中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

皮秒激光能量密度对Se掺杂硅光电特性影响研究

程堰林 杜玲艳 殷杰 陈福松 徐顺阳

Effect of picosecond laser energy density on the photoelectric properties of se-doped silicon

CHENG Yan-ling, DU Ling-yan, YIN Jie, CHEN Fu-song, XU Shun-yang

引用本文:
程堰林, 杜玲艳, 殷杰, 等. 皮秒激光能量密度对Se掺杂硅光电特性影响研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0103
CHENG Yan-ling, DU Ling-yan, YIN Jie, *et al*. Effect of picosecond laser energy density on the photoelectric properties of se-doped silicon[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0103

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026-0103

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维Bi_2O_2Se的制备与光学表征研究进展

Recent progress on synthesis and optical characterization of two-dimensional Bi_2O_2Se

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 24 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0071

TDLAS气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计

Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry

中国光学（中英文）. 2024, 17(1): 198 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0107

电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究

Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 750 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0190

波导/势垒界面插入GaInP和GaAsP对InAlGaAs量子阱808-nm激光二极管载流子泄漏的影响

Effect of GaInP and GaAsP inserted into waveguide/barrier interface on carrier leakage in InAlGaAs quantum well 808-nm laser diode

中国光学（中英文）. 2025, 18(1): 186 https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0006

小闪耀角单晶硅光栅结构参数优化及制备工艺

Optimization of structural parameters and fabrication of monocrystalline silicon gratings with small blazed angle

中国光学（中英文）. 2024, 17(5): 1139 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0056

激光外差干涉皮米级平动测量技术研究

Laser heterodyne interferometry for picometer-level displacement measurement

中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 535 https://doi.org/10.37188/CO.2024-0192

文章编号　2097-1842(xxxx)x-0001-10

皮秒激光能量密度对 Se 掺杂硅光电特性影响研究

程堰林[1,2], 杜玲艳[1,2*], 殷　杰[1,2], 陈福松[1,2], 徐顺阳[1,2]
（1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 自贡 643000;
2. 高耐性材料四川省重点实验室,四川 宜宾 644000）

摘要: 硅基光电器件在近红外波段的光吸收和光电响应受限于硅材料本征带隙。通过皮秒激光诱导 Se 掺杂并构筑表面微纳结构, 可有效改善硅材料的近红外吸收与光电性能。其中, 激光能量密度作为影响微结构演化和掺杂效果的关键工艺参数, 对器件性能具有重要调控作用。围绕这一关键参数, 本研究选用镀有 Se 膜的单晶硅, 采用 0.85 kJ/m^2、1.40 kJ/m^2 和 1.71 kJ/m^2 三种皮秒激光能量密度进行扫描处理, 并制备 Se 掺杂 N^+-N 型硅光电二极管, 系统研究激光能量密度对样品微纳结构、光吸收及光电性能的影响。不同激光能量密度处理后, 样品整体晶体结构保持良好, 但表面微结构存在差异。这种差异进一步影响了光吸收特性, 并导致器件光电性能随激光能量密度发生显著变化。在 1.40 kJ/m^2 条件下样品表面微纳结构分布最均匀, 光谱和器件测试表明, 其近红外吸收率超过 60%, 制备的光电二极管在 1 064 nm 激光照射下光响应度达到 2.28 A/W@ −6 V。皮秒激光能量密度对 Se 掺杂硅的表面微结构、光吸收及器件光电响应具有显著调控作用。本研究可为 Se 掺杂黑硅近红外探测器的制备与性能优化提供实验依据和技术参考。

关　键　词: Se 掺杂硅; 皮秒激光; 硅光电二极管; 光电响应
中图分类号: TN21,TN36　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.3724/CO.2026-0103　　**CSTR:** 32171.14.CO.2026-0103

Effect of picosecond laser energy density on the photoelectric properties of se-doped silicon

CHENG Yan-ling[1,2], DU Ling-yan[1,2*], YIN Jie[1,2], CHEN Fu-song[1,2], XU Shun-yang[1,2]
（1. *School of Automation and Information Engineering*, *Sichuan University of Science & Engineering*, *Zigong* 643000, *Sichuan*, *China*;
2. *Extreme-Environment-Resistant Materials Key Laboratory of Sichuan Province*, *Yibin* 644000, *Sichuan*, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *dulingyan@suse.edu.cn*

Abstract: The near-infrared optical absorption and photoresponse of silicon-based optoelectronic devices are intrinsically limited by the bandgap of silicon. Picosecond laser-induced Se doping combined with surface micro/nanostructuring provides an effective approach to enhancing the near-infrared performance of silicon. Among the relevant processing parameters, laser energy density plays a critical role in governing microstructure evolution and dopant redistribution, thereby strongly influencing device performance. In this study, single-crystal silicon substrates coated with a Se film were irradiated using a picosecond laser at energy dens-

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 12304469)
Supported by

ities of 0.85, 1.40, and 1.71 kJ/m^2. Se-doped N^+−N silicon photodiodes were subsequently fabricated to systematically investigate the effects of laser energy density on surface micro/nanostructure, optical absorptance, and photoelectric performance. The results show that the overall crystalline structure of the samples remains well preserved under all processing conditions, whereas their surface microstructures differ markedly. These structural variations further affect the optical absorption and device photoresponse. At an energy density of 1.40 kJ/m^2, the sample exhibits the most uniform surface micro/nanostructure. Optical and electrical measurements show that its near-infrared absorptance exceeds 60%, while the corresponding photodiode achieves a responsivity of 2.28 A/W at a reverse bias of −6 V under 1 064 nm illumination. These findings demonstrate that picosecond laser energy density plays a significant role in regulating the surface microstructure, near-infrared absorption, and photoresponse of Se-doped silicon. This study provides experimental guidance for optimizing the fabrication and performance of Se-doped black-silicon near-infrared photodetectors.

Key words: Se-doped silicon; picosecond laser; silicon photodiode; photoelectric response

1 引 言

硅基材料因资源丰富、制备成本低、制造工艺成熟且与现有 CMOS 工艺兼容性好，已成为光电探测器、太阳能电池和光通信模块等器件的重要基底材料[1-4]，随着片上光电振荡器频率梳及面向 5G 通信的无机电光材料等研究不断发展，光电材料与器件对高速响应、低损耗传输和高集成度提出了更高要求[5-6]。然而，晶体硅在室温下的禁带宽度约为 1.12 eV，对波长大于 1 100 nm 的光子吸收显著减弱，同时其表面反射率较高，这使传统硅基器件在近红外乃至更长波段的光电响应受到明显限制[7-8]。尽管电化学腐蚀、离子注入和表面织构化[9-10] 等方法能够在一定程度上调控硅材料的表面结构与光电特性，但对于满足红外探测所需的宽光谱响应和高效光电转换要求仍较为有限。

相比传统改性手段，超短激光脉冲加工凭借高精度、高效率及可调控掺杂等优势，已成为硅基材料结构调控与性能优化的重要技术手段[11-14]。为突破硅本征带隙对光谱响应范围的限制，利用 VI 族元素（S、Se、Te）对硅进行超掺杂，已成为构筑硅基红外功能材料的重要研究方向[15-17]。研究表明，硫族元素掺杂可在硅禁带中引入中间能级，促进亚带隙光吸收，进而显著提升硅材料在近红外波段的吸收与探测能力[18]。已有研究报道，在 SF_6 气氛下采用飞秒激光对硅表面进行微结构化处理，可成功制备出具有显著带隙下红外吸收特性的 S 掺杂微结构硅[19]；随后，Sheehy[20] 等进一步证实，S、Se、Te 等 VI 族元素均可通过强飞秒激光辐照引入硅表层，从而形成具有宽谱吸收潜力的硫族超掺杂硅。

上述基于飞秒激光的研究奠定了 VI 族元素掺杂黑硅材料的研究基础，也充分展示了超短激光脉冲诱导掺杂在硅基红外光电器件中的应用前景。已有相关研究围绕皮秒激光诱导 VI 族元素（尤其是 Se 元素）掺杂硅展开探索，Hu[21] 等利用皮秒脉冲激光混合制备 Se 掺杂硅，发现当脉冲能量密度由 0.40 J/cm^2 提高到 0.72 J/cm^2 时，材料表面粗糙度、晶相状态以及器件漏电流和响应特性均发生明显变化，说明激光能量密度对掺杂层结构与光电性能具有直接影响。Du[22] 等采用皮秒激光扫描镀有 Se 膜的硅基底，制备 Se 掺杂微纳复合结构硅，发现扫描速度变化会显著影响表面形貌、反射率和电子迁移率；当扫描速度为 100 mm/s 时，样品在 1 000~1 700 nm 波段的平均反射率可低至 3.45 %，同时保持较好的晶相完整性。进一步的对比研究表明，与飞秒激光相比，皮秒激光处理后的 Se 掺杂硅具有更紧凑的 Se 分布、更好的结晶质量以及更强的近红外光电响应。从激光与材料相互作用的时间尺度看，飞秒激光脉冲宽度极短，能量沉积过程高度非平衡，适于快速诱导表面微纳结构，但其熔融持续时间较短，在 Se 膜辅助掺杂体系中可能限制 Se 与 Si 表层的充分液相混合，并伴随局部烧蚀和结构无序[23-25]。纳秒脉冲激光熔融已被用于 Se 超掺杂硅制备，但较长脉宽会使热扩散、液相熔融和重凝固过程更加明显，容易引起 Se 元素再分布、表面偏析及较

大的热影响区[26]; Te 等硫族元素超掺杂硅研究也表明, 纳秒脉冲激光熔融仍主要依赖强热熔融过程实现高浓度掺杂[27]。相比之下, 皮秒激光处于飞秒与纳秒之间, 可在促进 Se 膜与 Si 表层瞬态熔融混合的同时限制热扩散范围, 从而更有利于在 Se 元素有效引入、表面微纳结构构筑和晶体完整性保持之间取得平衡。

但现有研究多聚焦于单一工艺参数或局部性能表征, 针对 1 064 nm 波长皮秒激光不同能量密度对 VI 族元素超掺杂硅的表面微纳结构、近红外光吸收及光电响应性能的系统性研究仍较为匮乏, 尤其是不同能量密度对掺杂层结构调控及光吸收、光电响应的关联规律尚需进一步明确。因此, 本文重点研究 1 064 nm 皮秒激光不同能量密度对掺杂硅的结构、光吸收及光电特性的影响, 旨在揭示皮秒激光参数调控掺杂硅性能的规律, 为高吸收、低损伤和高响应度的硅基近红外光电器件设计提供理论支撑与实验依据。

2　实验方法与过程

本实验系统采用热蒸发镀膜、皮秒激光扫描、高温热退火以及真空蒸发电极等工艺步骤, 以制备 Se 掺杂 N^+-N 型硅基光电二极管。

实验选用电阻率≤10 Ω·cm、厚度为 500 μm、尺寸为 10 mm×10 mm 的 n 型(111)单晶硅片作为基底材料。硅片采用标准 RCA 清洗去除表面污染物和杂质。基底清洗完成后, 采用热蒸发沉积工艺在硅片表面均匀沉积一层厚度为 250 nm 的硒薄膜。该硒膜作为后续激光掺杂的硒源, 其均匀性将直接影响掺杂浓度分布及最终器件性能。因此, 在沉积过程在低于 8×10^{-4} Pa 的真空室中以 0.3 nm/s 的速度蒸镀, 以确保硒膜厚度均匀, 并与硅基底结合较为紧密。

使用 AmberNXIR-10 型皮秒激光器(苏州贝林激光有限公司, 中国)对样品进行激光扫描微结构化处理。激光器参数设置如下: 波长 1 064 nm, 激光频率 f 为 2000 kHz, 单脉冲能量为 4.5 μJ, 脉冲宽度 8.7 ps, 光斑半径为 10 μm。皮秒激光能量密度计算公式如下:

$$\phi = \frac{4P}{\pi \cdot D^2 \cdot f} \quad , \qquad (1)$$

其中 P、f 和 D 分别表示平均功率、激光重复频率和激光光斑直径。实验以 100 mm/s 的恒定速度开展格栅扫描[28], 保证样品表面单位面积激光脉冲数稳定为 N=400;通过调控入射激光功率, 即可在样品表面实现不同激光能量密度的作用效果。

完成皮秒激光扫描后, 对样品的微观形貌、晶体结构和光学性能进行了系统表征。利用 SEM5000 形场发射扫描电子显微镜(国仪量子, 中国)观察表面形貌, 通过 inViaQontor 显微拉曼光谱仪分析晶格完整性, 采用 PG2000-Pro/NIR2500 型光纤光谱仪(上海复享)结合积分球对样品的反射率(R)和透射率(T)进行测试。根据公式 A=1-R-T 计算样品的光吸收率。三组样品进行了 500 °C、30 分钟氮气保护热退火。退火后, 将样品置于 JSD-400 型真空蒸发镀膜机 (安徽嘉硕真空科技有限公司, 中国) 的真空腔内, 正反面蒸发沉积 250 nm 梳齿状银电极, 并在氮气保护下进行 400 °C、1 分钟快速退火, 以形成稳定的欧姆接触。器件制备完成后, 使用 Keithley2602B 半导体参数分析系统测量 N^+–N 结器件的电流-电压特性, 分析整流性能, 并结合光电测试计算光电响应度。

3　结果与讨论

3.1　样品形貌与晶体结构

在皮秒激光加工作用机制中, 激光能量密度实质上表征了单位面积所接受的脉冲能量输入强度。本次研究在其他工艺参数保持不变的前提下, 通过三种递增的激光能量密度, 系统考察了不同激光能量对 Se 掺杂硅基材料表面形貌的影响规律。

图 1 展示了不同激光能量密度扫描所形成的 Se 掺杂硅样品的表面形貌。总体而言, 皮秒激光辐照可在单晶硅表面诱导形成沟壑状的周期性微纳结构。作为调控激光与材料相互作用过程的关键工艺参数, 激光能量密度对该微结构的形成机制、形貌演化影响显著。由图 1(a)~(c) 可见, 随着激光能量密度的增加, 样品表面微纳结构的沟壑深度、周期性均呈现出明显差异。在激光能量密度为 0.85 kJ/m² 的条件下, 样品表面整体较为平整, 形成周期性结构, 但由于激光能量密度较低, 材料表面的熔融与重构作用有限, 导致微结构起伏较小、表面粗糙度较低, 不利于形成具有显

著陷光效应的微纳结构。当激光能量密度提升至 1.40 kJ/m² 时，样品表面形成了较为均匀的周期性微纳结构，有助于延长入射光在材料表面的传播路径，增强光的多次反射和光陷阱效应[29]。继续提高激光能量密度至 1.71 kJ/m²，微结构的沟壑深度显著增加，表面起伏明显增大。从光学机理上分析，理论上更深的微结构有利于增强光陷阱效应，提升长波段光吸收能力，但过高的激光能量密度会引发局部过度烧蚀与热累积，造成硅基体非均匀去除和剧烈熔化重铸，从而破坏表面微结构的规整性，并进一步影响载流子的分离与传输过程[30]。因此，合适的激光能量密度更有利于兼顾表面结构均匀性与陷光能力，为后续样品光吸收和光电性能差异提供了形貌基础。

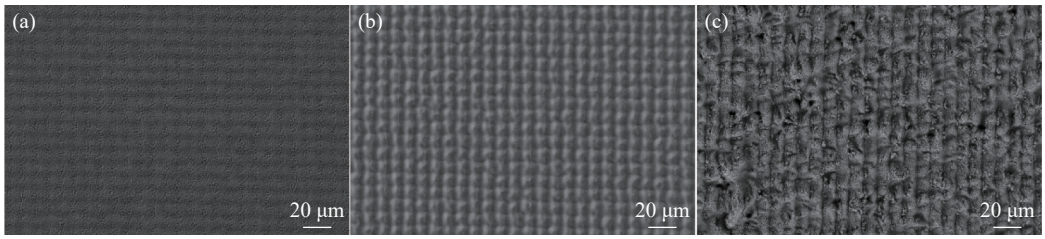


图 1 Se 掺杂黑硅不同能量密度的 SEM 图像 (a) 激光能量密度为 0.85 kJ/m²; (b) 激光能量密度为 1.40 kJ/m²; (c) 激光能量密度为 1.71 kJ/m²

Fig. 1 SEM images of Se-doped black silicon at different energy densities: (a) laser scanning energy of 0.85 kJ/m²; (b) laser scanning energy of 1.40 kJ/m²; (c) laser scanning energy of 1.71 kJ/m²

为进一步对 SEM 观察到的表面起伏差异进行定量表征，对三组样品进行了三维表面粗糙度测试，测试区域均为 256 μm × 257 μm。结果表明，随着激光能量密度由 0.85 kJ/m² 提高至 1.71 kJ/m²，样品的算术平均粗糙度 Sa 由 0.055 μm 增大至 1.228 μm，最大高度差 Sz 由 0.993 μm 增大至 14.437 μm，说明激光能量输入增强使样品表面高度分布范围明显扩大。相比之下，1.40 kJ/m² 样品的 Sa 为 0.362 μm，Sz 为 3.666 μm，表明其表面已形成一定程度的三维起伏，但峰谷高度差仍处于相对适中的范围。截面图结果进一步表明，0.85 kJ/m² 样品曲线波动幅度较小，表面高度变化较为平缓；1.40 kJ/m² 样品出现较明显且相对规则的峰谷起伏，说明适当能量输入可促进表面三维起伏结构的形成；而 1.71 kJ/m² 样品的波峰高度进一步升高，峰谷差明显扩大，表明高能量输入会加剧局部高度起伏。进一步结合表面高度分布参数可知，1.40 kJ/m² 样品的偏斜度 Ssk 接近 0，说明其表面峰谷分布相对均衡；而 1.71 kJ/m² 样品的 Sa 和 Sz 显著增大，表明局部高度差明显放大，表面起伏离散程度增强。因此，粗糙度测试结果从定量角度进一步证明，激光能量密度会显著改变 Se 掺杂硅表面的三维高度分布。

为分析不同激光能量密度对 Se 元素近表面分布的影响，对激光处理后样品进行了 EDS 面扫描分析，其结果如图 3 所示，不同激光能量密度下样品表面微结构形貌及 Se 元素空间分布存在明显差异[31]，表明皮秒激光能量输入不仅影响表面孔洞形貌，也会改变 Se 元素在样品表面的分布。在 0.85 kJ/m² 条件下，由于激光能量密度较低，形成的孔洞较浅，表面起伏较小，因此在被激光辐照的孔洞区域内仍可观察到一定量的 Se 元素分布。这说明低能量密度下硒膜未能充分参与激光诱导的迁移与重排过程，部分 Se 仍滞留于浅表层或孔洞内部区域。相比之下，在图 2(b) 和图 2(c) 中，随着激光能量密度升高，样品表面的孔洞进一步加深，微结构起伏增大，Se 元素主要分布于山谷状结构表面，而在孔洞区域内，Se 元素分布相对较少，说明较高能量输入促进了 Se 元素的迁移与再分布。从激光诱导迁移过程看，皮秒激光辐照使表面 Se 膜与 Si 表层发生瞬态熔融，Se 元素在浓度梯度、熔池流动及界面混合的共同作用下向熔融硅中迁移，并在快速凝固过程中被保留于重构层内。能量密度较低时，熔融深度和持续时间有限，Se 与 Si 的混合不充分；随着能量输入增加，熔池范围扩大，有利于 Se 在表层的迁移与再分布。但能量密度过高时，剧烈的熔池流动、材料烧蚀及快速凝固可能加剧 Se 的局部富集或非均匀分布。因此，Se 元素近表面分布随激光能量密度的变化并非简单单调关系，而是由表层熔融

混合、局部材料去除和快速凝固过程共同决定。总体来看, 1.40 kJ/m² 条件下 Se 元素在微结构表面的分布相对均匀, 推测更有利于形成相对稳定的掺杂层结构。

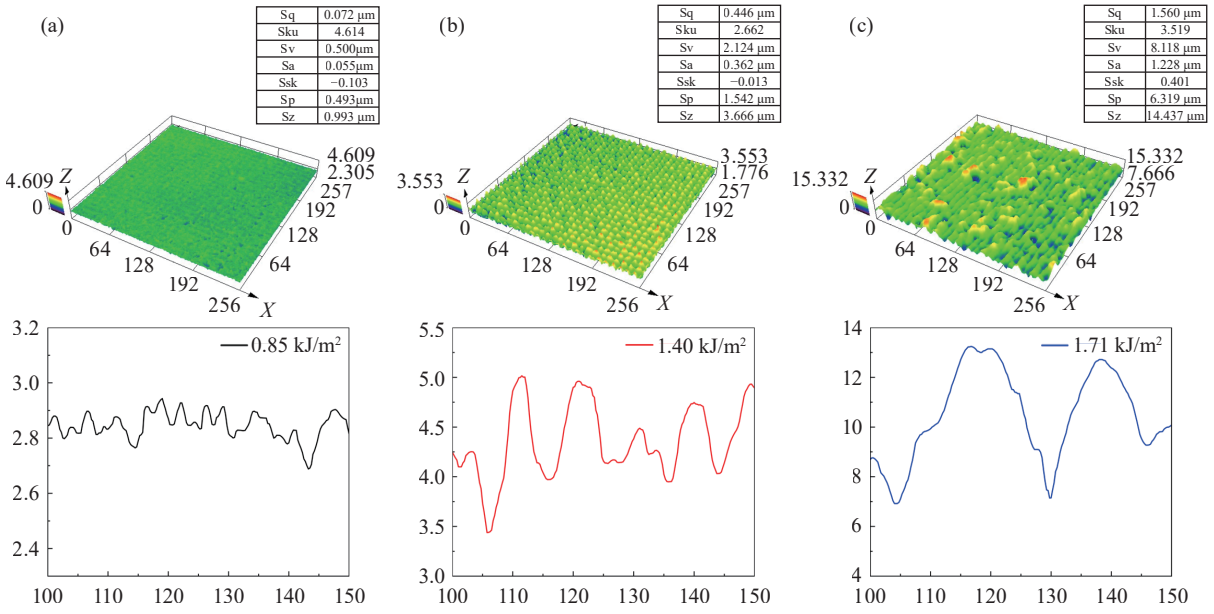


图 2　不同激光能量密度下 Se 掺杂硅样品的三维表面形貌及粗糙度测试结果: (a) 0.85 kJ/m²; (b) 1.40 kJ/m²; (c) 1.71 kJ/m²

Fig. 2　Three-dimensional surface morphology and roughness measurement results of Se-doped silicon samples under different laser energy densities: (a) 0.85 kJ/m²; (b) 1.40 kJ/m²; (c) 1.71 kJ/m².

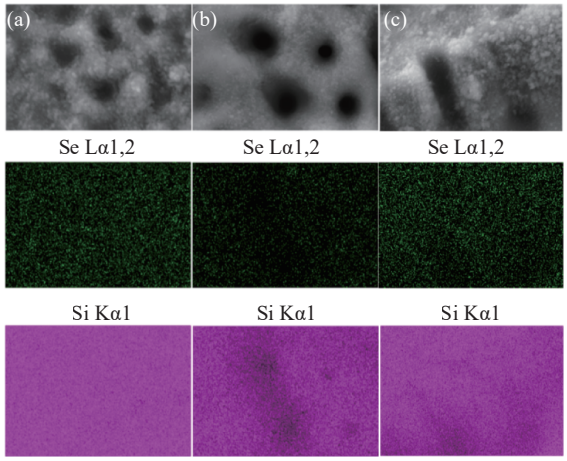


图 3　不同能量密度样品 Se 和硅的 EDS 能谱图 (a) 激光能量密度为 0.85 kJ/m²; (b) 激光能量密度为 1.4 kJ/m²; (c) 激光能量密度为 1.71 kJ/m²

Fig. 3　EDS spectra of Se and Si in samples with different energy densities: (a) laser scanning energy of 0.85 kJ/m²; (b) laser scanning energy of 1.4 kJ/m²; (c) laser scanning energy of 1.71 kJ/m²

图 4 为不同激光能量密度条件下 Se 掺杂样品的拉曼光谱。由图可见, 三组样品在约 520 cm⁻¹ 附近均出现明显的拉曼特征[32], 该峰对应于晶体硅的单晶相特征峰, 是表征硅材料保持晶态结构的重要标志。对 520 cm⁻¹ 附近特征峰进行 Gaussian 拟合。0.85、1.40 和 1.71 kJ/m² 样品的拉曼峰位分别为 518.54、518.91 和 517.43 cm⁻¹, 半高宽分别为 8.97、8.54 和 8.70 cm⁻¹。三组样品峰形均较尖锐, 且半高宽差异较小, 说明不同能量密度处理后样品整体仍保持较好的晶态硅结构。其中, 1.40 kJ/m² 样品半高宽略小, 晶格有序性相对较好。与此同时, 在 480 cm⁻¹ 附近未观察到明显的非晶硅特征宽峰, 也未出现显著的多晶硅相关展宽峰或杂峰, 说明在本实验激光参数范围内, 皮秒激光作用并未导致样品表层发生大面积非晶化或严重晶格失序。虽然皮秒激光在硅表面诱导形成了沟壑状周期性微纳结构, 并伴随局部熔融、重构及 Se 元素引入, 样品整体晶体结构仍以晶相为主, 说明激光加工对硅基体的破坏主要局限于表层局部区域。从图 1(c)可以看出, 此时样品表面沟壑更深、起伏更大, 但同时也出现了更明显的不均匀性和局部过度烧蚀特征, 推测该样品可能存在大量缺陷以及受损晶格, 然而图 3 仍以 520 cm⁻¹ 附近的晶体硅峰为主, 这更加说明即便在较高能量密度下, 样品整体仍未发生严重的相结构转变, 说明皮秒激光造成的损伤主要

局限于表层局部区域，而非扩展为整体性的晶体损伤。

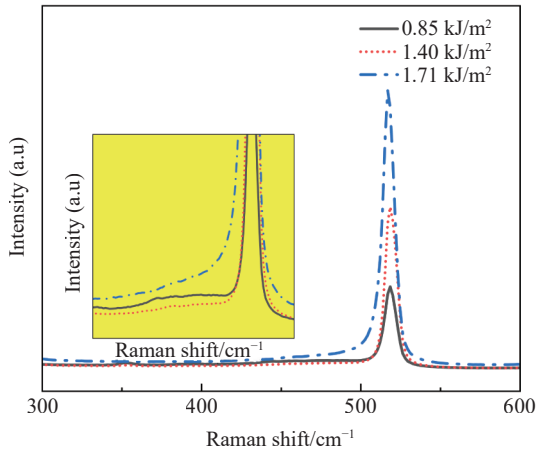


图 4 不同能量密度 Se 掺杂样品的拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectra of Se-doped samples at different energy densities

3.2 光电性能

基于关系式 A=1-R-T，分析了不同激光能量密度的条件下制备 Se 掺杂黑硅样品在 400~2200 nm 波段内的吸收光谱。如图 5 所示，可以看出在近红外光谱区，单晶硅表现出显著的低吸收特性，其吸收率普遍低于 10%，即使在可见光谱范围内也不超过 70%。而通过 Se 掺杂黑硅样品在 400~1100 nm 范围内的吸收光谱，光吸收率超过 80%，不同激光能量密度条件下差异不明显，而在近红外波段（1100~2200 nm）内，三组样品均表现出较强的吸收能力，但吸收水平存在一定差异。其中，0.85 kJ/m² 和 1.40 kJ/m² 条件下样品的吸收率保持在 60% 以上，1.71 kJ/m² 条件下仍维持在 50% 以上，这主要归因于两个方面：一方面是由于皮秒激光加工在硅表面诱导形成的微纳复合结构，通过构建宽谱减反层与多重散射机制，有效抑制表面菲涅尔反射，增强光陷阱效应；而在近红外段（1100–2200 nm），吸收增强不仅受微纳结构影响，还显著受 Se 掺杂引入的中间能级调控，Se 掺杂在硅禁带中引入中间能级，使低于硅本征带隙的近红外光子能够被吸收，从而显著增强材料的亚带隙光吸收[13]。在本实验参数范围内，样品近红外吸收性能并未随激光能量密度增加而持续增强，反而在较高能量密度条件下出现一定下降趋势。这可能与局部过度烧蚀及表面结构不均匀性增加有关，说明激光能量密度对 Se 掺杂黑硅近红外吸收性能的影响并非单调增强，而存在一定的优化区间。因此，合理调控激光能量密度是获得较优近红外吸收性能的重要条件。

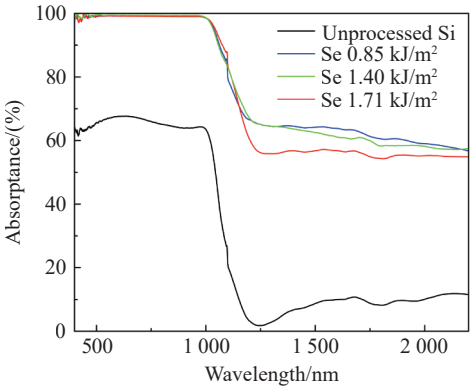


图 5 不同能量密度掺 Se 样品的吸收光谱

Fig. 5 Absorption spectra of Se-doped samples at different energy densities

图 6 展示了三组样品在 500 °C 退火后制备成的 N^+-N 光电二极管在不同能量密度下的暗电流与电压曲线。从图中可以看出三组样品均表现出良好的整流特性，即正向偏压下电流迅速增大，而反向偏压下电流相对较小。在反向偏压为−6 V 时，三组器件的暗电流分别为 375.1 μA、210.8 μA 和 899.3 μA。其中，激光能量密度为 1.40 kJ/m² 时器件的暗电流最小，可以看出，暗电流随激光能量密度的变化呈现出先减小后增大的变化规律。一般认为，光电二极管的暗电流主要来源于热激发载流子、结区漏电流以及缺陷辅助隧穿等因素。在相同测试环境下，各器件暗电流差异主要与激光能量密度对结区电学特性的调控有关。激光能量密度的变化会影响掺杂 Se 原子的有效引入及掺杂层均匀性，进而改变结区载流子浓度分布以及反向偏压下的漏电传输行为。当激光能量密度较为合适时，器件结区电学质量较好，反向漏电流得到有效抑制，因此暗电流较低；而当激光能量密度偏离这一适宜范围时，器件结区的漏电流增大，导致暗电流明显上升。从物理机制上看，较均匀的 Se 掺杂层有利于减弱结区局部电场集中并减少漏电通道；当能量密度过高时，较强的烧蚀、熔融重凝固及表面不均匀性可能增加界面态和局部高场区域，从而增强反向漏电及陷阱辅助隧穿过程。由此可见激光能量密度对器件暗电流具有显著影响，并存在一定的优化窗口。

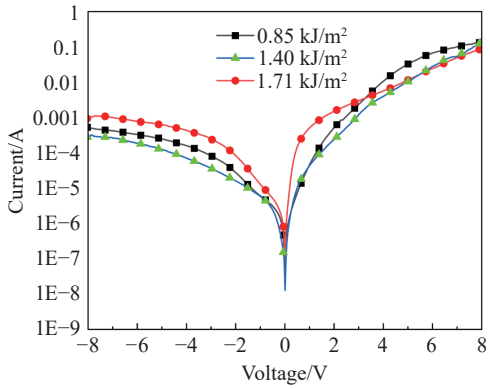


图 6　退火温度为 500 °C 的情况下不同能量密度制备的 N^+−N 光电二极管在黑暗环境下的半对数 I-V 曲线

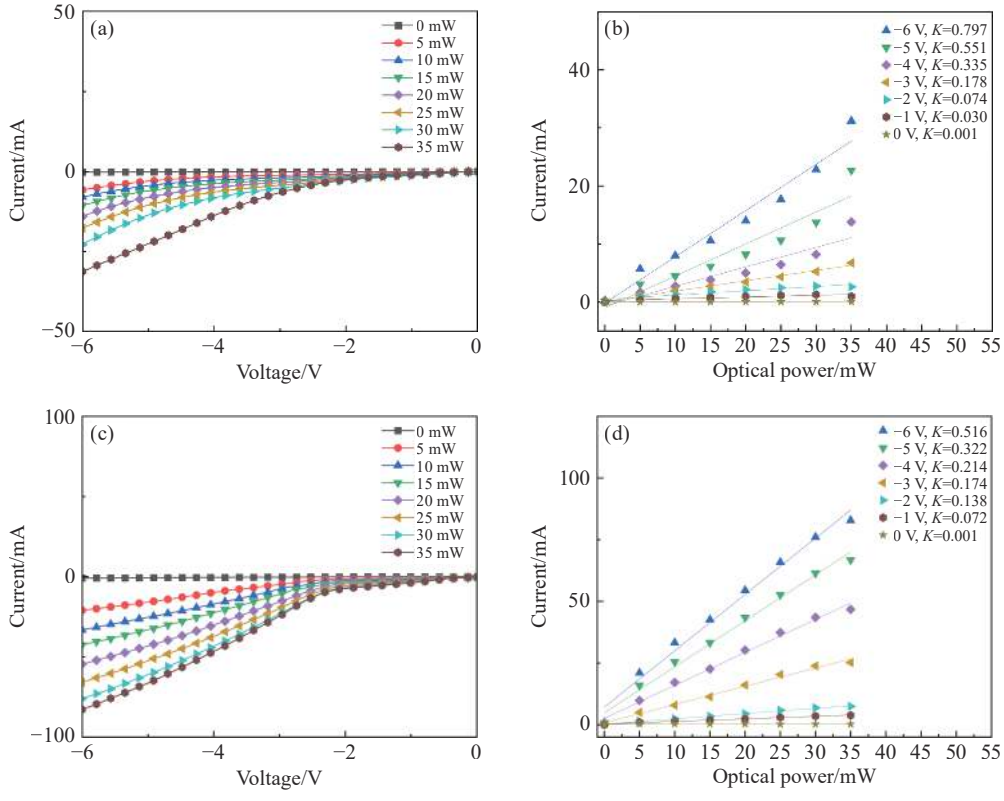
Fig. 6　Semi-logarithmic I–V curves of N^+−N photodiodes prepared at different energy densities with annealing temperature of 500 °C in dark condition

鉴于 1 064 nm 波长激光因其低大气损耗、强环境光抗干扰等特性, 已成为远程传感、自由空间通信等领域的主流工作波长, 所以本次实验选用 1 064 nm 的波长激光作为入射光源。为确保数据准确性, 每个样品重复测试三次, 结果取平均值用于分析。图 6 为不同激光能量密度条件下制备的光电二极管器件的光电流-电压曲线 (左) 和不同偏置电压下的光电流与入射光功率关系的线性拟合曲线 (右)。拟合曲线的斜率 K 可表示为器件的光响应度, 其公式[33] 为:

$$K = \frac{I_{light} - I_{dark}}{P_{in}} \quad , \qquad (2)$$

其中, I_{light} 为不同光功率下测得的电流, I_{dark} 为器件的暗电流, P_{in} 为入射光功率。

从图 7(a)(c)(e) 可以看出在设定的偏置电压条件下, 三组样品均表现出显著的光电响应特性, 当偏置电压从−6 V 变化到 0 V 时, 光电流强度呈现出明确的单调递减趋势, 这是因为偏置电压绝对值减小使器件内部电场减弱, 载流子定向迁移能力下降, 光生载流子收集效率降低, 最终导致光电流减小。当偏置电压为固定值时, 随着光功率逐渐增大, I-V 曲线逐渐升高。在−6 V 偏置电压下, 图 6(a)(c)(e) 三组样品在入射光功率为 35 mW 时分别为 30 mA、82 mA 和 18 mA, 表明不同激光能量密度条件下制备器件的光响应能力存在明显差异。这主要是因为反向偏压增大时, 器件内部电场增强, 光生载流子的分离与输运能力提高, 从而使更多载流子被有效收集, 导致光电流增大; 而随着入射光功率升高, 单位时间内产生的光生载流子数目增加, 因此光电流进一步升高。由图 6(b)(d)(f) 可见, 在不同偏压条件下, 光电流与入射光功率在测试范围内均呈现出较好的线性关系, 说明器件对 1 064 nm 入射光具有稳定的响应行为。拟合直线斜率反映了器件的光响应能力, 斜率越大, 表明单位入射光功率所对应的有效光电流越大, 器件的光响应性能越强。



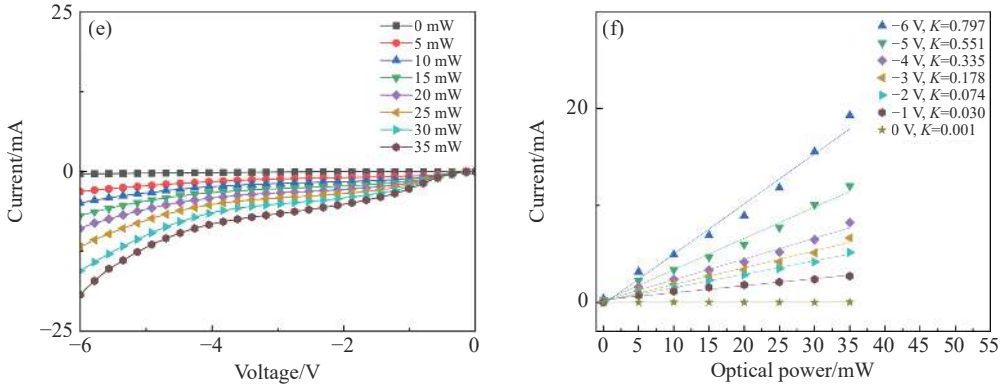


图 7 不同能量密度所制备光电二极管的光电流-电压曲线 (左) 和不同偏压下光电流与入射光功率关系 (右)(a)(b) 激光能量密度为 0.85 kJ/m²; (c)(d) 激光能量密度为 1.40 kJ/m²; (e)(f) 激光能量密度为 1.71 kJ/m²

Fig. 7 Photocurrent-voltage curves of photodiodes fabricated at different energy densities (left) and relationship between photocurrent and incident light power under different bias voltages (right): (a)(b) laser scanning energy of 0.85 kJ/m²; (c)(d) laser scanning energy of 1.40 kJ/m²; (e)(f) laser scanning energy of 1.71 kJ/m²

基于拟合曲线，获得了三组样品在不同反向偏压下的光响应度曲线，结果如图 8 所示。可以看出，各组样品的光响应度均随反向偏压的降低而显著下降，这主要源于偏压减小使得 N^+–N 结耗尽区宽度收缩、内建电场强度减弱，进而降低了光生载流子的分离与收集效率，最终导致光电流减小。经公式 (2) 计算可得，在激光能量密度分别为 0.85 kJ/m²、1.40 kJ/m²、1.71 kJ/m² 时，皮秒激光处理后的样品制得的器件在−6V 偏压下响应度分别达到 0.797 A/W、2.28 A/W 与 0.516 A/W，三种不同激光能量密度所制备而成的器件在响应度上表现出了显著差异，在激光能量密度为 1.40 kJ/m² 时所制成的光电二极管在 1 064 nm 处表现出最佳的光响应。掺 Se 硅基光电二极管的响应度随激光能量密度的变化而呈现先升高后降低的趋势，所以为了获得高响应度的红外光电探测器，需精准调控激光能量密度，实现光电响应性能的优化。

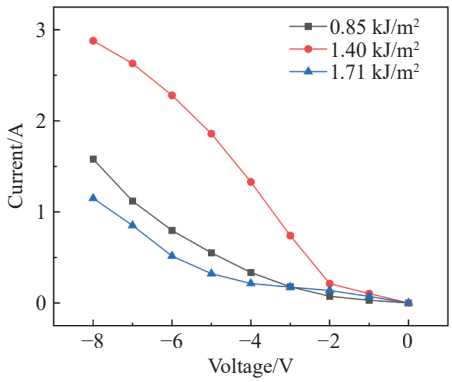


图 8 不同能量密度 Se 掺杂硅器件的光电响应度

Fig. 8 Photoresponsivity of Se-doped silicon devices at different energy densities

4 结 论

本文系统研究了不同皮秒激光能量密度对 Se 掺杂硅光电二极管表面微纳结构、光吸收特性及光电性能的影响。结果表明，在本实验参数范围内，不同激光能量密度处理后样品整体晶体结构均保持较好，但其表面形貌和 Se 元素表面分布特征存在明显差异。随着激光能量密度变化，样品表面结构发生改变，进而影响其光捕获能力以及器件的电学与光电响应特性。光谱测试结果显示，三组 Se 掺杂样品在 400~1 100 nm 波段内均具有较高吸收率，差异相对较小；而在 1 100~2 200 nm 近红外波段内，0.85 kJ/m² 和 1.40 kJ/m² 条件下样品均保持 60% 以上的吸收率，而 1.71 kJ/m² 条件下样品吸收率仍在 50% 以上，激光能量密度对近红外吸收的调控并不呈单调递增关系。器件测试结果进一步表明，不同激光能量密度制备的 N^+–N 光电二极管在暗电流和光响应度方面存在显著差异。其中，1.40 kJ/m² 条件下制备的样品表面微纳结构分布较均匀，对应器件表现出更优的电学特性：在−6 V 反向偏压下暗电流为 210.8 μA，在 1 064 nm 激光照射下光响应度达到 2.28 A/W，优于 0.85 kJ/m² 和 1.71 kJ/m² 条件下制备的器件。皮秒激光能量密度对 Se 掺杂黑硅的表面结构演化、近红外光吸收及器件光电响应具有显著调控作用，其影响并非简单的线性增强，而是存在较优工艺窗口。在本实验条件下，1.40 kJ/m² 为较优的激光能量密度参数。该研

究结果可为 Se 掺杂黑硅近红外光电探测器的工　　艺优化与器件性能提升提供参考。

参考文献:

[1] LV J, ZHANG T, ZHANG P, *et al*.. Review application of nanostructured black silicon[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2018, 13(1): 110.

[2] TONG ZH Y, BU M X, ZHANG Y Q, *et al*.. Hyperdoped silicon: processing, properties, and devices[J]. *Journal of Semiconductors*, 2022, 43(9): 093101.

[3] LI D D, KONG L H, FENG L P, *et al*.. Large-area, high-resolution, flexible x-ray scintillator film based on a novel 0d hybrid cuprous halide[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(4): 44.

[4] GAO D, CHEN B J, SHA X ZH, *et al*. . Near infrared emissions from both high efficient quantum cutting (173%) and nearly-pure-color upconversion in $NaY(WO_4)_2$: Er^{3+}/Yb^{3+} with thermal management capability for silicon-based solar cells[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2024, 13(1): 17.

[5] LONG J B, WANG ZH K, PENG H F, *et al*.. A chip-based optoelectronic-oscillator frequency comb[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 14.

[6] WANG H, CHEN L, WU Y, *et al*. . Advancing inorganic electro-optical materials for 5 G communications: from fundamental mechanisms to future perspectives[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2025, 14(1): 190.

[7] GREEN M A. *Silicon Solar Cells: Advanced Principles & Practice*[M]. Kensington: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, 1995.

[8] SZE S M, LI Y M, NG K K. *Physics of Semiconductor Devices*[M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.

[9] LIU X G, COXON P R, PETERS M, *et al*.. Black silicon: fabrication methods, properties and solar energy applications[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(10): 3223-3263.

[10] FAN ZH, CUI D F, ZHANG Z X, *et al*.. Recent progress of black silicon: from fabrications to applications[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(1): 41.

[11] SUGIOKA K, CHENG Y. Ultrafast lasers-reliable tools for advanced materials processing[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2014, 3(4): e149.

[12] PHILLIPS K C, GANDHI H H, MAZUR E, *et al*.. Ultrafast laser processing of materials: a review[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(4): 684-712.

[13] ZHAO ZH CH, KRAVTSOV V, WANG Z R, *et al*.. Applications of ultrafast nano-spectroscopy and nano-imaging with tip-based microscopy[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 1.

[14] ZHAO J H, LI X B, CHEN Q D, *et al*.. Ultrafast laser-induced black silicon, from micro-nanostructuring, infrared absorption mechanism, to high performance detecting devices[J]. *Materials Today Nano*, 2020, 11: 100078.

[15] LI CH, ZHAO J H, CHEN ZH G. Infrared absorption and sub-bandgap photo-response of hyperdoped silicon by ion implantation and ultrafast laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 883: 160765.

[16] FU J W, YANG D R, YU X G. Hyperdoped crystalline silicon for infrared photodetectors by pulsed laser melting: a review[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2022, 219(14): 2100772.

[17] HUANG S, JIN X R, WU Q, *et al*.. Ultrafast laser hyperdoped black silicon and its application in photodetectors: a review[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2024, 221(24): 2400127.

[18] UMEZU I, WARRENDER J M, CHARNVANICHBORIKARN S, *et al*.. Emergence of very broad infrared absorption band by hyperdoping of silicon with chalcogens[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(21): 213501.

[19] HER T H, FINLAY R J, WU C, *et al*.. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(12): 1673-1675.

[20] SHEEHY M A, TULL B R, FRIEND C M, *et al*.. Chalcogen doping of silicon via intense femtosecond-laser irradiation[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2007, 137(1-3): 289-294.

[21] HU SH X, HAN P D, WANG SH, *et al*.. Improved photoresponse characteristics in Se-doped Si photodiodes fabricated using picosecond pulsed laser mixing[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, 27(10): 102002.

[22] DU L Y, YIN J, ZENG W, *et al*.. Fabrication of micro-nano structure Se-doped silicon via picosecond laser irradiation assisted by dopant film[J]. *Materials Letters*, 2023, 331: 133463.

[23] GUO H, XIE J W, HE G ZH, *et al*.. A review of ultrafast laser micro/nano fabrication: material processing,

surface/interface controlling, and devices fabrication[J]. *Nano Research*, 2024, 17(7): 6212-6230.

[24] GROSS J M, SHAVANDI S R, ZAGORAC T, *et al*.. Picosecond versus femtosecond-laser ablation of silicon in atmosphere[J]. *Journal of Laser Applications*, 2023, 35(4): 042053.

[25] HAMAD A H. *Effects of different laser pulse regimes (nanosecond, picosecond and femtosecond) on the ablation of materials for production of nanoparticles in liquid solution*[M]//VISKUP R. High Energy and Short Pulse Lasers. Rijeka: InTech, 2016.

[26] ZHOU SH Q, LIU F, PRUCNAL S, *et al*.. Hyperdoping silicon with selenium: solid vs. liquid phase epitaxy[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8329.

[27] WANG M, DEBERNARDI A, ZHANG W X, *et al*.. Critical behavior of the insulator-to-metal transition in Te-hyperdoped Si[J]. *Physical Review B*, 2020, 102(8): 085204.

[28] DU L Y, LIU SH P, CHEN F S, *et al*.. Effects of dopant film thickness on near-infrared photodiode response based on Se-doped silicon fabricated by picosecond laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2025, 150: 105933.

[29] ATTEIA F, LE ROUZO J, DENAIX L, *et al*.. Morphologies and optical properties of black silicon by room temperature reactive ion etching[J]. *Materials Research Bulletin*, 2020, 131: 110973.

[30] ZHANG X M, LI W N, JIN CH, *et al*.. Effects of black silicon surface morphology induced by a femtosecond laser on absorptance and photoelectric response efficiency[J]. *Photonics*, 2024, 11(10): 947.

[31] KOMAROV F, PARKHOMENKO I, ALZHANOVA A, *et al*.. Broad infrared absorption band through ion beam hyperdoping of silicon with selenium[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 639: 158168.

[32] LEDINSKÝ M, FEKETE L, STUCHLÍK J, *et al*.. Characterization of mixed phase silicon by Raman spectroscopy[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(9-20): 1209-1212.

[33] FANG Y J, ARMIN A, MEREDITH P, *et al*.. Accurate characterization of next-generation thin-film photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 1-4.

作者简介：



程堰林 (2001—), 男, 四川成都人, 研究生, 主要从事材料及器件方面的研究。2024 年 6 月, 四川轻化工大学通信工程专业毕业获学士学位。E-mail: 324085404229@stu.suse.edu.cn



杜玲艳 (19XX—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。2005 年 6 月, 湖北师范大学物理学专业毕业获学士学位; 2007 年 6 月, 华中科技大学生物医学工程专业毕业获硕士学位; 2018 年 6 月, 电子科技大学光学工程专业毕业获博士学位。主要从事半导体材料与半导体器件、红外敏感材料与红外成像器件等方面的教学与科研工作。E-mail: dulingyan@suse.edu.cn