** (a) 可调谐吸收器结构示意图，高温和低温下的吸收率光谱[47]；(b) 动态热调节器结构示意图，高温和低温下的吸收率光谱[48]

### 3. 热致变色智能窗的研究进展

热致变色智能窗是一种利用热致变色材料，根据环境温度的变化自动调节其透光性能的器件。这种器件在不需要外部驱动力或人工干预的情况下，可根据室内外温度的变化智能地调整透光度，以实现节能和舒适的效果。其工作原理是利用热致变色材料在特定温度下结构改变的特性，当温度达到阈值时，热致变色材料会改变其光学性质，如透明度和反射率，从而调节室内光线和热量。近年来，研究者致力于改善热致变色智能窗的实用性和性能，主要集中在降低相变阈值、改善颜色美观度、提高太阳能调制

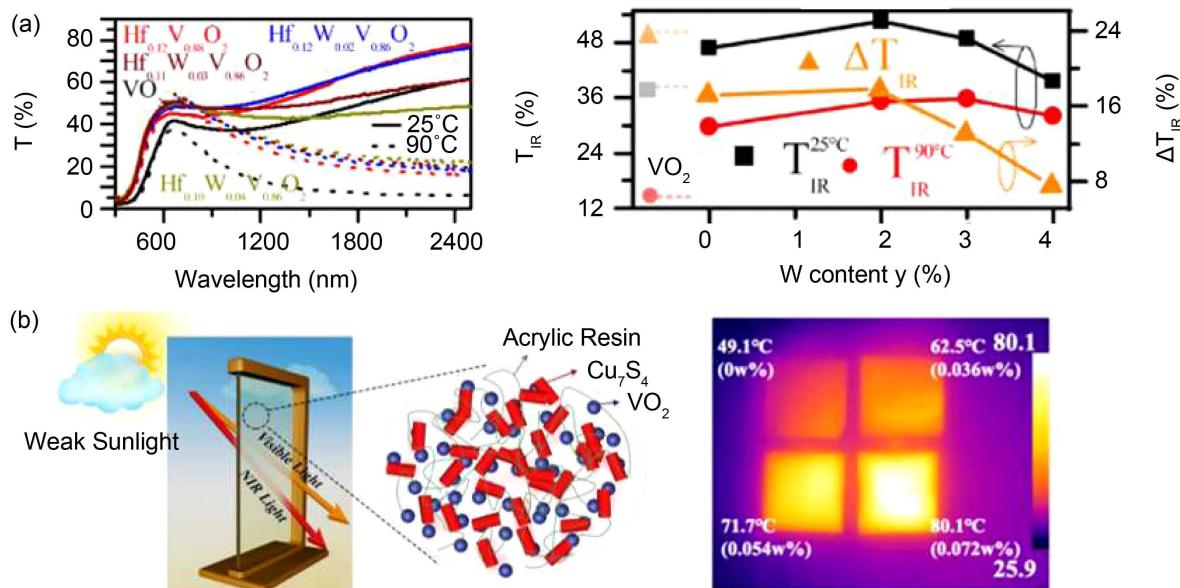
能力以及实现光热协同调控等方面。

### 3.1. 降低相变阈值

在热致变色智能窗的研究中，研究者们利用元素掺杂等技术来调节材料的相变温度，以确保其更好地适应实际应用中的温度变化。同时，他们还研究了通过控制材料的升温速率来改善传统热致变色智能窗存在的相变温度过高等问题。这些方法的应用有助于提高窗户的实用性和性能，为节能和舒适性提供更有效的解决方案。

Wang [49]等通过铪-钨(Hf-W)共掺杂法对 $\text{VO}_2$ 进行改性，在蓝宝石基底上制备了高质量的 $\text{Hf}_x\text{W}_y\text{V}_{1-x-y}\text{O}_2$ 薄膜。经过掺杂处理后，薄膜的可见光透过率为41.1%，近红外调制能力为13.1%，相变温度为38.9°C，如图5(a)所示。该研究证实了通过Hf和W的共掺杂， $\text{VO}_2$ 薄膜可以在阳光直射下实现相变，并保持较好的光学性能。该掺杂材料可被广泛应用于 $\text{VO}_2$ 基智能窗领域，实现可调节透光性能。

另外，本课题组[50]通过将光热材料 $\text{Cu}_7\text{S}_4$ 与 $\text{VO}_2$ 薄膜相结合，成功制备了一种太阳能驱动的高性能 $\text{VO}_2$ 热致变色智能窗复合薄膜，如图5(b)所示。该复合薄膜充分利用了 $\text{Cu}_7\text{S}_4$ 的局域表面等离子体共振特性，使其能够在阳光照射下通过光热效应将光能转化为热能，从而促进 $\text{VO}_2$ 在室温下实现快速相变。研究表明，该复合薄膜在低温和高温环境下可见光透过率分别为60.8%和55.9%时，同时具有较高的太阳能调制能力，达到12.3%。通过将 $\text{Cu}_7\text{S}_4$ 与 $\text{VO}_2$ 相结合，该薄膜能够利用 $\text{Cu}_7\text{S}_4$ 的光热效应，将薄膜快速加热至72.1°C，从而促使 $\text{VO}_2$ 的相变。该研究为热致变色材料的快速相变提供了新的思路和方法，有助于推动热致变色智能窗技术的进步。



**Figure 5.** (a) Transmittance spectra of  $\text{Hf}_x\text{W}_y\text{V}_{1-x-y}\text{O}_2$  film and pure  $\text{VO}_2$  film, the near-infrared modulation ability of  $\text{Hf}_x\text{W}_y\text{V}_{1-x-y}\text{O}_2$  film [49]; (b) Schematic diagram of  $\text{Cu}_7\text{S}_4/\text{VO}_2$  composite film, infrared thermal images at different concentrations of  $\text{Cu}_7\text{S}_4$  [50]

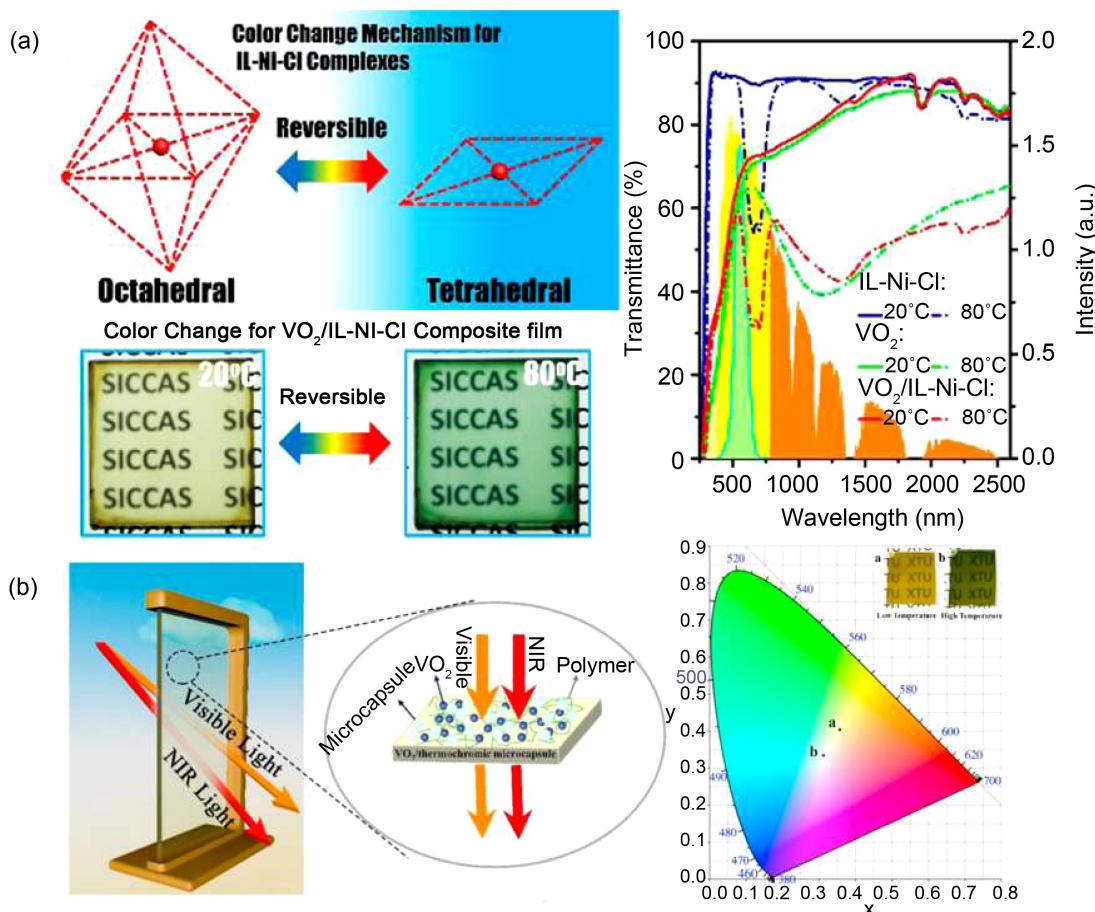
**图 5.** (a)  $\text{Hf}_x\text{W}_y\text{V}_{1-x-y}\text{O}_2$  薄膜和纯  $\text{VO}_2$  薄膜的透过率光谱,  $\text{Hf}_x\text{W}_y\text{V}_{1-x-y}\text{O}_2$  薄膜的近红外调制能力[49]; (b)  $\text{Cu}_7\text{S}_4/\text{VO}_2$  复合薄膜的结构示意图, 不同  $\text{Cu}_7\text{S}_4$  浓度下的红外热图像[50]

### 3.2. 改变其不美观的颜色

将具有优异光热性能的材料与热致变色材料结合，不仅可以提高热致变色智能窗的光学性能，还可

以提升其美观度，增加其实用价值。

Zhu [51]等将  $\text{VO}_2$  纳米粉体与金属离子配位基离子液体(IL-Ni-Cl)复合，成功合成了  $\text{VO}_2/\text{IL-Ni-Cl}$  复合薄膜。这种复合使薄膜的光学性能得到了显著提升，其可见光透过率达到了 66.44%，且太阳能调制能力高达 26.45%，如图 6(a)所示。此外，当环境温度发生变化时，薄膜的颜色会由浅棕色变为深绿色。这种优异的光学性能使得复合薄膜在智能窗户的功能展示和应用方面具备了显著的优势。通过无机 - 有机复合改性，可以调控  $\text{VO}_2$  材料的晶体结构和成分，从而增强材料的稳定性和耐久性，延长材料的使用寿命。此外，这种改性方法还大大提高了材料的可见光透过率和太阳能调制能力。



**Figure 6.** (a) Changes in the structure of  $\text{VO}_2/\text{IL-Ni-Cl}$  composite films, color changes at different temperatures, and transmittance spectra at 20°C and 80°C [51]; (b) Schematic diagram of a novel switchable cold/warm-tone  $\text{VO}_2$ -based smart window composite films, color range before and after phase transition [52]

**图 6.** (a)  $\text{VO}_2/\text{IL-Ni-Cl}$  复合薄膜结构的变化，不同温度下颜色的变化，20°C 和 80°C 下的透过率光谱[51]；(b) 新型冷/暖色调可切换的  $\text{VO}_2$  基智能窗复合薄膜结构示意图，相变前后的颜色范围[52]

本课题组[52]也成功设计并制备了一种新的冷/暖色调可切换的  $\text{VO}_2$  基智能窗复合薄膜。该复合薄膜通过在  $\text{VO}_2$  中复合热致变色微胶囊实现了冷/暖色调的切换，如图 6(b)所示。复合薄膜具有双波段调节能力，能够同时调控可见光和近红外光，表现出优异的光学性能。在低温下，其可见光透过率为 48.70%，且太阳能调节能力高达 18.92%。此外，该复合薄膜还能在不同温度下实现冷/暖颜色的切换。这种冷/暖色调可切换的  $\text{VO}_2$  智能窗复合薄膜不仅可调节太阳能输入，还能改善居民的舒适感和情绪。这一研究成果为节能窗技术的发展提供了重要的突破，有望为人们创造更加舒适宜居的生活环境。

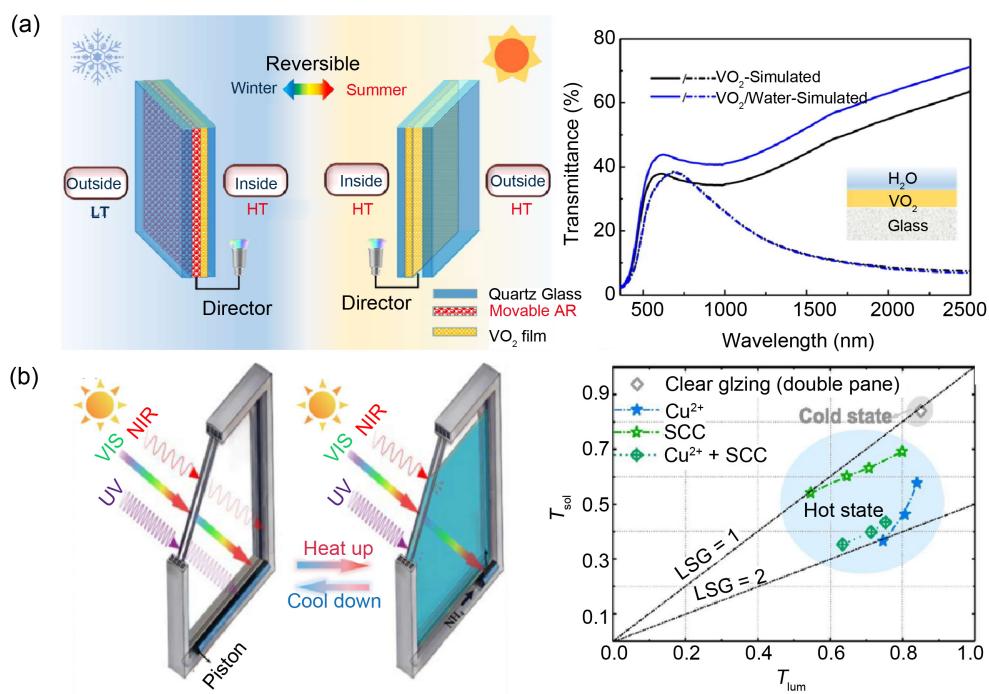
### 3.3. 提高太阳能调制能力

太阳能调制能力是评价智能窗性能的重要指标之一。微结构设计和引入具有优异光热性能的材料是常见的提高太阳能调制能力的方法。微结构设计可以通过在智能窗表面设计微观结构，实现对太阳光的散射、反射或吸收，从而调节窗户的透光性。这种设计可以控制室内的光照强度和温度，减少热量的传输，以提高节能效果。

另外，引入具有优异光热性能的材料也是提高太阳能调制能力的一种方法。这些材料在受到太阳光照射时能够吸收光能并转化为热能，从而减少室内的光照和热量，进而降低能耗，实现更好的节能效果。

Xu [53]等基于  $\text{VO}_2$  设计了一种具有动态防反射(AR)涂层的热致变色复合薄膜，如图 7(a)所示。当室内外温差较大时，溶剂蒸汽会均匀附着在冷侧玻璃表面，形成类似于冬季窗户表面雾化的效果，从而形成  $\text{VO}_2$  薄膜的防反射层。然而，当室内外温差减小时，防反射层就会消失。该设计选择廉价、环保的水作为可移动的动态防反射层，并通过液体和气体的转换实现了两相智能调节。这种设计显著提高了  $\text{VO}_2$  薄膜的光学性能，使其具有较高的可见光透过率(40.4%)和优良的太阳能调制能力(20.8%)。该复合薄膜不仅具有优异的光学性能，而且具备节能和环保的特点，对于推动热致变色智能窗的发展至关重要。

Pu [54]等利用氨水溶解度随温度升高而降低的特性，设计一种新型的由氨水压力的改变驱动变色行为动态智能窗(APPS)。它具备在可见光和近红外双波段进行调节的能力。该智能窗通过  $\text{Cu}^{2+}$  和叶绿素铜钠(SCC)溶液对光谱进行吸收，在高温时能够实现大于 50% 的可见光透过率，并具备 40%~70% 的太阳能调制能力，如图 7(b)所示。此外，该智能窗还具有较低的相变温度范围( $24^\circ\text{C}$ ~ $36^\circ\text{C}$ )，解决了目前热致变色智能窗存在的多个问题，并为智能窗的发展提供了新思路，有望为下一代绿色建筑的发展提供智能和可持续的解决方案，进一步推动建筑行业朝着更加环保和高效的方向发展。



**Figure 7.** (a) Schematic diagram of  $\text{VO}_2/\text{AR}$  thermochromic composite films, optical properties of  $\text{VO}_2/\text{H}_2\text{O}$  composite films and pure  $\text{VO}_2$  films [53]; (b) Schematic diagram of the APPS smart window, transmittance spectra at high and low temperatures [54]

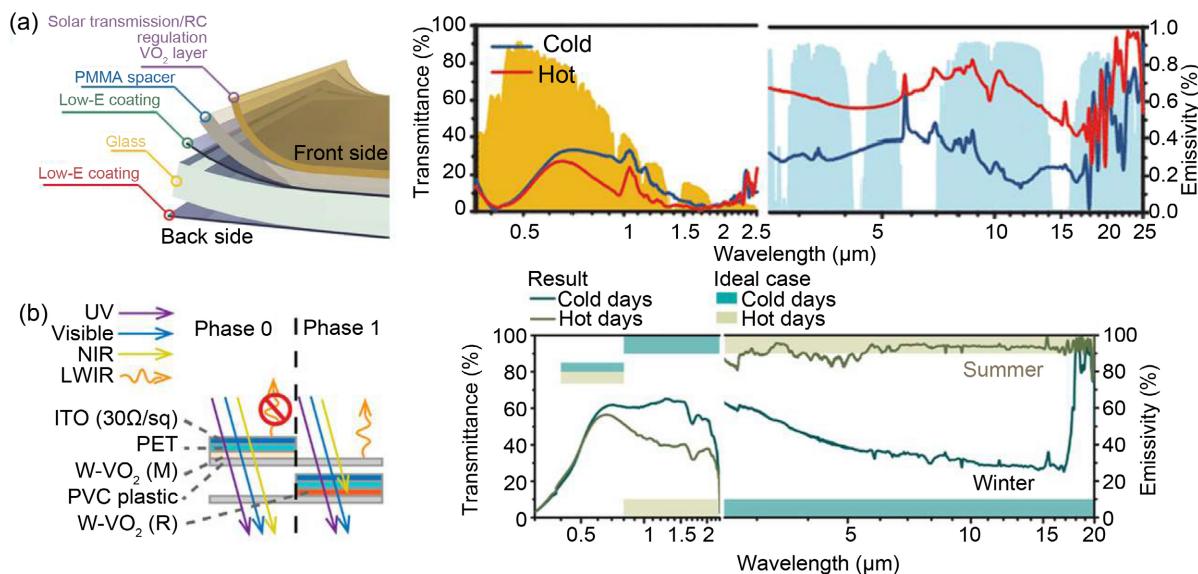
**图 7.** (a)  $\text{VO}_2/\text{AR}$  热致变色复合薄膜示意图， $\text{VO}_2/\text{H}_2\text{O}$  复合薄膜和纯  $\text{VO}_2$  薄膜的光学性能[53]；(b) APPS 智能窗示意图，高温和低温下的透过率光谱[54]

### 3.4. 光热协同调控研究

传统的热致变色智能窗通常只关注于波长为  $0.3\text{~}2.5\ \mu\text{m}$  的太阳能调制，而对波长为  $2.5\text{~}25\ \mu\text{m}$  的发射率调节关注较少。一个理想的智能窗不仅需要高的可见光透过率和太阳能调制能力，还需要优异的发射率调节能力，这样的智能窗能根据环境温度变化自动调节发射率，有效控制室内温度，从而减少能源消耗。

基于此理念，Wang [55]等人设计并制备了一种基于  $\text{VO}_2$  的热致变色智能窗复合薄膜，其结构包括  $\text{VO}_2$  涂层、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)介质层以及两层氧化铟锡(ITO)涂层，如图 8(a)所示。该复合薄膜主要基于  $\text{VO}_2/\text{PMMA}/\text{ITO}$  形成的法布里 - 珀罗谐振器，在低温下对红外具有低谐振，高温下由于  $\text{VO}_2$  的绝缘体到金属的转变，显示出强烈的法布里 - 珀罗谐振效应，从而大大增强了红外吸收。此外，该智能窗在发射率调节能力为 0.40 的同时，其可见光透过率为 27.8%，太阳能调制能力为 9.3%。

在此基础上，Ke [56]等又设计了一种可重构的编织表面，其结构主要由 ITO、掺钨的  $\text{VO}_2$  以及聚氯乙烯(PVC)组成，如图 8(b)所示。在低温下，外层的 ITO 赋予其低发射率特性。而在高温下， $\text{VO}_2$  发生相变成金属态，形成法布里 - 珀罗谐振腔，从而实现高发射率。这种编织表面不仅具有较高的热辐射调节能力(0.57)，而且在可见光波段具有高透过率(50%)。此外，该设计不仅可应用于窗户，而且还可以应用到墙壁/屋顶中，为提高建筑的节能效率提供了一种新的途径。



**Figure 8.** (a) Schematic diagram of thermochromic smart window composite films, transmittance and emissivity spectra at high and low temperatures [55]; (b) Schematic diagram of interwoven surface structure, transmittance and emissivity spectra at high and low temperatures [56]

**图 8.** (a) 热致变色智能窗复合薄膜示意图，高温和低温下的透过率和发射率光谱[55]；(b) 编织表面的结构示意图，高温和低温下的透过率和发射率光谱[56]

## 4. 总结和展望

本文从当前航天器热控的发射率调节技术和热致变色智能窗面临的挑战出发，综述了光热调控器件的最新研究进展。在航天器热控方面，总结了主动型和被动型智能热控器件的研究进展。在热致变色智能窗方面，总结了目前提高其光学性能和实用性的四个方面——降低相变阈值、改变其不美观的颜色、提高太阳能调制能力和光热协同调控研究等。通过光热协同调控可实现对太阳光波段和热辐射波段的双

波段调制，达到更高节能效果。为了更好地实现节能效果并满足商业化需求，未来的研究可以从以下两个方面展开：

- 1) 目前仍难以平衡太阳能调制能力和发射率调节能力，以达到最佳节能效果。因此，开发一种新型光热调控器件实现更佳双波段调节能力，从而达到更好的节能效果是十分必要的。
- 2) 为了推动光热调控器件的商业化，需要确保器件具备良好的机械效能、低成本、长期稳定性以及易推广性。因此，降低器件成本、提升器件稳定性和光学性能是促进商业化生产的关键因素。

## 基金项目

国家自然科学基金(51902276); 湖南省自然科学基金(2019JJ50583, 2023JJ30585); 湖南省教育厅科研基金(21B0111); 湖南省研究生创新基金(QL20220158)。

## 参考文献

- [1] 李龙, 徐洪波, 任飞飞, 等. 光子晶体光热调控研究[J]. 中国材料进展, 2019, 38(4): 352-358+341.
- [2] Dou, S., Xu, H., Zhao, J., et al. (2021) Bioinspired Microstructured Materials for Optical and Thermal Regulation. *Advanced Materials*, **33**, Article ID: 2000697. <https://doi.org/10.1002/adma.202000697>
- [3] Lin, C., Hur, J., Chao, C.Y.H., et al. (2022) All-Weather Thermochromic Windows for Synchronous Solar and Thermal Radiation Regulation. *Science Advances*, **8**, Eabn7359. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn7359>
- [4] Zhu, L., Tian, L., Jiang, S., et al. (2023) Advances in Photothermal Regulation Strategies: From Efficient Solar Heating to Daytime Passive Cooling. *Chemical Society Reviews*, **52**, 7389-7460. <https://doi.org/10.1039/D3CS00500C>
- [5] Prosuntsov, P. and Praheeva, A. (2021) Design of Thermal Insulation Based on Open-Cell Carbon Materials for Spacecraft. *Materials Today: Proceedings*, **38**, 2019-2024. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.032>
- [6] Doherty, K.A.J., Dunne, C.F., Norman, A., et al. (2016) Flat Absorber Coating for Spacecraft Thermal Control Applications. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **53**, 1035-1042. <https://doi.org/10.2514/1.A33490>
- [7] Shirshneva-Vaschenko, E.V., Shirshnev, P.S., Snezhnaya, Z.G., et al. (2019) Zinc Oxide Aluminum Doped Slabs for Heat-Eliminating Coatings of Spacecrafts. *Acta Astronautica*, **163**, 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.07.005>
- [8] Grob, L.M. and Swanson, T.D. (2000) Parametric Study of Variable Emissivity Radiator Surfaces. *AIP Conference Proceedings*, **504**, 809-814. <https://doi.org/10.1063/1.1302579>
- [9] Xiao, L., Ma, H., Liu, J., et al. (2015) Fast Adaptive Thermal Camouflage Based on Flexible VO<sub>2</sub>/Graphene/CNT Thin Films. *Nano Letters*, **15**, 8365-8370. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04090>
- [10] Du, K.-K., Li, Q., Lyu, Y.-B., et al. (2017) Control over Emissivity of Zero-Static-Power Thermal Emitters Based on Phase-Changing Material GST. *Light: Science & Applications*, **6**, E16194. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.194>
- [11] Xu, G., Zhang, L., Wang, B., et al. (2020) A Visible-to-Infrared Broadband Flexible Electrochromic Device Based Polyaniline for Simulta-Neously Variable Optical and Thermal Management. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **208**, Article ID: 110356. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110356>
- [12] Sun, Y., Chang, H., Hu, J., et al. (2021) Large-Scale Multifunctional Carbon Nanotube Thin Film as Effective Mid-Infrared Radiation Modulator with Long-Term Stability. *Advanced Optical Materials*, **9**, Article ID: 2001216. <https://doi.org/10.1002/adom.202001216>
- [13] Inoue, T., Zoysa, M.D., Asano, T., et al. (2014) Realization of Dynamic Thermal Emission Control. *Nature Materials*, **13**, 928-931. <https://doi.org/10.1038/nmat4043>
- [14] Ming, Y., Sun, Y., Liu, X., et al. (2022) Optical Evaluation of a Smart Transparent Insulation Material for Window Application. *Energy Conversion and Management: X*, **16**, Article ID: 100315. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100315>
- [15] Huang, Z., Chen, S., Lv, C., et al. (2012) Infrared Characteristics of VO<sub>2</sub> Thin Films for Smart Window and Laser Protection Applications. *Applied Physics Letters*, **101**, Article ID: 191905. <https://doi.org/10.1063/1.4766287>
- [16] Zeng, J., Wang, Y., Rajan, K., et al. (2021) Transparent-to-Black Electrochromic Smart Windows Based on N,N,N',N'-Tetraphenylbenzidine Derivatives and Tungsten Trioxide with High Adjustment Ability for Visible and Near-Infrared Light. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **226**, Article ID: 111070. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111070>

- [17] Yang, P., Sun, P. and Mai, W. (2016) Electrochromic Energy Storage Devices. *Materials Today*, **19**, 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.007>
- [18] Wang, J.-L., Sheng, S.-Z., He, Z., et al. (2021) Self-Powered Flexible Electrochromic Smart Window. *Nano Letters*, **21**, 9976-9982. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c03438>
- [19] Junsukhon, A. and Ngaotrakaniwat, P. (2019) Effect of CuS:WO<sub>3</sub> Ratio on the Photochromic Properties of CuS-WO<sub>3</sub> Film. *Materials Today: Proceedings*, **17**, 1780-1786. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.212>
- [20] Wang, L., Liu, Y., Zhan, X., et al. (2019) Photochromic Transparent Wood for Photo-Switchable Smart Window Applications. *Journal of Materials Chemistry C*, **7**, 8649-8654. <https://doi.org/10.1039/C9TC02076D>
- [21] Kim, C.W., Santoro, E.G., Pawar, A.U., et al. (2023) Swift Photochromic Smart Window Based on Plasmonic Yolk-Shell Nanophosphors. *Advanced Optical Materials*, **11**, Article ID: 2202171. <https://doi.org/10.1002/adom.202202171>
- [22] Tian, J., Peng, H., Du, X., et al. (2021) Hybrid Thermochromic Microgels Based on UCNPs/PNIPAm Hydrogel for Smart Window with Enhanced Solar Modulation. *Journal of Alloys and Compounds*, **858**, Article ID: 157725. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157725>
- [23] Ji, H., Liu, D., Cheng, H., et al. (2018) Vanadium Dioxide Nanopowders with Tunable Emissivity for Adaptive Infrared Camouflage in both Thermal Atmospheric Windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **175**, 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.013>
- [24] Xu, F., Cao, X., Luo, H., et al. (2018) Recent Advances in VO<sub>2</sub>-Based Thermochromic Composites for Smart Windows. *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 1903-1919. <https://doi.org/10.1039/C7TC05768G>
- [25] Zhang, Z., Zhang, L., Zhou, Y., et al. (2023) Thermochromic Energy Efficient Windows: Fundamentals, Recent Advances, and Perspectives. *Chemical Reviews*, **123**, 7025-7080. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00762>
- [26] Ji, C., Wu, Z., Lu, L., et al. (2018) High Thermochromic Performance of Fe/Mg Co-Doped VO<sub>2</sub> Thin Films for Smart Window Applications. *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 6502-6509. <https://doi.org/10.1039/C8TC01111G>
- [27] Hao, Q., Li, W., Xu, H., et al. (2018) VO<sub>2</sub>/TiN Plasmonic Thermochromic Smart Coatings for Room-Temperature Applications. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1705421. <https://doi.org/10.1002/adma.201705421>
- [28] Cao, X., Chang, T., Shao, Z., et al. (2020) Challenges and Opportunities toward Real Application of VO<sub>2</sub>-Based Smart Glazing. *Matter*, **2**, 862-881. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.02.009>
- [29] Chang, T., Zhu, Y., Cao, C., et al. (2021) Multifunctional Flexible Vanadium Dioxide Films. *Accounts of Materials Research*, **2**, 714-725. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00044>
- [30] Wang, S., Zhou, Y., Jiang, T., et al. (2021) Thermochromic Smart Windows with Highly Regulated Radiative Cooling and Solar Transmission. *Nano Energy*, **89**, Article ID: 106440. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106440>
- [31] Demiryont, H. and Moorehead, D. (2009) Electrochromic Emissivity Modulator for Spacecraft Thermal Management. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **93**, 2075-2078. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.02.025>
- [32] Tian, Y., Zhang, X., Dou, S., et al. (2017) A Comprehensive Study of Electrochromic Device with Variable Infrared Emissivity Based on Polyaniline Conducting Polymer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **170**, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.053>
- [33] Chandrasekhar, P., Zay, B.J., Lawrence, D., et al. (2014) Variable-Emissance Infrared Electrochromic Skins Combining Unique Conducting Polymers, Ionic Liquid Electrolytes, Microporous Polymer Membranes, and Semiconductor/Polymer Coatings, for Spacecraft Thermal Control. *Journal of Applied Polymer Science*, **131**, Article No. 40850. <https://doi.org/10.1002/app.40850>
- [34] Jia, Y., Liu, D., Chen, D., et al. (2023) Transparent Dynamic Infrared Emissivity Regulators. *Nature Communications*, **14**, Article No. 5087. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40902-w>
- [35] Zeng, S., Shen, K., Liu, Y., et al. (2021) Dynamic Thermal Radiation Modulators via Mechanically Tunable Surface Emissivity. *Materials Today*, **45**, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.12.001>
- [36] Wang, Y., Ji, H., Chen, Y., et al. (2023) Artificially Adjustable Radiative Cooling Device with Environmental Adaptability. *Ceramics International*, **49**, 40297-40304. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.10.002>
- [37] Guo, R.H., et al. (2022) Phase-Change Materials for Intelligent Temperature Regulation. *Materials Today Energy*, **23**, Article ID: 100888. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100888>
- [38] Cui, Y., Ke, Y., Liu, C., et al. (2018) Thermochromic VO<sub>2</sub> for Energy-Efficient Smart Windows. *Joule*, **2**, 1707-1746. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.06.018>
- [39] Shi, R., Chen, Y., Cai, X., et al. (2021) Phase Management in Single-Crystalline Vanadium Dioxide Beams. *Nature Communications*, **12**, Article No. 4214. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24527-5>
- [40] Liu, D., Ji, H., Peng, R., et al. (2018) Infrared Chameleon-Like Behavior from VO<sub>2</sub>(M) Thin Films Prepared by Trans-

- formation of Metastable VO<sub>2</sub>(B) for Adaptive Camouflage in both Thermal Atmospheric Windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **185**, 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.05.042>
- [41] Li, M., Magdassi, S., Gao, Y., et al. (2017) Hydrothermal Synthesis of VO<sub>2</sub> Polymorphs: Advantages, Challenges and Prospects for the Application of Energy Efficient Smart Windows. *Small*, **13**, Article ID: 1701147. <https://doi.org/10.1002/smll.201701147>
- [42] Chen, Y., Ji, H., Lu, M., et al. (2023) Machine Learning Guided Hydrothermal Synthesis of Thermochromic VO<sub>2</sub> Nanoparticles. *Ceramics International*, **49**, 30794-30800. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.035>
- [43] Ji, H., Liu, D., Cheng, H., et al. (2019) Large Area Infrared Thermochromic VO<sub>2</sub> Nanoparticle Films Prepared by Inkjet Printing Technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **194**, 235-243. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.028>
- [44] Taylor, S., Long, L., Mcburney, R., et al. (2020) Spectrally-Selective Vanadium Dioxide Based Tunable Metafilm Emitter for Dynamic Radiative Cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **217**, Article ID: 110739. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110739>
- [45] Liang, S., Xu, F., Li, W., et al. (2023) Tunable Smart Mid Infrared Thermal Control Emitter Based on Phase Change Material VO<sub>2</sub> Thin Film. *Applied Thermal Engineering*, **232**, Article ID: 121074. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121074>
- [46] Xie, B., Zhang, W., Zhao, J., et al. (2022) VO<sub>2</sub>-Based Superposed Fabry-Perot Multilayer Film with a Highly Enhanced Infrared Emittance and Emittance Tunability for Spacecraft Thermal Control. *Optics Express*, **30**, 34314-34327. <https://doi.org/10.1364/OE.464266>
- [47] Wang, H., Yang, Y. and Wang, L. (2014) Wavelength-Tunable Infrared Metamaterial by Tailoring Magnetic Resonance Condition with VO<sub>2</sub> Phase Transition. *Journal of Applied Physics*, **116**, Article ID: 123503. <https://doi.org/10.1063/1.4896525>
- [48] Yan, C., Wang, Z., Qu, J., et al. (2023) Scalable and Dynamically Passive Thermal Regulation over Solar Wavelengths Enabled by Phase-Transition Metamaterials. *Solar Energy*, **257**, 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.032>
- [49] Wang, X., Chen, L., Lu, H., et al. (2021) Enhancing Visible-Light Transmittance While Reducing Phase Transition Temperature of VO<sub>2</sub> by Hf-W Co-Doping. *Applied Physics Letters*, **118**, Article ID: 192102. <https://doi.org/10.1063/5.0044516>
- [50] Zhao, Y., Ji, H., Ou, Y., et al. (2024) Novel Sunlight-Driven Cu<sub>7</sub>S<sub>4</sub>/VO<sub>2</sub> Composite Films for Smart Windows. *Journal of Materials Chemistry C*, **12**, 2534-2543. <https://doi.org/10.1039/D3TC03774F>
- [51] Zhu, J., Huang, A., Ma, H., et al. (2016) Composite Film of Vanadium Dioxide Nanoparticles and Ionic Liquid-Nickel-Chlorine Complexes with Excellent Visible Thermochromic Performance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 29742-29748. <https://doi.org/10.1021/acsmami.6b11202>
- [52] Ji, H., Zhao, Y., Lu, M., et al. (2023) Novel Warm/Cool-Tone Switchable VO<sub>2</sub>-Based Smart Window Composite Films with Excellent Optical Performance. *Ceramics International*, **49**, 22630-22635. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.073>
- [53] Xu, F., Cao, X., Shao, Z., et al. (2019) Highly Enhanced Thermochromic Performance of VO<sub>2</sub> Film Using “Movable” Antireflective Coatings. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 4712-4718. <https://doi.org/10.1021/acsmami.8b20794>
- [54] Pu, J., Shen, C., Lu, L., et al. (2024) Ammonia Powered Thermal-Responsive Smart Window with Spectral Regulation of Cu<sup>2+</sup> and Sodium Copper Chlorophyllin. *Energy Conversion and Management*, **299**, Article ID: 117815. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117815>
- [55] Wang, S., Jiang, T., Meng, Y., et al. (2021) Scalable Thermochromic Smart Windows with Passive Radiative Cooling Regulation. *Science*, **374**, 1501-1504. <https://doi.org/10.1126/science.abg0291>
- [56] Ke, Y., Li, Y., Wu, L., et al. (2022) On-Demand Solar and Thermal Radiation Management Based on Switchable Interwoven Surfaces. *ACS Energy Letters*, **7**, 1758-1763. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c00419>