

文章编号: 1005-5630(2024)01-0042-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202302260026

金属光栅增强石墨烯宽谱响应光电探测器

王兰霞, 余安琪

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 光电探测器在通信、检测和医疗等领域应用广泛, 随着航空航天、夜视、遥感、热成像、汽车互联和消费电子等行业的发展, 人们对超宽带探测器的需求也越来越迫切。现有的超宽带探测是使用不同材料、不同探测频段的多个光电探测器, 集成度不高, 阻碍了上述应用的发展。因此设计了石墨烯微米条-金属光栅复合结构的光电探测器, 该器件在太赫兹、红外和可见光波段都可产生光电响应。在可见光范围内, 金属光栅将探测器的探测灵敏度从 1.1 mA/W 显著提高至 2.5 mA/W。该研究为基于石墨烯的超宽带光电探测器的设计提供了新的思路。

关键词: 石墨烯微米条; 金属光栅微米条; 光致栅控效应; 测辐射热效应

中图分类号: TN 37 **文献标志码:** A

Metal grating enhanced graphene photodetector with wide spectral response

WANG Lanxia, YU Anqi

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Photodetectors are widely used in communication, detection, medical and other fields. With the development of industries such as aerospace, night vision, remote sensing, thermal imaging, automotive interconnection and consumer electronics, the demand for ultra-wideband photodetectors is increasing. Existing ultrawide band detectors are multiple photodetectors using different materials and different detection bands, which are poorly integrated and restrict the development of the above applications. We design a graphene micron strip-metal grating composite structure photodetector. It provides a photoelectric response in the terahertz, infrared and visible spectral regions. In the visible region, the metal grating significantly increased the detection sensitivity from 1.1 mA/W to 2.5 mA/W. This work provides new ideas for the design of graphene-based ultra-wideband photodetectors.

Keywords: graphene micron strip; metal grating micron strip; photogating effect; bolometer effect

收稿日期: 2023-02-26

第一作者: 王兰霞(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为二维材料探测器。E-mail: 1762321362@qq.com

通信作者: 余安琪(1987—), 男, 博士后, 研究方向为二维材料探测器。E-mail: anqiyu@usst.edu.cn

引 言

光电探测器是一种将光信号转换为电信号的光电器件, 被广泛应用于众多科学和工业领域, 如: 航空航天、医疗器械、环境监测、生物传感等。根据光电探测器所用材料带隙的不同, 它能够探测紫外(UV)、可见(VIS)、红外(IR)和太赫兹(THz)波段的光^[1-5]。到目前为止, 多种半导体材料被应用于光电检测, 如晶体硅、碳纳米管、III-V族化合物等。微纳结构对光进行聚焦和局域增强, 能极大提高光与物质的相互作用强度, 使低维材料在光电探测器领域的应用更加具有潜力。

在以往的研究中, 不同波段的光电探测器用不同的材料去适应工作环境^[6-7]。而超宽带探测器可打破传统探测器的空间和模块数量限制, 在同一应用场景下, 可用一个探测器代替多个工作于不同频段的探测器, 促进了宽带响应探测器在更多领域中的应用。如: 在夜视领域内, 通过融合可见和红外图像的方法来支持实时彩色夜视^[8]; 在通信领域内, 运用离子注入法扩展探测波长范围, 使带宽更宽, 光电性能更强, 成本大幅降低^[9], 结合物联特性, 广泛地应用于消费电子、汽车互联等产业; 在生物医学检测中^[10], 应用不同波段电磁波特性, 同时实现高效的癌细胞诊断和光热治疗等。超宽带探测器在众多领域的需求与应用使它成为了一个研究热点。

然而, 光电探测器的探测带宽很难覆盖从太赫兹到可见光的超宽频带。一般来说, 很难依靠一种响应机制在如此宽的频率范围内产生光电响应。因此, 近年来, 科研人员考虑在不同频率范围内利用不同响应机制, 以拓宽探测器的响应带宽。Yuan等^[11]展示了一种h-BN封装的石墨烯探测器, 探究了在异质结构中不同掺杂水平下的光电流响应机制, 其中测辐射热效应表现出47 MHz的响应范围, 室温下在3.4~12.0 μm的波长范围内表现出5.1~1.4 mA/W的响应率。Bai等^[12]设计了一种基于GaAs/Al_xGa_{1-x}异质结的从近红外到太赫兹的超宽带响应器件, 其最高响应率可达7.3 A/W。Chen等^[13]研究构建了一种天线辅助的二维Bi₂O₂Se光电探测器, 实现了

红外到太赫兹范围的宽带光电探测, 带隙和高迁移率之间的良好协调实现了宽光谱检测。该Bi₂O₂Se光电探测器在1550 nm, 0.17 THz和0.029 THz下的宽带响应率分别为58 A/W, 2.7 × 10⁴ V/W和1.9 × 10⁸ V/W。

石墨烯是一种有望实现超宽带光电探测的二维材料。当入射光的光子能量高于两倍费米能级时, 单层石墨烯呈现出恒定的2.3%的吸收率, 在相同材料厚度下, 这一吸收远高于其他材料。然而, 单原子层的总吸收较低, 难以产生光电效应。Freitag等^[14]制备了石墨烯微米条探测器, 却未观测到光电导响应。由此可见, 在近红外/可见光波段, 利用其他机制产生光电信号是更为可行的方法。因此, 本文结合金属光栅与石墨烯微米条设计出一种宽频响应的半导体场效应探测器件, 并与无金属光栅结构的器件进行了对比。使用银胶背栅对器件进行栅压调控, 对其转移特性和输出特性进行了详细表征。分别用可见520 nm和近红外1060 nm的光测量了探测器的响应行为, 分析并解释了器件的探测机理与性能。器件1为无金属光栅结构, 它在光照下发生光致栅控效应, 当栅压为-20 V时, 在可见光范围内响应率达到1.1 mA/W, 近红外波段内响应率为2.3 mA/W。器件2为有金属光栅结构, 它在光照下发生测辐射热效应, 同样的, 可见光下, 当栅压为-15 V时, 其响应率达到2.5 mA/W。在可见光波段内, 有金属光栅结构的器件比无金属光栅结构的器件开关比提高了1.5倍。

1 器件结构与制备

1.1 器件结构

图1(a)所示为器件结构示意图, 采用的是常见的中阻硅/二氧化硅衬底, 其目的是使器件具有背栅调控性, 轻掺杂硅的导电能力差, 不符合所需的栅控条件。设计并制备了石墨烯微米条和石墨烯微米条-金属光栅复合结构的2种器件, 图1(b)所示为器件的光学显微图片。石墨烯微米条长150 μm, 宽9 μm, 石墨烯微米条与光栅横向重合2 μm。石墨烯微米条之间的距离为L, 金属光栅微纳结构横向宽度为d。根据结

构的不同，总共设计了 2 个器件，分别是：器件 1——无金属光栅结构；器件 2——有金属光栅结构，其中 $L = 51 \mu\text{m}$ ， $d = 55 \mu\text{m}$ 。

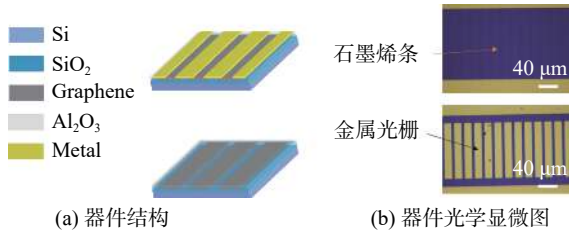


图 1 器件结构相关示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device structure

1.2 器件制备

制备器件采用的是常见的中阻硅衬底，晶向 100，电阻率为 $1 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 、厚度为 $500 \mu\text{m}$ 的单抛硅片，其上生长 300 nm 厚的二氧化硅。首先利用紫外光刻和热蒸发在二氧化硅衬底上生长金属对准标记 (30 nm Ti 和 100 nm Au) 和背栅电极，然后在有对准标记的衬底上湿法转移 CVD 生长的单层石墨烯。转移前石墨烯的迁移率为 $3000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ，由于石墨烯载流子受二氧化硅衬底杂质散射的影响，转移后石墨烯的迁移率会有少许下降。然后进行退火工艺 (烤箱内抽真空充惰性气体氩) 清除剩余 PMMA 胶，去除褶皱，防止石墨烯脱落。接着通过紫外光刻和氧离子刻蚀，将大片石墨烯图形化为所需要的 $9 \mu\text{m}$ 宽， $200 \mu\text{m}$ 长的条形阵列。在此基础上利用紫外光刻和磁控溅射生长源漏电极 (20 nm Ti 和 80 nm Au)。磁控溅射生长金属的方式不如热蒸发生长的金属致密性强，但它使用低温生长，更加有利于对石墨烯的保护。接着利用原子层沉积生长 30 nm 厚的三氧化二铝作为氧化层，保护石墨烯以及隔绝金属光栅与源漏电极。最后用磁控溅射使器件 2 生长 20 nm Ti 和 80 nm Au 作为金属光栅。

2 器件测试与响应性能计算

将器件置于室温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，超净环境中进行测试。按图 2 所示的测试系统连接仪器，使用 520 nm 的可见光和 1060 nm 的近红外光照射器件。

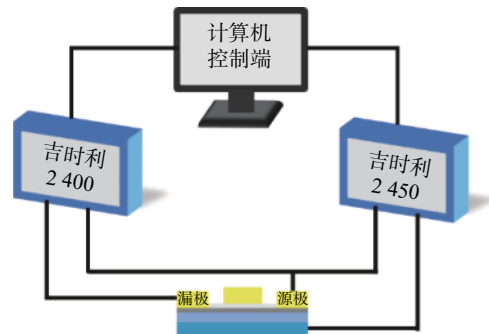


图 2 电学测试系统

Fig. 2 Electrical testing system

光源照射在器件上，器件置于接线盒连接于源表 keithley 2450 和 keithley 2400，并用电脑软件 MATLAB 编写测试程序，控制源表，使用银胶背栅通过硅衬底实现对沟道的调控，从而测得转移特性曲线、输出曲线以及光响应。在测试中，使用的光源功率 P 为 140 mW ，根据所测数据计算出器件响应率与开关比。

其中，响应率 R_A 为

$$R_A = \frac{I_{ph}}{P_{re}} \quad (1)$$

式中： I_{ph} 为光响应电流； $P_{re} = \frac{P}{S_{ph}} \times S_{eff}$ ，为器件接收功率，其中 S_{ph} 为光斑面积，测试光斑直径为 5 mm ， $S_{eff} = \max\{S_{re}, S_{gr}\}$ 为有效面积， S_{re} 为光斑衍射面积， S_{gr} 为石墨烯沟道面积。整个器件沟道是长 $150 \mu\text{m}$ ，宽 $9 \mu\text{m}$ 的石墨烯阵列，其总长为 55 mm 。

器件开关比 D 为

$$D = \frac{I_{ph}}{I_d} \quad (2)$$

式中： I_{ph} 为光响应电流； I_d 为暗电流。

3 结果分析与讨论

光电探测器的物理效应通常分为光电效应和光热效应。光电效应主要有光电导效应与光生伏特效。光电导效应是指半导体材料受到光照射，内部生成光生载流子，载流子数显著增加引起电导率的增加，从而导致电阻减小。光生伏特效是指光照产生的电子-空穴对被内建电场分开，导致电荷在两侧堆积，从而产生一定方向的

电动势。而光热效应是指探测器吸收能量后不直接引起电子状态的改变, 而是把吸收的光能变为晶格的热运动能量, 引起温度的上升, 使得与温度有关的电学性质发生变化。一般物质的声子能量落于红外波段。在红外波段内, 声子-光子相互作用更强, 光热效应也更强烈。

在对器件进行测试时, 分别对 2 个器件用 1 060 nm 与 520 nm 的波长进行照射, 用 Agilent B2912 分别对器件测转移特性曲线和 $I-t$ 曲线, 分析并计算响应率与开关比。

器件 1 的转移特性曲线如图 3(a)和(d)所示, 源漏偏压固定在 0.01 V 下, 对衬底施加栅极电压, 明显看到, 器件的电流呈 V 字型, 符合石墨烯的转移特性曲线。当对器件进行光照时, 转移特性曲线向左发生平移, 这说明光照使

器件产生额外的正栅压作用于石墨烯。因此, 认为产生这一光电响应的机制为光致栅控效应。在之前的研究中, 研究人员发现绝缘层中的缺陷在光照下会被激活, 激活后电子进入二维材料沟道, 而缺陷处留下正电中心, 从而对沟道产生正的等效栅压, 所以会看见转移特性向左移动^[15]。在图 3(b)和(e)中, 栅压固定为 0 V, 源漏偏压仍为 0.01 V。当器件受到光照, 产生正的光电信号, 大约为暗电流的 3%。从图 3(c)和(f)可以看出, 当栅压变化时, 器件的响应率和开关比都随栅压变化。在近红外下, 分别于 -20 V 和 -12 V 时达到最大响应率 2.3 mA/W 和最大开关比 9%; 在可见光下, 分别于 -20 V 和 -15 V 时达到最大响应率 1.1 mA/W 和最大开关比 4%。

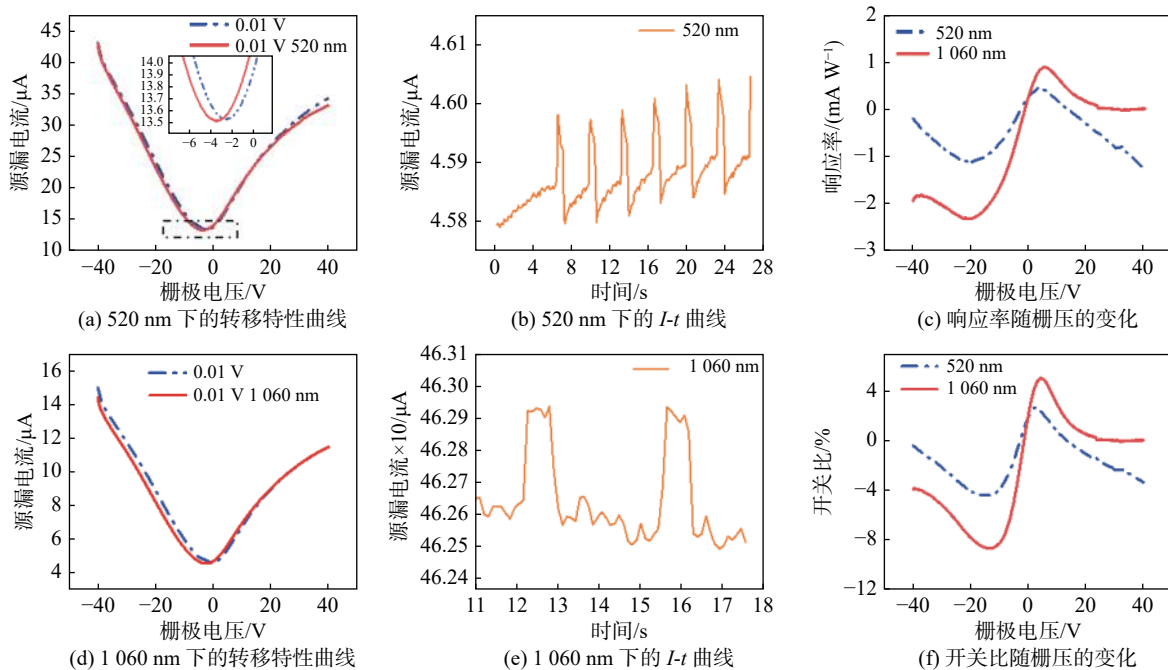


图 3 器件 1 在 520 nm 和 1 060 nm 光辐照下的电学测试结果

Fig. 3 Electrical testing results of device 1 with 520 nm and 1 060 nm illumination

用同样的方式对器件 2 进行测试, 如图 4(a)和(d)所示, 器件 2 的转移特性曲线在加光照后整体向下移动。狄拉克点的左右轻微移动同样是由光致栅控效应导致的。加光照后, 转移特性曲线向下移动, 说明石墨烯的电阻变大, 所以考虑其为测辐射热效应。虽然理想单晶石墨烯的电子-声子相互作用较弱, 但是实验中使用的 CVD 石墨烯是多晶, 晶粒边界中电子-声子相互作用可

能较强。此外, 从以往的研究中可以看出, 石墨烯和两侧介质层界面上的缺陷态也会对石墨烯的电子造成散射, 并且随温度增加^[16-17]。因此, 当器件 2 的温度受光照增加后, 载流子的散射增加, 平均自由程减少, 迁移率降低, 电导率下降。在栅压固定为 0 V, 偏压为 0.01 V 下测得的结果见图 4(b)和(e)。当受到光照后, 器件产生负的光响应电流, 在可见光下其大约为暗电流

的 0.3%；在近红外光下，该光电流约为 $0.015 \mu\text{A}$ ，为暗电流的 0.24%。而器件 1 在红外光下的光电流为 $0.003 \mu\text{A}$ ，仅为暗电流的 0.06%。从图 4(c) 和(f)中可以看到，栅压变化时，器件的响应率和开关比也随栅压变化。可见光下，在栅压为 -13 V 左右时，响应率和开关比都达到最大，分别为 2.5 mA/W 和 10%，远超器件 1。而在 2013 年，Freitag 等^[14]提出的石墨烯条结构的器件在

690 nm 可见光和 1 V 偏置电压下，响应率只达到了 0.25 mA/W ，响应效率主要由光伏和光诱导的热效应主导。而在本文中，有金属光栅结构的器件在 0.1 V 下测得的响应率为 2.5 mA/W ，比无金属光栅结构的器件响应率高出 9 倍。该器件响应机制为测辐射热效应，响应率随着偏置电压线性变化，偏置电压越大，响应率越大。

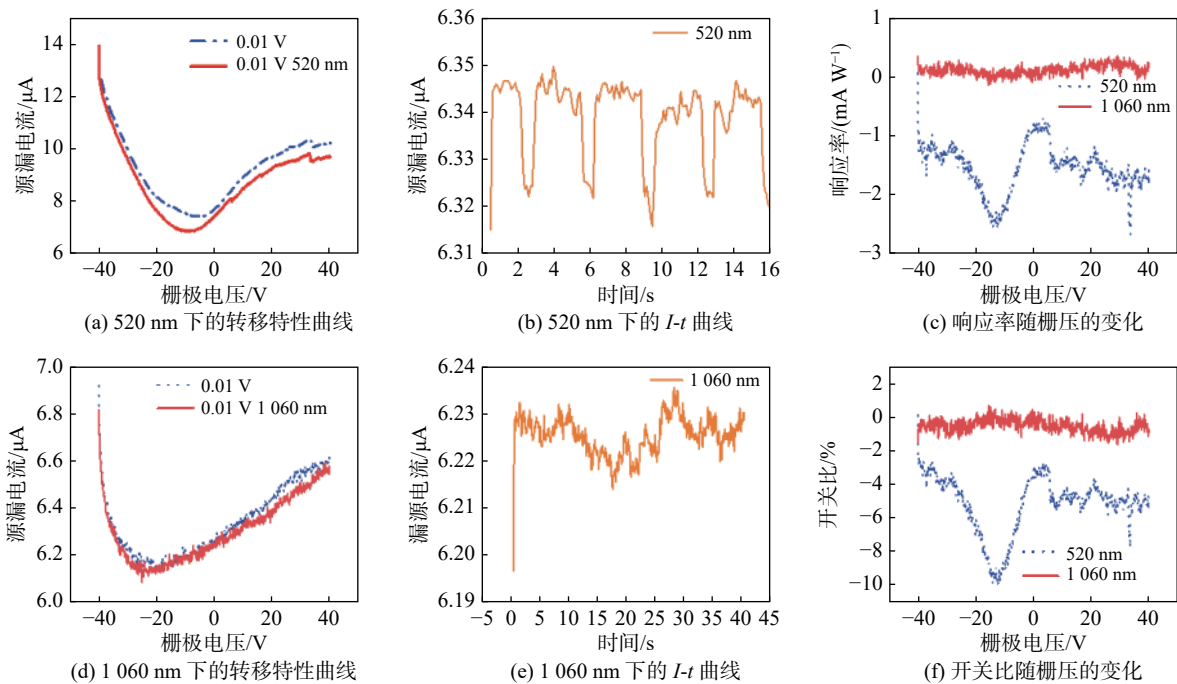


图 4 器件 2 在 520 nm 和 1060 nm 光辐照下的电学测试结果

Fig. 4 Electrical testing results of device 2 with 520 nm and 1060 nm illumination

与器件 1 相比较，器件 2 的光电响应机制完全不同，其差别应该源自金属光栅。当入射光照射在器件上，能量被金属吸收，金属温度升高，从而加热与之直接接触的绝缘层(25 nm Al_2O_3 材料)及其下方的石墨烯，增强绝缘层/石墨烯界面和石墨烯晶格对载流子的散射，导致光电流减小，这属于测辐射热效应。所以，金属光栅结构改变了器件的探测机理，由无金属光栅结构的光致栅控效应变为测辐射热效应，从而改变了器件的响应率。同时，由于石墨烯晶格对载流子的散射增强，器件的响应时间也达到 0.1 s 量级。由于金属增加了器件对入射光的吸收，因此相比器件 1，器件 2 的开关比增强了 1.5 倍。之前在太赫兹波段对器件的测试如图 5^[18]所示，其中图 5(a)所示为在 0.04 THz 照明， 0 V 栅极电压

和 0 V 源漏极偏置电压下，响应电流随时间的变化；图 5(b)~(d)所示分别为 0.12 THz ， 0.3 THz 和 0.6 THz 光照下，响应率随栅极电压的变化；图 5(e)~(h)所示分别为 0.04 THz ， 0.12 THz ， 0.3 THz 和 0.6 THz 光照下，器件的归一化开/关比(归一化为功率密度)随栅极电压的变化。有金属光栅结构的器件(Sample 4)在 0.6 THz 时，最大响应率可超过 400 mA/W ，最小噪声等效功率约为 $700 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。无金属光栅结构的两个器件(Sample 1、Sample 3)分别只在 0.12 THz 与 0.3 THz 下有响应，在 0.6 THz 下无响应。在太赫兹频率中，入射太赫兹波会在石墨烯中激发等离激元，并且金属光栅与石墨烯等离激元的相互作用使得等离激元的吸收率和带宽增加，产生等离激元自整流和等离激元辅助的光热电效应，并

由此产生光电响应。因此, 本研究设计的器件可以在太赫兹和近红外/可见光波段中, 依靠不同的光电响应机制, 产生超宽带的光电响应。值得指出的是, 如果将金属光栅做成非对称设计, 并

且增加金属纳米结构, 不仅可以增强太赫兹波段的光热响应, 也可以在近红外/可见光波段中增强器件对可见/近红外的量子效率, 并且利用产生的光热电效应产生电信号。

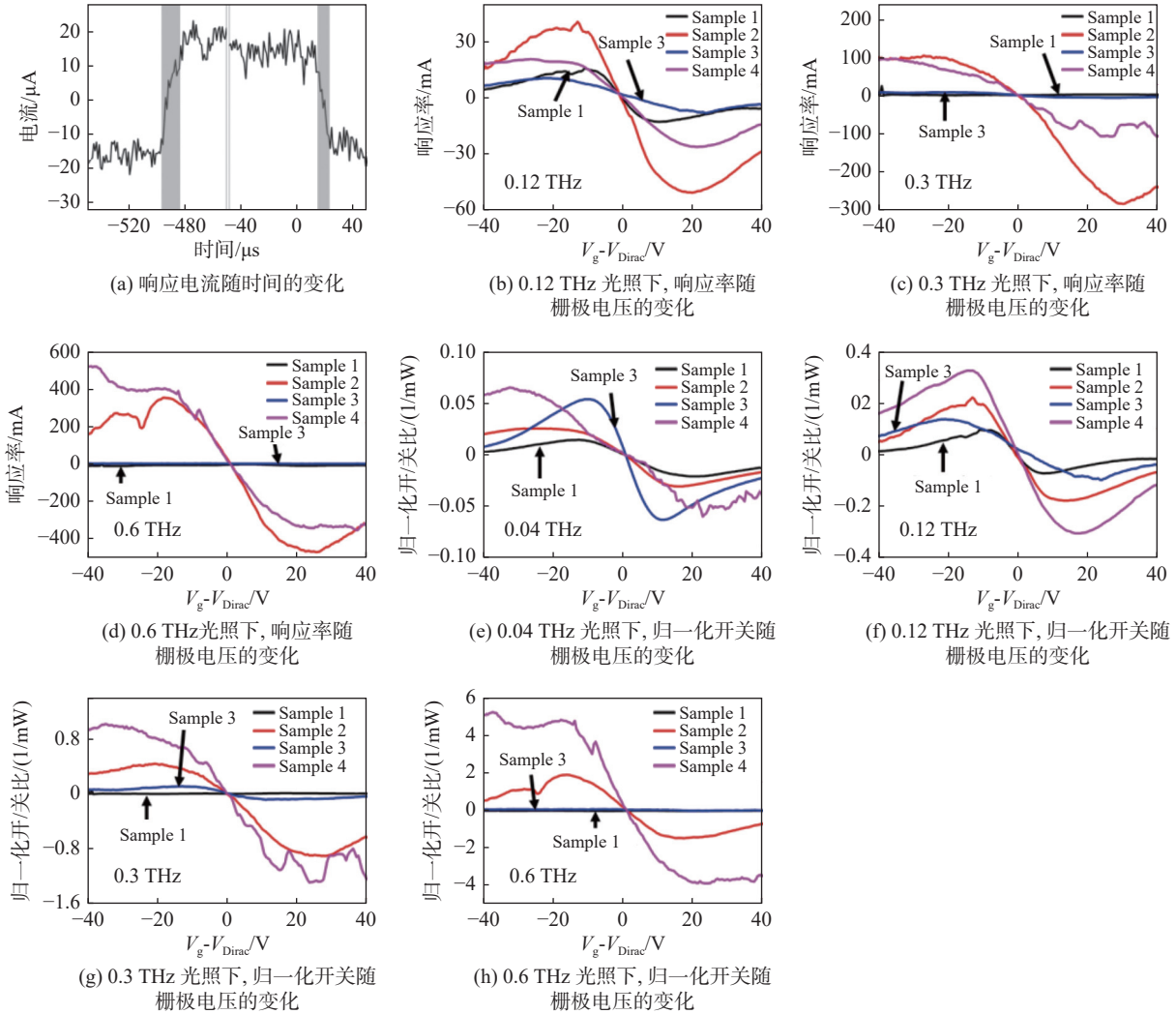


图 5 器件 1 (Sample 1) 与器件 2 (Sample 4) 在太赫兹波段的性能表征^[18]

Fig. 5 Performance characterization of device 1 (Sample 1) and device 2 (Sample 4) in terahertz band

4 结论

本文成功制备了中阻硅/二氧化硅/石墨烯微米条/三氧化二铝与中阻硅/二氧化硅/石墨烯微米条/三氧化二铝/金属微米条结构 2 个器件, 制备过程中涉及了湿法转移石墨烯、氧离子刻蚀、原子层沉积等半导体工艺。使用石墨烯为基础材料可在宽频范围内发生响应, 通过银胶背栅调控器件的费米能级, 提高器件的响应。无金属微米条

结构的器件在三氧化二铝中存在缺陷, 发生光致栅控效应, 在可见光范围内产生 1.1 mA/W 的响应率, 而且在红外波段也有 2.3 mA/W 的响应率。同样的, 对于可见与近红外光, 有金属微米条结构的器件也发生响应, 而且响应率达到 2.5 mA/W, 比无金属微米条的探测器提高约 2.3 倍。

参考文献:

[1] HASAN T, SUN Z P, WANG F Q, et al. Nanotube-

- polymer composites for ultrafast photonics[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(38/39): 3874 – 3899.
- [2] SUN Z P, POPA D, HASAN T, et al. A stable, wideband tunable, near transform- limited, graphene-mode-locked, ultrafast laser[J]. *Nano Research*, 2010, 3(9): 653 – 660.
- [3] SUN Z P, HASAN T, TORRISI F, et al. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 803 – 810.
- [4] POPA D, SUN Z, HASAN T, et al. Graphene Q-switched, tunable fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(7): 073106.
- [5] SUN Z, HASAN T, FERRARI A C. Ultrafast lasers mode-locked by nanotubes and graphene[J]. *Physica E:Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2012, 44(6): 1082 – 1091.
- [6] FANG J Z, ZHOU Z Q, XIAO M Q, et al. Recent advances in low - dimensional semiconductor nanomaterials and their applications in high - performance photodetectors[J]. *InfoMat*, 2020, 2(2): 291 – 317.
- [7] LONG M S, WANG P, FANG H H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1803807.
- [8] WAXMAN A M, GOVE A N, FAY D A, et al. Color night vision: opponent processing in the fusion of visible and IR imagery[J]. *Neural Networks*, 1997, 10(1): 1 – 6.
- [9] GEIS M W, SPECTOR S J, GREIN M E, et al. CMOS-compatible all-Si high-speed waveguide photodiodes with high responsivity in near-infrared communication band[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(3): 152 – 154.
- [10] HEIN M A. Ultra-wideband radar sensors for biomedical diagnostics and imaging[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Syracuse: IEEE, 2012: 486 – 490.
- [11] YUAN S F, YU R W, MA C, et al. Room temperature graphene mid-infrared bolometer with a broad operational wavelength range[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(5): 1206 – 1215.
- [12] BAI P, LI X H, YANG N, et al. Broadband and photovoltaic THz/IR response in the GaAs-based ratchet photodetector[J]. *Science Advances*, 2022, 8(21): eabn2031.
- [13] CHEN Y F, MA W L, TAN C W, et al. Broadband Bi₂O₂Se photodetectors from infrared to terahertz[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(14): 2009554.
- [14] FREITAG M, LOW T, XIA F N, et al. Photoconductivity of biased graphene[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(1): 53 – 59.
- [15] XU M J, XU T F, YU A Q, et al. Optoelectronic synapses based on photo - induced doping in MoS₂/h - BN field - effect transistors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(20): 2100937.
- [16] TIELROOIJ K J, MASSICOTTE M, PIATKOWSKI L, et al. Hot-carrier photocurrent effects at graphene – metal interfaces[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015, 27(16): 164207.
- [17] SONG J C W, LEVITOV L S. Energy flows in graphene: hot carrier dynamics and cooling[J]. *Journal of Physics:Condensed Matter*, 2015, 27(16): 164201.
- [18] YU A Q, YANG Z Y, CAI M, et al. Graphene plasmons-enhanced terahertz response assisted by metallic gratings[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(21): 4737 – 4745.

(编辑: 李晓莉)