文章编号:1005-4642(2025)08-0001-09

近代与综合实验

基于二氧化钒与有序碳纳米管复合薄膜的螺旋形柔性驱动器实验研究

马　赫[1],李　媛[1],刘　锴[2],方晓惠[1],张新平[1]
(1. 北京工业大学 物理与光电工程学院,北京 100124;
2. 清华大学 材料学院,北京 100084)

摘　要:柔性驱动器作为将外部刺激转化为机械运动的关键部件,在软体机器人领域具有重要应用价值. 针对现有碳基/聚合物复合驱动器响应速度慢、寿命短等问题,本研究提出了基于二氧化钒与有序碳纳米管复合薄膜的螺旋形柔性驱动器. 通过激光直写法制备具有各向异性特征的二氧化钒/碳纳米管复合薄膜,结合二氧化钒的金属-绝缘体相变特性与碳纳米管优异的光热转换性能,实现了快速响应的多维运动驱动. 实验结果表明:该驱动器在光激励下平均响应时间仅为 5 ms;经百万次循环测试后仍保持稳定形变性能,展现出优异的耐久性. 通过调控激光切割角度(37°～90°),可精确控制螺旋结构的直径(84～141 μm)和螺距. 本研究不仅为开发高性能柔性驱动器提供了新思路,同时通过材料制备、表征和器件测试的全流程实践,有效促进了学生对光学、凝聚态物理等学科知识的理解,并将所学知识应用到教学科研实践当中.

关键词:柔性驱动器;二氧化钒;碳纳米管
中图分类号:TP242;TB383.2　　**文献标识码:**A　　DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.08.001

机器人在工业生产、医疗健康、国防军事等领域应用广泛,对人类社会的影响日益重大,其研发、制造和应用是衡量国家科技创新和高端制造业水平的重要标志. 目前,机器人主要由刚体构建而成,但刚体机器人在复杂地形下存在灵活性较低、通过性受限等问题[1]. 基于仿生学原理,研究人员提出了仿生软体机器人的概念. 仿生软体机器人是利用软材料制造的机器人,具有较高的灵活性、柔顺性和出色的适应性,因此成为探索自然和执行特殊任务的重要载体和平台[2-3]. 不同于刚性机器人大量使用传感器和控制器来感受和响应外界刺激,软体机器人所需集成度更高,因此一般采用响应型功能材料(又称智能材料)对外界刺激进行响应[4]. 这些刺激响应型功能材料所构成的机械运动输出器件被称为柔性驱动器,其性能直接决定机器人的运动能力,开发高性能驱动器是提升软体机器人技术水平的关键[5-6].

近年来,智能材料的迅猛发展推动了柔性驱动器的进步. 基于智能材料的环境感知和驱动功能,并通过模仿自然生物,研究人员发展了各型柔性驱动器. 柔性驱动器一般采用复合材料制备,其中包含能够对外部激励(一种激励或多种激励)产生响应的活性层和对外部激励不敏感的非活性层[7]. 典型的柔性驱动器采用双层复合材料结构,通过活性层(如还原氧化石墨 RGO)与非活性层(如聚丙烯)的热膨胀/吸湿性差异产生应变梯度,实现弯曲形变. 例如,RGO/聚丙烯驱动器在光热刺激下曲率达到 2.8 cm^{-1},湿度刺激下曲率达 3.1 cm^{-1}[8-9];AuNPs@RGO/PMMA 复合膜通过光热形变驱动八足机器人爬行[10];CNT/PDMS 双层结构则利用光-力转换中的负反馈效应实现自振荡运动,利用这一效应,驱动器能够模拟仰卧起坐动作[11]. 然而,现有碳基/聚合物复合体系受材料本征特性限制(热膨胀率、吸湿性等),性能提升接近瓶颈[12].

二氧化钒(VO_2)因金属-绝缘体相变特性展现出了显著优势[13]. 热驱动下,VO_2 在 68 ℃附近经历金属-绝缘体的一级相变,并伴随着电子结

收稿日期:2024-11-24;修改日期:2025-05-15
基金项目:北京工业大学教育教学研究课题(No. ER2024KCB24);北京市自然科学基金(No. Z2006E01202301)
作者简介:马　赫(1985—),男,天津人,北京工业大学物理与光电工程学院副研究员,博士,研究方向为微纳光学. E-mail:mahe_beijing@bjut.edu.cn

构和晶格结构的变化. 高温时，VO_2 处于金属相，具有金红石晶体结构；低温时，VO_2 处于绝缘相，具有单斜晶体结构. 在四方晶体坐标系下，VO_2 相变时，晶格沿 c 轴收缩 1%，同时沿 a 轴和 b 轴分别膨胀 0.6%和 0.1%，沿 c 轴输出功率密度高达 7 J/cm^3（超聚合物驱动器 1 个数量级以上，比人类肌肉功率密度高 3 个数量级以上）[14]，且具有能量转换效率高、相变速度快、兼容性半导体工艺和性能稳定等优点，是理想的微纳驱动材料. VO_2 的高温制备条件（>500 ℃）需匹配耐高温的柔性基底，其中碳纳米管（CNT）薄膜凭借优异的吸光性、导电性、柔性和化学稳定性成为优选基底材料.

已有文献报道了基于 CNT 和 VO_2 复合薄膜的柔性驱动器[15-16]，但现有 VO_2/CNT 复合驱动器局限于各向同性结构，仅能实现弯曲运动. 旋转型驱动器通过结构创新拓展多维运动能力，并取得进展：碳纳米管加捻纤维实现溶剂/蒸汽驱动[17]，氧化石墨烯/SU-8 光刻胶复合结构调控湿度响应[18]，偶氮苯涂层诱导光控螺旋变形[19]. 尽管目前针对旋转型驱动器已经取得了一定进展，然而传统以有机物为基础构建的旋转型驱动器仍面临响应时间长（一般为秒级）且寿命较短的问题. 针对这一问题，本文提出了基于各向异性 VO_2/CNT 复合的螺旋驱动器，结合 VO_2 相变驱动速度快和 CNT 薄膜超薄且吸光性能好等优势，实现了高性能光致驱动器，为开发高速响应、长寿命的多维驱动单元提供了新方案.

1 材料与器件的制备

由于 CNT 薄膜具有吸光性强的特性，因此优选激光加工法制备 VO_2/有序 CNT 复合薄膜螺旋形驱动器. 激光加工法具有灵活、低成本优势，适合加工小批量样品. 螺旋形驱动器制备流程如图 1 所示，将激光通过显微物镜聚焦到 VO_2/有序 CNT 复合薄膜上，通过计算机控制二维电动平移台移动，切割并获得不同形状的 VO_2/有序 CNT 复合薄膜.

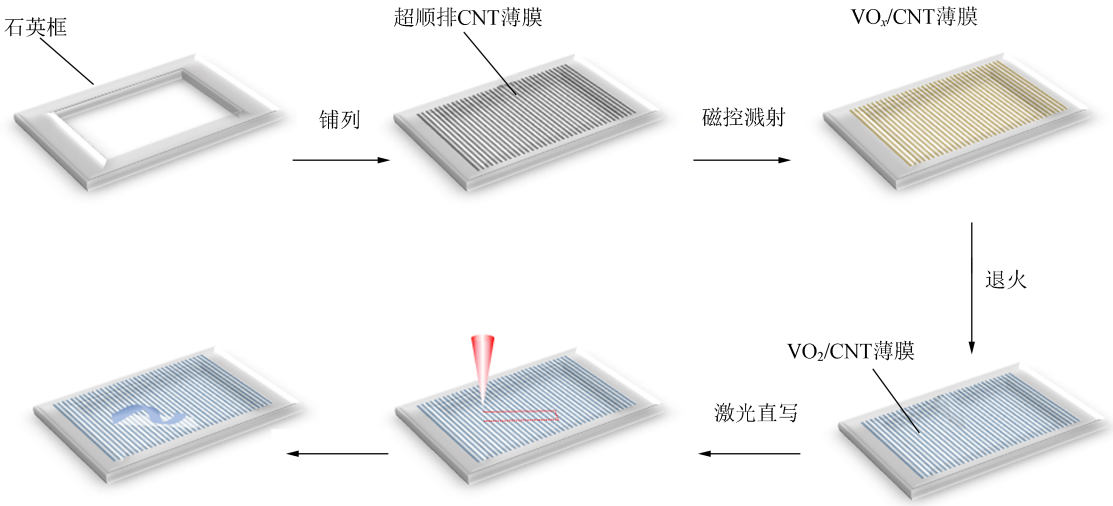
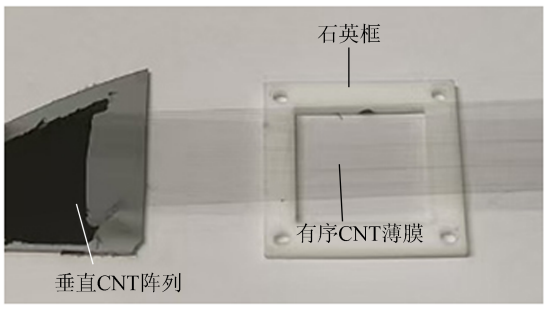


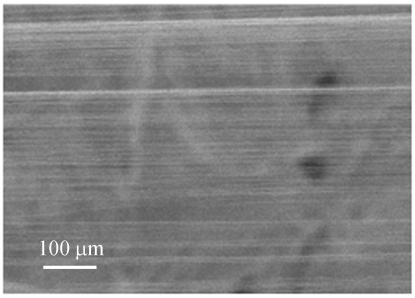
图 1 激光加工制备 VO_2/有序 CNT 复合薄膜螺旋形驱动器流程图

1.1 多层有序 CNT 薄膜的制备

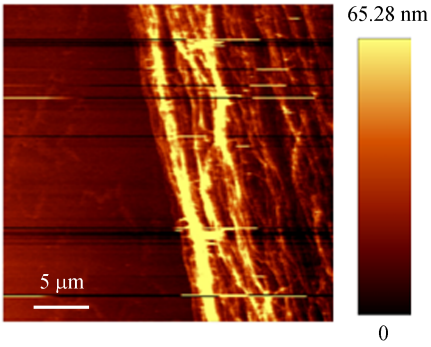
如图 2(a)和图 2(b)所示，有序 CNT 薄膜从化学气相沉积法制备的超顺排 CNT 阵列中抽出[20]，其薄膜厚度可以通过反复堆叠 CNT 薄膜控制. 将多层有序 CNT（10 层）铺在中间镂空的石英框上，并将无水乙醇滴在有序 CNT 薄膜表面. 利用原子力显微镜分别测试了置于玻璃基底上的单层与双层超顺排 CNT 薄膜的表面形貌以及高度差，如图2(c)和图2(d)所示. 单层和双层



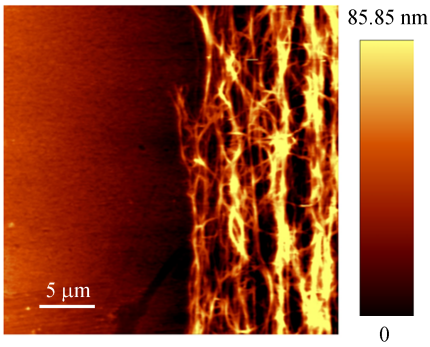
(a)有序 CNT 薄膜光学照片



(b)有序 CNT 薄膜扫描电子显微镜照片



(c)单层有序 CNT 薄膜原子力显微镜照片



(d)双层有序 CNT 复合薄膜原子力显微镜照片

图 2　有序 CNT 薄膜的表征

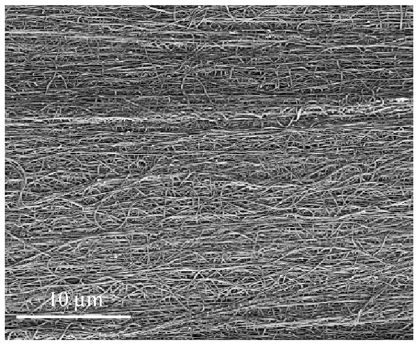
CNT 薄膜厚度分别为 65.28 nm 和 85.85 nm，可知双层厚度较理论叠加值(单层厚度的 2 倍)降低了 34.2%，证实了无水乙醇处理显著减小了层间间隙，使得 CNT 薄膜层与层之间紧密贴合[21].

1.2　VO_2/有序 CNT 复合薄膜的制备

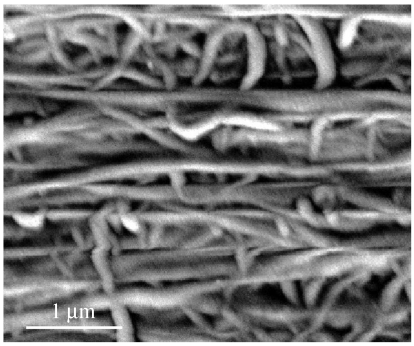
利用磁控溅射系统在 Ar 和 O_2 氛围中溅射金属钒靶，在制备好的有序 CNT 上沉积 VO_x 薄膜[22-25]. 溅射时，磁控溅射腔室内通入 Ar(气体流量为 35 sccm)和 Ar/O_2 混合气[V(Ar)∶V(O_2)=96∶4，气体流量为 15 sccm]. 其中，1 sccm表示标准条件(0 ℃，1 个大气压)下，每分钟流过的气体体积，即 1 sccm=1 cm^3/min. 腔室内压强为 0.6 Pa，直流电源功率为 55 W，腔体温度为 25 ℃，薄膜厚度由溅射时间控制. VO_2 薄膜典型沉积速率约为 4 nm/min，本实验中沉积时间为 50 min，因此 VO_2 薄膜厚度约为 200 nm. 将所得氧化钒/有序 CNT 复合薄膜置于真空管式炉中进行退火. 退火时，石英管中通入 3.5 sccm 的 O_2，压强为 4.5 Pa，退火温度为 450 ℃，退火时间为 10 min.

1.3　VO_2/有序 CNT 复合薄膜的表征

使用场发射扫描电子显微镜对 VO_2/有序 CNT 复合薄膜进行形貌表征，如图 3 所示. 尽管 VO_2/有序 CNT 复合薄膜中存在一些排列杂乱的 VO_2/CNT，但整体上看复合薄膜仍具有较好的取向性，这种有序排列为后续构建螺旋形驱动器奠定了基础.



(a)整体照片



(b)局部照片

图 3　VO_2/有序 CNT 复合薄膜的扫描电子显微镜照片

利用 WITec alpha300 型拉曼光谱仪测量不同温度下 VO_2/有序 CNT 复合薄膜拉曼光谱，结

果如图 4 所示. 测试时,将 VO_2/有序 CNT 复合薄膜从石英框上剥离,并粘到石英基片上,之后将石英基片粘到加热台上进行变温拉曼光谱测试. 由于石英片厚度仅为 0.5 mm,热平衡后样品温度和热板温度将达到一致. 拉曼光谱测试所用物镜为奥林巴斯产 100×显微物镜,显微物镜数值孔径为 0.9. 激发激光波长为 532 nm,功率约为 100 μW,光谱单次采集时间为 10 s,光谱积累 5 次. 当前温度下拉曼光谱测量完毕后,升温再进行下一个温度下的拉曼光谱测量. 为保证样品与热板温度一致,升温至指定温度后,等待 5 min 后再进行拉曼光谱测量. 当复合薄膜温度为 40 ℃时,VO_2/有序 CNT 复合薄膜在 141,191,223,260,313,394,487,618 cm^{-1} 处有拉曼光谱峰(图 4),这些拉曼光谱峰与已知单斜相 VO_2 拉曼光谱特征峰一致[14],证明此温度下 VO_2/有序 CNT 复合薄膜上的 VO_2 处于单斜相绝缘态. 随着温度逐渐升高,上述特征峰逐渐减弱,当复合薄膜温度达到 60 ℃时,VO_2 拉曼光谱特征峰消失,表明此时 VO_2 已从绝缘态转变为金属态,完成了金属绝缘体相变. 上述相变温度略低于 VO_2 典型相变温度(68 ℃)的原因是 CNT 具有较强的光吸收能力,进行拉曼光谱测试时,CNT 吸收激发激光能量,造成 VO_2/有序 CNT 复合薄膜具有一定的额外温升.

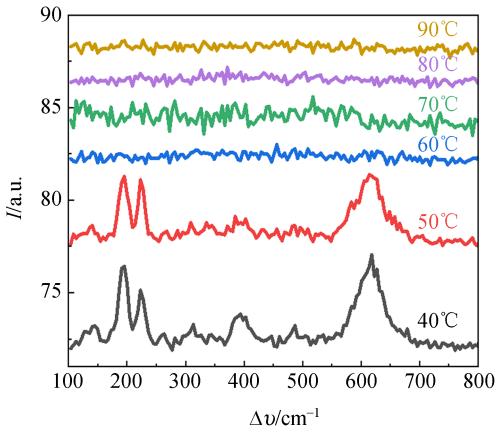


图 4 不同温度下 VO_2/CNT 复合薄膜拉曼光谱

图 5 为变温电阻测量实验结果. 通过测量 VO_2/有序 CNT 复合薄膜电阻 R 随温度 T 变化,研究 VO_2/有序 CNT 复合薄膜上 VO_2 的相变. 首先,将 VO_2/有序 CNT 复合薄膜切割成矩形;然后,将其固定在绝缘硅基底上,并点上 4 个等间距的导电银胶点作为电极;最后,利用 Cascade 公司 M150 型探针台和安捷伦 B2900 型双通道源表,采用四探针法测量 VO_2/有序 CNT 复合薄膜电阻,样品温度通过程序升温的加热板控制. 如图 5 所示,当 T 从 25 ℃升高至 90 ℃(升温速率 3 ℃/min),VO_2/有序 CNT 复合薄膜的 R 从 20 Ω降低到 15 Ω,相对电阻变化率为 25%. R-T 曲线中,68 ℃附近的电阻突变以及升降温曲线中存在的回滞,均是 VO_2 相变的典型特征[26]. 随着 T 升高至 68 ℃以上,VO_2 晶格结构发生变化,由单斜相转变为金红石相,这意味着 VO_2 发生了一级相变. 相变所涉及的材料物理性质发生不连续变化,导致加热和冷却循环中出现回滞现象.

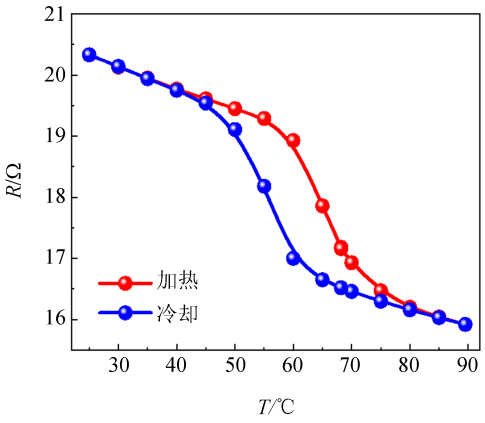
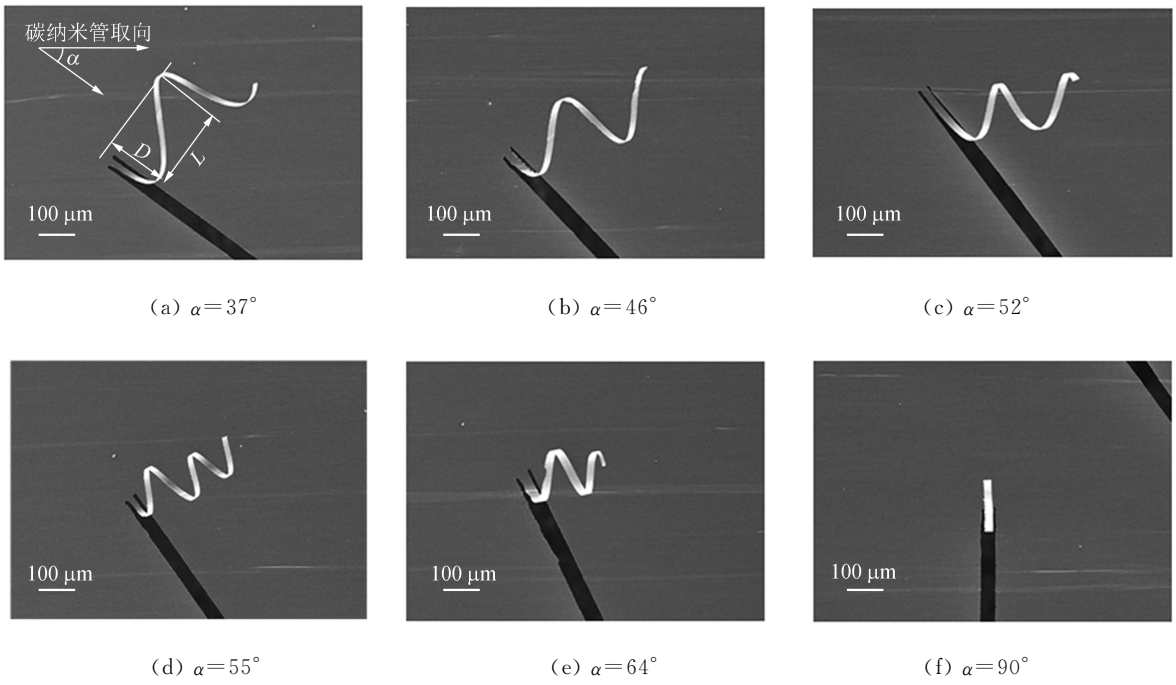


图 5 VO_2/CNT 复合薄膜的 R-T 曲线

1.4 VO_2/有序 CNT 复合薄膜基螺旋形驱动器的制备

为构建螺旋形驱动器件,在 VO_2/有序 CNT 复合薄膜上采用激光切割矩形微条,由于有序 CNT 薄膜的各向异性,当矩形条和 CNT 取向夹角 $\alpha=0°\sim90°$ 时,即可获得不同形状的螺旋形驱动器. 实验中,使用 Leukos 公司的 3 W 超连续白光激光器. 激光经奥林巴斯公司生产的 50×显微物镜(数值孔径为 0.5)聚焦到样品上,光斑直径约为 10 μm. 定义切割方向与 CNT 取向之间夹角为 α(切割角),并研究 α 与驱动器形状之间的关联. 图 6 为不同切割角下螺旋驱动器的扫描电子显微镜照片.

螺旋形驱动器的形状可以用螺旋直径 D 和螺距 L 来描述. 如图 7 所示,随着 α 从 37°增加到 90°,D 和 L 均减小. 因此,螺旋形驱动器的几何形状可以通过控制切割角 α 调控.



(a) $\alpha=37°$　(b) $\alpha=46°$　(c) $\alpha=52°$

(d) $\alpha=55°$　(e) $\alpha=64°$　(f) $\alpha=90°$

图 6　不同切割角下 VO_2/有序 CNT 复合薄膜基螺旋驱动器的扫描电子显微镜照片

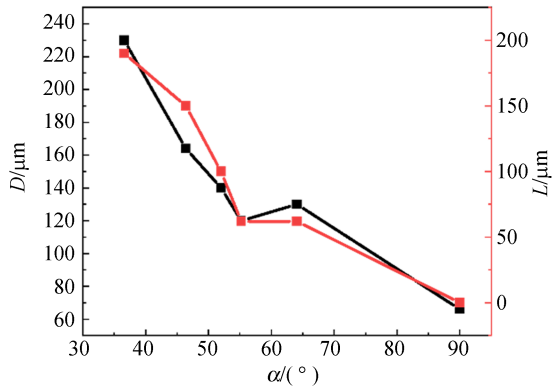


图 7　螺旋直径 D 和螺距 L 与切割角 α 的关系

2　VO_2/有序 CNT 复合薄膜基螺旋形驱动器的机理研究和性能测试

利用体式光学显微镜观察直接加热下螺旋驱动器($\alpha=52°$)的形状随温度的变化，观测结果如图 8 所示. 当 T 从 40 ℃升高至 67 ℃时，驱动器的螺旋直径从 141 μm 缩小至 118 μm. 当 T 达到 75 ℃，螺旋直径缩小至 84 μm. 此时，VO_2 完成相变，螺旋驱动器的螺旋直径最小，而螺距最大. 降温过程中，随着 T 下降至 40 ℃，螺旋驱动器又完全恢复至初始状态.

图 9(a)呈现了驱动器的螺旋直径 D 随 T 的变化曲线. 当样品升温至 75 ℃附近时，由于 VO_2 结构相变，螺旋驱动器的螺旋直径急剧下降. 由于螺旋驱动器悬空在石英框上，并不与加热台直接接触，所以加热台温度并不代表螺旋驱动器自身温度. 显然，螺旋驱动器温度应低于加热台温度，这就解释了为何所测得 VO_2 结构相变温度偏高. 由于 CNT 薄膜具有良好的吸光特性，并能高效地将光能转化为热能，因此 VO_2/有序 CNT 复合薄膜基螺旋形驱动器能够被低功率激光驱动. 如图 9(b)所示，采用北京凯普林公司生产的波长为 808 nm 半导体激光作为激励源，该激光器的输出功率可以通过电流调节且可以调制激光频率. 当激光功率密度超过 0.3 W/cm^2 时，螺旋形驱动器直径从 142 μm 下降至 128 μm.

搭建如图 10(a)所示的系统测量螺旋形驱动器的响应时间. 螺旋驱动器处于探测光路之中，侧向电调制激光用来激发螺旋驱动器变形. 变形的螺旋驱动器将调制探测器测量得到的光信号，从而测量得到螺旋驱动器的响应时间. 实验所用激光功率密度为 0.3 W/cm^2，激光器的调制频率为 5 Hz. 螺旋驱动器响应时间如图 10(b)和图 10(c)所示，其中时间响应曲线上升沿为 5.4 ms，下降沿为 4.6 ms. 因此，螺旋驱动器的平均光响应时间为 5 ms.

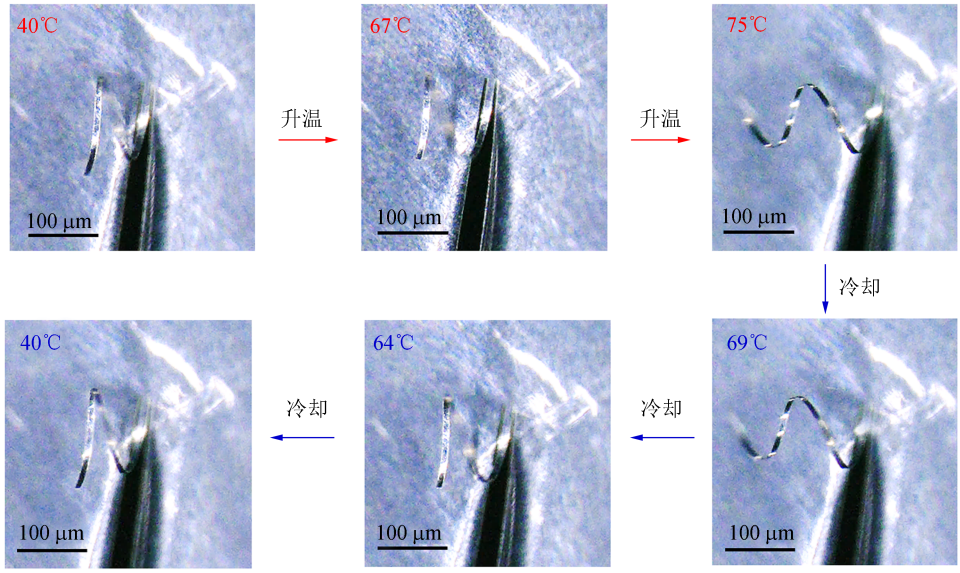
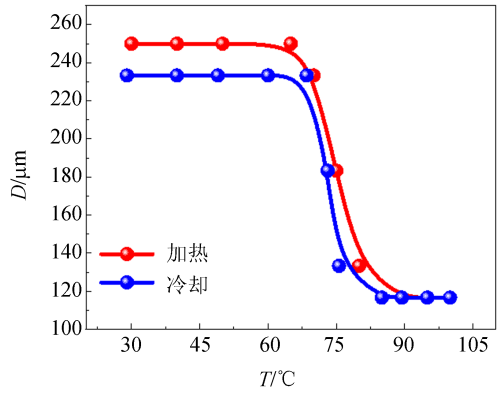
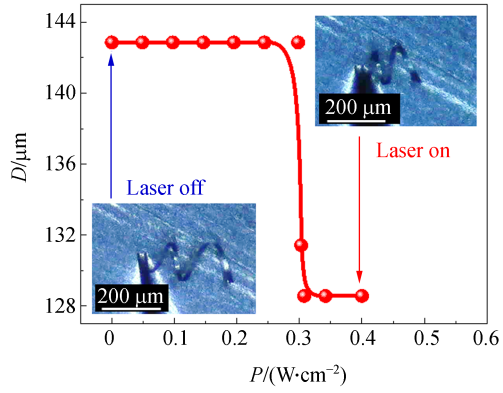


图 8 不同温度下螺旋驱动器的光学照片

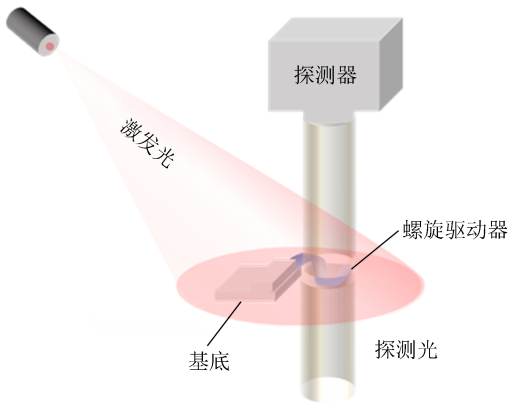


(a)驱动器直径随温度变化

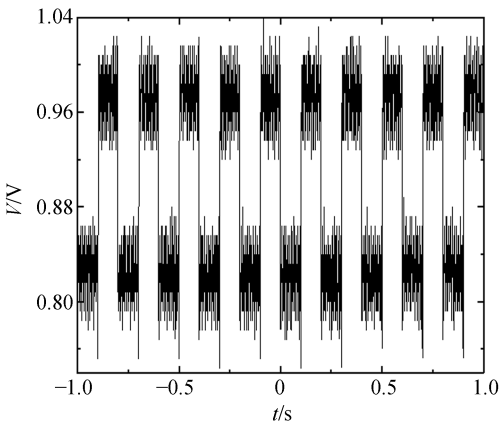


(b)驱动器直径随激光功率密度变化

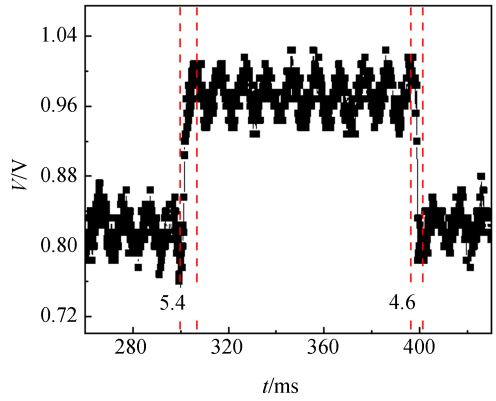
图 9 不同驱动方式下 VO_2/有序 CNT 复合薄膜基螺旋形驱动器的形变



(a)螺旋驱动器响应时间测试系统



(b)螺旋驱动器响应时间曲线



(c)螺旋驱动器响应时间曲线局部放大图

图 10　螺旋驱动器响应时间测试

表 1 对比了 VO_2/有序 CNT 螺旋驱动器与不同有机-无机物复合螺旋驱动器的响应时间，可见 VO_2/有序 CNT 螺旋驱动器的响应时间远短于有机-无机物复合螺旋驱动器. 这种响应时间优势一方面源自 VO_2 相变速度快，另一方面也源自 VO_2/有序 CNT 螺旋驱动器整体厚度小(如单层 CNT 厚度为 200 nm，则 VO_2/有序 CNT 薄膜整体厚度仅为 400 nm)所导致的极小热容.

表 1　典型螺旋形柔性驱动器性能对比

材料	响应时间	激励方式	文献
SU-8/氧化石墨烯螺旋驱动器	20 s	湿度	[18]
聚对苯二甲酸乙二酯结合偶氮苯螺旋形驱动器	12 s	光激励	[19]
CNT 薄膜/石蜡复合螺旋驱动器	1 s	光激励	[27]
CNT 薄膜/聚二甲基硅氧烷	5 s	电激励	[28]
麦克烯/CNT/石蜡螺旋驱动器	2 s	光激励	[29]
聚氨酯橡胶螺旋驱动器	60 s	水蒸气	[30]
CNT/NdFeB/聚二甲基硅氧烷	15 s	光驱动	[31]
VO_2/有序 CNT	5 ms	光驱动	本文

最后，测量了螺旋驱动器件在空气中工作的稳定性. 在空气中，利用电调制激光激发螺旋驱动器变形，频率为 50 Hz. 分别在驱动器经历 10^2，10^3，10^4，10^5，10^6 次记录螺旋驱动器形变幅度，如图 11 所示，即使驱动器经历百万次形变，仍然能保持良好的形变能力，证明 VO_2/有序 CNT 复合薄膜基螺旋形驱动器能够长期稳定服役.

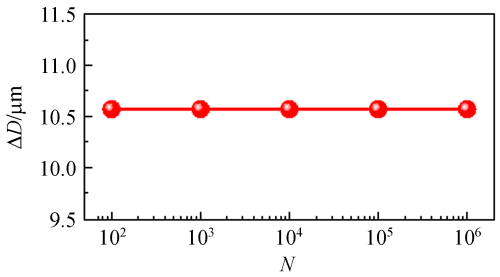


图 11　螺旋驱动器在空气中的稳定性测试

3　结束语

本文构建了具有各向异性特征的 VO_2/CNT 复合薄膜. 在此基础上，利用激光直写法制备了螺旋形驱动器. 该驱动器能够响应外界激励(如热和光)，并产生旋转运动. 光激励下，螺旋型驱动器的平均响应时间为 5 ms. 该驱动器经历百万次循环测试仍然保持稳定的形变性能. 通过上述实验，让学生学习并使用扫描电子显微镜、拉曼光谱等材料表征设备以及磁控溅射、激光直写等材料制备和加工手段，探究了 VO_2 相变的特性，为未来在光学、凝聚态物理等相关领域深造奠定了基础.

参考文献：

[1] 史震云，朱前成. 基于智能驱动器的软体机器人系统[J]. 北京航空航天大学学报，2016，42(12)：2596-2602.

[2] WANG H，TOTARO M L，BECCAI L. Toward perceptive soft robots：Progress and challenges [J]. Advanced Science，2018，5(9)：1800541.

[3] SITTI M. Miniature soft robots-road to the clinic [J]. Nature Reviews Materials，2018，3(6)：74-75.

[4] MIRIYEV A，STACK K，LIPSON H. Soft material for soft actuators [J]. Nature Communications，2017，8(1)：596.

[5] RUS D，TOLLEY M Y. Design，fabrication and control of soft robots [J]. Nature，2015，521(7553)：467-475.

[6] LASCHI C，MAZZOLAI B，CIANCHETTI M. Soft robotics：Technologies and systems pushing

the boundaries of robot abilities [J]. Science Robotics, 2016,1(1):eaah3690.

[7] CHEN Y H, YANG J J, ZHANG X, et al. Light-driven bimorph soft actuators: Design, fabrication, and properties [J]. Materials Horizons, 2021, 8(3):728-757.

[8] CHEN L Z, WENG M C, ZHOU P D, et al. Graphene-based actuator with integrated-sensing function [J]. Advanced Functional Materials, 2019,29(5):1806057.

[9] CHEN L Z, WENG M C, ZHOU P D, et al. Multi-responsive actuators based on a graphene oxide composite: Intelligent robot and bioinspired applications [J]. Nanoscale, 2017,9(28):9825-9833.

[10] HAN B, ZHANG Y L, ZHU L, et al. Plasmonic-assisted graphene oxide artificial muscles [J]. Advanced Materials, 2019,31(5):e1806386.

[11] YANG L L, CHANG L F, HU Y, et al. An autonomous soft actuator with light-driven self-sustained wavelike oscillation for phototactic self-locomotion and power generation [J]. Advanced Functional Materials, 2020,30(15):1908842.

[12] TIAN Y, LI Y T, TIAN H, et al. Recent progress of soft electrothermal actuators [J]. Soft Robot, 2021,8(3):241-250.

[13] MA H, XIAO X, ZHANG X P, et al. Recent advances for phase-transition materials for actuators [J]. Journal of Applied Physics, 2020,128(10):101101.

[14] LIU K, CHENG C, CHENG Z T, et al. Giant-amplitude, high-work density microactuators with phase transition activated nanolayer bimorphs [J]. Nano Letters, 2012,12(12):6302-6308.

[15] WANG T Y, TORRES D, FERNANDEZ F E, et al. Increasing efficiency, speed, and responsivity of vanadium dioxide based photothermally driven actuators using single-wall carbon nanotube thin-films [J]. ACS Nano, 2015,9(4):4371-4378.

[16] WANG T Y, TORRES D, FERNANDEZ F E, et al. Maximizing the performance of photothermal actuators by combining smart materials with supplementary advantages [J]. Science Advances, 2017,3(4):e1602697.

[17] CHEN P N, HE S S, XU Y F, et al. Electromechanical actuator ribbons driven by electrically conducting spring-like fibers [J]. Advanced Materials, 2015,27(34):4982.

[18] MA J N, ZHANG Y L, HAN D D, et al. Programmable deformation of patterned bimorph actuator swarm [J]. National Science Review, 2020,7(4):775-785.

[19] VERPAALEN R C P, CUNHA M P, ENGELS T A P, et al. Liquid crystal networks on thermoplastics: Reprogrammable photo-responsive actuators [J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2020,59(11):4532-4536.

[20] LIU K, SUN Y H, CHEN L, et al. Controlled growth of super-aligned carbon nanotube arrays for spinning continuous unidirectional sheets with tunable physical properties [J]. Nano Letters, 2008,8(2):700-705.

[21] XU W, CEN Y, ZHANG H, et al. High-strength carbon nanotube film from improving alignment and densification [J]. Nano Letters, 2016,16(2):946-952.

[22] ZHANG C D, GUO Y J, YANG Z H, et al. Effect of oxygen flow rate on magnetron-sputtering-based preparation and photoelectric properties of vanadium dioxide films [J]. Thin Solid Films, 2025,809:140595.

[23] ZHU M D, WANG H, LI C, et al. Thickness-modulated thermochromism of vanadium dioxide thin films grown by magnetron sputtering [J]. Surface & Coatings Technology, 2019,359:396-402.

[24] SIRJITA E N, BOULLE A, ORLIANGES J C, et al. Structural and electrical properties of high-performance vanadium dioxide thin layers obtained by reactive magnetron sputtering [J]. Thin Solid Films, 2022,759:139461.

[25] YA Q, JIE C, YUAN L, et al. Fabrication of low phase transition temperature vanadium oxide films by direct current reactive magnetron sputtering and oxidation post anneal method [J]. Infrared Physics & Technology, 2014,67:126-130.

[26] MA H, HOU J W, WANG X W, et al. Flexible, all-inorganic actuators based on vanadium dioxide and carbon nanotube bimorphs [J]. Nano Letters, 2017,17(1):421-428.

[27] DENG J, LI J F, CHEN P N, et al. Tunable photothermal actuators based on a preprogrammed aligned nanostructure [J]. Journal of the American Chemical Society, 2016,138(1):225-230.

[28] LI Q W, WANG X B, DONG L X, et al. Spirally

deformable soft actuators and their designable helical actuations based on a highly oriented carbon nanotube film [J]. Soft Matter, 2019, 15(47): 9788-9796.

[29] DING J, MA H, XIAO X, et al. Flexible torsional photo actuators based on MXene-carbon nanotube-paraffin wax films [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(51): 57171-57179.

[30] ZHAO C, LIU J L, DUAN L, et al. Biomimetic water-responsive helical actuators for space-efficient and adaptive robotic grippers [J]. Journal of Bionic Engineering, 2024, 21(6): 2847-2863.

[31] TIAN Z Z, XUE J Z, XIAO X Z, et al. Optomagnetic coordination helical robot with shape transformation and multimodal motion capabilities [J]. Nano Letters, 2024, 24(9): 2885-2893.

Experimental study on spiral flexible actuator based on vanadium dioxide and ordered carbon nanotube composite film

MA He[1], LI Yuan[1], LIU Kai[2], FANG Xiaohui[1], ZHANG Xinping[1]

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a key component that converts external stimuli into mechanical motion, the flexible actuator holds significant application value in the field of soft robotics. Addressing the issues of slow response speed and short lifespan in existing carbon-based/polymer composite actuators, this study proposes a spiral flexible actuator based on a composite film of vanadium dioxide and ordered carbon nanotubes. The vanadium dioxide/carbon nanotube composite film with anisotropic characteristics was fabricated via laser-direct writing, and the combination of vanadium dioxide's metal-insulator phase transition properties and the excellent photothermal conversion performance of carbon nanotubes enabled rapid-response multidimensional motion actuation. Experimental results showed that the actuator had an average response time of only 5 ms under light stimulation. Moreover, it maintained stable deformation performance after a million cycles of testing, demonstrating excellent durability. By adjusting the laser cutting angle (37°～90°), the diameter (84～141 μm) and pitch of the spiral structure could be precisely controlled. This study not only provides a new idea for the development of high-performance flexible actuators but also, through the full-process practice of material preparation, characterization, and device testing, effectively promotes students' understanding of knowledge in disciplines such as optics and condensed matter physics and applies the learned knowledge to teaching and research practice.

Key words: flexible actuator; vanadium dioxide; carbon nanotube

[编辑：龙玉梅]