

文章编号: 1000-7032(2024)08-1334-09

# 具有可见光透明特性的动态机械响应红外热辐射调制器件

李鑫锋<sup>1,2</sup>, 李龙男<sup>1\*</sup>, 李 炜<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 微纳光子学与材料国际实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于机械响应材料的红外热辐射调制器件具有成本低、结构简单、操作方便等优点。传统基于机械响应的红外热辐射调制器件通常是在弹性基体上构建金属薄膜, 进而通过薄膜层的开裂与闭合实现红外热辐射的动态调制。然而, 传统红外热辐射动态调制器件通常在可见光波段是不透明的, 这极大地限制了其在可见-红外双波段伪装等领域的应用。本研究采用磁控溅射方式在可见-红外宽波段透明弹性聚合物上沉积ITO薄膜, 制备了具有可见光透明、红外波段具有高反射特性的热辐射调制器件。在机械拉伸条件下, 器件在10  $\mu\text{m}$  处的红外反射率调控范围为40%~77%, 550 nm处的可见光透射率大于82%。

**关键词:** 红外调制器; 机械响应; 柔性; 可见透明

中图分类号: TN214 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20240124

## A Dynamic Mechanically Responsive Infrared Thermal Radiation Modulator with Visible Transparency

LI Xinfeng<sup>1,2</sup>, LI Longnan<sup>1\*</sup>, LI Wei<sup>1\*</sup>

(1. GPL Photonics Laboratory, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: longnanli@ciomp.ac.cn; weili1@ciomp.ac.cn

**Abstract:** Infrared thermal radiation modulators based on mechanically responsive materials offer advantages such as low cost, simple structure, and easy operation. Traditional infrared thermal radiation modulators based on mechanical responses typically involve constructing metal films (such as gold, aluminum, copper, etc.) on an elastic substrate, which modulate infrared thermal radiation dynamically through the cracking and closing of the film layers. However, traditional dynamic infrared modulators are generally opaque in the visible light spectrum, which greatly limits their applications in fields like visible-infrared dual-band camouflage. In this study, ITO films were deposited on transparent elastic polymers that are transparent across a wide visible-infrared spectrum using a magnetron sputtering technique, creating thermal radiation modulators that are transparent in the visible light spectrum and highly reflective in the infrared spectrum. Under mechanical stretching, the device exhibits an infrared reflectance range of 40%~77% at the 10  $\mu\text{m}$  and a visible light transmittance of over 82% at 550 nm.

**Key words:** infrared modulator; mechanical response; flexibility; visible transparency

## 1 引 言

红外热辐射调制器件在节能建筑<sup>[1]</sup>、个人热

管理<sup>[2]</sup>、热伪装<sup>[3]</sup>和智能窗户<sup>[4-7]</sup>等工程技术领域中具有重要意义。辐射传热无处不在, 热辐射中的光子学和热力学概念已得到了广泛讨论<sup>[8-10]</sup>。红

收稿日期: 2024-05-06; 修订日期: 2024-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(11075026)

Supported by National Natural Science Foundation of China (11075026)

外热辐射调制系统通常基于热致变色材料<sup>[11-12]</sup>、电致变色材料<sup>[13-14]</sup>、湿度响应材料<sup>[15-16]</sup>和机械响应材料<sup>[17-26]</sup>等。其中,基于机械响应材料的红外热辐射调制系统具有成本低、结构简单、操作方便等优点。传统基于机械响应材料的红外热辐射动态调控器件采用在弹性基体上沉积金属如铜<sup>[19]</sup>、金<sup>[24]</sup>、铝<sup>[25]</sup>的方式实现低红外发射率。未拉伸时器件具有红外高反射率的特性,在机械拉伸后,器件的红外反射率变化。然而,为了在红外波段实现足够低的发射率,通常金属薄膜层的厚度大于90 nm<sup>[19]</sup>,进而使器件在可见光波段不透明,这极大地限制了其在可见-红外双波段伪装等领域的应用。

本研究通过在可见-红外全波段透明、可拉伸苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯三嵌段聚合物(Styrene Ethylene Butylene Styrene, SEBS)薄膜上,使用磁控溅射工艺沉积一层铟锡氧化物(ITO),制备了可见光波段透射率82%(550 nm处)、红外反射率77%(10 μm处)的ITO-SEBS薄膜。在没有机械拉伸时,该薄膜呈现出可见透明、红外高反射率的特性。在机械拉伸后,ITO薄膜断裂产生裂纹暴露出下方被拉长的基底。ITO-SEBS薄膜的红外性能发生明显改变,由高反射率转变为低反射率,同时在可见波段始终保持高透射率。该器件同时具有背景透视和红外热辐射动态调控的能力,可以实现可见光与红外兼容隐身功能。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

ITO靶材( $\text{In}_2\text{O}_3$ : $\text{SnO}_2$ 质量比9:1,北京中诺新材)纯度99.99%,尺寸为 $\Phi 50.8$  mm $\times$ 3 mm,绑定2 mm铜背靶。Ag靶材(北京中诺新材)纯度99.99%,尺寸为 $\Phi 50$  mm $\times$ 5 mm。SEBS(Kraton G1650)购自博瑞达新材料有限公司(中国)。玻璃衬底(60 mm $\times$ 60 mm $\times$ 1 mm)购自志达实验器材有限公司。正己烷、丙酮、乙醇购自阿拉丁化学试剂网站。

### 2.2 器件制备

将SEBS(2 g)完全溶解在正己烷(30 g,质量分数6.25%)中,在环境温度下磁力搅拌12 h。依次用丙酮、乙醇和超纯水对玻璃进行超声波清洗10 min。使用台式匀胶机(KW-4A,赛德凯斯)在玻璃上旋涂SEBS。使用磁控溅射系统(JCP-350,泰科诺)在玻璃/SEBS上沉积ITO。ITO

沉积参数为:本底气压 $1.1\times 10^{-3}$  Pa,沉积压力0.63 Pa,基板转速10 r/min,沉积厚度500 nm,溅射功率100 W,基板温度120 °C。然后将玻璃/SEBS/ITO完全浸入乙醇中,使用镊子将薄膜从玻璃上剥离并转移到滤纸上,于室温下进行干燥。

### 2.3 样品表征

使用共聚焦显微镜(VK-X250K, Keyence)对具有不同单轴应变比的ITO-SEBS薄膜的表面形态进行了表征。通过傅里叶红外光谱仪(Bruker 80V, VERTEX)在2.5~15 μm波长范围内测量不同单轴应变比的ITO-SEBS薄膜的红外反射率和SEBS薄膜的红外透射率。使用紫外-可见-近红外分光光度计(Cary 5000, Agilent Technologies)测量具有不同单轴应变比的ITO-SEBS薄膜的透射率和SEBS薄膜的透射率。磁控溅射时薄膜的厚度由膜厚探测仪(FTM107-A,上海泰尧)测得。采用螺旋测微器(MNT5350025,美耐特)测量SEBS薄膜的厚度。使用红外热像仪(TI450, Fluke)记录热图像。

## 3 结果与讨论

### 3.1 ITO-SEBS的工作原理

本研究设计可见透明红外调制器的结构和机理如图1(a)所示。

该调制器由宽波段透明的弹性聚合物SEBS作为基底,其上沉积具有可见透明、红外反射特性的ITO薄膜。在没有机械拉伸前,薄膜的光学特性是可见透明、红外高反射(i)。在机械拉伸后,由于沉积层与基底的弹性模量的差异,ITO薄膜断裂产生裂纹暴露出下方被拉长的基底(ii)。薄膜的红外性能由高反射率转变为低反射率。在拉伸前后,薄膜在可见波段始终保持透明。通过对器件的拉伸程度的调整,可以进一步调控红外反射率(iii)。将未拉伸ITO-SEBS薄膜放在热源(手)的上方,在红外热像仪下观察,如图1(b)所示,器件展示出红外高反射(低发射)特性。图1(c)为ITO-SEBS薄膜的数码照片,透过薄膜器件可以清晰地观察到下方物体,说明该器件具有较高的可见光透射特性。在表1中对比了类似的器件,ITO-SEBS薄膜具有可见光波段透明、红外热辐射动态可调的特性。

### 3.2 SEBS的光学性质

关于聚合物材料的选择,需要考虑到其在可见光、红外波段的光谱特性,应认识到聚合物材料中的多类型官能团和振动模式贡献了大量红外吸

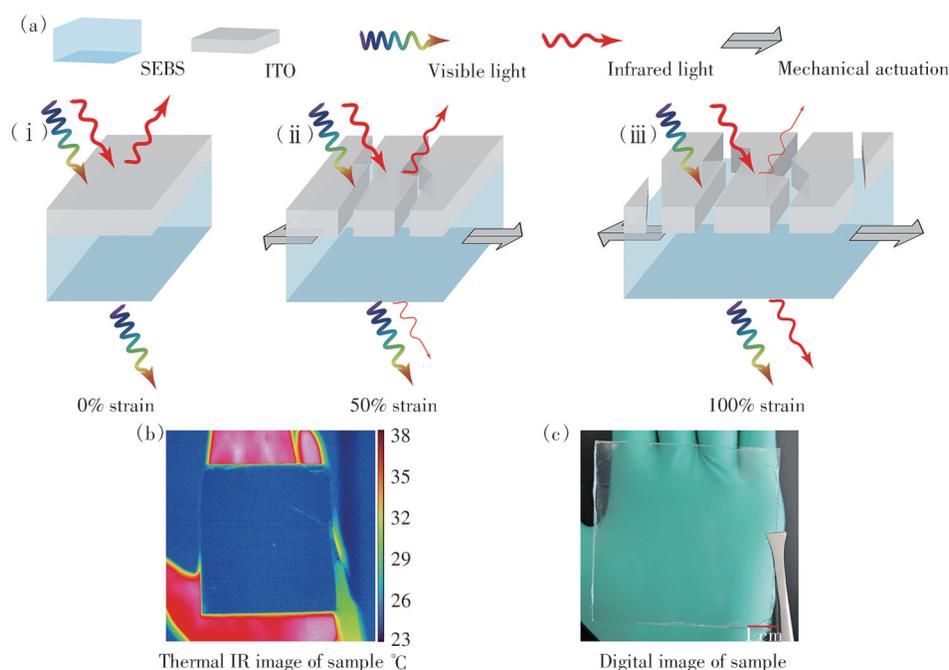


图 1 (a)具有单轴应变的 ITO-SEBS 薄膜器件的红外热辐射调控机制示意图;(b)样品的红外热成像结果;(c)样品的数码图像

Fig. 1 (a)Schematic illustration of the infrared thermal radiation modulation mechanism of the ITO-SEBS film device with uniaxial strain. Thermal infrared image (b) and digital image (c) of ITO-SEBS device

表 1 热辐射调制器件对比

Tab. 1 Comparison of thermal radiation modulation devices

结构	可见透射率	红外反射率	红外可调	年份
acrylate dielectric elastomer/Al	不透明	71%~96%(3~15 $\mu\text{m}$ )	√	2018 <sup>[26]</sup>
POE-Al-POE	不透明	60%~16%(3~15 $\mu\text{m}$ )	√	2024 <sup>[22]</sup>
Cu/SEBS	拉伸后透明	100%~53%(4~16 $\mu\text{m}$ )	√	2019 <sup>[19]</sup>
Au/SEBS	拉伸后透明	97%~37%(3~25 $\mu\text{m}$ )	√	2022 <sup>[24]</sup>
ZnO/Ag/ZnO/PET	87%	95%(4~20 $\mu\text{m}$ )	×	2020 <sup>[27]</sup>
ITO/Ag/ITO/Ag/ITO	69.2%	89.6%(1.1~3 $\mu\text{m}$ )	×	2024 <sup>[28]</sup>
ITO/SEBS	82%	77%~40%(10 $\mu\text{m}$ )	√	本工作

收峰<sup>[29]</sup>。

SEBS 分子链中的聚苯乙烯嵌段含有苯环,刚性大且在红外波段有少量吸收,乙烯-丁烯嵌段则较为柔顺且在红外波段透明。由于柔性差异,形成了聚苯乙烯硬段分散相分布于乙烯-丁烯软段连续相中的物理交联网络,使得 SEBS 薄膜表现出良好的弹性与红外透明特性<sup>[30]</sup>。SEBS 薄膜的断裂伸长率为 860%,平均弹性模量为 3 MPa,且当应变低于 250%时,SEBS 薄膜的伸长是可逆的<sup>[24]</sup>,因此适合于可重复利用的机械拉伸响应器件。

本研究中通过旋涂法制备了 20  $\mu\text{m}$  厚度的 SEBS 薄膜。如图 2(a)所示,SEBS 薄膜在可见光波段的平均透射率大于 90%,其在 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段的平均红外透射率大于 92%,在 3  $\mu\text{m}$ 、7  $\mu\text{m}$  等波段附近存在材料本征红外吸收峰,如图 2(b)所示。

### 3.3 磁控溅射 ITO 薄膜的工艺参数

ITO 是一种常见的透明导电氧化物材料,常被用作透明电极,应用于平面显示器<sup>[31]</sup>和太阳能电池<sup>[32]</sup>中。ITO 薄膜的可见光透明特性和导电特性归因于材料自身带隙以及载流子浓度<sup>[33]</sup>。在沉积 ITO 过程中,通过氧空位和 Sn 对 In 的替位掺杂,可以充分增加载流子密度<sup>[34]</sup>。ITO 在可见波段的高透射率和红外波段的高反射率特性可以通过在薄膜形成过程中优化沉积工艺参数来实现。制备 ITO 薄膜的方法有激光脉冲法<sup>[35]</sup>、磁控溅射法<sup>[36]</sup>和溶胶-凝胶法<sup>[37]</sup>、热喷雾法<sup>[38]</sup>等。其中磁控溅射法制备的 ITO 薄膜具有致密度高、均匀性好、成膜速率快以及可以实现大面积沉积等优点<sup>[36]</sup>。

#### 3.3.1 ITO 薄膜制备的基板温度优化

制备 ITO 薄膜时控制样品基板温度,设为室

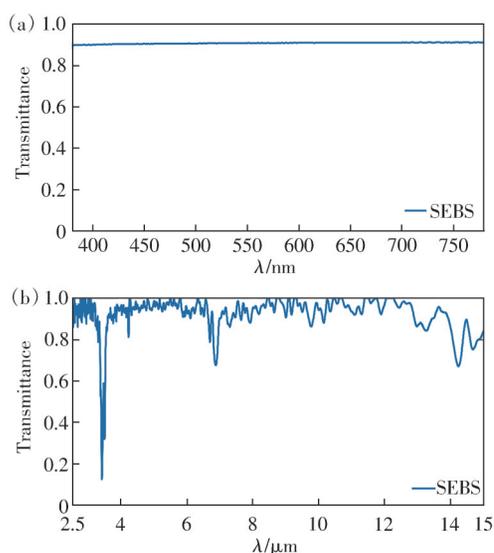


图 2 (a) 20  $\mu\text{m}$  厚度 SEBS 在可见光波段的透射率; (b) 20  $\mu\text{m}$  厚度 SEBS 在 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段的透射率

Fig. 2 (a) Transmittance of SEBS with a thickness of 20  $\mu\text{m}$  in the visible light spectrum. (b) Transmittance of SEBS with a thickness of 20  $\mu\text{m}$  in the 2.5-15  $\mu\text{m}$  wavelength range

温 (RT)、80  $^{\circ}\text{C}$ 、120  $^{\circ}\text{C}$ 、150  $^{\circ}\text{C}$ 、200  $^{\circ}\text{C}$ 、300  $^{\circ}\text{C}$ 。较高的基板温度会导致更多的锡原子从晶界和间隙晶格位置扩散到规则的  $\text{In}_2\text{O}_3$  晶格位置<sup>[39]</sup>。由于锡原子的化合价高于铟原子,因此它们在 ITO 薄膜中表现为供体。这种扩散会提高电子浓度,使得 ITO 薄膜中的等离子振荡频率增大。如图 3 所示,样品在 2.5~15  $\mu\text{m}$  的反射率随着基板温度的升高逐渐提高。考虑到 SEBS 在高温会变形甚至分解,最终选定 ITO 沉积时的基板温度为 120  $^{\circ}\text{C}$ 。

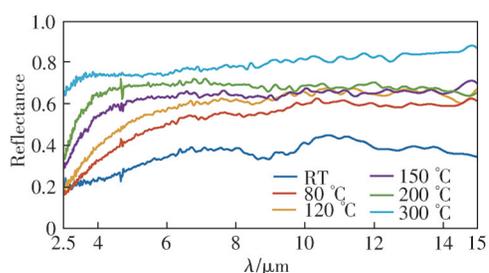


图 3 不同基板温度制备的 ITO-SEBS 样品的红外波段反射率

Fig. 3 Infrared reflectance of ITO-SEBS samples prepared at different substrate temperatures

### 3.3.2 ITO 薄膜制备的溅射功率优化

在研究中,溅射功率分别设定为 40 W、80 W、100 W 和 120 W。如图 4 所示,随着溅射功率的增大,红外反射率逐渐升高。射频溅射功率的增加

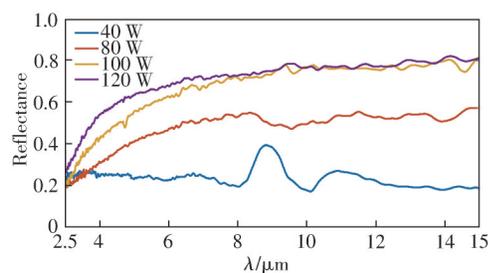


图 4 不同磁控溅射功率制备的 ITO-SEBS 样品的红外波段反射率

Fig. 4 Infrared reflectance of ITO-SEBS samples prepared with different magnetron sputtering powers

使得 ITO 薄膜的结晶度<sup>[40-41]</sup>增大以及氧空位浓度增加<sup>[42]</sup>,从而增大了载流子浓度,进而提升了等离子振荡频率。当入射光波长大于材料的等离子体吸收边 ( $\lambda_p$ ) 时,等离子振荡能够响应入射光的电场,使得材料呈现出高反射率的特性:

$$\lambda_p = 2\pi C \sqrt{\frac{m^* \varepsilon_0 \varepsilon}{ne^2}}, \quad (1)$$

其中  $C$  代表光速,  $m^*$  代表有效载流子质量,  $\varepsilon_0$  代表真空介电常数,  $\varepsilon$  代表材料的介电常数,  $n$  代表载流子浓度。

本研究通过 ITO 薄膜的红外反射率随溅射功率的变化关系为上述分析提供了依据。

在共聚焦显微镜下观察发现,当溅射功率较低时 (40 W 和 80 W), ITO 薄膜表面形貌均匀,并易于从基板剥离,但是 ITO 薄膜的平均红外反射率较低。而溅射功率大于 100 W 时, ITO-SEBS 薄膜表面会出现类似花纹的形状,如图 5(d),判断

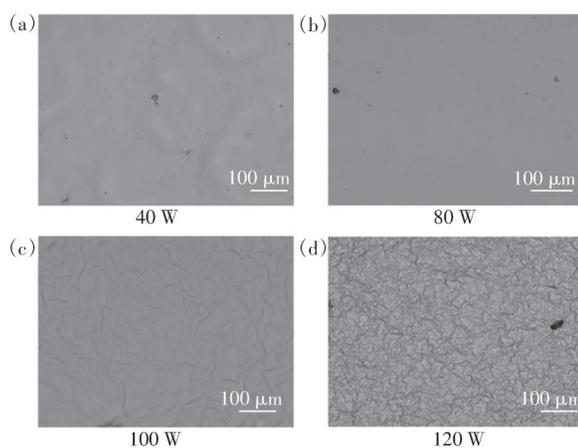


图 5 ITO 磁控溅射功率分别为 40 W (a)、80 W (b)、100 W (c)、120 W (d) 时 ITO-SEBS 样品的表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of ITO-SEBS samples when the ITO magnetron sputtering power is set at 40 W (a), 80 W (b), 100 W (c), and 120 W (d)

是热效应导致 SEBS 薄膜收缩。同时,在玻璃上剥离 ITO-SEBS 薄膜时发现,溅射功率大于 100 W 的样品难以完整剥离(如 120 W)。因此,本研究中 ITO 磁控溅射功率最终确定为 100 W。

### 3.3.3 ITO 薄膜制备的沉积厚度优化

研究中控制 ITO 薄膜的沉积厚度为 100 nm、300 nm、500 nm、700 nm、1 000 nm。测量样品的 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段的反射率,如图 6(a),样品反射率随着薄膜的厚度先上升后下降,在厚度为 500 nm 时表现出最大的反射率(10  $\mu\text{m}$  处 77%)。薄膜厚度的增加会导致晶粒尺寸增大进而使得薄膜的表面粗糙度增大,使散射损耗增加<sup>[43]</sup>。因此,ITO 薄膜的红外反射率不会随厚度的增加而持续增加。样品的透射率如图 6(b),在 5~15  $\mu\text{m}$  波段各个厚度的 ITO 薄膜透射率无明显变化。ITO-SEBS 薄膜的红外吸收率可以通过下式计算:

$$A = 1 - T - R, \quad (2)$$

其中, $A$  代表红外吸收率, $T$  代表红外透射率, $R$  代表红外反射率。可知随着 ITO 薄膜厚度的增大,其在

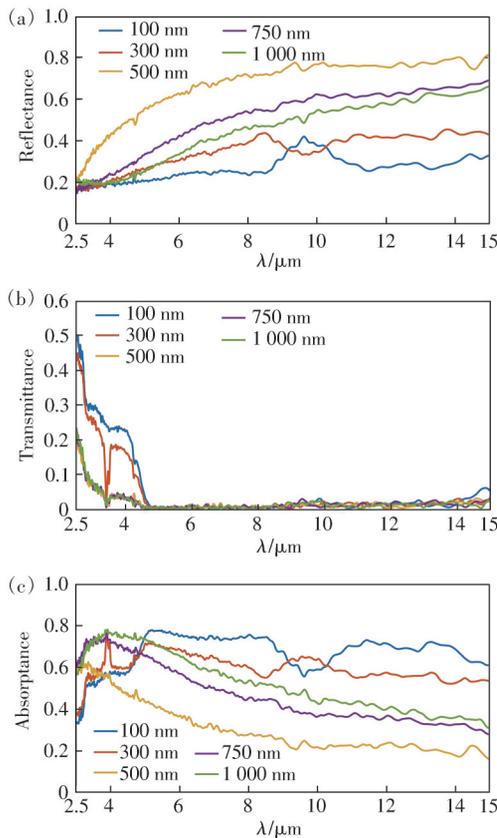


图 6 不同 ITO 层厚度的样品的红外波段反射率(a)、透射率(b)、吸收率(c)

Fig. 6 Infrared reflectance(a), transmittance(b), absorbance(c) of samples with different ITO layer thicknesses

红外波段的光吸收先减小后增大,如图 6(c)。

### 3.4 ITO-SEBS 薄膜的光谱特性

基于上述实验,最终选定的沉积参数为:本底气压为  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa,沉积气压为 0.63 Pa,基板旋转为 10 r/min,沉积厚度为 500 nm,控制溅射功率为 100 W,设定基板温度为 120  $^{\circ}\text{C}$ 。

在 SEBS 上沉积 ITO 薄膜,最终制备样品的可见透射率为 82%(550 nm 处)、红外反射率(10  $\mu\text{m}$  处)为 77%。可见波段透射率选用 550 nm 处的数据是考虑到明视觉中人眼对该波段最敏感,红外反射率选择 10  $\mu\text{m}$  处的数据是因为 25  $^{\circ}\text{C}$  时的黑体辐射峰值强度对应的波长在该波段附近。薄膜的拉伸程度定义为形变量与原长之比,如下式:

$$s = (l_1 - l_0)/l_0, \quad (3)$$

其中  $s$  是拉伸程度, $l_1$  是薄膜维持拉伸时的长度, $l_0$  是薄膜的初始长度。在实验过程中,我们将紧固件与器件两端紧密结合以保证拉伸变化一致。通过制备带有如柱状阵列结构的沉积层<sup>[19]</sup>,有助于增强拉伸过程中器件的均匀性。

如图 7(a) 所示,在拉伸程度为 0%、20%、50%、70%、100% 时,测得可见平均透射率分别为 74%、76%、80%、82%、83%。如图 7(b) 所示,在拉伸程度为 0%、20%、50%、70%、100% 时,测得 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段的红外平均反射率分别为 67%、58%、49%、40%、37%。

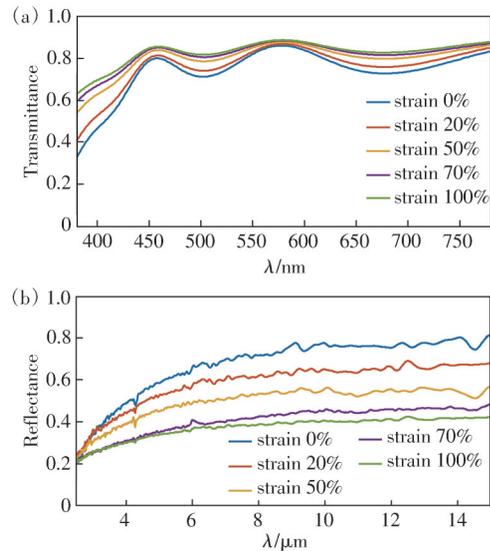


图 7 (a)不同拉伸程度下 ITO-SEBS 薄膜的可见透射率;(b)不同拉伸程度下 ITO-SEBS 薄膜的红外反射率

Fig. 7 (a)Visible transmittance of ITO-SEBS films under different strains. (b)Infrared reflectance of ITO-SEBS films under different strains

### 3.5 ITO-SEBS 薄膜在热伪装方面的应用

为了验证 ITO-SEBS 器件的动态热伪装效果,进行了如下实验。设定实验背景为低发射率铝板,外加 10 V、1 A 的电源以加热,铝板上粘贴有具有高红外发射率的聚酰亚胺胶带,作为热源信息。从数码照片即图 8(a)、(b)、(c)中可以发现,ITO-SEBS 薄膜在未拉伸、拉伸 50%、拉伸 100% 时,均可以清楚地观察到下方的黄色聚酰亚胺胶带。而随着薄膜的拉伸,在热红外图像(图 8(d)、(e)、(f))

中可以观察到中心区域的温度随着薄膜的拉伸程度增大而增加。这是因为随着样品的拉伸,进入到热红外成像仪的辐射能量增多。使用共聚焦显微镜观察处于不同应变下的薄膜,如图 8(g)、(h)、(i)所示,可以发现沉积层裂纹之间的空隙随着拉伸程度逐渐增大,暴露出透明的弹性聚合物基底。该实验展示了 ITO-SEBS 薄膜分别通过可见光波段、红外光波段传递信息的能力,揭示了其在热伪装、多通道信息传递等方面的应用潜力。

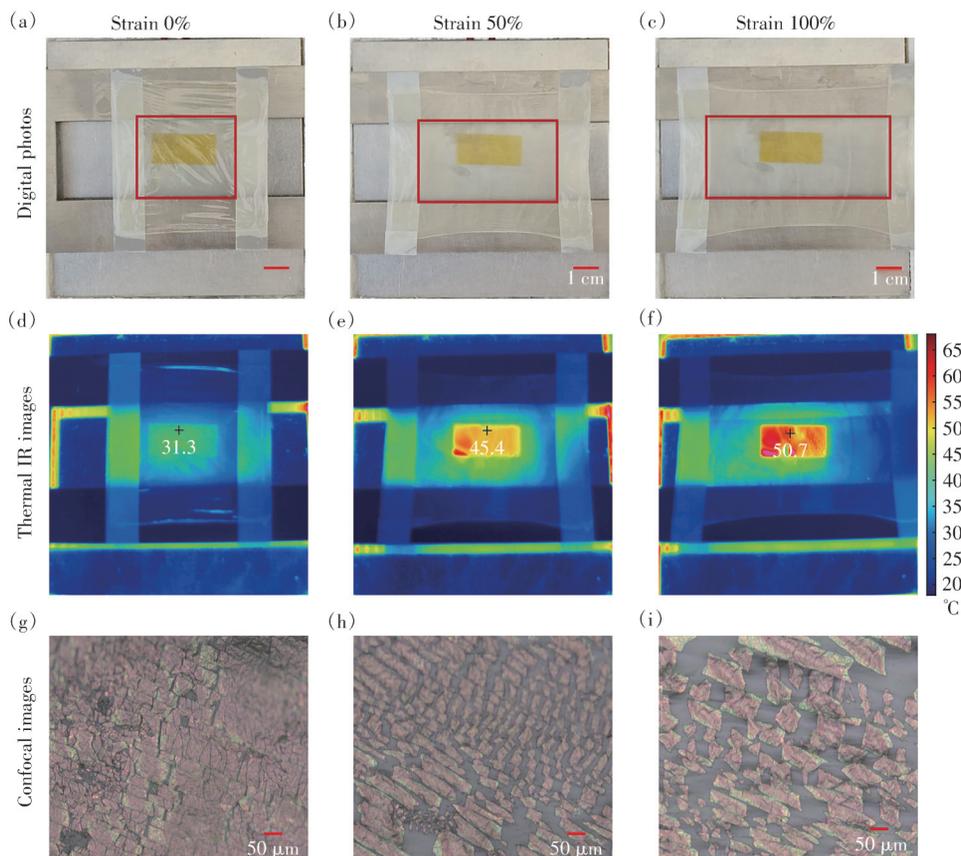


图 8 拉伸程度分别为 0%((a)、(d)、(g))、50%((b)、(e)、(h))、100%((c)、(f)、(i))时,ITO-SEBS 器件与底部样品的数码照片(第一行),ITO-SEBS 器件与底部样品的红外热成像照片(第二行),ITO-SEBS 器件表面 ITO 层共聚焦显微镜图片(第三行)

Fig. 8 Digital photographs of the transparent ITO-SEBS device and the sample(first row), infrared thermal images of the ITO-SEBS device and sample(second row), confocal microscopy images of the ITO layer on the surface of the ITO-SEBS device(third row) with different levels of strains: (a), (d), (g)0%; (b), (e), (h)50%; and (c), (f), (i)100%

## 4 结 论

本研究通过结合具有机械拉伸响应的红外透明 SESB 柔性薄膜与可见透明、红外高反射特性的 ITO 薄膜层,制备了具有可见光透明特性的动态机械响应红外热辐射调制器件。通过参数化实验,对射频磁控溅射过程中的基板温度、溅射功率、沉积

厚度进行了优化,并制备了 10  $\mu\text{m}$  处红外反射率达 77%、550 nm 处透射率达 82% 的 ITO-SEBS 薄膜器件。在机械拉伸下,ITO-SEBS 器件在 2.5~15  $\mu\text{m}$  波段的红外平均反射率的调制范围为 37%~67%,在 380~780 nm 波段的可见平均透射率的调制范围为 74%~83%。实验发现,提高沉积时的基板温度可以显著提升 ITO 薄膜的红外反射率。因为无需

高的退火温度,该策略适用于柔性聚合物材料且具有卷对卷、大面积制备的潜力。相较于传统的基于金属的红外辐射动态调制器,该调制器具有在调制红外辐射时始终保持可见透明的特点,在进行热伪装时可以与物体上的可见伪装图案结合,为可见-

红外兼容的动态热伪装提供了一种策略。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240124>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] AMIRIFARD F, SHARIF S A, NASIRI F. Application of passive measures for energy conservation in buildings: a review [J]. *Adv. Build. Energy Res.*, 2019, 13(2): 282-315.
- [ 2 ] ZHU B, LI W, ZHANG Q, *et al.* Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocessed silk [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2021, 16(12): 1342-1348.
- [ 3 ] ZHU H Z, LI Q, ZHENG C Q, *et al.* High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9: 60.
- [ 4 ] ZHANG H L, ZHANG X, SUN W H, *et al.* All-solid-state transparent variable infrared emissivity devices for multi-mode smart windows [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(16): 2307356.
- [ 5 ] CHEN M J, ZHANG X, YAN D K, *et al.* Oxygen vacancy modulated amorphous tungsten oxide films for fast-switching and ultra-stable dual-band electrochromic energy storage smart windows [J]. *Mater. Horiz.*, 2023, 10(6): 2191-2203.
- [ 6 ] CUI Y Y, KE Y J, LIU C, *et al.* Thermochromic VO<sub>2</sub> for energy-efficient smart windows [J]. *Joule*, 2018, 2(9): 1707-1746.
- [ 7 ] GAO Y Z, YAO W H, SUN J, *et al.* A novel soft matter composite material for energy-saving smart windows: from preparation to device application [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2015, 3(20): 10738-10746.
- [ 8 ] LI W, FAN S H. Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications [Invited] [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(12): 15995-16021.
- [ 9 ] FAN S H, LI W. Photonics and thermodynamics concepts in radiative cooling [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(3): 182-190.
- [ 10 ] LIU T J, GUO C, LI W, *et al.* Thermal photonics with broken symmetries [J]. *eLight*, 2022, 2(1): 25.
- [ 11 ] LIANG S R, XU F, LI W X, *et al.* Tunable smart mid infrared thermal control emitter based on phase change material VO<sub>2</sub> thin film [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 232: 121074.
- [ 12 ] DU K K, LI Q, LYU Y B, *et al.* Control over emissivity of zero-static-power thermal emitters based on phase-changing material GST [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2017, 6(1): e16194.
- [ 13 ] ZHANG X, TIAN Y L, LI W J, *et al.* Preparation and performances of all-solid-state variable infrared emittance devices based on amorphous and crystalline WO<sub>3</sub> electrochromic thin films [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2019, 200: 109916.
- [ 14 ] SALIHOGLU O, UZLU H B, YAKAR O, *et al.* Graphene-based adaptive thermal camouflage [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(7): 4541-4548.
- [ 15 ] MANDAL J, JIA M X, OVERVIG A, *et al.* Porous polymers with switchable optical transmittance for optical and thermal regulation [J]. *Joule*, 2019, 3(12): 3088-3099.
- [ 16 ] ZHANG X A, YU S J, XU B B, *et al.* Dynamic gating of infrared radiation in a textile [J]. *Science*, 2019, 363(6427): 619-623.
- [ 17 ] KRISHNA A, KIM J M, LEEM J, *et al.* Ultraviolet to mid-infrared emissivity control by mechanically reconfigurable graphene [J]. *Nano Lett.*, 2019, 19(8): 5086-5092.
- [ 18 ] HSU P C, LIU C, SONG A Y, *et al.* A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling [J]. *Sci. Adv.*, 2017, 3(11): e1700895.
- [ 19 ] LEUNG E M, COLORADO ESCOBAR M, STIUBIANU G T, *et al.* A dynamic thermoregulatory material inspired by squid skin [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 1947.
- [ 20 ] ZHOU Z G, FANG Y S, WANG X, *et al.* Synergistic modulation of solar and thermal radiation in dynamic energy-

- efficient windows [J]. *Nano Energy*, 2022, 93: 106865.
- [ 21 ] LIANG L L, YU R L, ONG S J H, *et al.* An adaptive multispectral mechano-optical system for multipurpose applications [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(13): 12409-12421.
- [ 22 ] ZHAO Y C, FANG F. Bio-inspired hierarchical wrinkles for tunable infrared reflectance [J]. *Surf. Interfaces*, 2024, 45: 103832.
- [ 23 ] YE Y, HONG Y, LIANG Q M, *et al.* Bioinspired electrically stable, optically tunable thermal management electronic skin via interfacial self-assembly [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2024, 660: 608-616.
- [ 24 ] SONG S, XU G, WANG B, *et al.* A dynamic mechanical stimulated and thermal-healed infrared modulator based on elastomer matrix with metal layer inspired by squid skin [J]. *Mater. Today Chem.*, 2022, 24: 100911.
- [ 25 ] YAN X X. Effect of different color paste on properties of fluorine resin/aluminum infrared low emissivity coating [J]. *Coatings*, 2020, 10(1): 70.
- [ 26 ] XU C Y, STIUBIANU G T, GORODETSKY A A. Adaptive infrared-reflecting systems inspired by cephalopods [J]. *Science*, 2018, 359(6383): 1495-1500.
- [ 27 ] DANG S C, YI Y, YE H. A visible transparent solar infrared reflecting film with a low long-wave emittance [J]. *Sol. Energy*, 2020, 195: 483-490.
- [ 28 ] CHOI C, LEE J, GHOSH S, *et al.* Light-wavelength-selective transparent ITO/Ag/ITO/Ag/ITO structure for functional energy applications [J]. *Sol. RRL*, 2024, 8(4): 2300936.
- [ 29 ] AILI A, WEI Z Y, CHEN Y Z, *et al.* Selection of polymers with functional groups for daytime radiative cooling [J]. *Mater. Today Phys.*, 2019, 10: 100127.
- [ 30 ] 张政, 刘广永, 王坤, 等. 共混工艺对SEBS/PP热塑性弹性体性能的影响 [J]. *弹性体*, 2019, 29(6): 57-61.  
ZHANG Z, LIU G Y, WANG K, *et al.* Effect of blending process on properties of SEBS/PP thermoplastic elastomers [J]. *China Elastomerics*, 2019, 29(6): 57-61. (in Chinese)
- [ 31 ] ZHANG Z Q, YU X, ZHAO W J, *et al.* Preparation of low-resistance and residue-free ITO films for large-scale 3D displays [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(49): 45903-45913.
- [ 32 ] LIEN S Y. Characterization and optimization of ITO thin films for application in heterojunction silicon solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(S21): S10-S13.
- [ 33 ] BAZARGAN A M, SHARIF F, MAZINANI S, *et al.* A high quality ITO/PET electrode for flexible and transparent optoelectronic devices [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2017, 28(3): 2962-2969.
- [ 34 ] 李晓晖, 宋凯强, 丛大龙, 等. 高透明低发射率ITO薄膜的制备及其光电性能研究 [J]. *表面技术*, 2020, 49(7): 126-132.  
LI X H, SONG K Q, CONG D L, *et al.* Preparation and photoelectric properties of ITO thin films with high transparency and low emissivity [J]. *Surf. Technol.*, 2020, 49(7): 126-132. (in Chinese)
- [ 35 ] HOLMELUND E, THESTRUP B, SCHOU J, *et al.* Deposition and characterization of ITO films produced by laser ablation at 355 nm [J]. *Appl. Phys. A*, 2002, 74(2): 147-152.
- [ 36 ] 雷沛, 束小文, 刘培元, 等. 氧化锡(ITO)薄膜溅射生长及光电性能调控 [J]. *表面技术*, 2022, 51(8): 100-106.  
LEI P, SHU X W, LIU P Y, *et al.* Growth and the tunable optical and electrical of sputtered ITO films [J]. *Surf. Technol.*, 2022, 51(8): 100-106. (in Chinese)
- [ 37 ] KŐRŐSI L, PAPP S, BEKE S, *et al.* Highly transparent ITO thin films on photosensitive glass: sol-gel synthesis, structure, morphology and optical properties [J]. *Appl. Phys. A*, 2012, 107(2): 385-392.
- [ 38 ] ROZATI S M, GANJ T. Transparent conductive Sn-doped indium oxide thin films deposited by spray pyrolysis technique [J]. *Renew. Energy*, 2004, 29(10): 1671-1676.
- [ 39 ] MENG L J, DOS SANTOS M P. Properties of indium tin oxide films prepared by rf reactive magnetron sputtering at different substrate temperature [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 322(1-2): 56-62.
- [ 40 ] TCHENKA A, AGDAD A, MELLALOU A, *et al.* Spectroscopic investigations and thermoelectric properties of RF-sputtered ITO thin films [J]. *J. Electron. Mater.*, 2022, 51(3): 1401-1408.
- [ 41 ] JOHN K A, PHILIP R R, SAJAN P, *et al.* In situ crystallization of highly conducting and transparent ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2016, 132: 91-94.
- [ 42 ] ZHU G S, YANG Z P. Effect of sputtering power and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin

films prepared from radio frequency sputtering using powder target [J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.* , 2013, 24 (10): 3646-3651.

- [ 43 ] HAO L, DIAO X G, XU H Z, *et al.* Thickness dependence of structural, electrical and optical properties of indium tin oxide (ITO) films deposited on PET substrates [J]. *Appl. Surf. Sci.* , 2008, 254(11): 3504-3508.



李鑫锋(1999-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,2020年于吉林大学获得学士学位,主要从事热辐射调控的研究。  
E-mail: lixinfeng21@mails.ucas.ac.cn



李伟(1989-),男,陕西西安人,博士,研究员,2014年于美国范德堡大学获得博士学位,主要从事包括热光子学、纳米光子学、光与物质相互作用及其在下一代信息和能源技术中的应用等方面的研究。

E-mail: weilil@ciomp.ac.cn



李龙男(1984-),男,吉林龙井人,博士,研究员,2017年于韩国西江大学获得博士学位,主要从事包括热辐射、相变传热、微纳加工及其在电子器件散热、电动汽车热管理中的应用等方面的研究。

E-mail: longnanli@ciomp.ac.cn