DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.04.008
文献引用：扈心舒，王晗，曹志林，等．基于CNT薄膜的红外发射率电致调控器件的循环稳定性研究［J］．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46（4）：56-63. HU X S，WANG H，CAO Z L，et al. Research on the cyclic stability of infrared emissivity electroinduction control devices based on CNT films［J］. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2025，46（4）：56-63.

基于CNT薄膜的红外发射率电致调控器件的循环稳定性研究*

扈心舒[1]，王　晗[1]，曹志林[1]，王长昊[1]，姜前蕾[1]，赵　维[2]，王如志[1**]

（1. 北京工业大学材料科学与工程学院，新能源材料与技术研究所，新型功能材料教育部重点实验室，北京　100124；2. 国家电投集团氢能科技发展有限公司关键材料事业部，北京　100076）

摘要：碳纳米管（CNT）薄膜具有良好的红外表面发射率电致调控功能，在红外伪装、航天器智能热控等领域中表现出良好的发展潜力。基于CNT薄膜的电致调控器件循环稳定性是器件应用的关键，但影响其循环稳定性的物理实质却较少有人研究。本文采用多壁CNT薄膜、多孔隔膜以及离子液体构建了三明治结构的电致红外发射率动态调控器件，其表面发射率调控范围达到0.60的优异动态发射率调控性能，且最快调控响应速度可达0.20 s。进一步研究了其循环稳定性及物理根源。研究表明，电致调控超过200个循环周期后，CNT薄膜有序结构被严重破坏，导致红外发射率电致调控性能损失，最后调控性能完全消失。CNT有序结构破坏可能来源于电场施加后离子液体冲击应力，使CNT薄膜逐渐无序化与团聚，发射率调控响应速度变慢，最后导致其红外发射动态调控性能完全失效。根据Coffin-Manson可靠性方程，提出了一个红外发射率循环稳定性公式，其预测结果与实验基本一致。研究结果表明，有序多孔结构有利于导电离子的输运与存储，是提升器件电致红外发射率性能的关键。该研究工作将为高性能与高稳定性的电致红外发射率调控器件的结构设计与材料选择提供可借鉴思路，同时也为电致红外发射率调控器件寿命预测提出了可行方法。

关键词：红外发射率；动态调控；碳纳米管；离子液体；循环稳定性；寿命预测模型
中图分类号：TN 219　　**文献标志码**：A

Research on the cyclic stability of infrared emissivity electroinduction control devices based on CNT films*

HU Xinshu[1]，WANG Han[1]，CAO Zhilin[1]，WANG Changhao[1]，JIANG Qianlei[1]，ZHAO Wei[2]，WANG Ruzhi[1**]

（1. Key Laboratory of Advanced Functional Materials of Education Ministry，Institute of New Energy Materials and Technology，College of Materials Science and Engineering，Beijing University of Technology，Beijing　100124；2. Critical Materials Division，State Power Investment Group Hydrogen Energy Technology Development Co.，Ltd，Beijing　100076）

Abstract：Carbon nanotube（CNT）thin films have been found to possess excellent infrared surface

收稿日期：2024-06-06
*国家重点研发计划项目（2021YFB3500403）
**通信作者：wrz@bjut.edu.cn

emissivity electromodulation functions, exhibiting great potential in fields such as infrared camouflage and intelligent thermal control of spacecraft. The cycling stability of electrochromic devices based on CNT thin films is crucial for device applications, yet the underlying physical mechanisms affecting their stability have received limited attention. In this study, a sandwich structure electroinduced infrared emissivity dynamic control device was constructed using multi-walled CNT thin films, porous membranes, and ionic liquids. The surface emissivity control range reached an exceptional dynamic emissivity control performance of 0.60, and the fastest control response speed achieved 0.20 seconds. Further research focused on the cyclic stability of the device and its physical roots. The research revealed that the ordered structure of CNT films was severely damaged after electromodulation exceeded 200 cycles, leading to the loss of infrared emissivity modulation performance and eventual complete failure. The damage to the ordered CNT structure may originate from the impact stress of ionic liquids following electric field application, causing gradual disordering and agglomeration of the CNT film, resulting in slowed response speed and ultimate failure of infrared emission dynamic control. Based on the Coffin-Manson reliability equation, a formula for predicting cyclic stability is proposed and found to be consistent with experimental results. The research results indicate that an ordered porous structure facilitating conductive ion transport and storage is critical for achieving excellent electroinduced infrared emissivity. This research provides reference ideas for high-performance and highly stable electro-infrared emissivity control device design and material selection, as well as feasible methods for predicting lifespan.

Keywords: infrared emissivity; dynamic regulation; carbon nanotube; ionic liquid; cycle stability; life prediction model

CLC: TN 219 **DC**: A

0 引 言

红外隐身的核心在于对物体红外辐射的精准调控。当物体温度保持不变时,其表面的发射率越高,红外辐射能力就越强[1]。要实现红外发射率的动态调控,研究者不断探索新的材料和技术。其中,相变材料[2]、电致变色材料[3]和生物仿生材料[4]等都展现出了良好的应用前景,同时,研究者还深入探讨了温度[5]、电场[6]和机械[7]等机制在红外隐身技术中的作用。其中,电致变发射率器件因其制备简便、性能卓越而备受瞩目[8]。

近年来,低维碳基材料如石墨烯等因其在红外波段展现出的卓越性能,以及在施加电激励后所表现出的可调控性,受到了研究者的广泛关注[9-10]。2014年,Polat等[11]成功地设计并制备了一种基于低维碳基结构的柔性电致变发射率器件;2018年,Salihoglu等[12]报道了一种性能出色的碳基材料红外发射率动态调控器件,这种器件采用Au作为对电极,在电刺激下能够实现离子液体的阴离子嵌入/脱嵌低维碳层,从而实现高发射与低发射态之间的转变;2020年,Ergoktas等[13]将器件与纺织技术相结合,实现了器件的可穿戴化,为红外隐身技术的实际应用提供了更多可能性;2021年,Huang等[14]深入探究了离子液体对调制多层石墨烯薄膜的影响,为优化器件性能提供了重要的理论依据。器件制备之前要先制得石墨烯薄膜,薄膜在制备、转移和后续组装过程中极易损坏。碳纳米管(carbon nanotubes,CNT)薄膜为这一问题提供了解决方案,CNT具有石墨烯的外层和中空的内部空间,同样具有可调节的费米能级和导电性[15],而且不易损坏,因此,CNT薄膜在电致变发射率材料中展现出巨大潜力[16]。2021年,Sun等[17]成功制备出了性能优异的CNT薄膜红外器件。

本文利用CNT薄膜、多孔隔膜(Celgard 2325,聚丙烯/聚乙烯/聚丙烯)以及离子液体([HMIm]NTf_2)等关键材料,成功制备了具有红外发射率动态调控功能的CNT薄膜器件。该器件展现出约0.60的调制范围,具有在0.20 s快速响应的能力,并可实现多次循环调控。

1　实验部分

1.1　主要仪器与试剂

(1)化学试剂。离子液体1-己基-3-甲基咪唑双三氟甲磺酰亚胺盐([HMIm]NTf_2,纯度为99%),购自兰州化学物理研究所。CNT薄膜购自江苏先丰纳米材料科技有限公司,采用浮动催化剂化学气相沉积法(floating catalyst chemical vapor deposition,FCCVD)制备[18]。

(2)仪器设备。使用的主要仪器有日本日立集团生产的SU9000型号的扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM),美国伊达克斯有限公司的Apollo XLT2型号的能谱仪(energy dispersive spectrometer,EDS),美国布鲁克公司的D8 Advance型号的X射线衍射(X-ray diffraction,XRD),上海热像科技股份有限公司的FOTRIC 326C型号的红外热像仪,北京普源生产的RIGOL DG1032型号的任意/函数波形发生器,济南三泉智能科技有限公司CHY-HS型号的测厚仪,北京金埃谱科技生产V-Sorb 2800P型号的比表面积分析测试仪。

1.2　实验方法

制备三明治结构的红外发射率动态调控器件,选择使用CNT薄膜作为电致变发射率材料以及电极,红外透明多孔隔膜Celgard 2325作为间隔物,以及[HMIm]NTf_2作为导电物质。采用测厚仪测量CNT薄膜厚度约11 μm,由直径4~15 nm的多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube,MWCNT)构成,这些MWCNT是片层状的石墨烯按照一定曲率卷成的中空管体。器件示意如图1(a)所示,2层CNT薄膜通过离子液体粘附在Celgard隔膜上,同时离子液体的用量需要大致与单位面积的Celgard隔膜厚度一致,以防止过量的离子液体渗透并污染CNT薄膜的外表面。整个过程需要确保薄膜的平整性,薄膜之间无气泡,且作为电极的CNT薄膜之间不短接。最后,使用导电银浆将导线粘接在薄膜上,完成整个回路的导通。器件通过非挥发性离子液体的插层进行调控,使得器件红外发射率具有可调控性能。器件测试设置示意如图1(b)所示。

2　结果与讨论

2.1　红外性能测试

为了研究薄膜在特定电压范围内的电致红外发射率可调制性能,根据图1(b)所示的实验测试装置,将薄膜器件置于70.0 °C的加热板上,并利用热像仪来观察其红外性能,同时考虑到所使用离子液体的电化学窗口,实验中从0开始给器件施加电压,每15.00 s电压递增0.2 V,直至达到4.4 V。热像仪记录下测试过程中的部分图像如图2(a)所示,这些图像清晰地展示了器件温度随电压的变化情况,从初始的65.1 °C逐渐降低至32.6 °C。发射率是在红外热像仪自带处理软件中计算得到,较为准确且易获得。首先,在被测物附近粘贴黑色绝缘胶带,这种胶带的发射率为0.95;接着在黑色绝缘胶带上设置测温点,同时在被测物上设置待测点,通过不断调整待测点的发射率至两点的温度数值相等,此时待测点的发射率即为被测物的实际发射率。把红外成像温度转换为红外发射率表示,随着电压的逐渐升高,器件的发射率从0.73开始逐渐下降,并在约3.8 V时达到最小值0.17(图2(b))。当器件的正负极与波形发生器的正负极反接时,器件就施加了负电压(图2(c))。随着电压的逐渐降低,器件的发射率从0.58开始上升,当电压降至−1.2 V时,发射率达到峰值0.80,随后发射率保持相对稳定后随着电压的继续降低而逐渐下降。在测试过程中,未设置时间间隔使离子液体从CNT薄膜中脱嵌,导致初期负电压(−0.1 V)下的性能表现逊于0状态。但这一变化并未显著影响器件在负电压下的总体性能规律,特别是在−1.2 V时,器件仍表现出了最高的发射率。进一步地,设置特定的方波电压条件,即高电压为3.8 V,



图1　碳纳米管(CNT)薄膜器件示意
(a)器件;(b)测试实验装置

低电压为−1.2 V,周期为30.00 s,占空比为50%。在这种条件下,器件的红外辐射温度随电压的变换呈现出明显的周期性变化,发射率也相应地显著降低与升高。当器件处于−1.2 V电压时,其红外辐射温度高达68.5 °C,发射率为0.82,而在3.8 V电压下,器件的红外辐射温度则显著降低,几乎接近环境温度,同时发射率为0.23。这一变化直观地展示了器件在电压调控下实现的红外隐身效果(图2(d))。器件红外辐射温度的变化曲线如图2(e)所示,同时使用与器件测试环境相同的校准物来计算得到发射率,器件的发射率可以从0.82调制到0.23,调控范围达到了0.59。综上所述,本文制备的电致变发射率调控器件,其红外辐射温度的调制范围达到32.9 °C,发射率的调制范围达到0.59,相较于其他文献报道的27.0 °C与0.55的调制范围[17],本文器件性能有所提升。

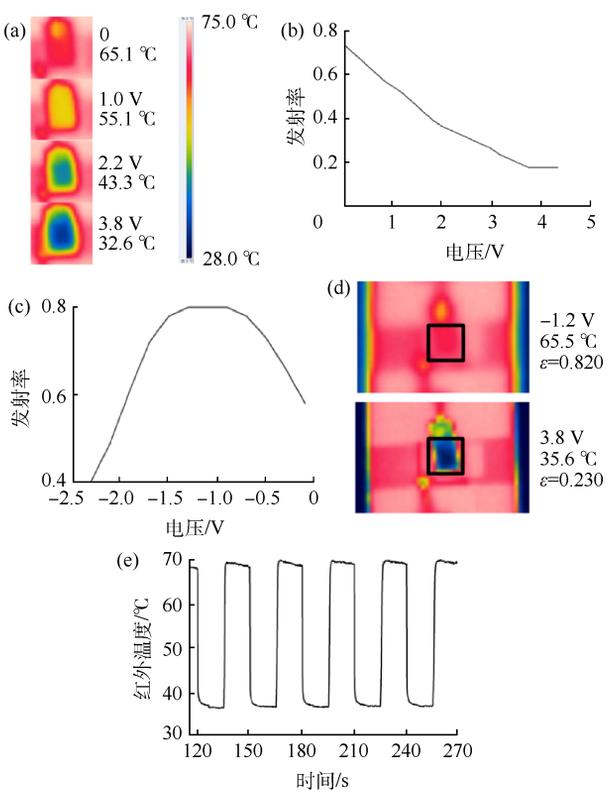


图2　CNT器件在电场调控下的红外性能
(a)红外图像;(b)红外发射率随正电压的变化曲线;(c)红外发射率随负电压的变化曲线;(d)器件在−1.2与3.8 V时的红外图像、红外辐射温度与发射率;(e)红外辐射温度的周期性变化

2.2　循环稳定性与响应时间

循环稳定性和响应时间是衡量电致红外发射率动态调控器件性能的核心指标。循环稳定性往往通过器件寿命来评估,所谓器件寿命,是指从器件投入使用开始,直到其最大发射率下降至初始值的90%所经历的完整工作周期数[19]。器件的响应时间,则特指在器件上发射率变化最为明显的位置,当受到电刺激或电压变化时,从发射率(或红外辐射温度)开始发生变化,到这一变化达到最终稳定值的90%所需要的时间[20]。为了精准地测量器件的循环稳定性及其响应时间,首先将器件放置在恒温70.0 °C的加热板上,接着设定波形发生器的方波电压参数,高压为3.8 V,低压为−1.2 V,占空比为50%,并以30.0 s为周期进行连续测试。同时热像仪以10帧/s的速度录制测试过程中的图像。图3(a)展示了器件在不同周期时红外辐射温度随电压变化的曲线。图3(b)和(c)取自图3(a),可以清晰地看到,第7周期的器件关-开响应时间为0.20 s,这与已有文献报道[17]的0.15 s相差无几,同时开-关的响应时间为0.80 s,这些数据进一步证明了该器件的优异性能。随着器件的持续运行,其响应时间开始逐渐增长,在第183周期器件的关-开响应时间略有增加,而开-关过程的响应时间更是显著延长到了10.00 s。在第242周期时,电压由3.8 V转换至−1.2 V后,器件已经不能在15.00 s内重新显示出稳定的高红外辐射温度,这一变化清晰地反映了器件在长时间运行后性能下降。器件的发射率与循环周期之间的关系如图3(d)所示,调制深度会随循环周期的增加逐渐下降,初始的最大发射率为0.82,然而在第183周期时,发射率已降低至0.74,衰减了约9%。基于此,可以估算器件的循环寿命约为200周期,满足器件的一定应用要求。

随着循环周期增加,响应恢复时间逐渐变长。器件在不同周期时红外辐射温度随电压的变化曲线如图4所示,在第494周期将时间增加到1.0 min,随着周期时间的延长,器件在−1.2 V电压下的红外辐射温度有所上升;第527周期将周期时间进一步增加到1.5 min,器件在相同电压下的发射率恢复了较稳定高发射率的状态。然而,当连续测试近13 h(即第796周期时),再次将周期时间延长至6.0 min,显示器件的红外辐射温度调制范围与响应速度显著减小,即使增长周期温度也不能快速地使离子完全脱嵌。这意味着尽管器件在某种程度上仍然可以工作,但其性能已经严重下降,器件已基本失效。

2.3　CNT薄膜结构循环稳定性

为进一步研究其循环稳定性的物理根源,通过

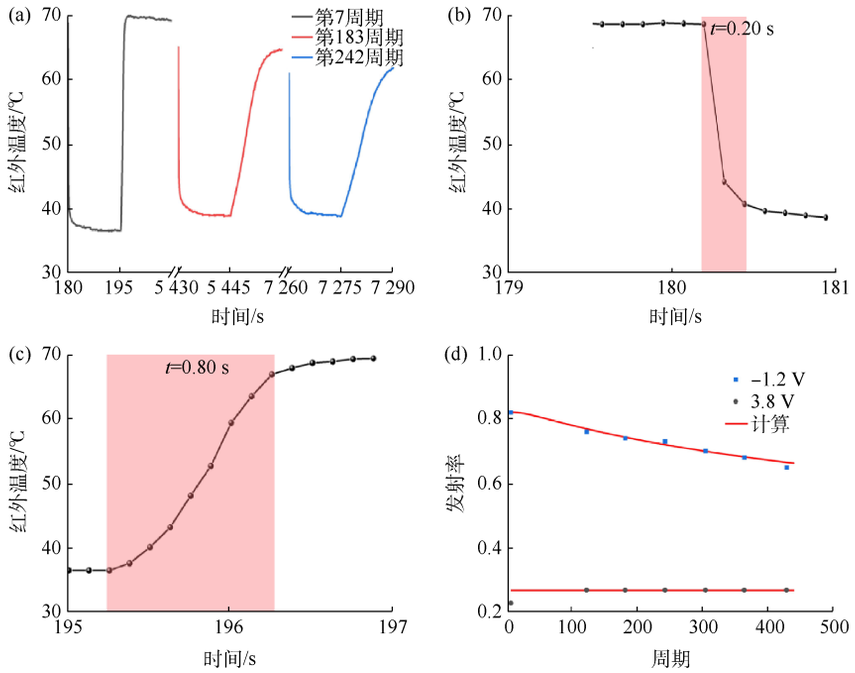


图3　CNT器件循环周期测试

(a)不同周期红外辐射温度随电压变化的曲线;(b)第7周期关-开响应时间;(c)第7周期开-关响应时间;(d)长期稳定性测试与计算

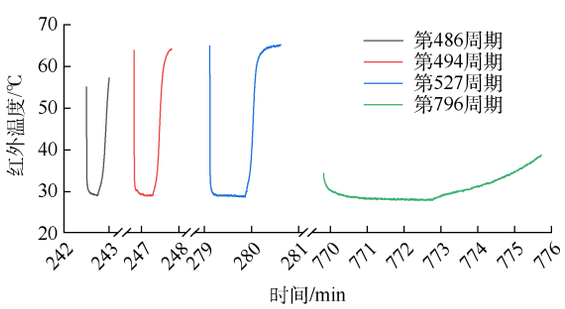


图4　器件在不同周期红外辐射温度随电压变化的曲线

SEM对原始CNT薄膜与服役后的CNT薄膜进行表征分析。如图5(a)所示,原始的CNT薄膜主要由直径在4~15 nm的CNT构成。在薄膜制备过程中,由于需要在收集滚筒上缠绕、在工作台上压实以及后续的转移与切割等操作,不可避免地引入了一些杂质与缺陷。这些杂质与缺陷虽然在一定程度上影响了薄膜的纯净度和完美性,但也为后续的离子嵌入过程提供了可能的空间和位点。为了进一步研究离子嵌入过程对CNT结构的影响,从可继续运行和已经失效的器件中取出了CNT薄膜进行表征。这些器件经过离子嵌入/脱出后,其内部CNT结构的SEM测试结果如图5(b、c)所示。在可继续运行的器件中,CNT薄膜中的CNT直径明显变大,约在50~100 nm。这表明离子嵌入过程对CNT的结构产生了影响,使其直径发生了明显的膨胀。而在失效的器件中,CNT的结构损坏得更加严重,不仅直径变得更大,有的甚至会呈现出束状结构,达到约500 nm。

图5清晰地表明,在器件使用过程中,离子嵌入与脱嵌对CNT结构的破坏,即使器件能够持续运行,CNT的结构完整性也会逐渐受损。离子液体插层调控示意如图6所示,束状结构是由于离子在嵌入与脱嵌CNT薄膜时,对CNT产生强烈挤压作用

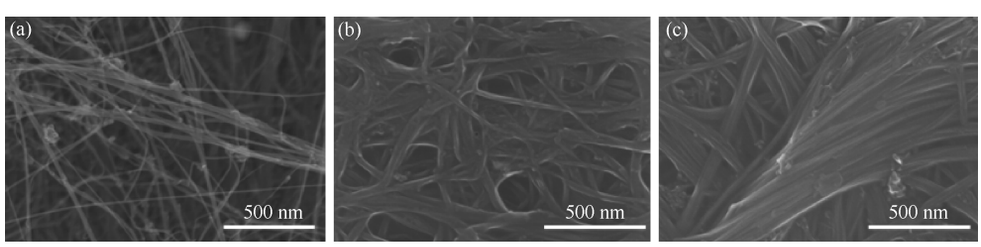
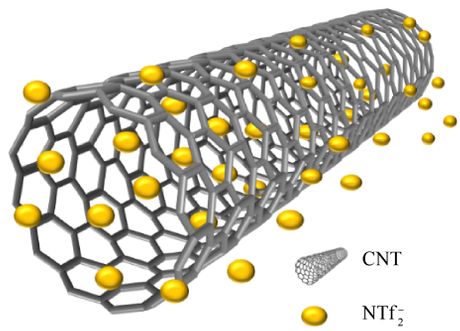


图5　不同状态下薄膜器件中CNT扫描电子显微镜(SEM)结果

(a)原始薄膜;(b)可继续运行器件;(c)已失效器件

而形成的。这种结构破坏增加了后续离子插层的难度,随着使用次数的增加,器件的响应速度逐渐减缓,恢复时间延长,调制范围缩小,达到器件寿命的使用周期后,最终失去调制能力。



注:CNT为碳纳米管;NTf_2^-为离子液体阴离子。

图6　离子液体插层调控示意

为了进一步探究CNT在经过电场刺激以及离子液体插层后的结构变化,对原始CNT以及使用后器件的CNT进行XRD分析,结果如图7所示,2θ衍射范围设定为10°~50°。在XRD表征结果中可以观察到在26°附近存在一个强烈的特征峰,这主要归因于CNT的(002)面,这个特征峰是CNT中石墨层间堆叠的反映,其强度通常与CNT的结构有序性直接相关。可以观察到,器件在经过电场刺激和离子液体插层后,其CNT的特征峰强度大大降低,这与之前通过SEM观察到的结果相一致,表明CNT的结构在经过电场和离子液体作用后受到损害,由于离子液体的插层导致CNT内部石墨层间的距离增大,导致(002)面的衍射强度降低。此外,不同使用周期的器件,CNT的损坏程度有所不同,随着使用周期的增加,CNT的结构破坏程度更明显。

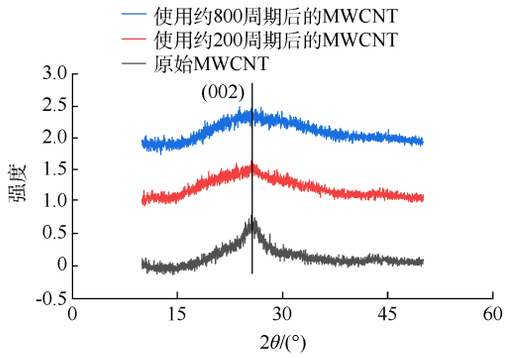


图7　不同周期CNT薄膜器件的X射线衍射(XRD)结果

同时,对隔膜进行了微结构表征分析,Celgard 2325隔膜是由聚丙烯/聚乙烯/聚丙烯(PP/PE/PP)组成的微孔隔膜,通过SEM对隔膜进行表征,如图8(a)所示,可以观察到隔膜上分布着大小不一的孔洞。这些孔洞不仅为离子提供了传输通道,还能储存离子液体。从使用过的器件中取出隔膜并再次进行SEM表征,研究已使用器件中隔膜的结构变化。与原始隔膜相比,使用后的隔膜孔洞数量明显减少,表明在器件的工作过程中,离子液体确实被储存在了这些微孔中,并随着器件的使用导致了孔洞的扩大(图8(b))。为了证明离子插层过程的存在,采用EDS表征确定薄膜中所含元素的种类及其相对含量,来验证使用后的器件中CNT薄膜中确实含有离子液体,如图8(c)为[HMIm]NTf_2的化学结构式。首先,对未使用的CNT薄膜进行EDS表征,结果如图8(e)所示。由图可知,未使用的CNT薄膜主要由C组成,含量约为89%,而S的含量仅有8%,这一结果符合CNT主要由碳原子构成的事实。然后,从使用后的器件中取出CNT薄膜进行表征,与

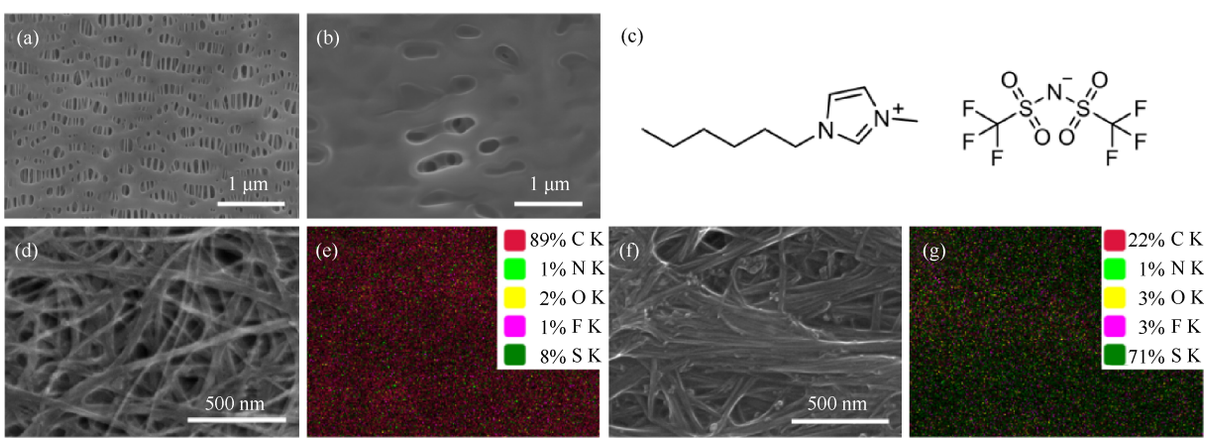


图8　不同使用状态CNT器件的表征结果

(a)未使用器件隔膜SEM;(b)已使用器件隔膜SEM;(c)[HMIm]NTf_2的化学结构式;(d)、(e)未使用器件的CNT薄膜SEM及其能谱仪(EDS);(f)、(g)已使用器件的CNT薄膜SEM及其EDS

未使用的薄膜相比,使用后的薄膜中C含量显著降低,仅为22%,而S含量则显著升高,达到了71%。这种元素含量的巨大变化表明,使用后的CNT薄膜中确实引入了大量的S。从结构式中可知,S是离子液体阴离子NTf_2^-的组成元素之一。因此,可以推断出使用后的器件中CNT薄膜中确实存留有离子液体的阴离子,即发生了阴离子插层的过程(图6)。

2.4 红外发射率循环稳定性机制

在红外动态器件上施加电场,CNT将受到离子周期性的应力冲击,这种冲击不仅作用于多壁CNT薄膜的层与层之间,还作用于每一根CNT,导致出现束状结构,进一步影响器件的性能,甚至存在器件失效的风险。为了对器件的循环稳定性及器件使用寿命进行预测,进行了器件发射率循环失效数学模型的建立。

根据图3可知,随着电压循环次数的增加,器件负压下的发射率逐渐变小,从而影响其红外发射率的调制幅度,这是由于在电压多次循环过程中,CNT的结构变化导致离子液体在其中脱嵌不完全导致的。则在N次循环后,器件在−1.2 V负压条件下的红外发射率为

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 - R, \tag{1}$$

式中:ε_n为施加负压时,器件的发射率;ε_0为器件初始负压下的发射率;R为N次循环后器件负压下的发射率减小值。

而在N次循环后,器件在正电压条件下的红外发射率基本维持不变,这是由于CNT的结构变化导致的不完全离子脱嵌反而有利于正压下离子的嵌入过程,所以3.8 V电压下的发射率为

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 - E_0, \tag{2}$$

式中:ε_p为施加正压时器件的发射率;E_0为初始器件发射率的调制幅度。

由图5可知,CNT的比表面积是影响其经历电压循环后R变化的主要因素,R的表达式为

$$R = k_1 S, \tag{3}$$

式中:k_1是比表面积系数,表示薄膜比表面积与发射率变化量之间的关系,k_1取4.63×10^{-3};S为比表面积变化量。CNT微结构在电压循环下的离子冲击应力产生的应变是影响其比表面积变化的主要因素。应变对CNT微结构比表面积的影响为

$$S = S_0 e^{-k_2 v}, \tag{4}$$

式中:S_0是初始CNT薄膜的比表面积,经由比表面积分析测试仪测量,S_0取220;k_2是应变系数,表示塑形应变与薄膜比表面积之间的关系,本计算中,取k_2=−32.452。进一步,对CNT应变的计算,基于Coffin-Manson模型[21]进行数学模型的构建

$$\frac{v}{2} = A(2N)^B, \tag{5}$$

式中:A为疲劳韧性系数,根据CNT物性,取A=−0.325;N为电压循环周期的数量;B是疲劳韧性指数,与频率和电压有关,具体表达为

$$B = -0.442 - 6\times10^{-4}U + 1.74\times10^{-2}\ln(1+f), \tag{6}$$

式中:U为电压;f为循环频率。

综上所述器件发射率循环稳定机制数学模型为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - k_1 S_0 e^{-k_2 2A(2N)^B}。 \tag{7}$$

由式(7)可知,器件在外加电压条件下,循环周期数量越大,循环频率越高,离子液的冲击将在CNT薄膜中产生更大的应变,导致有序结构破坏,CNT薄膜开始无序化,并团聚化,使其比表面积变小,使器件在负压下的离子脱嵌过程发射率逐渐变小。由图3(d)可知,当N=123时,发射率的测试结果为0.76。电压为−1.2 V,则U=1.2,周期为30.00 s,每小时循环120周期,则f=120,那么B=−0.359。代入器件发射率循环稳定机制数学模型,计算得ε=0.770,与测试结果相近。此外,根据器件寿命定义,R=0.082,即ε=0.738,代入器件发射率循环稳定机制数学模型,计算得N=193,与估算的器件循环寿命200周期相近。综上所述,计算与测试结果基本一致。而在正压下,CNT薄膜的结构变化对离子的嵌入过程影响较小,器件发射率在多次循环后较为稳定,同样与测试结果基本一致。此外,对于不同的器件,可以通过改变参数取值,进而修订发射率循环稳定机制模型,满足不同器件的需求,达到有效预测各类器件循环寿命的目的,为器件性能优化提供有力支持。

3 结 论

本文利用CNT薄膜作为电致变发射率材料和电极,结合Celgard 2325隔膜,并以离子液体[HMIm]NTf_2作为导电介质,制备出CNT薄膜红外发射率动态调控器件,同时得到以下结论:

(1)当施加不同电压时,该器件在红外热像仪下会呈现不同的红外图像,即发射率产生变化。在−1.2 V电压下,器件具有0.82的高发射率,当电压增至3.8 V时,发射率则显著降低至0.23,从而实现了约0.60的调制范围。此外,该器件具备出色的快速响应能力,最快调控响应速度可达0.20 s,并在200次循环内保持稳定性能。

(2)通过微结构分析,表明随着离子的嵌入与脱嵌,CNT与Celgard隔膜结构均被破坏。器件在初始使用阶段具有良好的红外发射率调制性能,随着使用周期的增加,CNT结构完整性逐渐被破坏,超过200个循环周期后,CNT结构被严重破坏,导致红外发射率电致调控性能损失,最后直到调控性能完全消失。Celgard隔膜的多孔结构,随着器件使用周期的增加,孔洞数量逐渐减少且直径显著增大。此外通过EDS分析使用后的器件,其C含量明显减少,S含量显著增加,证实离子插层过程的存在。

(3)根据Coffin-Manson模型,提出了器件发射率循环稳定机制模型。由于离子液体嵌入与脱嵌,在CNT中引起应变,导致结构破坏并团聚化,使其比表面积变小,影响器件在负压下的离子脱嵌过程,发射率逐渐变小,与测试结果基本一致。本文提出的CNT薄膜电致红外发射率调控器件稳定性机制模型,将为高性能与高稳定性的动态红外调控器件结构设计与材料选择提供可借鉴思路,同时也为其寿命预测提出了可行性方法。

参 考 文 献

[1] MORLAND J C, GRIMES D I F, HEWISON T J. Satellite observations of the microwave emissivity of a semi-arid land surface [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(2): 149-164.

[2] CHEN F, YUAN L, WU X, et al. Simultaneous tuning of the phase transition temperature and infrared optical properties of Mo-doped VO_2 powders for intelligent infrared stealth materials [J]. Ceramics International, 2023, 49(15): 25585-25593.

[3] NIU J L, WANG Y, ZOU X L, et al. Infrared electrochromic materials, devices and applications [J]. Applied Materials Today, 2021, 24: 101073-101099.

[4] DOU S L, XU H B, ZHAO J P, et al. Bioinspired microstructured materials for optical and thermal regulation[J]. Advanced Materials, 2021, 33(6): 2000697.

[5] XIAO L, MA H, LIU J K, et al. Fast adaptive thermal camouflage based on flexible VO_2/graphene/CNT thin films[J]. Nano Letters, 2015, 15(12): 8365-8370.

[6] JIA Y, LIU D Q, CHEN D S, et al. Transparent dynamic infrared emissivity regulators [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5087-5095.

[7] ZHAO H X, SUN Q Q, ZHOU J, et al. Switchable cavitation in silicone coatings for energy-saving cooling and heating [J]. Advanced Materials, 2020, 32(29): 2000870.

[8] CHENG B Z, ZHU Y L, YI Y, et al. Research progress of infrared electrochromic devices [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(20): 204205.

[9] ZHANG Y Z, LIU T, MENG B, et al. Broadband high photoresponse from puremonolayer graphene photodetector[J]. Nature Communications, 2013, 4(5): 1811.

[10] LI Q, LU J, GUPTA P, et al. Engineering optical absorption in graphene and other 2D materials: advances and applications[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(20): 1900595.

[11] POLAT E O, BALCI O, KOCABAS C. Graphene based flexible electrochromic devices[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6484-6492.

[12] SALIHOGLU O, UZLU H B, YAKAR O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage[J]. Nano Letters, 2018, 18(7): 4541-4548.

[13] ERGOKTAS M S, BAKAN G, STEINER P, et al. Graphene-enabled adaptive infrared textiles [J]. Nano Letters, 2020, 20(7): 5346-5352.

[14] HUANG H, LI J, KE H, et al. Impact of ionic liquids on effectiveness of tuning the emissivity of multilayer graphene [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(22): 26256-26263.

[15] GLADUSH Y, MKRTCHYAN A A, KOPYLOVA D S, et al. Ionic liquid gated carbon nanotube saturable absorber for switchable pulse generation [J]. Nano Letters, 2019, 19(9): 5836-5843.

[16] WANG F, ITKIS M E, BEKYAROVA E, et al. Charge-compensated, semiconducting single-walled carbon nanotube thin film as an electrically configurable optical medium[J]. Nature Photonics, 2013, 7(6): 459-465.

[17] SUN Y, CHANG H C, HU J, et al. Large - scale multifunctional carbon nanotube thin film as effective mid-infrared radiation modulator with long-term stability [J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(3): 2001216.

[18] 凌天杰,陈天鹏,吴永锋.一种石墨烯碳纳米管薄膜的制作工艺:CN109704310A[P].2019-05-03.

[19] DE LA YEDRA A G, PEDREJÓN J L, MARTÍN-MEIZOSO A, et al. Thermomechanical fatigue tests development and life prediction of a nickel base superalloy [J]. Experimental Techniques, 2016, 40(2): 777-787.

[20] ARGUN A A, AUBERT P H, THOMPSON B C, et al. Multicolored electrochromism in polymers: structures and devices[J]. Chemistry of Materials, 2004, 16(23): 4401-4412.

[21] HE X T, FU J Y. Experimental evidence that electrical fatigue failure obeys a generalized Coffin-Manson law [J]. Physics Letters A, 2017, 381(18): 1598-1602.

(责任编辑:兰丽丽)