

文章编号 1672-6634(2024)03-0014-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023110007

面向 6G 通信的 SnSe_2 薄膜太赫兹波探测器

彭忠泽¹, 高飞龙², 阮振宇¹, 张敏¹, 宋琦^{1,2}, 张丙元²

(1. 深圳大学 广东省/教育部光电子器件与系统重点实验室, 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060;

2. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要 第六代通信(6G)技术以其宽带宽、高速传播、保密性强等优势成为了通信技术的发展方向,并计划于2028年商用。然而,由于6G波段电磁波的光子能量较低而在室温下缺乏高效的探测手段,这也成了制约6G技术发展的因素之一。近年来,低带隙纳米材料的发展,为太赫兹波检测提供了一种低成本、高灵敏度的探测手段。对大面积、高灵敏度的薄膜太赫兹波探测器进行研究,同时引入532 nm激光和强垂直磁场进行调控,研究了外场作用下的探测性能变化,得到了外场对太赫兹波的探测效果具有极其显著的提升。因此,少层和多层 SnSe_2 薄膜在外场调控下对于太赫兹波探测有明显的提升作用,这一研究也证明了,外场调控下的 SnSe_2 薄膜对6G探测技术的发展具有重要意义。

关键词 6G 通信技术; SnSe_2 薄膜; 太赫兹波探测器

中图分类号 TN241

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Terahertz Wave Detection in SnSe_2 Thin Films for 6G Communication Applications

PENG Zhongze¹, GAO Feilong², RUAN Zhenyu¹, ZHANG Min¹,
SONG Qi^{1,2}, ZHANG Bingyuan²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract The sixth-generation (6G) communication technology is currently being developed due to its wide bandwidth, high-speed propagation, and strong confidentiality. It is expected to be commercially available in 2028. However, the lack of efficient detection methods at room temperature, caused by the low photon energy of electromagnetic waves in the 6G band, is a significant limitation to the technology's advancement. In recent years, the emergence of narrow bandgap nanomaterials has provided a cost-effective and highly sensitive means of detecting terahertz waves. This study proposes a large-area, high-sensitivity thin-film terahertz wave detector. Additionally, it introduces a 532 nm laser and a strong vertical magnetic field for modulation during detection. The study investigates the impact of external fields on detection per-

收稿日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(12104314);广东省/教育部光电子器件与系统重点实验室开放基金资助

通信作者:宋琦,男,汉族,博士,副教授,研究方向:太赫兹光子学技术, E-mail: songqi@lcu.edu.cn.

formance and finds that the external field significantly enhances the detection of terahertz waves. Consequently, few-layer and multi-layer SnSe₂ films under external field modulation demonstrate a noticeable enhancement in terahertz wave detection. This research also confirms the significance of SnSe₂ films under external field modulation for the advancement of 6G detection technology.

Key words 6G communication technology; SnSe₂ film; terahertz wave detector

0 引言

太赫兹波段作为第六代移动通信技术的载波波段,由于其频率范围相较于 5G 技术有所提高,以及该频段具有的宽带宽、高传输速率等特殊性质,具有极大的促进产业互联网、物联网的发展的潜力,此外,应用 6G 技术边缘智能技术连接的应用将覆盖未来大众生活的方方面面。由于 6G 技术的实验波段主要为 0.12、0.22、0.28 和 0.42 THz^[1]。因此,工作频率区域在这些频率附近的太赫兹功能器件已经成为 6G 技术突破的关键点。

同太赫兹辐射源一样,室温下高性能的太赫兹波探测器也是太赫兹技术中重要的一项关键技术,由于太赫兹波光子能量较低,0.1 THz 的光子能量仅为 0.41 meV,虽然不会引起对生物组织的有害电离反应,但此能量能够直接激发载流子迁移产生光电效应的材料较少,应用中缺乏大面积、高响应的太赫兹波探测器,限制了 6G 技术应用的发展^[2,3]。

常用的太赫兹波探测器通常仅在特定条件下工作,如高莱探测器是早期提出的一种利用气体空腔热膨胀式太赫兹探测器^[4]难以实时探测皮秒量级超短脉冲太赫兹信号,肖特基二极管利用金属和半导体结合形成肖特基结原理制造^[5],由于其损伤阈值较低,在实验应用过程中容易损坏^[6]。与硅基、砷化镓等传统的半导体材料相比,目前备受关注的石墨烯^[7]、过渡金属硫化物^[8,9]以及黑磷^[10]等二维材料,被认为是高性能太赫兹探测器的新发展方向,针对二维材料性质及微纳结构对于太赫兹探测器性能影响的研究具有重要意义。近年来,针对低于传统半导体带隙的太赫兹波 meV 量级光子能量,研究人员将目光集中于研发新型材料和新结构来提高太赫兹波同器件的耦合,以提高量子效率。石墨烯材料是具有代表性的二维材料,其显著特性有零带隙以及优异的光电子性能,吸收谱覆盖超宽太赫兹频谱,其在太赫兹波段能够激发高载流子迁移^[11-13],这直接提高了探测器的灵敏度。近年来结合天线^[14]或腔体耦合的石墨烯探测器在太赫兹频段内取得了卓越的进展。石墨烯探测器具有高灵敏度和高探测频谱的优点,然而低光吸收、低探测面积和载流子寿命短意味着必须在光响应度和响应时间之间取舍,同时,零带隙意味着暗电流较高,这也在一定程度上降低了探测器的灵敏度。

为了获得大有效探测面积、高灵敏度的太赫兹波探测器,采用了在硅基底上以化学气相沉积制备了少层和多层的 SnSe₂ 薄膜,其纯度高结晶度好,少层和多层 SnSe₂ 膜,少层为 5~6 层,多层为 19~20 层。单层 Sn-Se 原子层为 0.575 nm^[15],因此少层厚度小于 3.45 nm,多层厚度小于 11.5 nm。这种与石墨烯材料有类似层状结构的二维金属硫化物不仅在某些探测器应用上能够取代石墨烯,还可以在高开关比逻辑器件等领域具有广泛的应用^[16],同样因这种二维金属硫化物具有优秀的韧性,在柔性传感、光电探测器等领域具有广泛的前景^[17]。金属硫化物材料储备丰富,开采简单成本低^[18],这为上述领域应用奠定基础。

SnSe₂ 作为新型半导体材料,拥有 1 eV 的窄带隙,具有正交层状结构,层与层之间通过范德华力连接,其在二维平面垂直方向上的量子约束以及态密度在导带和价带边缘附近达到峰值,电子与入射光子之间的耦合作用因此更加明显。目前已有研究人员使用 1 040 nm 飞秒激光激发通过机械剥离的 SnSe₂ 纳米片来得到涉及太赫兹感应谐波信号,在低能量光子信号检测应用中具有巨大潜力,促进了 6G 太赫兹技术的发展^[19]。

随着太赫兹辐射源技术的日益成熟,这也增加了对高性能的太赫兹探测器的需求^[20],目前研究人员为拓展太赫兹探测器的应用范围,将目光集中于室温工作,具有高灵敏度、大探测面积、低噪声等效功率、可集成的高性能太赫兹探测器^[21]。我们根据这一原理制备了层状 SnSe₂ 薄膜探测器,通过调整层数可以改变 SnSe₂ 薄膜的带隙,其有效探测面积高达 20 mm²,工作在室温条件下。同时为增加探测器探测性能,实验上

设计结合了垂直强磁场与 45° 斜入射 532 nm 激光,并对 0.1 THz 频率的太赫兹波进行了探测,其在室温下表现出良好的性能,少层 SnSe_2 和多层 SnSe_2 薄膜在 0.1 THz 的 NEP、 D^* 分别为 $1.53 \times 10^{-10}\text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 、 $7.16 \times 10^8\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $4.71 \times 10^{-10}\text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 、 $2.55 \times 10^8\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。实验表面了该材料在 6G 应用中大面积、高灵敏度太赫兹波探测领域具有极大的优势^[22]。

1 SnSe_2 表征与实验设备

1.1 器件的制备和实验装置

采用了基于光电流激励的光暗电流比较法对少层和多层 SnSe_2 薄膜太赫兹波探测器的探测性能进行表征 SnSe_2 的示意图、拉曼光谱图和扫描电镜图分别如图 1(a~c)所示,将少层和多层 SnSe_2 薄膜太赫兹波探测器放置于探针平台中心,使用两根针尖为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的钨钢探针接触少层和多层 SnSe_2 薄膜太赫兹波探测器两电极端,钨钢探针与皮安表、直流电源相连,由于太赫兹波探测器两端电极间距较小以及器件导电性影响,实验中易形成电容,电极两端同钨钢探针连接处电荷积累,长时间实验需根据具体情况进行接地处理。

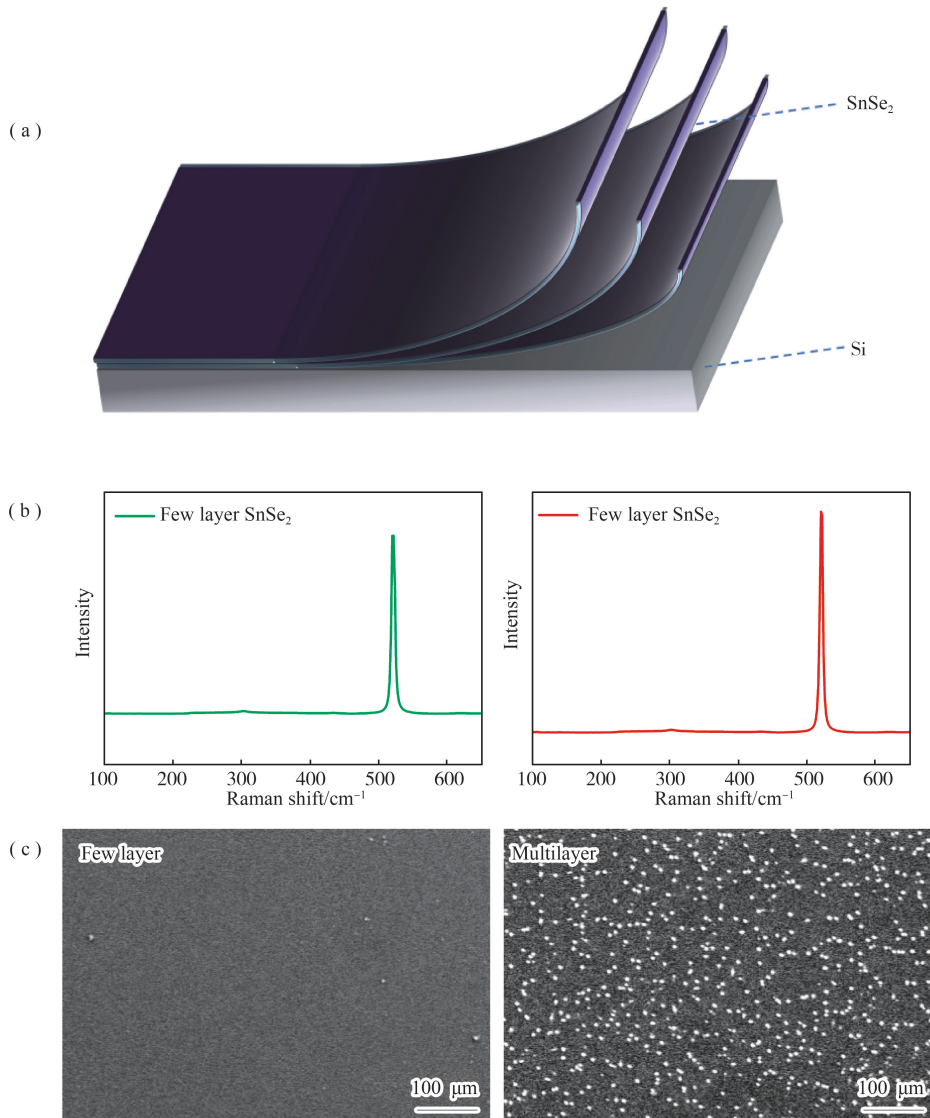


图 1 器件表征结果 (a) 示意图; (b) 拉曼光谱图; (c) 扫描电镜图

Fig. 1 Device characterization results (a) Schematic diagram; (b) Raman spectroscopy diagram; (c) Scanning electron microscopy diagram

同时由于实验中外加光场、磁场的原因会导致器件电导率发生变化,其排除所积累电荷时间发生变化,磁场会对直径较小的钨钢探针产生影响需间歇工作。实验中采用的太赫兹源为 0.1 THz 的雪崩二极管

(TeraSense IMPATT diodes),最高输出功率为 70 mW,实验使用前,首先测量其入射到器件上的功率,大致衰减为其输出功率的 95%。实验结果使用皮安表记录少层和多层 SnSe₂ 薄膜太赫兹波探测器的 I - V 曲线,器件的总面积大于衍射极限,我们计算基于光电流的响应率并转换为电压,便于与其他太赫兹波探测器进行比较,根据太赫兹源照射面积与器件面积计算太赫兹波有效面积。

图 2 是器件在 0.1 THz 室温下光暗电流数据。通过器件光暗电流对比,计算了探测器的光响应度 R_i 、噪声等效功率 p_{NEP} (Noise Equivalent Power, NEP) 和归一化探测率 D^* [23]

$$R_i = \frac{I_p}{PS}, \quad (1)$$

$$p_{NEP} = \frac{v_n}{R_v} = \frac{v_n}{R_{ir}}, \quad (2)$$

式中 I_p 是器件测的光电流, P 为太赫兹源功率密度, S 是器件的探测面积。文中采用 R_i 来表现器件光响应的大小,更大的光响应对应更高的光电转换效率。等效噪声功率定义为太赫兹波探测器输出信号信噪比为 1 时最小输出功率,当 p_{NEP} 越小时,器件探测灵敏度越高。正是由于缺乏这种大面积、高灵敏度太赫兹波探测器,才阻碍了 6G 技术的发展, p_{NEP} 也是衡量一个探测器性能的重要参数之一。其中 v_n 是总噪声,有热噪声 v_r 与偏置电压引起的暗电流噪声 v_b 构成,其表示为[24]

$$v_n = \sqrt{v_r^2 + v_b^2} = \sqrt{4k_B T r + 2q I_d r^2}, \quad (3)$$

式中 k_B , T , r , q , I_d 分别为玻尔兹曼常数、探测器绝对温度、电阻、单位电荷、暗电流。归一化探测率 D^* 是评估具有不同有效探测面积的探测器所具有灵敏度的参数, S 为有效探测面积, D^* 也是对比不同探测器探测性能的重要参数之一[25],其单位为 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,

$$D^* = \frac{\sqrt{S}}{p_{NEP}}. \quad (4)$$

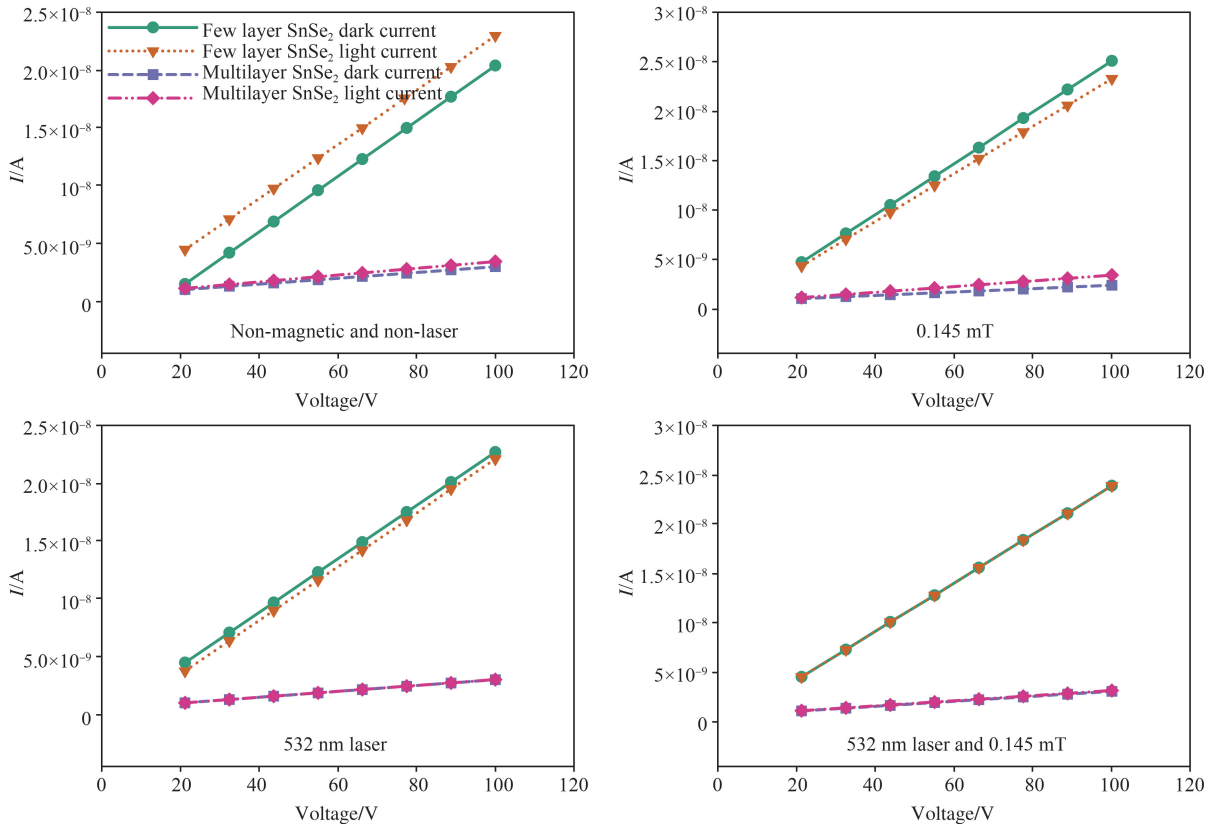


图 2 少层 SnSe₂ 和多层 SnSe₂ 暗亮电流 I - V 曲线

Fig. 2 I - V curves of dark bright current for few layer SnSe₂ and multi-layer SnSe₂

6G 通讯频段设置为 THz 频段的低频部分,而大面积、高灵敏的太赫兹低频探测器研究尚未完善,根据

目前实验频段的划分,该部分探测器的频率主要围绕在 0.1 THz 以及 0.28 THz 展开,而少层 SnSe₂ 薄膜和多层 SnSe₂ 薄膜的电极间宽度均为 3 mm,在频率上与 0.1 THz 更加匹配,因此实验将在 0.1 THz 的辐射源下进行器件探测性能的研究。为了测试器件在探测低功率太赫兹波的能力,我们实验中适当增加辐射源与器件表面之间的距离,降低有效探测面积与该平面辐射源照射面积。基于上述探测装置,我们在该基础上增加了 45°斜入射 532 nm 激光以及垂直于器件薄膜表面的强磁场,进行针对太赫兹波与薄膜探测器耦合效率的变化的实验。

2 结果与讨论

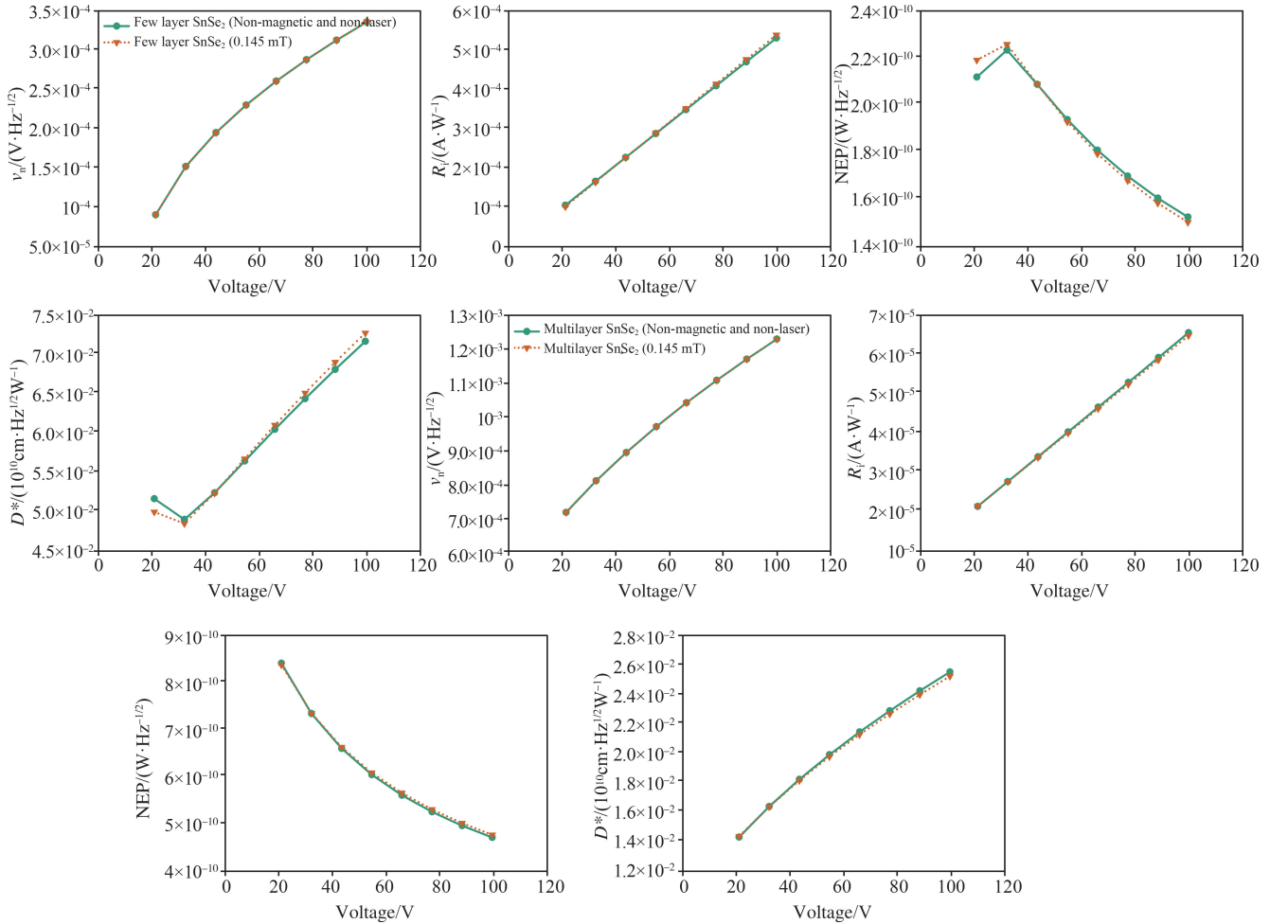


图3 少层 SnSe₂ 和多层 SnSe₂ 无外场与 0.145 mT 磁场条件下总噪声 (v_n)、光响应度 (R_i)、噪声等效功率 (p_{NEP})、归一化探测率 (D^*)

Fig. 3 Total noise (v_n), optical responsivity (R_i), noise equivalent power (p_{NEP}), normalized detection rate (D^*) of few layer SnSe₂ and multi-layer SnSe₂ under no external field and 0.145 mT magnetic field

在室温条件下,图3所示少层 SnSe₂ 和多层 SnSe₂ 初始与 0.145 mT 磁场条件下总噪声 v_n 、光响应度 R_i 、噪声等效功率 p_{NEP} 、归一化探测率 D^* ,对少层和多层 SnSe₂ 薄膜在 0.1 THz 频率加线性增长的电压 (20~100 V),由于非平衡载流子与漂移速度成正比,其 R_i 均呈线性增长。器件的总噪声来源于光电转换过程中,半导体中电子跃迁以及逸出表面的随机过程,在信号较弱时,光电探测器的总噪声会显著地影响信号探测的准确性,因此少层 SnSe₂ 薄膜其总噪声要小于多层 SnSe₂ 薄膜,则少层 SnSe₂ 薄膜探测器性能要优于多层 SnSe₂ 薄膜。值得注意的是当我们只施加一个 0.145 mT 垂直于薄膜表面的强磁场少层 SnSe₂ 薄膜的 R_i 从 $5.29 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 增长到 $5.37 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,而多层 SnSe₂ 薄膜在施加强磁场后其 R_i 从 $6.57 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 减小到 $6.49 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,相较于少层 SnSe₂ 薄膜探测器,多层 SnSe₂ 薄膜探测器

的光响应度更高,但是在磁场作用下由于磁电阻效应抑制了光生载流子复合效率,显然多层 SnSe₂ 薄膜在垂直于电流方向和磁场方向产生的霍尔电场更大以至于阻碍了光生载流子的迁移,而少层受到此霍尔电场影响后促进了载流子迁移,其光响应度增大。同时可以注意到对于少层 SnSe₂ 的噪声等效功率在 20~32.5 V 产生了增长,这说明其在低电压时并未达到工作电压条件,SnSe₂ 薄膜探测器应工作于 32.5 V 以上的电压。

表 1 100 V 电压下少层 SnSe₂ 和多层 SnSe₂ 在多种外场条件下总噪声(v_n)、
光响应度 R_i 、噪声等效功率 p_{NEP} 、归一化探测率 D^*

Table 1 Total noise of few layer SnSe₂ and multi-layer SnSe₂ under various external field conditions at a voltage of 100 V v_n Light responsivity R_i , noise equivalent power p_{NEP} , normalized detection rate D^*

Samples (Applied laser or magnetic field)	$v_n/(V \cdot Hz^{-1/2})$	$R_i/(A \cdot W^{-1})$	$NEP/(W \cdot Hz^{-1/2})$	$D^*/(10^{10} \text{ cm} \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1})$
Low layer SnSe ₂ (Non-magnetic and non-laser)	3.36×10^{-4}	5.29×10^{-4}	1.53×10^{-10}	0.071 646 014
Low layer SnSe ₂ (0.145 mT)	3.36×10^{-4}	5.37×10^{-4}	1.51×10^{-10}	0.072 710 399
Multilayer SnSe ₂ (Non-magnetic and non-laser)	1.23×10^{-3}	6.57×10^{-5}	4.71×10^{-10}	0.025 544 28
Multilayer SnSe ₂ (0.145 mT)	1.23×10^{-3}	6.49×10^{-5}	4.77×10^{-10}	0.025 252 643
Low layer SnSe ₂ (532 nm laser)	3.36×10^{-4}	5.09×10^{-4}	1.59×10^{-10}	0.068 860 271
Low layer SnSe ₂ (532 nm laser and 0.145 mT)	3.36×10^{-4}	6.20×10^{-4}	1.31×10^{-10}	0.083 935 104
Multilayer SnSe ₂ (532 nm)	1.23×10^{-3}	5.72×10^{-5}	5.41×10^{-10}	0.022 251 273
Multilayer SnSe ₂ (532 nm and 0.145 mT)	1.23×10^{-3}	6.02×10^{-5}	5.14×10^{-10}	0.023 425 683

层状 SnSe₂ 薄膜材料具有优异的光电特性,我们测试了其在单独垂直磁场下探测性能变化、在 532 nm 激光以 45°斜入射时探测性能变化以及在上述两种条件同时存在时其探测性能变化,532 nm 激光激发实验结果如图 4 所示,在经过静电排除以及多次测试取平均的条件下,相较于单独施加 0.145 mT 垂直磁场时 SnSe₂ 薄膜的探测性能,在 45°斜入射 532 nm 激光照射下,再施加 0.145 mT 垂直磁场的探测性能提升更为明显,根据表 1 在 100 V 时,少层 SnSe₂ 薄膜的光响应度从 $5.09 \times 10^{-4} \text{ A/W}$ 提高到了 $6.20 \times 10^{-4} \text{ A/W}$,提升了 21.8%,同时 NEP 也从 $1.59 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 下降到了 $1.31 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,等效噪声功率在同时施加 532 nm 激光与 0.145 mT 磁场条件下具有有效提升,归一化探测率在同时施加 532 nm 激光与 0.145 mT 磁场条件下增长了 14.6%,而在 532 nm 激光照射条件下施加的 0.145 mT 磁场使得比探测率增长了 18.0%,这表明了在光场作用下,磁场对于器件耦合更加明显,探测性能更高。而对于多层 SnSe₂ 薄膜在 45°斜入射 532 nm 激光照射下并施加 0.145 mT 垂直磁场的探测性能仅增强 5.2%,等效噪声功率也较大,且施加 532 nm 激光的探测性能均低于未施加 532 nm 激光的性能。因此对于少层 SnSe₂ 薄膜磁场表现为促进光生载流子迁移运动,而对于多层 SnSe₂ 薄膜为抑制作用。

根据图 4 中两种场同时施加时少层 SnSe₂ 薄膜和多层 SnSe₂ 薄膜探测性能提升的结果,对于少层 SnSe₂ 薄膜在 532 nm 激光激发作用下总噪声变化并不明显,但是光响应度提升更大,噪声等效功率变得更小,能够探测到更小的信号,其归一化探测率提升较大,对于长波长低能量太赫兹光子的探测能力具有提升,探测性能提升较为理想。相较于单场施加,多场综合作用下其探测的光生载流子变化更加明显。对于多层 SnSe₂ 薄膜,光响应度 $6.57 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,在施加 0.145 mT 磁场后反而下降到 $6.49 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,虽然在施加 532 nm 激光下,0.145 mT 磁场作用于多层 SnSe₂ 薄膜光响应度表现为增强,但是其效果并不明显。

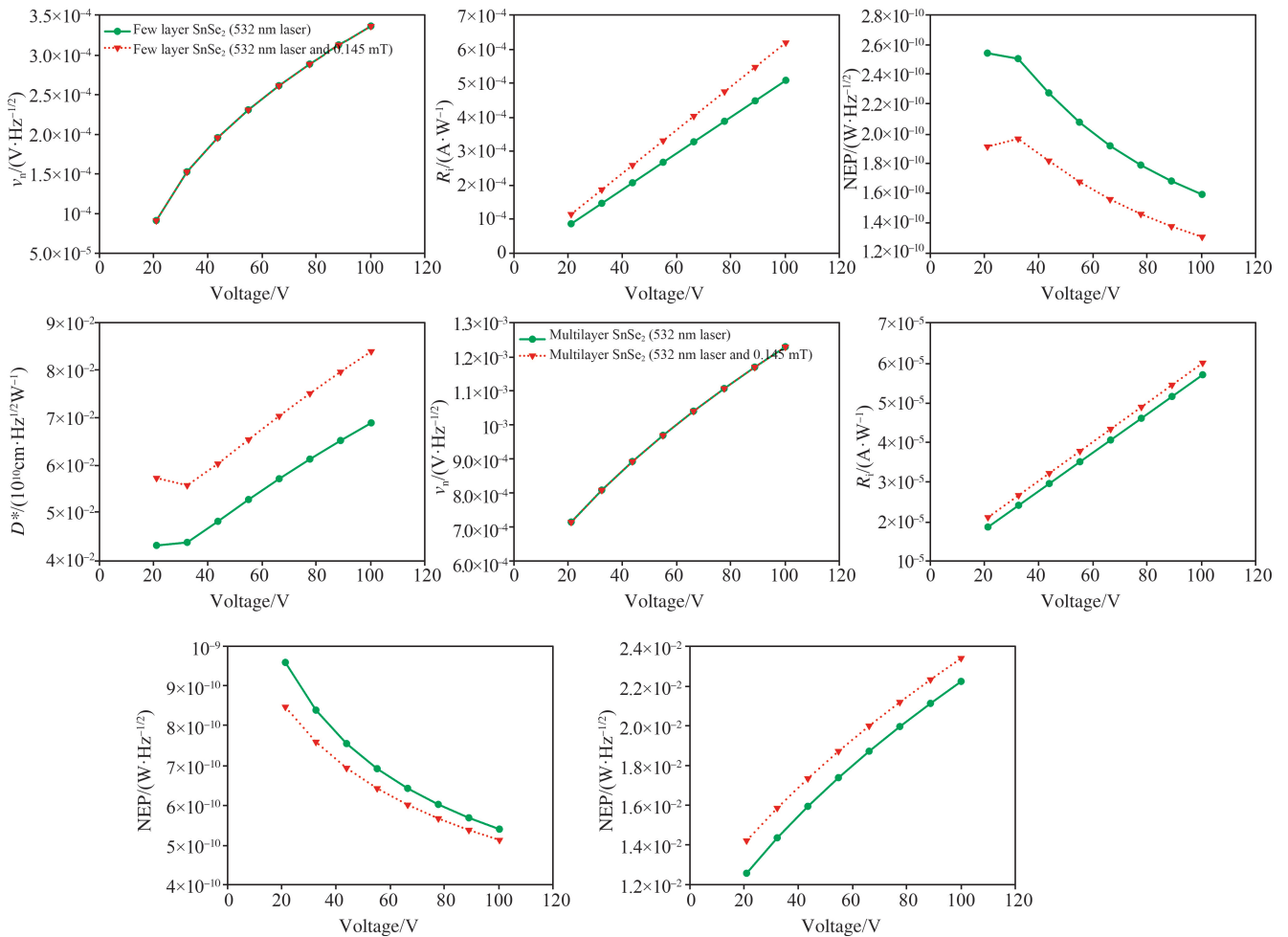


图 4 少层 SnSe₂ 和多层 SnSe₂ 在 532 nm 激光激发下总噪声 v_n 、光响应度 R_i 、噪声等效功率 p_{NEP} 、归一化探测率 D^*

Fig. 4 Total noise v_n , optical responsivity R_i , noise equivalent power p_{NEP} , normalized detection rate D^* of few layer SnSe₂ and multi-layer SnSe₂ under no external field and 532 nm laser

对于少层 SnSe₂ 和多层 SnSe₂ 在 532 nm 激光激发下响应时间也进行了测试,由测试结果可知少层的响应时间大概为 80 ms,多层器件的响应时间为 105 ms,较长的响应时间与薄膜本身的面积较大有关系,此外,也与电流测试源表的读取数据间隔较长有关。

3 结论

综上所述,我们设计制备了一种面向 6G 的大面积、高灵敏度 SnSe₂ 薄膜太赫兹波探测器。薄膜探测器不仅可以降低加工成本,而且易于集成,相较于探测晶体等器件,其具有更高效、高精度和快速响应等优点。通过实验证明,这种薄膜材料在低光子能量下具有出色的探测性能。同时,在室温条件下,该探测器具有较大的有效探测面积优势。此外,在 0.1 THz 频率下施加磁场和多个场效应下,NEP(等效噪声功率)和 R_i (灵敏度)明显变化。在 6G 应用中,可以利用外场效应来更有效地探测信号。在外加场作用下,少层 SnSe₂ 薄膜材料与太赫兹波的耦合效率提升了 21.8%,同时等效噪声功率更小,探测率提升了 18.0%。这为探测可调领域的应用提供了巨大优势,为探测 6G 通信频段的太赫兹波增加了更多的手段。研究结果表明,面向 6G 通信技术的少层 SnSe₂ 薄膜太赫兹波探测器拓展了大面积、高灵敏度的太赫兹探测技术。

参 考 文 献

- [1] SONG Q, ZHOU Y, JIA E S, et al. Large area crystalline Weyl semimetal with nano Au film based micro-fold line array for THz detec-

- tor[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66: 3267-3275.
- [2] 周新鹏,徐凌伟. 5G 移动通信系统性能分析与预测方法研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2021,34(4):23-28.
- [3] SONG Q, ZHOU Y, CHEN R, et al. High sensitivity multiple microcavity enhanced 3-D printed micro-stud array ultrafast response detector at 6G frequency[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(13): 14067-14073.
- [4] KLOCKE D, SCHMITZ A, SOLTNER H, et al. Infrared receptors in pyrophilous (“fire loving”) insects as model for new un-cooled infrared sensors[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2011, 2: 186-197.
- [5] 刘海瑞. 基于平面肖特基二极管的准光检波器研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.
- [6] 张玉平,唐利斌,刘玉菲,等. 太赫兹新型探测器的研究进展及应用. 红外与毫米波学报[J]. 2020, 39(2): 191-210.
- [7] QIN H, SUN J, HE Z, et al. Heterodyne detection at 216, 432, and 648 GHz based on bilayer graphene field-effect transistor with quasi-optical coupling[J]. Carbon, 2017, 121: 235-241.
- [8] LIU H, CHEN Z, CHEN X, et al. Terahertz photodetector arrays based on a large scale MoSe_2 monolayer[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(40): 9399-9404.
- [9] DENG X Y, DENG X H, SU F H, et al. Broadband ultra-high transmission of terahertz radiation through monolayer MoS_2 [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(22): 224304.
- [10] VITI L, HU J, COQUILLAT D, et al. Black phosphorus terahertz photodetectors[J]. Advanced Materials, 2015, 27(37): 5567-5572.
- [11] LIU J, LI X, JIANG R, et al. Recent progress in the development of graphene detector for terahertz detection[J]. Sensors, 2021, 21(15):4987.
- [12] CHEN T, WANG J, LIANG D. A polarization-insensitive dual plasmon-induced transparency terahertz sensor based on graphene metamaterial[J]. Optics Communications, 2023, 544:129622.
- [13] KOPPENS F H L, MUELLER T, AVOURIS P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(10): 780-793.
- [14] GUO Z, MA C, OU H, et al. Room-temperature terahertz detector based on monolayer graphene integrated with an asymmetric bowtie antenna[J]. Photonics, 2023, 10(5):576.
- [15] JIANG J, WONG C P Y, ZOU J, et al. Two-step fabrication of single-layer rectangular SnSe flakes[J]. 2D Materials, 2017, 4(2): 021026.
- [16] GUPTA S U, DALVANIYA A G, PATEL N F, et al. Optical switching device based on a crystalline SnSe_2 photodetector in diverse conditions[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3(11): 4859-4869.
- [17] GUO C, GUO W, XU H, et al. Ultrasensitive ambient-stable SnSe_2 -based broadband photodetectors for room-temperature IR/THz energy conversion and imaging[J]. 2D Materials, 2020, 7(3): 035026.
- [18] XU X, LOU J, WU S, et al. SnSe_2 -functionalized ultrafast terahertz switch with ultralow pump threshold[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2022, 10(15): 5805-5812.
- [19] SONG Q, CHEN J, WANG Y, et al. Ultra-sensitive terahertz introduced harmonic emission towards terahertz detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 133: 104868.
- [20] SHAN Y, LIANG Y, LI C, et al. Review of recent progress on solid-state millimeter-wave and terahertz signal sources[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2023, DOI:10.1002/cta.3726.
- [21] LEWIS R A. A review of terahertz detectors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(43): 433001.
- [22] SONG Q, ZHOU Z, XU Y, et al. Low-bias, high-photoresponsivity SnSe_2 nanofilm with an Au split-ring array-based THz detector toward 6G communication[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(6): 169405.
- [23] LEI T, LÜ W M, LÜ W X, et al. Photogating effect in two-dimensional photodetectors[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(2):027801.
- [24] 柯程虎,包晶,梁静远,等. 探测器及其噪声模型研究进展[J]. 光学技术, 2023, 49(3): 329-348.
- [25] WANG L X. Research progress of graphene-based photodetectors[J]. Hans Journal of Nanotechnology, 2023, 13(2): 59-68.

(责任编辑:赵海军)