

## 激光与光电子学进展

## 石墨烯 MIS 结宽光谱光电特性的研究

李蓓<sup>1</sup>, 蔡长龙<sup>1\*</sup>, 梁海锋<sup>2</sup>, 范飞虎<sup>1</sup>, 屠奔<sup>2</sup><sup>1</sup>西安工业大学兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021

**摘要** Ge基光电探测器具有独特的通信带宽响应特性和良好的CMOS工艺兼容性,在光电探测方面具有广阔的应用前景。但目前商用探测器的响应波段普遍局限在某一波段,难以满足多波段融合、小型化的探测需求。因此,通过在多层石墨烯和N型Ge之间引入薄的SiO<sub>2</sub>界面层,制备了基于石墨烯金属-绝缘层-半导体(MIS)结的光电探测器,分析了SiO<sub>2</sub>的厚度以及石墨烯层数对MIS结器件性能的影响,并测试了器件的光谱响应范围、电流-电压曲线、响应度、开关比等光电特性。结果表明,该器件在254~2200 nm波段内均有响应,在980 nm处的响应度和开关比达到峰值,分别为78.36 mA/W和1.74×10<sup>3</sup>,上升时间和下降时间分别为1 ms和3 ms。

**关键词** 探测器; 石墨烯; Ge基光电探测器; 宽波段; 红外光电探测器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1904001

## Study on Broad Spectrum Photoelectric Properties of Graphene MIS Junction

Li Bei<sup>1</sup>, Cai Changlong<sup>1\*</sup>, Liang Haifeng<sup>2</sup>, Fan Feihu<sup>1</sup>, Tu Ben<sup>2</sup><sup>1</sup>Ordnance Science and Technology College, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;<sup>2</sup>Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Film Technology and Optical Test, School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

**Abstract** The Ge-based photodetector has a broad application prospect in light detection with its unique communication bandwidth response characteristics and good compatibility with CMOS technology. However, the response band of current commercial detectors is generally limited to a specific band, which is not easy to meet the detection requirements of multiband fusion and miniaturization. Therefore, in this paper, a graphene metal-insulator-semiconductor (MIS) junction-based photodetector is fabricated by introducing a thin SiO<sub>2</sub> interface layer between multilayer graphene and N-type Ge. The effect of SiO<sub>2</sub> with different thicknesses and graphene layers in the MIS junction device is investigated. The influence of the number of layers on performance of the MIS junction device is also tested. The spectral response range, current-voltage curve, responsivity, on-off ratio, and other optoelectronic properties of the device are tested. The results show that the device has a response in the wavelength range of 254~2200 nm, and the responsivity and the on-off ratio peaked at 980 nm, which are 73.86 mA/W and 1.74 × 10<sup>3</sup>, respectively. The rise and fall times are 1 ms and 3 ms, respectively.

**Key words** detectors; graphene; Ge-based photodetector; broadband; infrared photoelectric detector

## 1 引言

红外光电探测器广泛应用于军事监视、目标检测、目标跟踪等领域<sup>[1]</sup>。但目前商用光电探测器的响应波段一般局限在某一波段,很难满足多波段融合、小型化的探测需求<sup>[2]</sup>。光电探测器的核心问题是解决高响应度、宽光谱的光电响应特性,目前具有成熟工艺的红外

光电探测器主要基于Si、Ge、PbS、InSb以及晶体InGaAs/HgCdTe或其他无机半导体材料制作<sup>[3]</sup>。Ge作为一种重要的IV族半导体材料,其光谱吸收范围在近红外波段(400~1700 nm)且具有吸收率高、成本低、与CMOS工艺的兼容性好等特点,在光电探测方面具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。

近年来,二维材料在电子和光电子应用方面也表

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2022-01-04; 录用日期: 2022-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11975177)、陕西省重点研发计划(2020GY-045)

通信作者: \*879867254@qq.com

现出优异的性能。如石墨烯具有电子迁移率高、导热性好、电导率高、与金属接触电阻低的电学特性,且石墨烯是零带隙结构,响应光谱较宽,波长较长的光子入射到石墨烯中也会产生载流子,这一点是其他材料无法比拟的<sup>[5]</sup>。但单层石墨烯作为光吸收层时总体光吸收率低、载流子寿命短,导致纯石墨烯光电探测器的响应度不高,在高灵敏度探测的应用中受到限制<sup>[6]</sup>。此外,石墨烯具有类金属特性,形成器件后存在明显的暗电流。因此,增强石墨烯光电探测器的光电响应研究主要集中在提高石墨烯光吸收率和减小器件暗电流两方面<sup>[7]</sup>。

基于石墨烯异质结器件的研究中,姚杰等<sup>[8]</sup>制备了石墨烯-MoS<sub>2</sub>垂直异质结的光电探测器。Periyanaounder等<sup>[9]</sup>制备了基于石墨烯-Si肖特基结的自供电光电探测器,该器件在零偏压下具有优越的光电子收集和载流子传输性能,但光谱响应范围较窄。Zeng等<sup>[11]</sup>制备了基于单层石墨烯-Ge肖特基结的近红外光电探测器,该器件在近红外波段表现出了良好的光电特性。Kim等<sup>[10]</sup>制备了带有Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>界面氧化层的石墨烯光电探测器,通过引入薄的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>减小器件的暗电流,使器件性能得到了显著提高。基于上述研究,本文在多层石墨烯和N型Ge之间引入薄的SiO<sub>2</sub>界面

层,制备了基于石墨烯MIS结的光电探测器。通过调整SiO<sub>2</sub>氧化层的厚度和石墨烯的层数优化器件结构,测试并分析了器件的光电特性,包括光谱响应范围、电流-电压(I-V)特性、响应度、开关比、响应时间等。结果表明,该器件在254~2200 nm波长(紫外-可见-近红外短波-近红外长波)范围内均有响应,在980 nm处的响应度和开关比达到峰值,分别为78.36 mA/W和 $1.74 \times 10^3$ ,上升时间和下降时间分别为1 ms和3 ms。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验过程

器件的制备过程包括介质层的制备、石墨烯的制备、石墨烯的转移和电极的制备,如图1所示。基片采用的是电阻率为 $0.2 \sim 0.8 \Omega \cdot \text{cm}$ 、厚度为500  $\mu\text{m}$ 的国产商用N型Ge片。界面氧化层为采用热蒸发方法制备的不同厚度(20、40、100 nm)SiO<sub>2</sub>。以25  $\mu\text{m}$ 厚的铜箔作为催化底物,采用化学气相沉积法在1030  $^{\circ}\text{C}$ 温度下的CH<sub>4</sub>(20 sccm)和H<sub>2</sub>(8 sccm)混合气体中生长了单层石墨烯薄膜。其中,1 sccm=1 mL/min。由于石墨烯生长在铜基底上,为了进一步表征器件性能,采用湿法转移方式将石墨烯转移到带有介质层的Ge基片上。

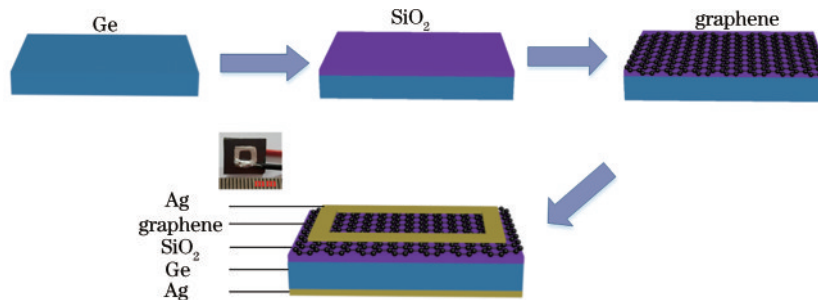


图1 器件的制备过程

Fig. 1 Fabrication process of the device

器件的具体制备过程:首先,在带有石墨烯的铜箔上涂一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)溶液,并利用匀胶台使PMMA均匀覆盖在石墨烯表面;然后,将覆盖PMMA的石墨烯铜箔置于温度为160  $^{\circ}\text{C}$ 的热板上加热10 min,使PMMA干燥,将带有石墨烯的铜箔放入配置好的FeCl<sub>3</sub>溶液中直至铜箔被腐蚀干净;随后,用清洗干净的Si衬底将带有PMMA的石墨烯从腐蚀液中取出,放入干净的去离子水中反复漂洗,重复多次后将其转移至带有介质层的Ge基上;将转移后的石墨烯在室温下自然晾干,置于100  $^{\circ}\text{C}$ 热板上烘烤30 min;最后,将烘烤后的石墨烯浸泡在丙酮溶液中进行水浴(温度为50  $^{\circ}\text{C}$ 、时间为30 min)以去除PMMA,再用乙醇清洗丙酮,用去离子水清洗乙醇,多次重复该过程以转移多层石墨烯<sup>[11]</sup>。将转移后的多层石墨烯放入真空退火炉,抽真空使气压在10 Pa以下,打开加热设备进行退火处理(升温至600  $^{\circ}\text{C}$ 、保温30 min),以减小石墨烯表

面化学物质的残余,改善石墨烯的质量,减小转移石墨烯过程中杂质对器件性能的影响。退火工艺可以使石墨烯与SiO<sub>2</sub>衬底密切接触,减小表面态对器件的影响。退火处理后分别采用丝网印刷和旋涂导电银浆方式制备顶电极和底电极。

### 2.2 测试方法

首先,对制备的单层石墨烯和多层石墨烯样品进行拉曼光谱测试。然后,采用丝网印刷工艺在样品正反面使用导电银浆制备顶电极和底电极。其中,石墨烯为光敏面,尺寸约为1 cm $\times$ 1 cm,可增强材料对入射光的吸收。分别在紫外、可见、近红外短波、近红外长波范围内对器件的光电特性进行测试,测试原理如图2所示。测试使用的光源主要有三种,即波长分别为254 nm和365 nm的紫外灯光源、波长分别为650、808、980、1310 nm的激光器以及中心波长为2500 nm的红外宽光谱光源。测试时使入射光通过固定频率为

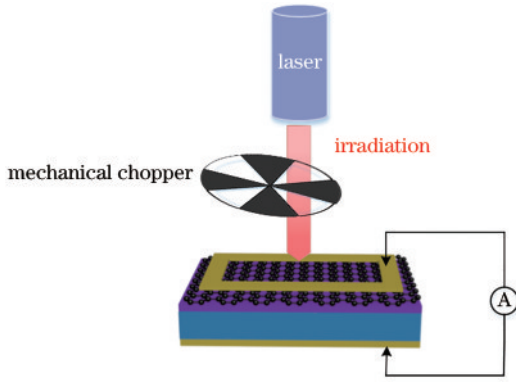


图 2 器件的测试原理

Fig. 2 Test principle of the device

0.05 Hz 的光学斩波器,对光信号进行调制,同时使用 Keithley 2450 数字源表结合 Keithley KickStart 软件测试器件在紫外-可见-近红外短波-近红外长波光谱内有光和无光条件下的电流瞬态变化。为了测试器件在短波红外固定波段的响应,测试时在 2500 nm 的红外宽光谱光源和器件之间分别添加了 1200、1650、2200 nm 的滤光片,以测试器件在 1200、1650、2200 nm 的光响应。

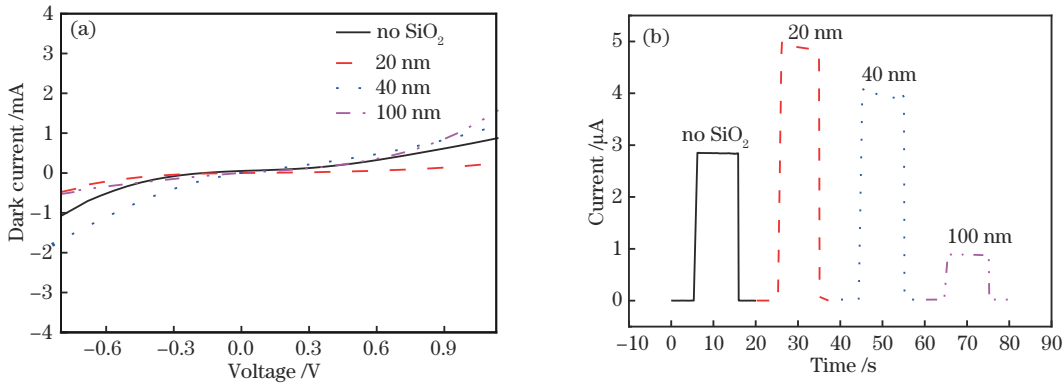


图 3 介质层厚度对器件性能的影响。(a) 器件的暗电流曲线;(b) 器件的光谱响应曲线

Fig. 3 Influence of dielectric layer thickness on device performance. (a) Dark current curve of the device; (b) spectral response curve of the device

Kim 等<sup>[13]</sup>用 MIS 结构测试了石墨烯的费米能级,可表示为

$$E_F(n_B) = hV_F \sqrt{n_B}, \quad (2)$$

$$n_B \propto f(C_{SiO_2} \times V_g), \quad (3)$$

式中: $h=1.15 \times 10^8$ ;  $V_F$  为石墨烯载流子的移动速度; $f$  为介质电容和偏置电压的乘积; $E_F$  为石墨烯的费米能级; $n_B$  为载流子浓度; $C_{SiO_2}$  为介质电容; $V_g$  为偏置电压; $\propto$  为正比符号。可以发现,石墨烯的费米能级受载流子浓度的影响,载流子浓度与介质电容和偏置电压成正比,即除了偏置电压外,改变介质的厚度也能调整石墨烯的费米能级,进而改变器件内部的内建电场,有效分离光生载流子,提高器件的性能。

### 3 测试结果与分析

#### 3.1 不同 SiO<sub>2</sub> 厚度对器件性能的影响

在单层石墨烯和 N 型 Ge 之间制备了厚度分别为 20、40、100 nm 的 SiO<sub>2</sub> 界面层,测试得到器件的暗电流曲线、光谱响应如图 3 所示。可以发现,器件的暗电流随着界面氧化层厚度的增加不断降低,且器件在 20 nm 处的暗电流小于无 SiO<sub>2</sub> 介质层的器件。原因是当载流子要越过界面氧化层进行传输时,会以隧穿形式或在空间电荷作用下以受限的电流密度通过界面氧化层。MIS 异质结的暗电流<sup>[12]</sup>可表示为

$$I = AA^* \exp(-\sqrt{\chi_{ox}} \delta) \exp\left(\frac{-\Phi_B}{KT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

式中: $A$  为器件的有效面积; $A^*$  为与所用材料有关的理查德森常数; $\chi_{ox}$  为界面氧化层的平均隧穿势垒高度; $\delta$  为界面氧化层厚度; $T$  为绝对温度; $\Phi_B$  为带有界面氧化层的肖特势垒高度; $q$  为电荷量; $V$  为电压; $K$  为玻尔兹曼常数。可以发现,如果界面氧化层过厚,光生载流子将不能穿过界面氧化层,导致光电流降低,进而使器件的开关比和响应度降低。

#### 3.2 不同石墨烯层数对器件性能的影响

为了研究石墨烯层数对基于石墨烯 MIS 结器件性能的影响,在 20 nm 的 SiO<sub>2</sub> 氧化层上转移了不同层数的石墨烯。利用拉曼光谱对转移到带有界面氧化层 SiO<sub>2</sub> 的单层石墨烯和多层石墨烯微观结构性能进行了表征,结果如图 4 所示。其中:1350 nm 的 D 峰为石墨烯的振动峰,可反映石墨烯的缺陷;1580 nm 的 G 峰可反映石墨烯的结晶程度;2700 nm 的 2D 峰可反映石墨烯的层数。可以发现:D 峰与 G 峰的强度比非常小,表明石墨烯的结晶程度好、缺陷少;2D 峰与 G 峰的强度比大于 2,表明石墨烯是单层的;室温下 2D 峰和 G 峰的峰值随石墨烯层数的增加而增大,且 2D 峰的宽度也逐渐变宽。已有研究表明,2D 和 G 峰的强度比与石墨



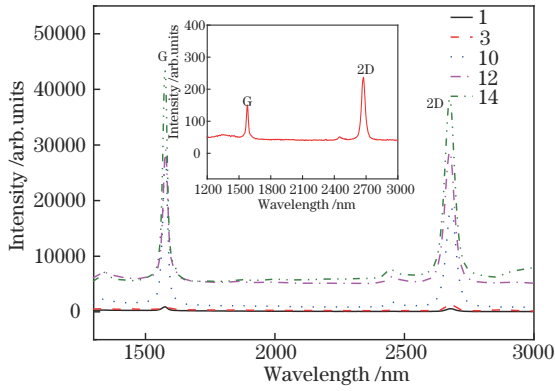


图 4 不同层数石墨烯的拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectra of graphene with different layers

烯的载流子浓度正相关<sup>[14]</sup>。因此,可通过改变石墨烯的层数调整石墨烯的载流子浓度,进而改变石墨烯的

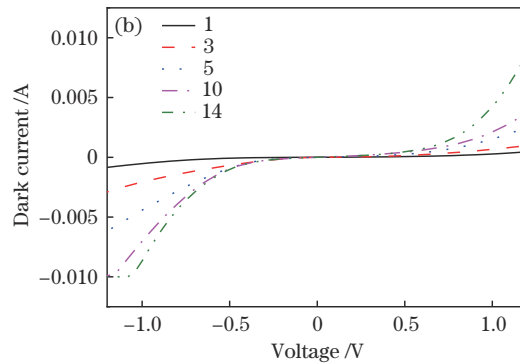
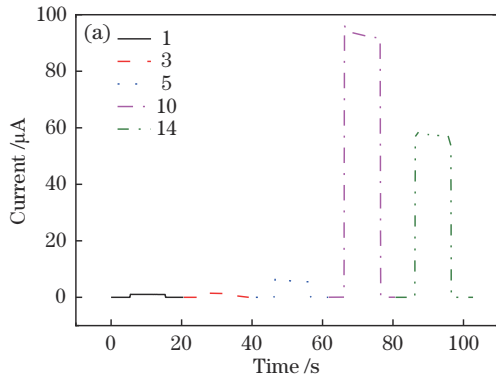


图 5 石墨烯层数对器件性能的影响。(a)零偏压下石墨烯的光谱响应;(b)石墨烯的暗电流

Fig. 5 Influence of the number of graphene layers on the device performance. (a) Spectral response of the graphene under zero bias; (b) dark current of the graphene

### 3.3 器件的光电特性

在 10 层石墨烯和 N 型 Ge 之间制备了厚度为 20 nm 的 SiO<sub>2</sub> 界面氧化层器件,测试得到器件在无光照和 254 nm (光功率密度为 1.12 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 6.62 cm<sup>2</sup>)、356 nm (光功率密度为 1.50 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 6.62 cm<sup>2</sup>)、650 nm (光功率密度为 68.34 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 3.14 mm<sup>2</sup>)、808 nm (光功率密度为 500.00 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 3.14 mm<sup>2</sup>)、980 nm (光功率密度为 66.43 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 7.00 mm<sup>2</sup>)、1200 nm (光功率密度为 2.13 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 9.62 mm<sup>2</sup>)、1310 nm (光功率密度为 71.02 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 3.14 mm<sup>2</sup>)、1650 nm (光功率密度为 1.40 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 9.62 cm<sup>2</sup>) 和 2200 nm (光功率密度为 1.09 mW/cm<sup>2</sup>、光斑面积为 9.62 cm<sup>2</sup>) 激光照射下的 I-V 曲线如图 6 所示。可以发现,器件在无光照和有光照时的 I-V 曲线都表现出明显的整流特性。

半导体 Ge 材料受到自身禁带宽度的限制,导致传统 Ge 基光电探测器件的光谱响应范围一般为 400~1700 nm,而基于石墨烯-Ge 异质结的光电探测器可以

费米能级。Giovannetti 等<sup>[15]</sup>的研究发现,每转移 0.01 个电子,石墨烯的费米能级会变化 0.47 eV。

对厚度为 20 nm 的氧化层转移了不同层数的石墨烯,并对器件进行测试。图 5(a)为不同层数石墨烯在零偏压下的光谱响应。可以发现,器件产生的光电流随石墨烯层数的增加而增加。原因是石墨烯层数的增加会导致石墨烯带隙发生变化<sup>[16]</sup>,外电路耦合加剧。但当石墨烯的层数大于 10 层后,器件产生的光电流逐渐减小,原因可能是石墨烯层数为 14 层时石墨烯不再是二维结构。图 5(b)为不同石墨烯层数在无光照下的 I-V 曲线。可以发现:在小偏压下且石墨烯层数小于 10 层时,增加石墨烯层数对于器件的暗电流影响微弱;当石墨烯层数为 14 层时添加适当偏压,其内建电场的增强会明显增加器件的暗电流。

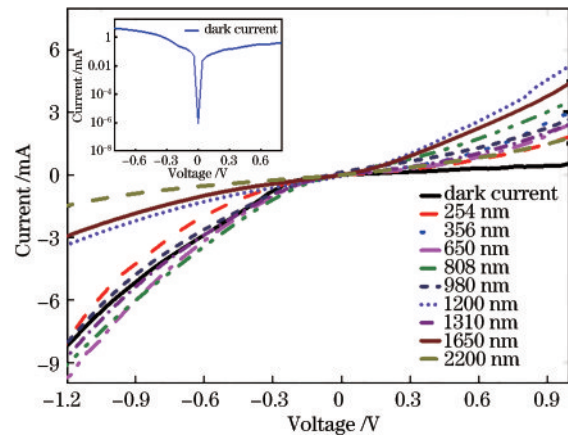


图 6 器件在不同波长照射下的 I-V 曲线  
Fig. 6 I-V curves of the device under different wavelengths of light

实现紫外-可见-近红外短波-近红外长波整个光谱内的光探测,且器件在 980 nm 处的光电流 (90 μA) 为纯 N 型 Ge 光电流 (600 nA) 的 150 倍,如图 7 所示。其中,Gr 表示石墨烯。

响应度是衡量光电探测器件光电转换效率的物理

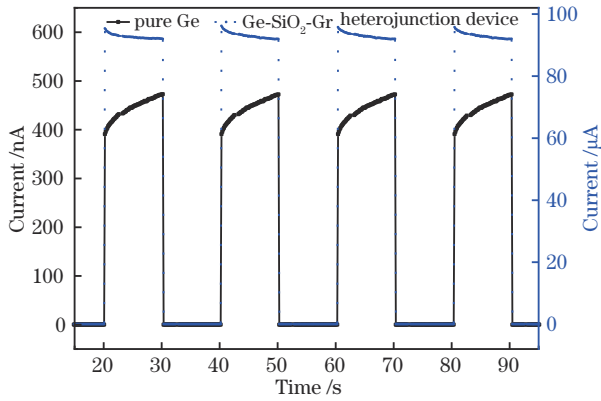


图 7 Ge 异质结与纯 N 型 Ge 的光谱响应曲线

Fig. 7 Spectral response curves of Ge heterojunction and pure N-type Ge

量,可描述光电探测器输出电信号与入射光功率的关系<sup>[17]</sup>。响应度的定义:波长为 $\lambda$ 的入射光照射在光敏面上时入射光子产生的光电流增益 $I_s$ 与入射到光敏面上光功率 $P$ 的比,可表示为

$$R_\lambda = \frac{I_s}{P} = \frac{I_l - I_d}{P}, \quad (4)$$

式中: $I_l$ 为光电流; $I_d$ 为暗电流。

采用卓立汉光 Zolix 公司生产的 DSR-F4 光谱测试系统测试零偏压下器件在紫外-可见-近红外波段的响应度,结果如图 8 所示。可以发现,器件在整个波段都有响应,且在 1000 nm 左右处响应度达到峰值。

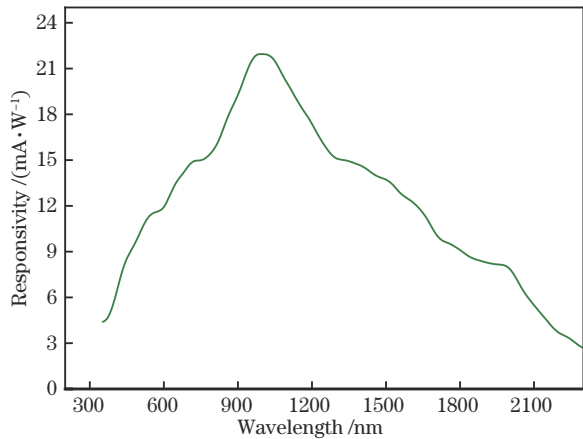


图 8 不同波长下器件的响应度

Fig. 8 Responsivity of the device at different wavelengths

为了探究偏置电压对器件性能的影响,测试了无光和 980 nm 激光照射下,偏置电压为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 V 下器件的瞬态响应,结果如图 9 所示。可以发现,器件的光电流和暗电流都随偏置电压的增加而增加,但光电流的增幅大于暗电流。原因是给石墨烯添加正偏置电压时,空间电荷区的电场减小,势垒降低,载流子更容易通过。

图 10 为器件在 980 nm 波长处不同偏压下的响应度曲线。可以发现,器件的响应度随偏压的升高逐渐

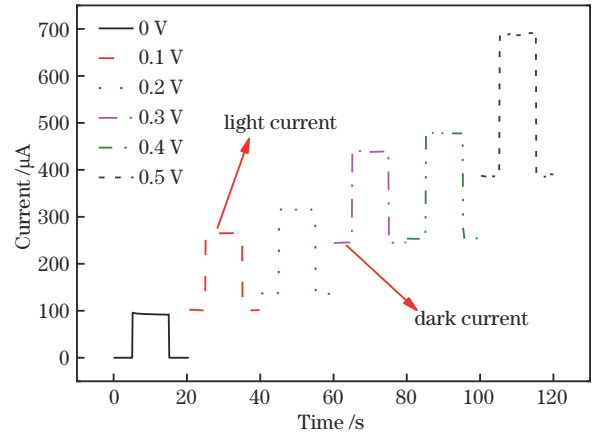


图 9 器件的光电流和暗电流随电压的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of device photocurrent and dark current with voltage

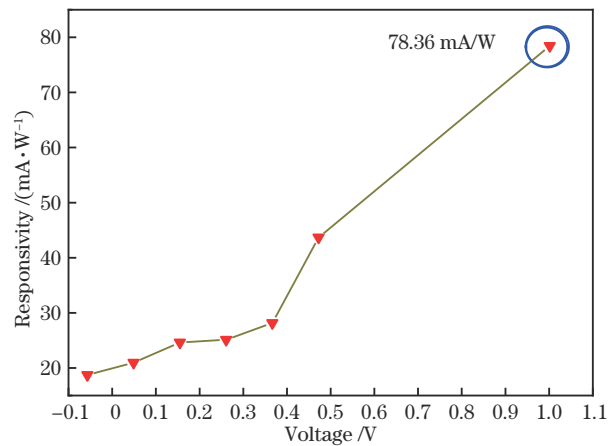


图 10 器件在不同偏压下的响应度

Fig. 10 Responsiveness of the device under different bias voltages

增加,当器件的偏压为 1 V 时,响应度达到 78.36 mA/W。原因是电场的增强会导致光生电子-空穴对的分离和漂移,避免了更多的复合,同时光电流和暗电流都会增强,但光电流的增幅大于暗电流。

光电探测器件的开关比能直观反映光电探测器对入射光的响应能力<sup>[17]</sup>,可表示为

$$R_{\text{on/off}} = I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}, \quad (5)$$

式中: $I_{\text{light}}$ 为有光照时的输出电流(响应电流); $I_{\text{dark}}$ 为无光照时的输出电流。图 11(a)为零偏压下器件在 808、980、1310 nm 处的归一化开关比。可以发现,在 980 nm 处器件的开关比最高,可达到  $1.74 \times 10^3$ 。图 11(b)为 808、980、1310 nm 波长激发下,器件添加正偏压时开关比的变化趋势。可以发现,随着偏压的增加,器件的开关比逐渐减小,且器件在 980 nm、0.5 V 偏压下的开关比为零偏压下的 1/1070。

为了对比器件在不同波长下的绝对开关比,计算了零偏压下 650 nm(入射光功率为 2.15 mW)、808 nm(入射光功率为 15.70 mW)、980 nm(入射光功率为

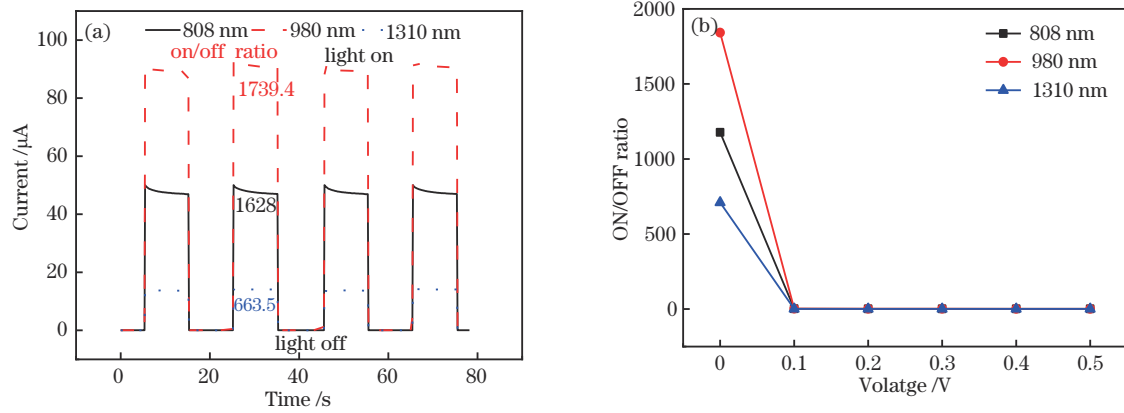


图 11 激发波长和偏压对器件开关比的影响。(a)激发波长对开关比的影响;(b)偏压对开关比的影响

Fig. 11 Influence of excitation wavelength and bias voltage on device on/off ratio. (a) Influence of excitation wavelength on switching ratio; (b) influence of bias voltage on switching ratio

6.70 mW)、1200 nm(入射光功率为 20.50 mW)、1310 nm(入射光功率为 2.23 mW)、1650 nm(入射光功率为 13.50 mW)、2200 nm(入射光功率为 10.50 mW)的归一化开关比(NPDR),结果如图 12 所示。可以发现,器件在 1310 nm 处的归一化探测率达到峰值,为  $0.297 \times 10^3$ 。归一化开关比<sup>[18]</sup>可表示为

$$N_{\text{PDR}} = \frac{I_{\text{light}}}{I_{\text{dark}} P_{\text{in}}}, \quad (6)$$

式中,  $P_{\text{in}}$  为入射光功率。

光电探测器的上升时间和下降时间是表示器件瞬态特性的参数。光电探测器从开始响应到达峰值响应 10% 至 90% 的响应时间为上升时间,从峰值响应 90% 回落至 10% 的回复时间为探测器的下降时间。器件的上升时间和下降时间如图 13 所示。可以发现,器件

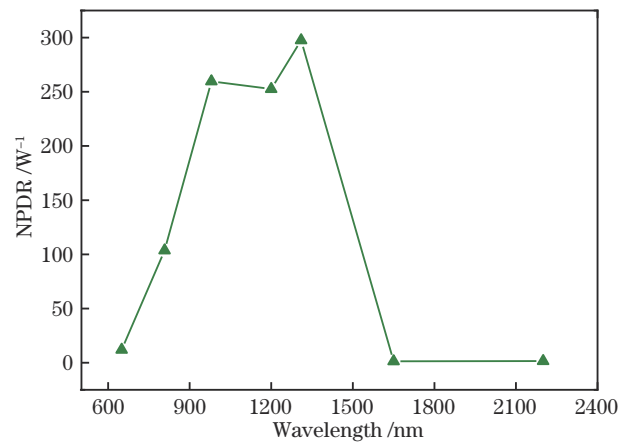


图 12 器件在不同波长下的 NPDR

Fig. 12 NPDR of the device at different wavelengths

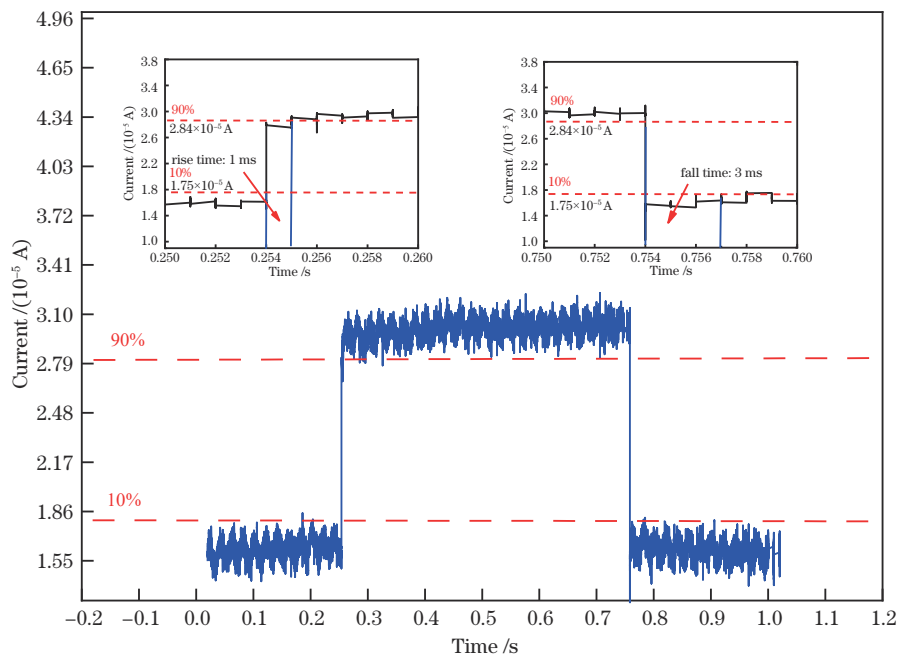


图 13 器件的响应时间

Fig. 13 Response time of the device

在 632 nm 波长激发、0.5 V 偏压下的响应时间为 ms 量级,上升时间为 1 ms,下降时间为 3 ms。

表 1 为实验制备的器件与其他石墨烯异质结的主要性能参数。可以发现,实验制备的器件具有与其他

器件相似的开关比以及更宽的光谱响应范围,且在近红外波段的响应度达到峰值,可满足商用光电探测器多波段融合、响应度高、小型化的探测需求。

表 1 不同器件的性能参数

Table 1 Performance parameters of different devices

Device structure	Spectral range /nm	$R / (A \cdot W^{-1})$	$I_{light} / I_{dark}$	Response time /ms	Ref.
Gr-SiO <sub>2</sub> -Ge	254-2200	0.078	$0.71 \times 10^4$	1-3	ours
Gr-MoS <sub>2</sub>	532	$0.15 \times 10^{-4}$	/	/	[8]
Gr-Si	532	0.51	$10^5$	$13 \times 10^{-3} - 13.5 \times 10^{-3}$	[9]
Gr-Ge	1400	0.05	$10^4$	$23 \times 10^{-3} - 108 \times 10^{-3}$	[1]
Gr-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ge	520-1625	1.2	$10^4$	/	[10]

### 3.4 器件的响应机理

通过分析 MIS 结构能带图和其暗电流的组成部分,解释了 MIS 结器件具有良好性能的原因。同时,结合器件的光电特性,提出了光电子的响应机制。石墨烯和 Ge 之间无 SiO<sub>2</sub> 界面氧化层时的能带图如图 14 所示。其中: $E_C$  为半导体 Ge 的导带; $E_V$  为半导体 Ge 的价带。可以发现,石墨烯与半导体 Ge 接触时,N 型 Ge 的功函数为 4.9 eV,石墨烯的功函数为 4.3 eV,功函数的差异会使电子从费米能级高的一侧流向费米能级低的一侧,即电子会从半导体 Ge 流向石墨烯,从而在半导体 Ge 表面形成一个带正电且不可移动的杂质离子组成的空间电荷区,该区存在一个由半导体 Ge 指向

石墨烯的电场,阻止半导体 Ge 中的电子流向石墨烯,此时界面半导体 Ge 的能带会发生弯曲,形成了一个高势能区,电子必须有越过该势垒的能量才能越过势垒流向石墨烯<sup>[18]</sup>。存在光照射时,半导体 Ge 和石墨烯吸收光,电子从价带被激发到导带,产生的空穴在内建电场的作用下扩散到石墨烯一侧,电子流在半导体 Ge 的一侧,连接外电路形成电流。该结构暗电流较大的原因<sup>[19]</sup>:1) 半导体中经热发射而越过势垒的载流子会形成电流;2) 载流子在石墨烯-半导体 Ge 界面处的复合会产生电流;3) 载流子在耗尽层中不断产生复合会产生电流;4) 载流子在半导体内准电中性区的注入和扩散会产生电流。

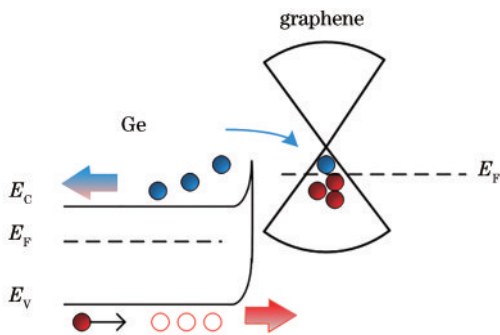


图 14 石墨烯和 Ge 之间无氧化层时器件的能带图

Fig. 14 Band diagram of the device without oxide layer between graphene and Ge

石墨烯-SiO<sub>2</sub>-Ge 结构光电探测器的光电响应机制。可以发现,SiO<sub>2</sub> 界面氧化层作为介质层使石墨烯和半导体 Ge 分离,从而增加势垒高度、减小暗电流。图 15(a) 为带有界面氧化层的器件未加偏压时的光电响应机制,具体表现在半导体吸收光后,电子从价带激发到导带产生光生载流子,载流子要么以隧穿形式通过界面氧化层,要么在空间电荷效应作用下以受限的电流密度通过界面氧化层,从而连接外电路形成电流。存在偏压时器件的光电响应机制如图 15(b) 所示。可以发现,界面氧化层在一定程度上会增加异质结在偏压方向的电压降,使势垒高度发生改变。此外,隧穿到外面的光生载流子,通过外电路耦合成倍的空穴,形成光栅效应,也会进一步提高器件的光电响应度和开关比。

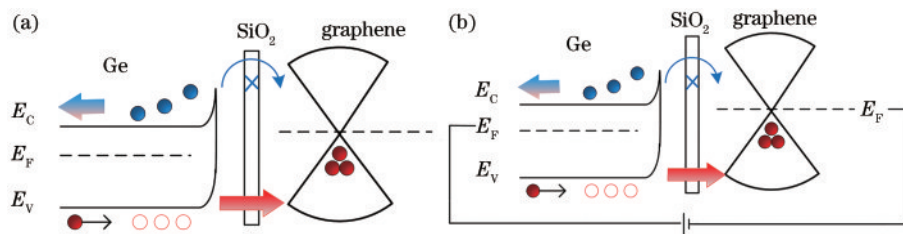


图 15 器件的光电响应机制。(a)隧穿;(b)界面耦合

Fig. 15 Photoelectric response mechanism of the device. (a) Tunneling; (b) interface coupling



## 4 结 论

在多层石墨烯和半导体 Ge 基之间引入薄的 SiO<sub>2</sub> 界面层,制备了基于 MIS 结的器件。通过改变 SiO<sub>2</sub> 的厚度、石墨烯的层数对器件结构进行改进,并测试了器件的光谱响应范围、I-V 特性以及响应度、开关比、响应时间等光电特性,结合光电特性探讨了光电探测器的工作机理。仿真结果表明:在石墨烯和半导体 Ge 基之间引入薄的界面氧化层可以有效增加其势垒高度、减小器件的暗电流,但当界面氧化层的厚度过大时,器件产生的光生载流子不能有效穿过界面氧化层,进而使器件的开关比和响应度降低;石墨烯的载流子浓度随石墨烯层数的增加而增加,进而引起石墨烯费米能级的改变,导致外电路耦合加剧,器件产生的光电流增加。测试结果表明,该器件在 254~2200 nm 波段内均有响应,在 980 nm 处的响应度和开关比达到峰值,分别为 78.36 mA/W、 $1.74 \times 10^3$ ,上升时间和下降时间分别为 1 ms 和 3 ms。

### 参 考 文 献

- [1] Zeng L H, Wang M Z, Hu H, et al. Monolayer graphene/germanium Schottky junction as high-performance self-driven infrared light photodetector[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(19): 9362-9366.
- [2] Liu W, Ye Z H. Development of infrared photoelectric detectors abroad[J]. Laser and Infrared, 2011, 41(4): 365-370.
- [3] Yang F, Cong H, Yu K, et al. Ultrathin broadband germanium-graphene hybrid photodetector with high performance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(15): 13422-13429.
- [4] Arakawa Y, Nakamura T, Urino Y, et al. Silicon photonics for next generation system integration platform [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(3): 72-77.
- [5] Fang X Y. Study on graphene/silicon Schottky junction photodetector[D]. Suzhou: Suzhou University, 2020: 15-17.
- [6] Yang Q. Optical response characteristics of graphene laminated structure and dual-band detection method[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Science, 2020: 25-20.
- [7] 金文最, 赵洪霞, 丁志群, 等. 石墨烯光电探测器的研究进展[J]. 宁波工程学院学报, 2019, 31(3): 1-7.  
Jin W Z, Zhao H X, Ding Z Q, et al. Research progress of graphene photodetectors[J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2019, 31(3): 1-7.
- [8] 姚杰, 缪鑫, 王帅, 等. 高响应度光电检测器件石墨烯-MoS<sub>2</sub>垂直异质结的制备[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 1516024.  
Yao J, Miao X, Wang S, et al. Preparation of graphene-MoS<sub>2</sub> vertical heterojunction for high-responsivity photodetectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(15): 1516024.
- [9] Periyagounder D, Gnanasekar P, Varadhan P, et al. High performance, self-powered photodetectors based on a graphene/silicon Schottky junction diode[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(35): 9545-9551.
- [10] Kim C, Yoo T J, Chang K E, et al. Highly responsive near-infrared photodetector with low dark current using graphene/germanium Schottky junction with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfacial layer[J]. Nanophotonics, 2021, 10(5): 1573-1579.
- [11] 蔡伟, 王聪, 方小红, 等. 化学气相沉积生长石墨烯薄膜转移方法及转移用支撑材料的研究进展[J]. 机械工程材料, 2015, 39(11): 7-13.  
Cai W, Wang C, Fang X H, et al. Progress in transfer technologies and related supporting materials for graphene film synthesized by chemical vapor deposition[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(11): 7-13.
- [12] Card H C, Rhoderick E H. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1971, 4(10): 1589-1601.
- [13] Kim S, Jo I, Dillen D C, et al. Direct measurement of the Fermi energy in graphene using a double-layer heterostructure[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(11): 116404.
- [14] Henni Y, Ojeda Collado H P, Nogajewski K, et al. Rhombohedral multilayer graphene: a magneto-Raman scattering study[J]. Nano Letters, 2016, 16(6): 3710-3716.
- [15] Giovannetti G, Khomyakov P A, Brocks G, et al. Doping graphene with metal contacts[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(2): 026803.
- [16] Wang W M, Shi Y C, Zakharov A A, et al. Flat-band electronic structure and interlayer spacing influence in rhombohedral four-layer graphene[J]. Nano Letters, 2018, 18(9): 5862-5866.
- [17] Xie C, Mak C, Tao X M, et al. Photodetectors based on two-dimensional layered materials beyond graphene[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(19): 1603886.
- [18] 甘桃. 石墨烯的光电特性及其探测器技术[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016: 22-60.  
Gan T. Photoelectric properties of graphene and its detector technology[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, 2016: 22-60.
- [19] 朱森. 石墨烯/硅异质结光电探测器性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015: 35-40.  
Zhu M. Study on the performance of graphene/silicon heterojunction photodetector[D]. Tsinghua University, 2015: 35-40.