

文章编号: 1005-5630(2025)01-0086-09

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202401030001

# 纳米光栅集成的双肖特基结石墨烯波长探测器

孟旭东<sup>1,2</sup>, 董毅博<sup>1</sup>, 陈希<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 光子芯片研究院, 上海 200093;  
2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 波长探测器是一种能够区分入射光波长的光电器件, 在安全检测、生物医学等领域得到广泛应用。波长探测器正朝着小尺寸、高性能、易集成的方向发展。研究了一种纳米光栅超表面与石墨烯-硅-石墨烯探测器集成的单像素的波长探测器。其原理是使用双光子飞秒激光打印技术在两个对称反向的石墨烯-硅肖特基结上集成不同的纳米柱超表面滤波片。在不同入射波长下, 两个纳米柱滤波片的透射率不同, 会导致两个肖特基结的光响应不同, 通过测试不同偏压下器件的光电流和暗电流就可以探测出入射波长。实验表明, 该波长探测器能够识别波长为 450~700 nm 的可见光。当偏压为 0.1 V 时, 该波长探测器的响应度为 0.19  $\mu\text{A}/\text{W}$ , 响应速度小于 1 ms, 分辨率约为 14.1 nm。该器件具有高集成度、单像素探测的优点, 为未来多功能探测器的高密度片上集成提供了新的思路和方法。

**关键词:** 波长探测器; 石墨烯; 肖特基结; 激光打印; 滤波片  
**中图分类号:** TN 247 **文献标志码:** A

## Nanograting-integrated dual Schottky junction graphene wavelength detector

MENG Xudong<sup>1,2</sup>, DONG Yibo<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>

(1. Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Wavelength detectors are optoelectronic devices distinguishing the wavelength of incident light and have been used for applications including safety detection and biomedicine. Nowadays, wavelength detectors are developed to realize small size, high performance, and feasible integration. In this paper, a single-pixel wavelength detector was fabricated based on an integration of a graphene-silicon-graphene detector on a nanograting metasurface, in which two nanopillar metasurface filters were printed on symmetrically reversed graphene-silicon Schottky junctions using two-photon femtosecond laser printing technology. The transmittance of the two nanopillar filters was

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 上海市启明星扬帆专项(23YF1429500); 上海市集成电路领域定向项目(21DZ1100500)

第一作者: 孟旭东(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光微纳加工。E-mail: 213330582@st.usst.edu.cn

通信作者: 陈希(1983—), 男, 教授, 研究方向为智能光子器件、激光加工、全光学习、超级电容。E-mail: xichen@usst.edu.cn

tuned under different incident wavelengths, resulting in different optical responses of the Schottky junctions. The incident wavelength could be detected by measuring the photocurrent and dark current of the device under different bias voltages. The results demonstrated that the wavelength detector could detect visible light with wavelengths rang of 450 nm to 700 nm, with a responsivity of  $0.19 \mu\text{A/W}$  at a bias voltage of 0.1 V and a response speed of less than 1 ms, and the resolution was about 14.1 nm. The device exhibits the advantages of high integration and single-pixel detection, providing an innovative pathway toward high-density on-chip integration of multifunctional detectors.

**Keywords:** wavelength detector; graphene; Schottky junction; laser printing; filter

## 引 言

随着 5G 技术的推广与应用, 机器视觉、虚拟现实(virtual reality, VR)、光芯片等领域迅猛发展, 它们对各种光电子器件的需求量越来越大, 性能要求也越来越高。波长探测器是一种能够区分波长的光探测器件<sup>[1]</sup>。作为图像传感技术的研究重点, 它受到了广泛关注, 并在安全检测<sup>[2]</sup>、生物医学<sup>[3]</sup>、光学成像<sup>[4]</sup>、光通信<sup>[5]</sup>和光谱学<sup>[6]</sup>等诸多领域得到广泛应用。目前, 随着消费电子产品的快速发展, 各种光电器件都在朝着小型化、片上集成的方向发展。因此, 实现小型化、片上集成的波长探测器已成为该领域的重要发展方向之一<sup>[7]</sup>。

波长探测器的工作原理通常是使用特定的光学元件(如光栅、光子晶体或干涉仪)来分散光, 使不同波长的光出现在不同的空间位置, 然后再用光电探测器测量出不同波长光的光强, 并生成波长谱图或光谱, 以此获取入射光的信息<sup>[8-9]</sup>。根据是否使用滤波片, 可将波长探测器分为滤波片辅助型波长探测器<sup>[10]</sup>和无滤波片波长探测器<sup>[11]</sup>。传统的滤波片辅助型波长探测器是由多个滤波片和光电探测器组成。由于这种波长探测器用到了滤波片及至少 3 个光电探测器, 所以其体积相对较大, 无法获得较高的集成度。无滤波片波长探测器主要运用电子传输相关的电荷收集变窄(charge collection narrowing, CCN)原理<sup>[12-13]</sup>和光吸收相关的比尔-朗伯定律<sup>[14]</sup>来实现波长选择性探测。但是现有的无滤波片波长探测器的材料制备条件复杂苛刻, 不能满足片上集成的需求, 且成本较高。以上这些问题极大地限

制了波长探测器的小型化和片上集成。

近年来, 有关超表面的研究也相当火热。超表面是一种平面的光学微结构<sup>[15]</sup>, 具有强大的光场调控能力, 可对入射光的相位、振幅和频率等多种参数进行调控<sup>[16]</sup>。纳米柱相位光栅就是一种超表面结构, 它可以实现滤波片的功能, 已被用于彩色显示<sup>[17-18]</sup>、全息<sup>[18]</sup>等领域。超表面的体积小、功能强大, 非常适合于集成到光电子器件上, 赋予传统光电子器件新的性能<sup>[19-22]</sup>。因此, 在探测器上集成超表面结构有助于拓展传统探测器的功能, 实现其对不同入射波长的响应, 推动波长探测器向小型化、片上集成的方向发展。

在本研究中, 设计了具有两个对称反向的石墨烯-硅肖特基结的光电探测器, 利用激光纳米三维(3D)打印技术在探测器上直接集成纳米柱超表面滤波片, 实现了具有波长探测功能的单像素探测器。基于双光子聚合机理的激光 3D 打印技术, 利用材料的三阶非线性效应, 可以实现分辨率为纳米级的三维结构加工<sup>[23]</sup>。创新性地利用该技术, 将具有滤波功能的纳米柱结构直接打印在探测器光响应区域上方, 可实现片上集成。与传统的滤波片辅助型波长探测器<sup>[10]</sup>不同, 在该探测器中, 利用双肖特基结在正负偏压下光吸收区域不同的特点, 通过获取探测器正负偏压下的光电流和暗电流即可得到入射光波长, 从而无需使用多个探测器, 可进一步缩小器件的尺寸, 实现更高的集成。使用该探测器可实现对可见光波段的红(638 nm)、绿(520 nm)、蓝(450 nm)三色光的探测。测试结果显示: 偏压仅为 0.1 V 时, 探测器的响应度为  $0.19 \mu\text{A/W}$ , 响应时间小于 1 ms, 分辨率约为 14.1 nm。

## 1 器件制备

### 1.1 石墨烯-硅-石墨烯肖特基结探测器的制备

探测器的制备流程如下：首先，选用衬底为轻掺杂的 n 型硅衬底(电阻率为 1~10 Ω·cm)，其表面有 100 nm 厚的 SiO<sub>2</sub> 层，通过光刻和反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)工艺，在衬底表面刻蚀 SiO<sub>2</sub> 层形成一个 35 μm×63 μm 大小的硅窗口，再通过湿法转移工艺将单层石墨烯转移至衬底表面。然后，利用光刻、等离子体刻蚀工艺将石墨烯图形化，使其形成两个矩形区域，并均与硅衬底接触，从而得到两个肖特基结，分别为石墨烯-硅和硅-石墨烯肖特基结。两个肖特基结的光感应区域(即石墨烯和硅的接触区域)的面积大小一致，均为 10 μm×40 μm。最后，通过光刻—磁控溅射—剥离工艺制备了 Ti/Au(15 nm/100 nm)源漏电极。

### 1.2 激光打印纳米柱超表面

探测器制备完成后，通过激光纳米打印技术在探测器表面直接打印纳米柱超表面，从而实现器件的集成。激光纳米打印利用了材料的双光子吸收效应，可以实现超越衍射极限的打印分辨率<sup>[23-24]</sup>。该操作使用了 Nanoscribe 公司的激光打印设备，该设备装配了 780 nm 波长、80 MHz 的飞秒激光源，IP-Dip 双光子聚合光刻胶和 60×物镜(数值孔径为 1.4)。石墨烯是一种对掺杂极其敏感的材料，任何有机物的接触都有可能对它造成严重的 p 型掺杂<sup>[25-26]</sup>。为了减小 IP-Dip 光刻胶对石墨烯性能的影响，先打印了一个支架结构，然后将纳米柱光栅打印在支架表面，避免了两者的直接接触。使用振镜模式来打印支架，打印速率为 10 000 μm/s，功率约为 25 mW。之后，使用设备的压电模式来打印纳米柱，打印速率为 200 μm/s，功率约为 16 mW。

### 1.3 器件的光电测试

使用探针台，利用半导体参数分析仪(Keithley 4200A)测试器件在偏压为±x 时的光电

流和暗电流，得到测试因子 K，计算式为

$$K = \frac{I(x)/I_d(x)}{I(-x)/I_d(-x)} \quad (1)$$

式中：I(x) 是偏压为 x 时的光电流；I(-x) 是偏压为 -x 时的光电流；I<sub>d</sub>(x) 是偏压为 x 时的暗电流；I<sub>d</sub>(-x) 是偏压为 -x 时的暗电流。为了保证器件安全运行，使用探针台对器件进行 I-V 曲线测试时，施加的最大偏压应控制在 ±5 V 以内，并测试 0.1 V 偏压下的 I-V 曲线以验证器件的稳定性。为了验证该器件能识别多种波长的光，需施加不同波长及功率密度的光照来获取 I-V 曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 器件的工作原理

所设计的波长探测器的三维结构见图 1(a)，它由石墨烯-硅-石墨烯双肖特基结探测器和纳米柱光栅两部分结构组成。打印的纳米柱光栅分为两个区域，由两种不同高度(1.6 μm 和 1.2 μm)的纳米柱组成，分别对应两个肖特基结区域，如图 1(b)所示。

石墨烯具有高载流子迁移率、高导电性、宽带吸收和便于片上集成等优势<sup>[27-29]</sup>，但由于单层石墨烯的透光率(97.7%)较高，纯石墨烯的光探测器响应度普遍较低。多数研究采用石墨烯和其他光吸收材料构建异质结来提高响应度，其中就包含石墨烯-硅肖特基结探测器<sup>[30-31]</sup>。图 1(c)是石墨烯-硅-石墨烯肖特基结的能带示意图。单层石墨烯的导带和价带完全对称，具有狄拉克锥形能带结构，带隙为零<sup>[32]</sup>。由于空气中氧分子和水分子的吸附，石墨烯普遍表现为 p 型掺杂，所以其初始费米能级位于价带中。当硅与石墨烯接触时，界面处的电子从硅的侧面流入到石墨烯，空穴从石墨烯流向硅。硅中的电子流失导致导带费米能级降低，石墨烯中流入电子导致能级升高，从而形成内建电场<sup>[33-34]</sup>，其方向是从硅指向石墨烯。在硅与石墨烯接触的界面处，硅的能带向上弯曲达到石墨烯的费米能级，并形成两个方向相反的石墨烯-硅肖特基结。图 1(d)所示为该

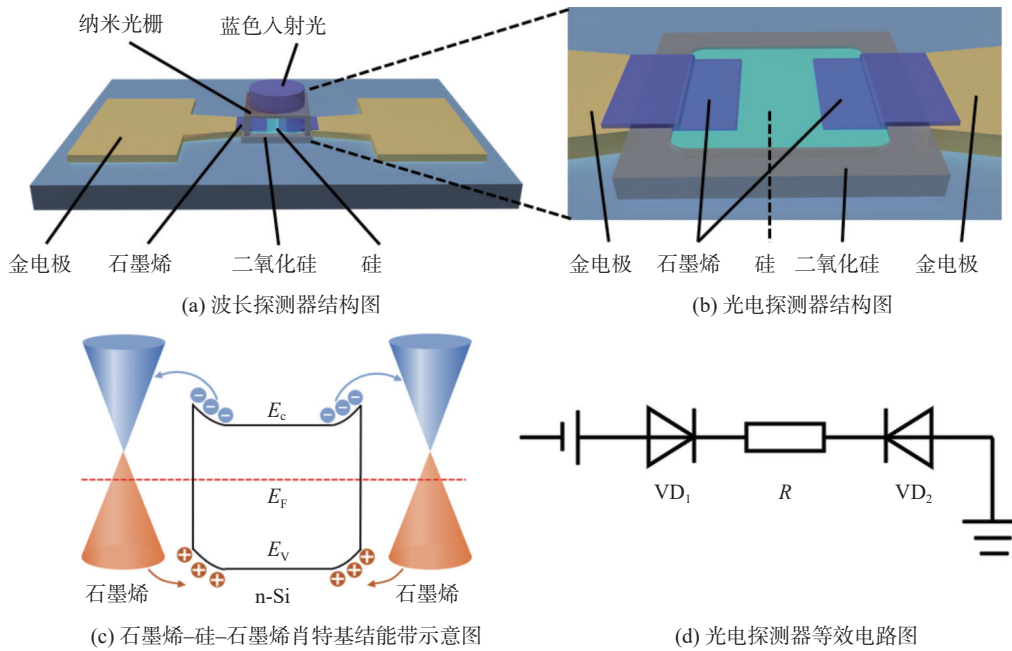


图 1 波长探测器结构及原理图

Fig. 1 Structure and schematic diagram of the proposed wavelength detector

光电探测器的等效电路。石墨烯-硅肖特基结探测器在反向偏压状态下工作<sup>[35]</sup>。在反向时, 暗环境下, 肖特基结由于载流子耗尽, 表现为高阻态, 因此反向时器件的暗电流很小。当有光照射在肖特基结区域时, 硅吸收光子产生电子-空穴对, 导致肖特基结电阻下降, 从而会产生明显的光电流。对于该器件而言, 由于两个肖特基结反向, 因此, 当该器件分别在正向偏压和反向偏压工作时, 起主要光响应作用的肖特基结是不同的。

纳米柱光栅可以产生滤波功能, 其机理如下<sup>[17]</sup>: 光穿过纳米柱光栅后被分为两部分, 一部分光直接穿过纳米柱, 另外一部分光从纳米柱周围的空气间隙穿过。由于光程不同, 两部分光相互干涉后会产生滤波效果。打印在器件上方的纳米柱有两种不同高度, 分别对应两个肖特基结。不同高度的纳米柱产生的滤波波谱不同。因此, 当一束单色光照射在器件上时, 两个肖特基结区域所接收到的光强不同。该器件在正向偏压或反向偏压工作时, 会由不同的肖特基结来响应, 它们所产生的光电流响应不同。最后, 利用正反向偏压下产生的光电流和暗电流, 可计算出测试因子  $K$ , 即可以获得入射光的波长信息。

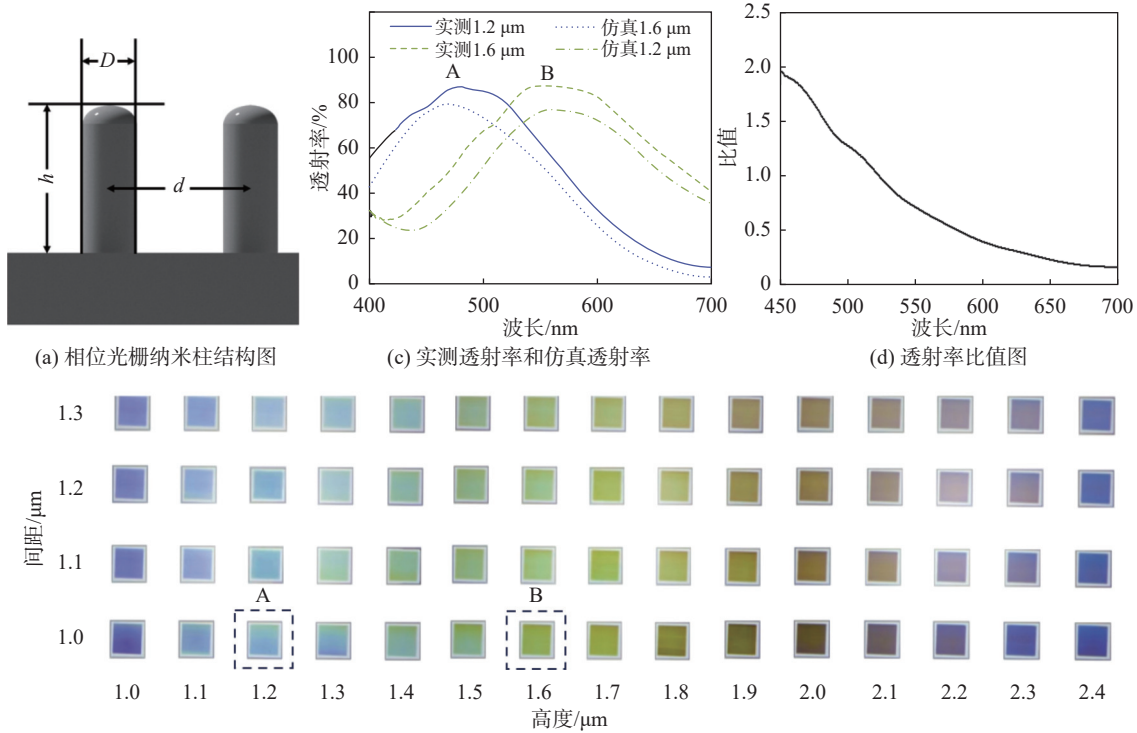
## 2.2 纳米光栅表征

实验中, 首先打印了一系列的纳米柱光栅, 并对光栅的滤波特性进行分析, 进而选择出合适高度的纳米柱光栅。二维周期纳米柱的结构如图 2(a)所示, 它是由一组高度为  $h$ 、直径为  $D$  的纳米柱阵列组成, 纳米柱之间的间距为  $d$ 。打印的纳米柱高度为  $1.0\sim 2.4\ \mu\text{m}$ , 间距为  $1.0\sim 1.3\ \mu\text{m}$ 。图 2(b)所示为白光照射下使用  $20\times$ 物镜观察到的图像, 每个相位光栅的有效面积为  $40\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}$ 。可以看到, 随着纳米柱高度变化, 透过纳米柱的光的颜色也发生了明显的变化, 这说明不同高度的纳米柱对所透过的光的相位调制不同, 证明了纳米柱光栅具有非常明显的滤波作用。同时, 纳米柱的间距会使直接穿过纳米柱的光和穿过纳米柱间隙的光的比例发生变化, 从而影响干涉对比度<sup>[17]</sup>。随着纳米柱间距变小, 光的颜色深度会增加。图 2(c)所示为图 2(b)中虚线方框所标记的 A、B 两种纳米柱光栅的实际透射率曲线和使用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 软件仿真的透射率曲线。它们的纳米柱间距均为  $1.0\ \mu\text{m}$ , 高度分别为  $1.2\ \mu\text{m}$  和  $1.6\ \mu\text{m}$ , 对应波峰分别为  $460\ \text{nm}$  和  $550\ \text{nm}$ , 分别对应于蓝色和绿色滤波片。图 2(d)所示为结合这两种纳米柱光栅所测



得的透射率比值，可以看到在 450 nm 到 700 nm 波段内所测得的透射率比值逐渐减小，且不存在比值相同的波段。这就是选择两种不同高度的纳

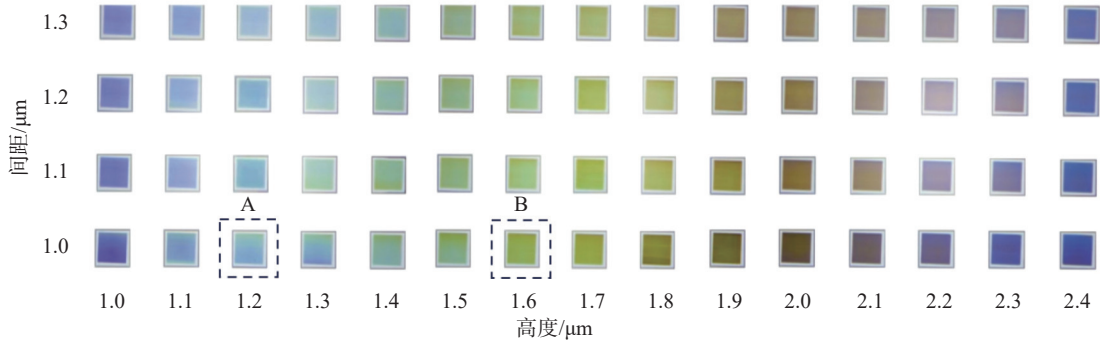
米柱光栅进行探测器集成的原因，当用不同波长的光照射探测器时，探测器在正反偏压下的光电流比值不同，通过改比值即可以确定入射光波长。



(a) 相位光栅纳米柱结构图

(c) 实测透射率和仿真透射率

(d) 透射率比值图



(b) 白光照射下各种光栅的显微镜图

图 2 相位光栅结构及其透射率

Fig. 2 Phase grating structure and transmittance

图 3(a)展示的是未打印纳米柱光栅前，波长探测器的光学显微镜图，其中石墨烯和硅的重叠区域是肖特基结区域。图 3(b)是在打印了纳米柱光栅后，将器件倾斜一定角度时拍摄到的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图。在相位光栅与光电探测器之间添加了一个 10 μm 高的支柱和一块 60 μm×60 μm 的平板，以避免纳米打印结构与石墨烯的直接接触。在探测器左半侧打印的纳米柱的高度为 1.2 μm，在右半侧打印的纳米柱的高度为 1.6 μm。左右两侧的纳米柱除加工高度不同以外，其余的加工条件完全一致，均使用压电模式打印，速率为 200 μm/s，功率约为 16 mW。图 3(c)和图 3(d)所示分别为将 1.6 μm 高的纳米柱光栅倾斜 45°后拍摄的 SEM 图和俯视拍摄的 SEM 图，该纳米柱直径  $D$  为  $(460\pm 10)$ nm，间距  $d$  为 1 μm。可以

看到，所加工的纳米柱具有较好的形貌和排列。

### 2.3 器件入射波长识别

图 4(a)是波长探测器在黑暗环境下测得的  $I-V$  曲线，该曲线基本是镜像对称的，也就是测试因子  $K$  约等于 1。器件在暗环境下的电流值小于 0.2 nA，这证明了肖特基结的整流作用。图 4(b)是在 450 nm 激光照射下测得的  $I-V$  曲线，可以看到，在正负偏压下，光电流的绝对值已经不相等，这说明光电探测器上两个肖特基结区域接收到的光强已经明显受到纳米柱光栅的调控。图 4(c)是分别在 0.1 V 和 -0.1 V 偏压下用 638 nm 和 450 nm 的光照射时，测得的电流随光照周期性变化的  $I-T$  曲线。光照时的光强会逐渐增大。可以看到，光电流随着光强的增大也在逐渐增大，且在 0.1 V 偏压和 -0.1 V 偏压时的光电

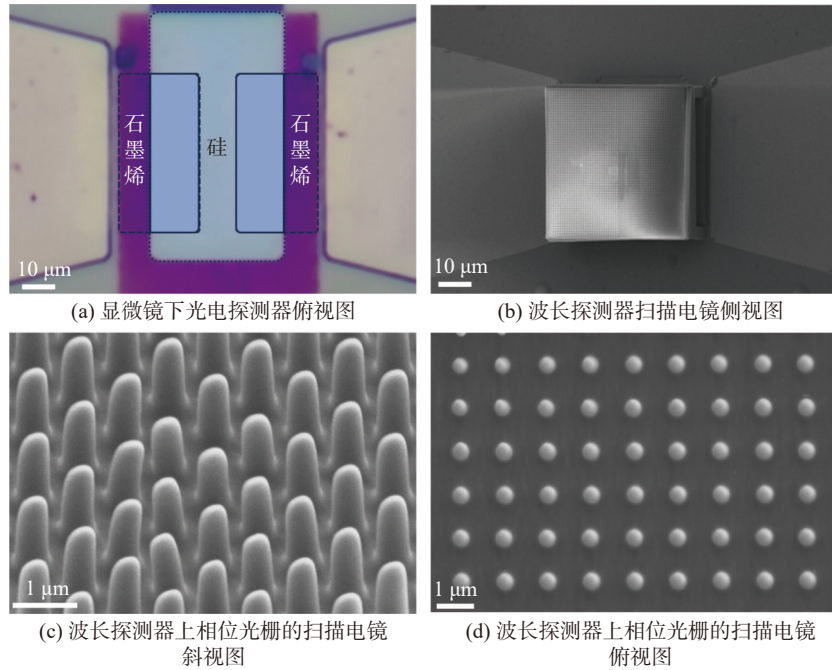


图 3 波长探测器表征图

Fig. 3 Characterization of the wavelength detector

流大小不同。肖特基结器件具有较快的响应速度, 实验结果显示, 其在光照下的响应时间小于 1 ms。在 3 个不同波长 (638 nm、520 nm 和 450 nm) 下测试了光电流和暗电流, 得到不同波长下的测试因子  $K$ 。如图 4(d) 所示, 不同波长下的  $K$  值有明显差异, 其变化规律和图 2(d) 中所展示的纳米柱光栅的透射率比值的变化规律一致, 会随着波长的增大而逐渐变小。在激光设备能达到的功率范围内采用不同的光功率进行了照射测试,  $K$  值不会随照射的光功率变化而产生明显的改变。这一特性对于波长探测器而言十分关键, 它证明该波长探测器可以在不同的光功率范围内工作。在 520 nm 光照射下,  $K$  值基本在 1 附近; 在 450 nm 光照射下,  $K$  值在 1.2 附近; 在 638 nm 光照射下,  $K$  值在 0.8 附近: 说明入射光的波长和  $K$  值有一一对应的关系, 可以根据  $K$  值得出入射光的波长。需要说明的是, 虽然  $K$  值的变化规律与图 2(d) 中的两种纳米柱光栅的透射率比值的变化规律一致, 但其具体的数值并不相同, 这是因为探测器的阻值变化并不与入射光的光功率等比。在图 1(d) 中可以看到, 探测器的内阻还包含一个串联的硅衬底的电阻, 从而导致  $K$  值的变化范围小于图 2(d) 中的透射率

比值的变化范围。

波长探测器的波长分辨率是其重要的指标参数。从图 4(d) 中的误差棒可以看到, 在同一波长下进行多次测试, 得到的  $K$  值会发生一定变化, 由此造成的测试误差是影响探测器波长分辨率的最主要因素, 因此可通过对该误差值的分析来计算得到波长分辨率。从图 4(d) 可以看到, 探测器对蓝光 (450 nm) 波段进行探测时,  $K$  值的误差较大, 其最大误差约为  $\pm 0.015$ 。该探测器探测 450~638 nm 波段的入射光时,  $K$  值的变化范围约为 0.8~1.2。因此, 在 450~638 nm 波段下, 假设探测器探测任一波长时  $K$  值的误差均为  $\pm 0.015$ , 则可以计算得到探测器的波长分辨率约为

$$\frac{638 \text{ nm} - 450 \text{ nm}}{(1.2 - 0.8)/(0.015 \times 2)} = 14.1 \text{ nm} \quad (2)$$

该波长分辨率的值较大, 这可能与所使用的石墨烯为单原子层材料, 其电学稳定性较差有关。后续可以尝试通过优化肖特基结的材料和结构来降低每次测试的光电流波动, 从而降低  $K$  值的误差, 提高器件的波长分辨率。

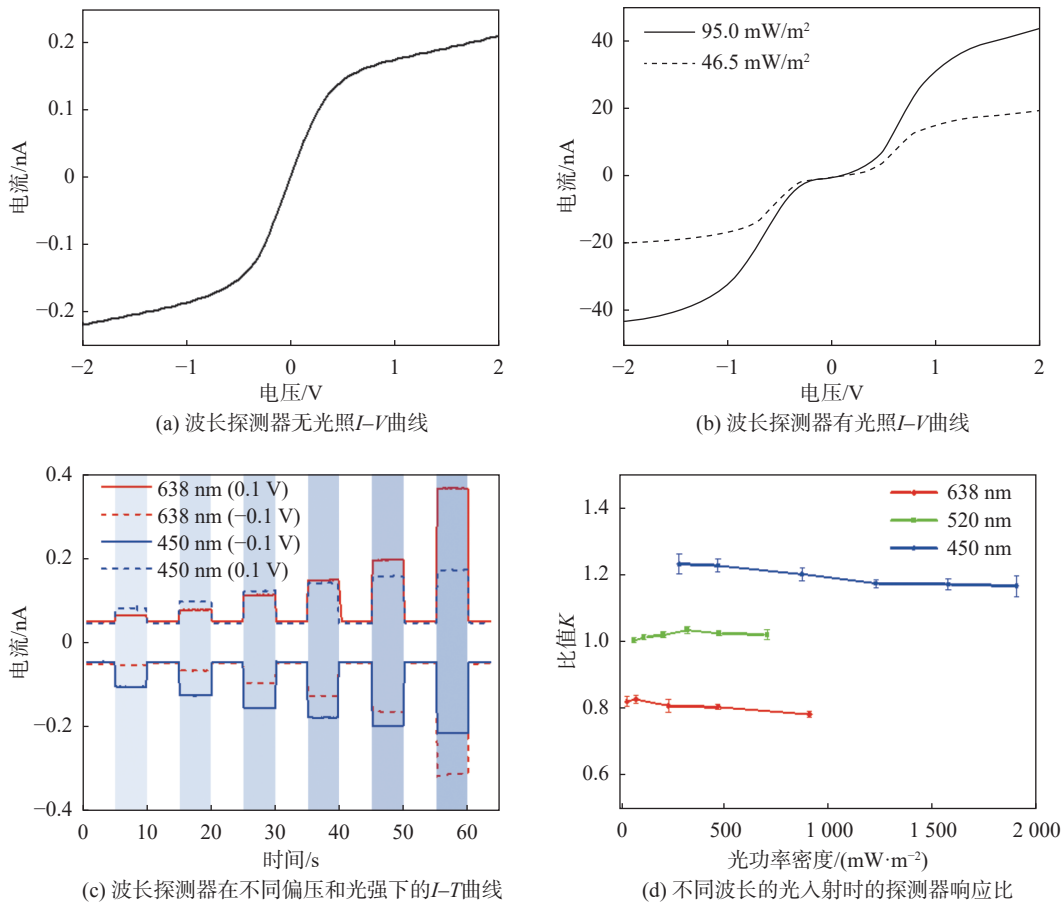


图 4 器件光电测试结果

Fig. 4 Optoelectronic test results of the device

### 3 结 论

设计了石墨烯-硅-石墨烯结构的双肖特基结探测器，通过激光纳米打印集成纳米柱光栅滤波片，制备了单像素波长探测器。基于两种光栅透射率的比值在可见光波段呈单调性变化，结合肖特基结主要在反向偏压下工作的机理，通过测试不同偏压下器件的光电流和暗电流可以探测出入射光的波长。该探测器只需一组滤波片和一个光电探测器便可实现波长探测，相较传统的波长探测器其体积更小，更适合片上集成。接下来将通过优化器件结构和制备工艺，进一步提高器件的波长灵敏度，实现更高分辨率的波长探测，推动器件的应用。激光纳米打印技术提供了高效的光学微纳结构的制备方法。本工作作为激光纳米打印光学微纳结构和探测器集成的探索研究，为光电探测器的发展提供了新的思路。通过集成各种

光学微纳结构，有望进一步提高探测器性能，扩展探测器功能。

#### 参考文献：

[1] HONG S, CHO H, KANG B H, et al. Neuromorphic active pixel image sensor array for visual memory[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(9): 15362 – 15370.

[2] WALCZAK R, DZIUBAN J, SZCZEPAŃSKA P, et al. Toward portable instrumentation for quantitative cocaine detection with lab-on-a-paper and hybrid optical readout[J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1(1): 999 – 1002.

[3] BAONE G A, QI H R. Demosaicking methods for multispectral cameras using mosaic focal plane array technology[C]//Proceedings of SPIE 6062, Spectral Imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science. San Jose: SPIE, 2006.

[4] DE LASARTE M, VILASECA M, PUJOL J, et al.

- Color measurements with colorimetric and multispectral imaging systems[C]//Proceedings of SPIE 6062, Spectral Imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science. San Jose: SPIE, 2006.
- [ 5 ] ZHANG J, ITZLER M A, ZBINDEN H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e286.
- [ 6 ] SEKI H, MA T, MURAKAMI H, et al. Visualization of sugar content distribution of white strawberry by near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Foods*, 2023, 12(5): 931.
- [ 7 ] KHORASANINEJAD M, CAPASSO F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, 358(6367): eaam8100.
- [ 8 ] KLEINBERGER P, KLEINBERGER I D. Systems for three-dimensional viewing and projection: US 20010750702[P]. 2001-08-16.
- [ 9 ] ZHANG S, DUAN X, LI G, et al. Application of high-reflectivity non-periodic sub-wavelength gratings with small-angle beam-steering ability in fabry-perot cavity [C]// Proceedings of 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose: IEEE. 2018: 1-2.
- [10] KUROKAWA U, CHOI B I, CHANG C C. Filter-based miniature spectrometers: spectrum reconstruction using adaptive regularization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(7): 1556-1563.
- [11] GANESH N, SHIVANNA R, FRIEND R H, et al. Wavelength-dependent charge carrier dynamics for single pixel color sensing using graded perovskite structures[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(9): 6577-6584.
- [12] HOSSAIN M I, KHAN H A, KOZAWA M, et al. Perovskite color detectors: approaching the efficiency limit[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(42): 47831-47839.
- [13] LI J Z, WANG J, MA J Q, et al. Self-trapped state enabled filterless narrowband photodetections in 2D layered perovskite single crystals[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 806.
- [14] ARMIN A, JANSEN-VAN VUUREN R D, KOPIDAKIS N, et al. Narrowband light detection via internal quantum efficiency manipulation of organic photodiodes[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6343.
- [15] HASSAN J, AWAN A M, JALIL A. Welding defect detection and classification using geometric features[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Frontiers of Information Technology. Islamabad, Pakistan: IEEE, 2012.
- [16] LI J, ZHANG Y T, LI J N, et al. Amplitude modulation of anomalously reflected terahertz beams using all-optical active Pancharatnam-Berry coding metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(12): 5746-5753.
- [17] NAWROT M, ZINKIEWICZ Ł, WŁODARCZYK B, et al. Transmission phase gratings fabricated with direct laser writing as color filters in the visible[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 31919-31924.
- [18] LIM K T P, LIU H L, LIU Y J, et al. Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 25.
- [19] DONG Y B, PAN G Z, XUN M, et al. Nanoprinted diffractive layer integrated vertical-cavity surface-emitting vortex lasers with scalable topological charge[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(19): 9096-9104.
- [20] LI J Z, LI J Y, ZHOU S D, et al. Metasurface photodetectors[J]. *Micromachines*, 2021, 12(12): 1584.
- [21] XIE Y Y, NI P N, WANG Q H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(2): 125-130.
- [22] NI P N, FU P, CHEN P P, et al. Spin-decoupling of vertical cavity surface-emitting lasers with complete phase modulation using on-chip integrated Jones matrix metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7795.
- [23] FISCHER J, WEGENER M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(1): 22-44.
- [24] MATEUS C F R, HUANG M C Y, YUNFEI D, et al. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 518-520.
- [25] PARK H, BROWN P R, BULOVIĆ V, et al. Graphene as transparent conducting electrodes in organic photovoltaics: studies in graphene morphology, hole transporting layers, and counter electrodes[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(1): 133-140.
- [26] SUL O, KIM K, CHOI E, et al. Reduction of hole doping of chemical vapor deposition grown graphene by photoresist selection and thermal treatment[J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(50): 505205.
- [27] MA Y M, CHANG Y H, DONG B W, et al.



- Heterogeneously integrated graphene/silicon/halide waveguide photodetectors toward chip-scale zero-bias long-wave infrared spectroscopic sensing[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(6): 10084 – 10094.
- [28] 胡思奇, 田睿娟, 甘雪涛. 面向硅基光电子混合集成的二维材料探测器 [J]. *中国光学*, 2021, 14(05): 1039 – 1055.
- [29] ZHANG Q W, ZHANG F Y, LIU X, et al. Doping of laser-induced graphene and its applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(16): 2300244.
- [30] DONG Y B, CHENG C T, XU C, et al. Metal-catalyst-free growth of patterned graphene on SiO<sub>2</sub> substrates by annealing plasma-induced cross-linked parylene for optoelectronic device applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(15): 14427 – 14436.
- [31] CHEN Z F, LI X M, WANG J Q, et al. Synergistic effects of plasmonics and electron trapping in graphene short-wave infrared photodetectors with ultrahigh responsivity[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(1): 430 – 437.
- [32] CASTRO NETO A H, GUINEA F, PERES N M R, et al. The electronic properties of graphene[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 109 – 162.
- [33] ZHAO L, SUN X W, YAO Q N, et al. Field-effect control in hole transport layer composed of Li: NiO/NiO for highly efficient inverted planar perovskite solar cells[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(2): 2101562.
- [34] BELISLE R A, NGUYEN W H, BOWRING A R, et al. Interpretation of inverted photocurrent transients in organic lead halide perovskite solar cells: proof of the field screening by mobile ions and determination of the space charge layer widths[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(1): 192 – 204.
- [35] QIAN F S, DENG J, XU C, et al. Graphene–silicon–graphene schottky junction photodetector with field effect structure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 38503 – 38512.

(编辑: 李晓莉)