研究论文

硒化银基柔性近红外光热电探测器的制备及性能

张　帅[1], 李登极[1], 李博文[1,2], 刘泽昆[3], 吴振华[4,5,*], 何颂贤[1,2,†]

(1. 香港城市大学 材料科学与工程系, 香港特别行政区 999077; 2. 香港城市大学 太赫兹与毫米波全国重点实验室, 香港特别行政区 999077; 3. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237; 4. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 5. 上海交通大学 微纳工程科学全国重点实验室, 上海 200240)

摘要: 柔性近红外探测器在可穿戴健康监测、曲面成像及分布式光感知等领域应用前景广阔, 但常依赖外部供电, 且机械适配性与空间光信号识别能力有待提升。本文以聚酰亚胺(polyimide, PI)为柔性基底, 通过 Ag/Se 逐层沉积与快速热退火制备 Ag_2Se 薄膜, 并构建零偏压近红外光热电探测器。所得薄膜以 β-Ag_2Se 相为主, 呈现 (00*l*) 择优取向及稳定的 n 型热电输运特性, 室温塞贝克系数约为−105 μV·K^{-1}。当 1 550 nm 激光分别照射器件两端时, 输出电压极性发生反转, 表观电压响应度约为 50 V·W^{-1}, 该现象与光热电效应主导的响应机制一致。器件在重复光照开关及循环弯曲测试中保持稳定的电学响应, 6×6 柔性阵列可实现空间光照图案的二维电压映射。结果表明, Ag_2Se/PI 器件兼具柔性、零偏压响应及空间感知能力, 在柔性近红外传感领域具有应用潜力。

关键词: 硒化银; 近红外探测; 光热电效应; 塞贝克效应; 阵列成像

中图分类号: TB34　　**文献标志码:** A

DOI: 10.3724/jfmd.2609123　　CSTR: 32180.14.jfmd.2609123

Preparation and performance of silver selenide-based flexible near-infrared photothermoelectric detectors

ZHANG Shuai[1], LI Dengji[1], LI Bowen[1,2], LIU Zekun[3], WU Zhenhua[4,5,*], HO Johnny C.[1,2,†]

(1. Department of Materials Science and Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong SAR 999077, China; 2. State Key Laboratory of Terahertz and Millimeter Waves, City University of Hong Kong, Hong Kong SAR 999077, China; 3. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 4. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 5. State Key Laboratory of Micro-Nano Engineering Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Flexible near-infrared photodetectors hold promise for applications in wearable health monitoring, curved-surface imaging, and distributed optical sensing. However, their practical

收稿日期: 2026−09−23;　　**修订日期:** 2026−10−22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(C 类)(No.52505624); 上海市青年科技英才扬帆计划(No.24YF2708000)

通信作者: *zhenhuawu@sjtu.edu.cn; †johnnyho@cityu.edu.hk

implementation remains constrained by the need for external power supplies, limited mechanical adaptability, and insufficient spatial light recognition capabilities. In this work, Ag_2Se thin films were fabricated on flexible polyimide substrates via layer-by-layer deposition of Ag and Se, followed by rapid thermal annealing, to construct a zero-bias near-infrared photothermoelectric detector. The resulting film primarily consisted of β-Ag_2Se, exhibited a degree of (00*l*) preferred orientation, and demonstrated stable n-type thermoelectric behavior with a room-temperature Seebeck coefficient of approximately −105 $\mu V \cdot K^{-1}$. Upon irradiation of opposite device ends with a 1 550 nm laser, the output voltage reversed polarity, yielding an apparent voltage responsivity of approximately 50 $V \cdot W^{-1}$; this behavior is consistent with a photothermoelectric-dominated response mechanism. The device maintained stable electrical responses during repeated light-switching and cyclic bending tests. Furthermore, a 6×6 flexible detector array enabled two-dimensional voltage mapping of spatial illumination patterns. These results demonstrate the potential of flexible Ag_2Se/PI devices for zero-bias near-infrared sensing and spatial optical-field detection.

Key words: silver selenide; near-infrared detection; photothermoelectric effect; Seebeck effect; array imaging

0 引言

随着可穿戴电子、柔性医疗健康监测及曲面光电成像系统的飞速发展，市场对高性能近红外探测器提出了更高要求。现代器件不仅需在室温下保持高灵敏、稳定的光电响应，还需兼具低功耗、优异的机械柔韧性以及精细的空间光信号识别能力[1-4]。然而，传统近红外光子型探测器主要依赖半导体材料中的带间电子跃迁，其响应波段受限于固有的材料带隙与特定的器件结构设计；特别是部分窄带隙器件，为有效抑制暗电流和热噪声，往往极度依赖高外加偏压或低温真空制冷环境[5-8]。这些苛刻的运行条件不仅大幅增加了系统的体积与功耗复杂度，更成为其在轻薄化、可弯曲柔性平台上高效集成的主要瓶颈。因此，开发能够脱离复杂冷却系统、在零偏压（自供电）条件下稳定运行的高性能柔性近红外探测器，对推动下一代柔性光电系统的集成化与便携化应用具有重要的科学意义与实用价值。

光热电（photothermoelectric, PTE）效应通过突破传统光电导与光伏响应的局限，为构建新型零偏压自供电光探测器开辟了独特的能量转换路径[9-11]。在该机制下，材料吸收局域入射光后，光子能量经由非辐射弛豫过程高效转化为热能，引发受照区域局部升温，从而在器件两端诱导产生显著的温度梯度。在这一热力学驱动力作用下，载流子发生定向扩散，最终形成稳定的开路热电压输出。与受限于半导体固有带隙的光子型响应不同，光热电探测仅需材料对目标波段具备有效光吸收即可实现宽光谱响应；然而，其最终的光电响应性能与输出效率，仍深层次受制于材料的光吸收率、塞贝克系数、电导率、热导率分布以及电极接触几何结构等多维物理因素的综合协同调控[12]。

硒化银（Ag_2Se）是近室温范围内具有代表性的 n 型热电半导体[13-16]。低温 β-Ag_2Se 具有优良的电子输运特性和较低的热导率，并可通过薄膜工艺与聚酰亚胺（polyimide, PI）等柔性基底结合。近年来，化学计量比、晶体取向和成膜工艺的调控推动了柔性 Ag_2Se 热电材料的发展[17-19]。然而，相关研究主要集中于低品位热能收集和柔性热电发电，关于 Ag_2Se 薄膜在局域近红外探测、照射位置判别和阵列空间感知方面的研究仍相对有限。

对于面内型光热电探测器，输出电压不仅取决于材料的热电特性，还与光照位置和温度梯度方向有关。同时，单个器件的位置响应能否扩展为空间光场映射，也是实现阵列应用的关键[20-21]。Ag/Se 逐层沉积结合短时快速热退火能够实现前驱体组分调控及低热暴露条件下的薄膜形成，并与柔性器件图案化制备工艺相兼容。基于此，本文在 PI 基底上制备柔性 Ag_2Se 薄膜，构筑 Au/Ag_2Se/Au 面内型光热电探测器，研究其物相结构、热电响应、弯

曲稳定性及 1550 nm 近红外光热电特性, 并进一步通过柔性阵列验证空间光照图案的电压映射能力。

1　实验

1.1　材料制备

选用纯度均为 99.99% 的 Ag 和 Se 作为蒸发源材料, 分别置于热蒸镀设备的钨舟中。待腔体真空度达到设定值后, 在 PI 基底表面按照预定顺序逐层沉积 Ag 层和 Se 层, 形成 Ag/Se 叠层前驱膜。根据各元素的沉积量进行换算, Ag 与 Se 的名义摩尔比控制为 2.00∶1.05, 即在 Ag_2Se 理论化学计量比的基础上使 Se 过量约 5%。考虑到 Se 具有较高的挥发性, 适量增加 Se 的初始沉积量有助于补偿沉积及后续热处理过程中可能发生的 Se 损失, 从而降低薄膜偏离化学计量比的风险。Ag 和 Se 的沉积速率约为 0.05 $nm\cdot s^{-1}$, 叠层前驱膜的总厚度约为 200 nm。沉积完成后, 将 Ag/Se 叠层前驱膜置于氩气气氛中进行快速热退火(rapid thermal annealing, RTA)。退火过程中, 升温速率为 100 $K\cdot s^{-1}$, 退火温度为 180 ℃, 保温时间为 10 s。快速热处理促进了 Ag 与 Se 之间的界面扩散和固相反应, 适量过量 Se 的沉积设计有助于补偿热处理过程中可能发生的 Se 损失, 最终获得组分接近理论化学计量比的 Ag_2Se 薄膜。

1.2　测试表征

采用场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察薄膜表面形貌, 并通过能量散射 X 射线谱(energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS)面扫描和定量分析获得 Ag、Se 元素分布及原子比。采用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)在 2θ 为 20°~80°范围内测试薄膜的晶体结构, 利用 X 射线光电子能谱仪(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)分析元素组成和近表面化学环境, 并进行 Ag、Se 元素原子百分比定量分析。采用塞贝克系数/电阻测量系统测试薄膜的变温塞贝克系数和温差电压关系, 并测量 300～400 K 范围内的电导率, 计算相应功率因子。利用半导体参数分析仪记录器件随时间、照射位置和入射功率变化的开路电压。波长为 1550 nm 的激光经光纤传输, 并通过显微光学系统聚焦至器件表面, 样品表面的激光光斑直径约为 2 mm, 样品位置处的入射功率由功率计校准。

器件采用 Au/Ag_2Se/Au 面内结构, Ag_2Se 沟道长度和宽度分别为 500 μm 和 100 μm, 两端 Au 电极厚度约为 60 nm。柔性阵列采用金属掩模进行图案化制备。首先在 PI 基底上沉积图案化 Ag/Se 叠层, 经快速热退火形成 Ag_2Se 薄膜单元; 随后通过金属掩模沉积 Au 电极; 最后经掩模对准, 在局部通道区域依次溅射约 50 nm 的 SiO_2 和 50 nm 的 Al。所得阵列包含 6×6 个探测单元, 每个单元具有独立引线, 采用多通道数据采集仪逐点读取电压信号。

2　结果与讨论

2.1　Ag_2Se 柔性薄膜的制备与表面形貌

连续且成分均匀的薄膜是形成稳定载流子传输通道和获得可靠光热电响应的基础。图 1(a)展示了 Ag_2Se 柔性薄膜的制备流程。Ag 层和 Se 层按照预定顺序逐层沉积在 PI 基底表面, 形成 Ag/Se 叠层前驱膜, 随后通过快速热退火促进两种元素在层间界面处扩散并发生固相反应。沉积过程中将 Ag 与 Se 的名义摩尔比控制为 2.00∶1.05, 即 Se 相对于 Ag_2Se 的理论化学计量比过量约 5%, 用于补偿沉积及退火过程中可能产生的 Se 损失。与溶液成膜方法相比, 该工艺无需引入有机黏结剂或分散剂, 可减少绝缘残留物对载流子输运的影响, 并便于在柔性基底上进行器件集成[22]。此外, 180 ℃、10 s 的短时快速热退火缩短了 PI 基底的持续热暴露时间, 结合金属掩模图案化工艺, 有利于后续柔性探测器及阵列集成[23]。

退火后薄膜表现出良好的表面完整性。由图 1(b)可见, Ag_2Se 薄膜连续覆盖 PI 基底, 表面整体较为平整, 未观察到明显的颗粒团聚、大面积剥离或贯穿裂纹。这表明快速热退火在促进 Ag 与 Se 反应的同时, 较好地保持了膜层的宏观连续性。连续的表面结构能够减少裂纹和孔隙对面内载流子传输路径的阻断, 也有利于减小局部形貌差异引起的电学响应波动, 为器件产生稳定的面内热电输出提供结构基础[24]。

2.2　Ag_2Se 薄膜的物相结构与表面化学态

在确认薄膜具有连续形貌和均匀元素分布后,

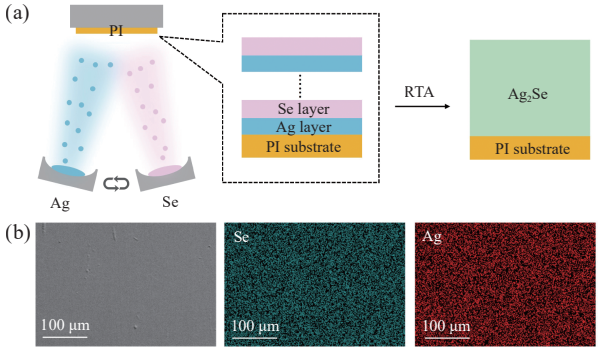

图 1　Ag_2Se 柔性薄膜的制备工艺及表面形貌。(a)Ag/Se 逐层沉积并经快速热退火制备 Ag_2Se/PI 薄膜的工艺示意图;(b)Ag_2Se 薄膜的 SEM 图像及对应的 Se、Ag 元素 EDS 面分布图

Fig. 1　Preparation and surface morphology of the flexible Ag_2Se film. (a) Schematic diagram illustrating the fabrication of the Ag_2Se/PI film via layer-by-layer deposition of Ag and Se, followed by rapid thermal annealing; (b) SEM image of the Ag_2Se film and the corresponding EDS elemental maps of Se and Ag

进一步通过 XRD 和 XPS 分析其晶体结构及近表面化学状态。图 2(a)给出了 20°～80°范围内的 XRD 图谱,位于 2θ 约 23.1°和 47.4°的主要衍射峰分别对应 β-Ag_2Se 的 (002) 和 (004) 晶面,与标准卡片 PDF No. 24-1041 一致。该扫描范围内未观察到明显归属于金属 Ag、α-Ag_2Se 或 Ag_2O 的额外衍射峰,表明薄膜以 β-Ag_2Se 为主要晶相。与标准粉末衍射谱中的其他晶面相比,样品的 (002) 和 (004) 衍射峰较为突出,说明薄膜呈现一定的 (00l) 择优取向。择优取向反映了晶粒在薄膜生长过程中的非随机排列,其形成与层状前驱结构、界面反应及基底约束有关[25]。由于 Ag_2Se 的晶体结构具有各向异性,这种取向特征可能影响载流子在膜面内的输运行为,但其具体作用仍应以实际电输运结果为依据。

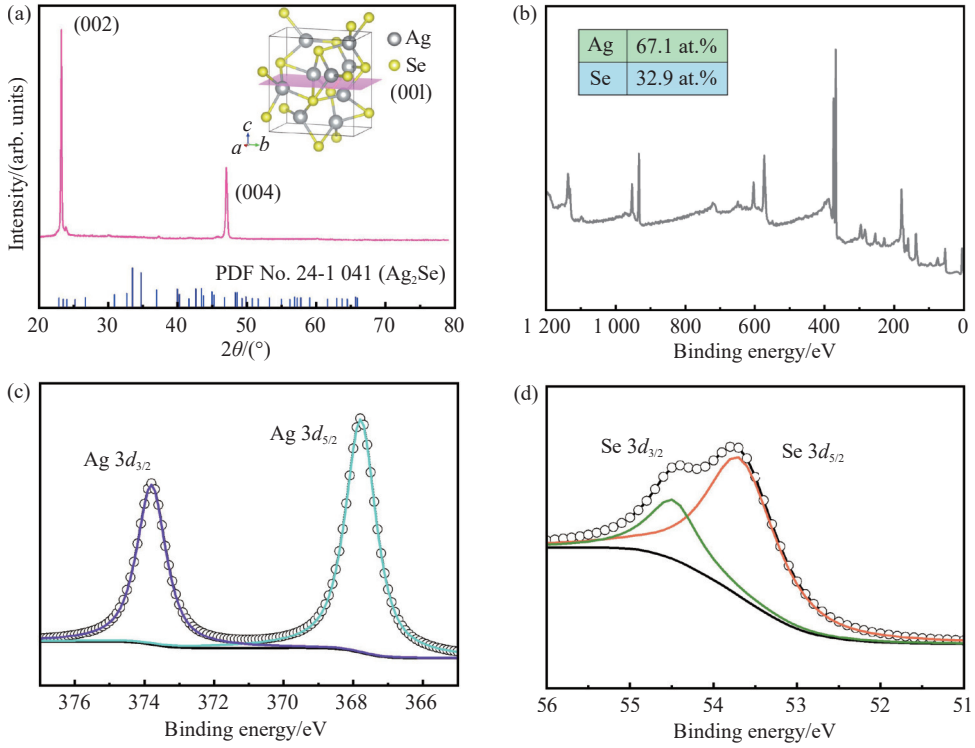

图 2　Ag_2Se 薄膜的物相结构与近表面化学状态。(a)XRD 图谱及晶体结构;(b)XPS 全谱及元素组成;(c)Ag 3d 和(d)Se 3d 高分辨 XPS 谱

Fig. 2 Phase structure and near-surface chemical states of the Ag_2Se film. (a) XRD pattern and crystal structure; (b) XPS survey spectrum and elemental ratios; high-resolution XPS spectra of (c) Ag 3d and (d) Se 3d

XPS 结果进一步证实了 Ag-Se 化学键合环境的形成。图 2(b)所示全谱中可以观察到 Ag 和 Se 的特征信号。XPS 元素定量结果显示,Ag 和 Se 的原子分数分别为 67.1% 和 32.9%,对应 Ag∶Se 原子比约为 2.04∶1.00,与 Ag_2Se 理论化学计量比 2∶1 接近。该结果与前驱体中采用适量过量 Se 以补偿制

备过程中可能发生的元素损失的设计相一致。图 2(c)中的 Ag 3d 高分辨谱由 Ag $3d_{5/2}$ 和 Ag $3d_{3/2}$ 双峰组成, 两峰之间的自旋轨道分裂约为 6 eV; 图 2(d)中的 Se 3d 谱可分解为 Se $3d_{5/2}$ 和 Se $3d_{3/2}$ 组分, 其结合能位置与 Ag-Se 键合状态相符。XRD 反映薄膜的整体晶体结构, XPS 表征近表面化学环境, 二者共同支持以低温 β-Ag_2Se 为主的薄膜形成。

2.3　薄膜的热电性能与弯曲稳定性

薄膜的塞贝克响应决定了温度梯度向电压信号的转换方向及幅度。如图 3(a)所示, 在 300~400 K 范围内, Ag_2Se 薄膜的塞贝克系数(S)始终为负值, 表明电子为主要载流子, 薄膜在测试温区内保持稳定的 n 型热电特征。随着温度从 300 K 升高至 400 K, 塞贝克系数由约−105 μV·K^{-1} 变化至约−114 μV·K^{-1}, 其绝对值整体增大, 说明薄膜对单位温差的电压转换能力随温度升高略有增强。这一变化与电子主导的热扩散输运行为定性一致。塞贝克系数受载流子能量分布、浓度及散射机制的共同影响。在测试温区内, 其绝对值随温度升高略有增加, 可能与电子热扩散输运的温度依赖性有关[26-27]。如图 3(b)~(c)所示, 进一步测试了 Ag_2Se 薄膜的变温电导率及功率因子。随着温度从 300 K 升高至 400 K, 薄膜电导率(σ)由约 1220 S·cm^{-1} 增加至 1510 S·cm^{-1}, 表现出正温度依赖性。功率因子根据 $S^2\sigma$ 计算, 由约 13.5 μW·cm^{-1}·K^{-2} 增加至 19.6 μW·cm^{-1}·K^{-2}, 表明塞贝克系数绝对值与电导率的同步增加有利于提升薄膜的热电输运性能。

温差电压测试进一步验证了薄膜的塞贝克效应。如图 3(d)所示, 随着外加温差增大, 输出电压的绝对值近似线性增加。当温差约为 15.5 K 时, 输出电压约为−1.65 mV。根据曲线斜率计算得到的塞贝克系数约为−106 μV·K^{-1}, 与室温下直接测得的结果基本一致。两种测试结果在数值和符号上的一致性表明, 薄膜输出电压与温差之间具有较稳定的线性关系, 为后续利用局域温升产生光热电压提供了依据。

除热电响应外, 薄膜在柔性形变下还表现出较好的电学稳定性。如图 3(e)所示, Ag_2Se/PI 薄膜在宏观弯曲状态下未出现明显断裂或大面积脱落, 说明膜层能够随 PI 基底发生协同形变。由图 3(f)可知, 在弯曲半径为 6 mm、弯曲周期为 5 s 的条件下, 薄膜相对电阻随弯曲次数增加而缓慢上升, 循环 100、200、500 和 800 次后的相对电阻变化($\Delta R/R_0$)分别约为 0.7%、1.2%、1.5% 和 2.1%。尽管电阻变化随循环次数逐渐累积, 但 800 次弯曲后的变化仍

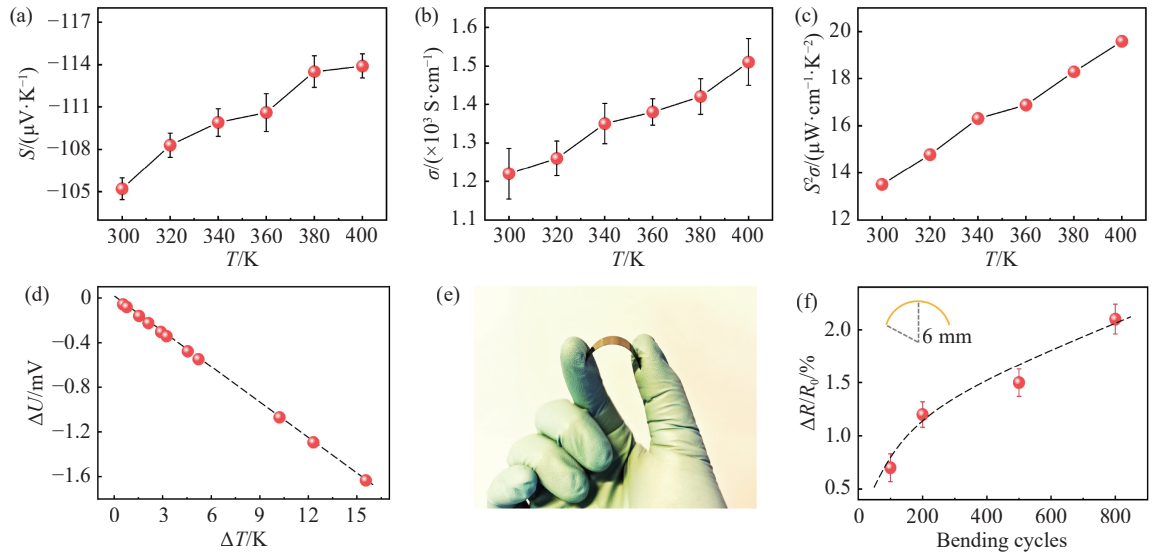

图 3　Ag_2Se 薄膜的热电性能及循环弯曲稳定性。(a)塞贝克系数、(b)电导率及(c)功率因子随温度的变化; (d)输出电压与外加温差的关系; (e)薄膜弯曲状态下的实物照片; (f)相对电阻变化随弯曲循环次数的变化

Fig. 3　Thermoelectric properties and cyclic bending stability of the Ag_2Se film. (a) Seebeck coefficient, (b) electrical conductivity, and (c) power factor as functions of temperature; (d) output voltage as a function of the applied temperature difference; (e) photograph of the film under bending; (f) relative resistance change as a function of bending cycles

处于较低水平，说明薄膜在反复形变后仍可维持较连续的载流子传输路径[28-29]。

2.4 1550 nm 近红外光热电响应

Ag_2Se 薄膜的 n 型塞贝克特性可将局域光照产生的面内温度梯度转换为具有方向性的电压信号。如图 4(a)所示，器件由 PI 基底、Ag_2Se 热电通道及两端 Au 电极构成。通道长 500 μm，宽 100 μm，Au 电极厚度约 60 nm。当 1550 nm 激光照射通道一端时，受照区温度升高，沿 Ag_2Se 通道形成由热端指向冷端的温度梯度。鉴于 Ag_2Se 薄膜具有负塞贝克系数，改变温度梯度方向会导致两电极间的热电势差反转，其对应关系如图 4(b)所示。

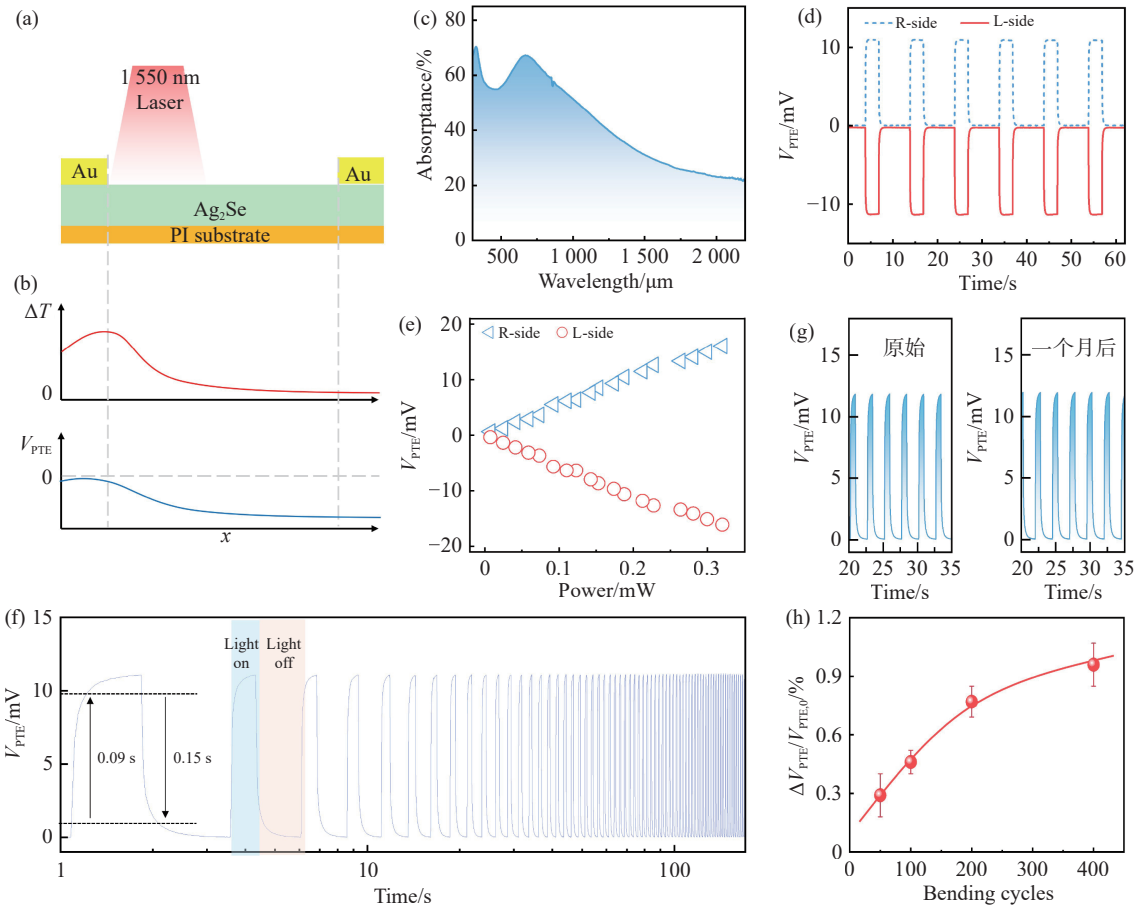

图 4　Ag_2Se 基光热电探测器的工作原理与近红外响应。(a)1550 nm 局域激光照射下的器件结构示意图；(b)两电极间温差与电势的分布示意；(c)Ag_2Se 薄膜的光谱吸收率；(d)激光周期性照射器件左、右两端时的输出电压；(e)输出电压与入射光功率的关系；(f)不同开关光周期下的循环响应；(g)长期稳定性；(h)机械稳定性

Fig. 4　Working principle and near-infrared response of an Ag_2Se-based photothermoelectric detector. (a) Schematic diagram of the device structure under localized 1550 nm laser irradiation; (b) schematic distribution of the temperature difference and electric potential between the two electrodes; (c) spectral absorptance of the Ag_2Se thin film; (d) output voltage when the left and right ends of the device are periodically irradiated by a laser; (e) relationship between output voltage and incident light power; (f) cyclic response under different light-switching periods; (g) long-term stability; (h) mechanical stability

图 4(a)~(b)展示了 Ag_2Se 基光热电探测器的工作原理，表明其输出电压依赖于照射区域和温度梯度方向。如图 4(c)所示，Ag_2Se 薄膜在可见至近红外波段具有宽光谱吸收特性，且在 1550 nm 处光吸收率显著，为近红外光热转换奠定了基础。图 4(d)显示，激光分别照射器件左右两端时，输出电压分别约为+11 mV 和−11 mV；关闭激光后，信号均回落至接近零。不同照射位置产生的电压幅值相近而极性相反，表明器件结构在两端具有良好的响应对称性。结合薄膜的负塞贝克系数及外加温差

电压测试结果, 该现象与局域光照诱导的温度梯度反转相吻合, 证实光热电效应是器件零偏压响应的主要机制[30-31]。

器件输出随入射功率的变化进一步揭示了其光热电转换特性。如图 4(e)所示, 随着入射功率增大, 两种照射位置对应的电压绝对值均呈近似线性增加, 且两条曲线斜率接近、符号相反。当入射功率约为 0.32 mW 时, 输出电压绝对值约为 16 mV, 据此计算的表观电压响应度约为 50 $V \cdot W^{-1}$。该表观响应度综合反映了光吸收、热扩散、器件几何结构及热电转换过程。在当前功率范围内未观察到明显的输出饱和现象, 表明器件能够对入射功率变化产生连续的电压响应。

循环开关光测试表明, 器件能够对交替变化的光照信号产生重复响应。由图 4(f)可见, 激光开启后输出电压逐渐升高并稳定在约 11 mV, 关闭激光后信号逐渐衰减至接近零, 体现了局域升温和冷却过程对输出电压的调制作用。动态光电压曲线显示, 器件在 1550 nm 激光照射下具有可重复的开关响应, 响应时间和恢复时间分别约为 0.09 s 和 0.15 s。随着开关次数增加, 器件仍保持清晰且可重复的电压变化, 峰值电压无明显衰减, 关光后的基线也未发生显著漂移。结合图 4 中的位置和功率响应结果可知, 该器件能够在零偏压条件下稳定地将局域近红外照射转换为可辨识的电压信号。

如图 4(g)所示, 器件在空气环境中存放一个月前后的周期性光电压响应基本一致。如图 4(h)所示, 在 6 mm 弯曲半径下, 经过 400 次循环弯曲, 器件光热电压的相对变化量低于 1%。上述结果表明, 器件在测试条件下具有良好的机械及环境稳定性。

2.5　柔性探测器阵列及空间成像

单个器件表现出的位置相关响应为阵列化空间感知奠定了基础。图 5(a)所示柔性阵列由 36 个规则排列的探测单元组成。每个像素包含 Au 电极、Ag_2Se 热电通道(500 μm×100 μm)以及位于通道局部区域的 Al/SiO_2 叠层功能区。其中, Au 电极用于引出电压信号, Ag_2Se 通道负责将局域温度梯度转换为电势差, PI 基底则为阵列提供柔性支撑。SiO_2 层用于隔离 Al 与 Ag_2Se 之间的直接电接触; Al 层位于局部通道上方, 作为遮光结构以调节通道不同区域的光照条件。各像素采用独立引线结构, 通过

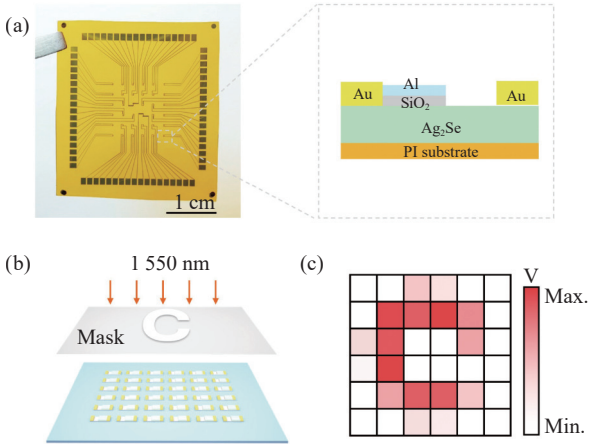

图 5　柔性 Ag_2Se 基光热电探测器阵列及空间光场映射。(a)探测器阵列实物照片及单个像素结构示意图; (b)采用“C”形掩膜进行空间选择性照射示意图; (c)对应的二维电压分布图

Fig. 5 Flexible Ag_2Se-based photothermoelectric detector array and spatial optical-field mapping. (a) Photograph of the detector array and schematic structure of a single pixel; (b) schematic of spatially selective illumination through a C-shaped mask; (c) corresponding two-dimensional voltage distribution map

多通道数据采集仪逐点读取电压, 使阵列能够同步保留光照信号的强度信息和空间位置信息。

图 5(b)展示了阵列的掩膜成像过程。入射光经“C”形掩膜选择性照射阵列, 受照像素产生较高的光热电压, 而未受照区域输出相对较低。将 36 个像素的电压按其实际空间位置排列, 得到图 5(c)所示的二维电压分布。高响应像素基本构成“C”形轮廓, 与掩膜图案具有较好的一致性; 部分边缘像素虽存在幅值差异, 但不影响整体图案辨识。这种差异可能源于局部光照强度、掩膜边缘透射条件及相邻区域的热扩散。鉴于各像素在实验中接受的光照条件不同, 图中的响应差异不能直接用于评价阵列固有的像素均匀性。该结果表明, 柔性 Ag_2Se 阵列能够将非均匀光照分布转换为二维电压信息, 实现了从单点探测向空间光场感知的扩展。

3　结论

本文通过 Ag/Se 逐层沉积和快速热退火工艺, 在 PI 基底上制备了柔性 Ag_2Se 薄膜, 并构建了 1550 nm 近红外光热电探测器及 6×6 柔性阵列。沉积过程中, Ag 和 Se 采用 2.00∶1.05 的名义摩尔比, 以少量过量 Se 补偿制备过程中的成分损失。所得薄膜连续且元素分布均匀, Ag 与 Se 原子比接近 2∶1, 物相以具有一定 (00*l*) 择优取向的低温 β-

Ag_2Se 为主。薄膜在 300~400 K 范围内保持 n 型热电特性，室温塞贝克系数约为−105 $\mu V \cdot K^{-1}$；经 800 次循环弯曲后，相对电阻变化约为 2.1%，表现出良好的柔性电学稳定性。当 1550 nm 激光照射器件不同端部时，输出电压幅值接近但极性相反，表明输出方向随面内温度梯度的反转而改变。器件的表观电压响应度约为 50 $V \cdot W^{-1}$，响应和恢复时间分别约为 0.09 s 和 0.15 s；经 400 次弯曲及一个月空气存放测试后，器件仍保持较稳定的光电压输出。进一步构建的柔性阵列实现了“C”形光照图案的二维电压映射，初步验证了 Ag_2Se/PI 器件在零偏压近红外探测、柔性集成及空间光场感知方面的可行性。

数据可用性声明：

本论文的关联数据可在科学数据银行（ScienceDB）数据库中访问、获取（https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00273.0003c）。

参考文献：

[1] Mahato K, Saha T, Ding Shichao, et al. Hybrid multimodal wearable sensors for comprehensive health monitoring[J]. Nature Electronics, 2024, 7: 735-750.

[2] Yao Zhengtong, Zhang Shuai, Guan Zhihao, et al. Flexible self-powered electronics: materials design, structure engineering, and multifunctional integration[J]. Matter, 2026, 9(6): 102724.

[3] Gundepudi K, Neelamraju P M, Sangaraju S, et al. A review on the role of nanotechnology in the development of near-infrared photodetectors: materials, performance metrics, and potential applications[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58: 13889-13924.

[4] Chen Tianying, Zhang Shuai, Hu Yuxin, et al. Fiber memristors for smart textiles: materials, devices, and applications[J]. Soft Science, 2026, 6: 27.

[5] Xin Kaiyao, Zhou Ziqi, Qiu Siqi, et al. Low-dimensional low-symmetric semiconductors for polarization-sensitive photodetection[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2025, 2: 480-493.

[6] Tan Hongyu, Wu Xianshuo, Hu Suhao, et al. High-performance organic semiconductor near-infrared and shortwave-infrared photodetectors: a materials and device roadmap[J]. Chemical Science, 2025, 16(46): 21705-21744.

[7] Wang Fang, Zhang Tao, Xie Runzhang, et al. How to characterize figures of merit of two-dimensional photodetectors[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2224.

[8] Najarian A M, Vafaie M, Chen Bin, et al. Photophysical properties of materials for high-speed photodetection[J]. Nature Reviews Physics, 2024, 6(4): 219-230.

[9] Zhang Shuai, Liu Zekun, Zhang Xiaotian, et al. Sustainable thermal energy harvest for generating electricity[J]. The Innovation, 2024, 5(2): 100591.

[10] Dai Mingjin, Zhang Xuran, Wang Qijie. 2D materials for photothermoelectric detectors: mechanisms, materials, and devices[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(21): 2312872.

[11] Li Xue, Liu Kunxuan, Wu Di, et al. Van der Waals hybrid integration of 2D semimetals for broadband photodetection[J]. Advanced Materials, 2025, 37(48): 2415717.

[12] Lu Xiaowei, Sun Lin, Jiang Peng, et al. Progress of photodetectors based on the photothermoelectric effect[J]. Advanced Materials, 2019, 31(50): 1902044.

[13] Wu Zhenhua, Zhang Shuai, Liu Zekun, et al. Thermoelectric converter: strategies from materials to device application[J]. Nano Energy, 2022, 91: 106692.

[14] Zhang Shuai, Wu Zhenhua, Liu Zekun, et al. An emerging energy technology: self-uninterrupted electricity power harvesting from the Sun and cold space[J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(19): 2300260.

[15] Shi Xiaolei, Li Nanhai, Li Meng, et al. Toward efficient thermoelectric materials and devices: advances, challenges, and opportunities[J]. Chemical Reviews, 2025, 125(16): 7525-7724.

[16] Shi Xiaolei, Wang Lijun, Lyu Wanyu, et al. Advancing flexible thermoelectrics for integrated electronics[J]. Chemical Society Reviews, 2024, 53(18): 9254-9305.

[17] Lyu Jiaming, Zhang Li, Yang Yanling, et al. Ag_2Se-based thermoelectric materials and devices: progress, challenges, and perspectives[J]. Energy & Environmental Science, 2026, 19(10): 3134-3183.

[18] He Chengjiong, Shi Xiaolei, Li Nanhai, et al. Ductile inorganic thermoelectrics: advances, challenges, and perspectives[J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(42): e03115.

[19] Chen Yuexing, Shi Xiaolei, Zhang Junze, et al. Deviceization of high-performance and flexible Ag_2Se films for electronic skin and servo rotation angle control[J]. Nature

Communications, 2024, 15: 8356.

[20] Zhang Shutao, An Shu, Dai Mingjin, et al. Chalcogenide metasurfaces enabling ultra-wideband detectors from visible to mid-infrared[J]. Advanced Science, 2025, 12(14): 2413858.

[21] Guo Xiaohan, Lu Xiaowei, Jiang Peng, et al. Touchless thermosensation enabled by flexible infrared photothermoelectric detector for temperature prewarning function of electronic skin[J]. Advanced Materials, 2024, 36(23): 2313911.

[22] Ding Yufei, Qiu Yang, Cai Kefeng, et al. High performance n-type Ag_2Se film on nylon membrane for flexible thermoelectric power generator[J]. Nature Communications, 2019, 10: 841.

[23] Liu Yan, Zhang Qihao, Huang Aibin, et al. Fully inkjet-printed Ag_2Se flexible thermoelectric devices for sustainable power generation[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2141.

[24] Jiang Cong, Ding Yufei, Cai Kefeng, et al. Ultrahigh performance of n-type Ag_2Se films for flexible thermoelectric power generators[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(8): 9646-9655.

[25] Yang Dong, Shi Xiaolei, Li Meng, et al. Flexible power generators by Ag_2Se thin films with record-high thermoelectric performance[J]. Nature Communications, 2024, 15: 923.

[26] Lu Yao, Qiu Yang, Cai Kefeng, et al. Ultrahigh power factor and flexible silver selenide-based composite film for thermoelectric devices[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(4): 1240-1249.

[27] Li Xiang, Lu Yao, Cai Kefeng, et al. Exceptional power factor of flexible Ag/Ag_2Se thermoelectric composite films[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 434: 134739.

[28] Lee D, Park W, Kang Y A, et al. Substrate-free thermoelectric 25 μm-thick Ag_2 Se films with high flexibility and in-plane zT of 0.5 at room temperature[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(2): 3047-3053.

[29] Hou Shuaihang, Huang Jiawei, Liu Yijie, et al. Encapsulated Ag_2Se-based flexible thermoelectric generator with remarkable performance[J]. Materials Today Physics, 2023, 38: 101276.

[30] Cai Xinghan, Sushkov A B, Suess R J, et al. Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(10): 814-819.

[31] Gabor N M, Song J C W, Ma Qiong, et al. Hot carrier–assisted intrinsic photoresponse in graphene[J]. Science, 2011, 334(6056): 648-652.