

# 表面等离激元增强硅基近红外光电导探测器

唐恕, 李家祥, 陈沁, 文龙\*

暨南大学纳米光子学研究院, 广东 广州 510632

**摘要** 近年来,表面等离激元(SP)增强的金属纳米结构中热载流子产生、传输和收集得到了广泛而深入的研究。其中,利用电子隧穿和热发射效应实现的全新光电转换机制,结合平面化制作和 CMOS 兼容集成等,有望成为硅基红外光电探测的备选方案。目前这类探测器主要为金属-半导体肖特基结的光伏型器件,其光电响应较弱。为此,报道了一种基于金属-硅复合无序纳米结构的光电导器件,得益于无序表面等离激元局域热点效应和多叉指金属-半导体-金属(MSM)结构的显著光电导增益,实验获得了硅亚带隙的宽带强光电响应。该热载流子介导的多叉指 MSM 器件在 1310 nm 波长处的光电流响应度高达 2.50 A/W。

**关键词** 探测器; 近红外探测器; 光电导探测器; 等离激元; 光电导增益

中图分类号 TN215

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1113002

## Surface Plasmon Enhanced Silicon-Based Near-Infrared Photoconductive Detector

Tang Jia, Li Jiexiang, Chen Qin, Wen Long\*

*Institute of Nanophotonics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*

**Abstract** In recent years, the generation, transport, and harvesting of hot carriers in surface plasmon (SP) enhanced metal nanostructures have been extensively and deeply studied. Among them, a new photoelectric conversion mechanism based on electronic tunneling and thermal emission effect, combined with planarization manufacture and complementary metal oxide semiconductor (CMOS) compatible integration, is expected to be an alternative scheme for silicon-based infrared photoelectric detection. At present, these detectors are mainly used in metal-semiconductor Schottky junction photovoltaic devices, which have weak photoelectric response. In this paper, a novel photoconductive device based on metal-silicon composite disordered nanostructures is reported. Due to the localized hot spot effect of the disordered surface plasmon and the significant photoconductivity gain of the multiple interdigital metal semiconductor metal (MSM) structures, the broad-band strong photoelectric response of the silicon sub-band gap is obtained experimentally. Finally, the photocurrent responsivity of the hot carrier mediated multiple interdigital MSM devices is as high as 2.50 A/W at 1310 nm.

**Key words** detectors; near-infrared detector; photoconductive detector; plasmon; photoconductive gain

**OCIS codes** 040.3060; 040.5150; 040.5350

## 1 引言

近红外光电导探测器被广泛应用于光通信、环境监测、遥感和消费电子等多个领域<sup>[1-6]</sup>。目前,主流的红外光电导探测器主要基于锗、III-V 族化合物和碲镉汞等半导体材料的带间跃迁光子吸收机制,具有较高的光电转换效率,其工作范围覆盖近红外

到中远红外多个波段。然而这些非硅材料的光电导探测器成本高,且难以与硅驱动电路集成,在大规模、高密度阵列化应用需求下,这些问题尤为突出。虽然关于上述红外材料与硅的异质外延或者键合的研究已有报道,但受制于晶格匹配和热学匹配等多方面因素,这些异质集成红外探测方案仍面临着材料及制作成本昂贵、工艺复杂和稳定性差等一系列

收稿日期: 2020-05-21; 修回日期: 2020-06-21; 录用日期: 2020-06-28

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203402)、国家自然科学基金(11774383, 11774099, 11874029)、广东省国际科技合作项目(2018A050506039)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2020B151502074)、广东省珠江人才计划(2019QN01X120)

\* E-mail: longwen@jnu.edu.cn

问题<sup>[7-10]</sup>。鉴于此,全硅材料或硅 CMOS 器件兼容的红外探测手段成为相关领域的重要研究方向。针对硅无法直接吸收能量小于其禁带宽度 1.1 eV 的光子的问题,人们提出亚带隙光子吸收机制来实现硅红外光电探测。例如,低维纳米结构化硅可借助陷阱态或表面态引入中间能级,在硅吸收限外仍能实现较高效的光子吸收进而实现光电转换。但由于陷阱态对价电子的捕获与释放存在较长弛豫时间,此类亚带隙探测器存在响应慢和稳定性差等问题。

随着纳米技术和等离激元光学的飞速发展,人们对于基于表面等离激元共振特性的金属材料中热载流子的产生、输运和传递等微观机理的认识进一步加深<sup>[11]</sup>。通过对表面等离激元热载流子的操控与收集,金属材料中光子吸收的能量有望转换为有效的光激励和电信号,而不再是以单一欧姆损耗的形式发生热耗散。当前,表面等离激元热载流子的应用包括光电探测、光催化和调制等多个方面<sup>[12-14]</sup>。2011年, Knight 等<sup>[15]</sup>提出了基于金属纳米结构的硅基近红外热电子光电导探测器,其利用金属纳米天线的表面等离激元效应增强器件的光吸收,使得器件在硅材料亚带隙波段的光电响应显著提高,且可以通过改变纳米结构的尺寸和形貌调节响应光谱,这为 CMOS 兼容的硅基红外探测提供了新的思路。影响光电导探测器转换效率的关键因素有两个:一个是光吸收,另一个是内量子效率。近年来报道的硅基等离激元热载流子探测器多为金属-半导体肖特基结的光伏型器件,该类器件虽利用金属纳米结构的表面等离激元特性增强了光吸收,但其内量子效率依旧很低<sup>[16-20]</sup>。

基于此,本文提出一种基于金属-硅复合无序纳米结构的硅基近红外光电导型探测器件。其借助金属无序结构的局域表面等离激元效应在硅吸收限外实现了高效、宽带的光学吸收。与已有报道的光伏型等离激元热载流子探测不同,多叉指金属-半导体-金属(MSM)电极背对背肖特基势垒设计可获取光电导增益且带来优异的载流子收集能力,使得器件在近红外波段展现出极高的光电流响应度。实验结果表明,在外置偏压作用下制作的硅基近红外光电导探测器在 1100~1550 nm 波段内的光电流响应度为 0.26~5.95 A/W,高出光伏型器件的光电流响应度一个量级以上。

## 2 器件原理和仿真优化

### 2.1 器件原理

所提器件是由 p 型 SOI(silicon-on-insulator)

基底上的无序硅纳米孔(SiNHs)和金叉指电极组成的 MSM 光电导探测器,之所以选择金(Au)材料来制作器件光吸收区是因为其具有表面等离激元特性,且相对于银(Ag)、铝(Al)等金属材料来说,Au 具有较好的稳定性。器件结构示意图如图 1(a)所示,金叉指电极薄膜覆盖在无序 SiNHs 上形成亚波长等离激元结构,入射光激发产生局域表面等离激元共振并形成空间密集分布的局域光场热点,进而显著增强等离激元光吸收。这种无序结构可以在宽波段范围内实现较强的光吸收,吸收光子的能量将在 ps 量级的时间内转换为热载流子,这些热载流子在金属内经过一定的传输到达金-硅界面,最终以热发射的形式并通过肖特基势垒注入到 p 型硅中,从而获得可观测的光生电流。图 1(b)、(c)为能带图(图中  $E_c$  是导带的最低能量, $E_v$  是价带的最高能量),MSM 器件由两个背对背肖特基结组成。当无电压偏置时,与光伏型器件不同,两极金属热载流子发射产生的光生载流子将复合,使得光电流为零。外加偏压后,如图 1(c)所示,多子空穴将产生定向移动,其中一个电极金属发射产生的光生空穴在漂移电场作用下往另一电极移动。因此,相对暗态工作而言,光照下器件产生附加光电流。需要注意的是,在器件制作过程中,叉指电极和引出电极采用了不同的厚度,前者为 Ti(2 nm)/Au(20 nm)(其中钛为黏附层),可保证器件良好的光吸收特性,但考虑到薄层金属在粗糙表面上的不连续性,器件采用 Ti(15 nm)/Au(120 nm)作为引出电极,以减小器件的接触电阻。同时,MSM 势垒主要由 Au/p-Si 接触决定,根据功函数匹配关系可预期较小的势垒高度,从而有利于实现较高的热载流子发射效率。另外,引入多叉指 MSM 电极结构更进一步提升了器件载流子的横向传输效率,通过叉指电极宽度和间距调控有望实现显著的光电导增益。

### 2.2 无序金属纳米结构设计与仿真

光吸收是影响器件性能的关键因素之一,虽然各类基于金属周期纳米结构的光吸收器已有大量报道,但往往伴随着窄吸收波段、高制备成本和低产率等不利方面。故宽带吸收的金属纳米结构的低成本制备是该类探测器能否实现实际应用的重要前提条件。为此,采用薄金膜的热退火工艺来获得大面积、低成本的无序金纳米结构,并通过进一步优化工艺参数来提高宽波段范围内的光吸收。在硅衬底上使用离子溅射镀膜仪进行金沉积,保持真空度为  $6 \times 10^{-2}$  Pa,溅射电流为 6 mA,沉积时间为 2 min,再将

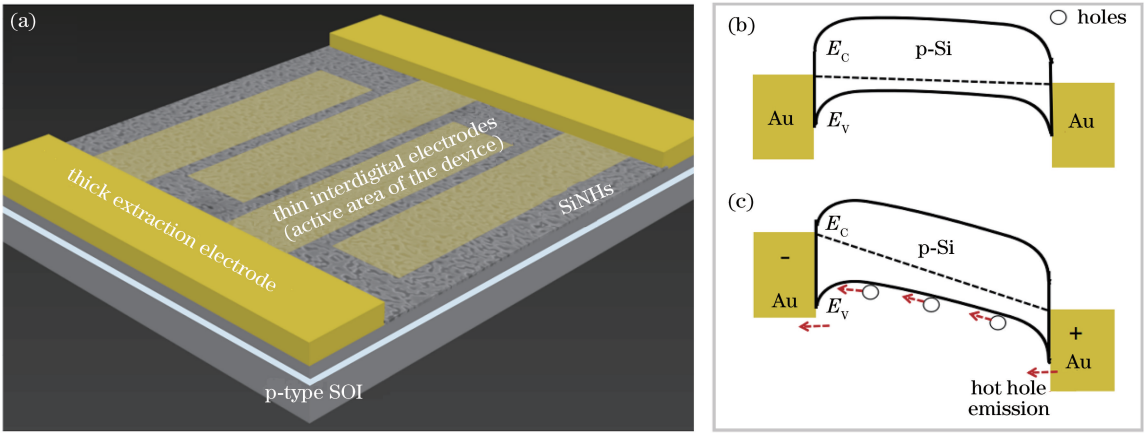


图 1 器件的结构示意图及能带图。(a)表面等离子增强硅基近红外光电探测器结构示意图；  
(b)探测器在零偏压下的能带图；(c)探测器在外置偏压下的能带图

Fig. 1 Structural and band diagrams of device. (a) Schematic of surface plasmon enhanced silicon-based near-infrared photoconductive detector; (b) band diagram of detector under zero voltage bias; (c) band diagram of detector under external voltage bias

同一批次的该样品分别在 400, 500, 850 °C 下进行 2 min 的热退火处理, 最终形成的样品形貌分别对

应着图 2(a)~(c), 其侧面示意图如图 2(d)所示。可以看出: 退火温度越高, 金纳米颗粒尺寸越大, 颗

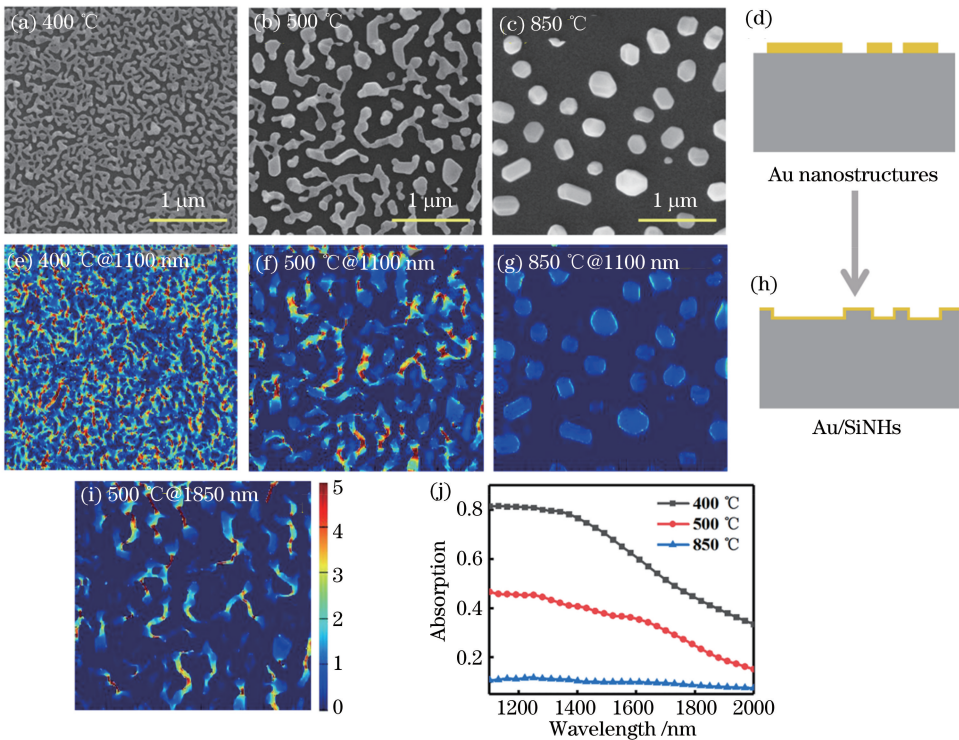


图 2 无序金属纳米结构设计仿真。(a)~(c)不同热退火温度下的 Au 纳米结构的扫描电子显微(SEM)图片;(d)薄膜经热退火处理后形成的 Au 纳米结构的侧面示意图;(e)~(g)图 2(a)~(c)对应的 Au/SiNHs 结构在 1100 nm 入射光下的电场仿真图;(h) Au/SiNHs 结构的侧面示意图;(i)图 2(b)对应的 Au/SiNHs 结构在 1850 nm 入射光下的电场仿真图;(j)仿真得出图 2(e)~(g)所示的 Au/SiNHs 结构在 1100~2000 nm 波段的光吸收谱

Fig. 2 Design and simulation of disordered metal nanostructures. (a)–(c) Scanning electron microscopy (SEM) images of Au nanostructures with different thermal dewetting temperatures; (d) side diagram of Au nanostructure formed after thermal annealing for film; (e)–(g) simulated electric fields of Au/SiNHs structures corresponding to images in Figs. 2(a)–(c) at 1100 nm incident light; (h) side diagram of Au/SiNHs structure; (i) simulated electric field of Au/SiNHs structure corresponding to image in Fig. 2(b) under incident light of 1850 nm; (j) simulated optical absorption spectra of Au/SiNHs structures shown in Figs. 2(e)–(g) in 1100–2000 nm band

粒的填充率越低,颗粒越规则。再对热退火后的样品进行金属辅助湿法化学刻蚀(MACE),刻蚀液的体积比为 HF(质量分数为 49%):H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(质量分数为 30%):C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH=5:1:1,刻蚀时间为 2 min,Au 作为该反应的催化剂,只有被 Au 纳米结构覆盖的硅会被刻蚀。去除 Au 纳米结构,得到无序 SiNHs 结构,在该结构上沉积 Au 薄膜,形成 Au/SiNHs 结构,其侧面示意图如图 2(h)所示。相对于直接使用热退火后的金纳米结构作为器件的光吸收有源区,Au/SiNHs 结构具有以下优点:1)孔状结构有更好的陷光效果;2)Au 膜厚度小于金纳米结构的厚度,使得在空气-金属界面产生的热载流子被输运到 MS(金属-半导体)结处的距离变短;3)器件的肖特基结面积进一步增大,可从光吸收和热载流子发射两个方面提高器件性能。图 2(e)~(g)是图 2(a)~(c)所示的金属纳米结构对应的 Au/SiNHs 结构在 1100 nm 波长处光场分布的数值仿真结果,其中 SiNHs 的深度为 150 nm,全包覆金膜厚度为 20 nm。值得注意的是,金膜厚度不同可能会对其介电常数有一定的影响,尤其是在金膜超薄的情況下<sup>[21-23]</sup>,但当金膜厚度大于十几纳米时,其介电常数的变化就很小了,故综合考虑介电常数、光学吸收、热载流子输运距离等多方面因素,最终选用 20 nm 厚的金膜来制备器件的薄叉指电极。从仿真结果可以看到与纳米结构形貌对应的明显的局域光场热

点,其中 400 °C 退火形成的连续岛状纳米结构具有最密集和最强的热点分布。图 2(j)显示了三种温度下 Au/SiNHs 结构的光吸收谱计算结果,其显示 400 °C 退火形成的纳米结构在宽波段范围内具有较高的光吸收,而 850 °C 退火形成的纳米结构的光吸收在宽波段范围内都较低。在 400 °C 和 500 °C 的退火条件下形成的连续岛状和带状 Au/SiNHs 结构的光场主要局域在结构孔隙处,这说明小尺寸孔隙具有更好的场局域效果,此外纳米间隙的分布非常密集、无序,从而获得了宽波段范围的光吸收增强。而高温退火形成的纳米结构相对分散,局域光场的增强比较弱,导致光吸收较弱。从同样结构在不同波长处的光场分布对比也能得出局域光场增强程度影响光吸收大小,图 2(i)为 1850 nm 波长处 500 °C 退火条件下形成的 Au/SiNHs 结构的光场分布,比 1100 nm 波长对应的光场分布的强度和密度都明显偏小,从而造成光吸收率从 46.7%降低到 21.6%。基于此,后续的器件研制中采用低于 500 °C 的退火温度去制备等离激元光吸收区。

### 3 器件制备与测试分析

#### 3.1 器件制备

简化的器件制备工艺流程如图 3 所示,但实际器件制作采用 p 型 SOI 基底,其中顶层硅厚度为 340 nm,电阻率为 10~20 Ω·cm。首先,使用离子

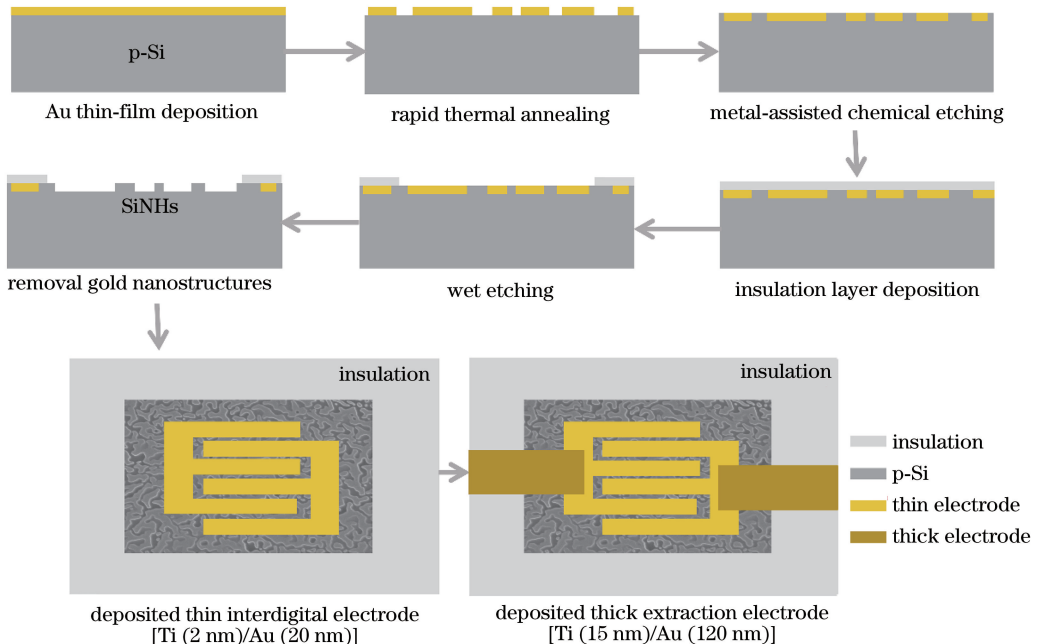


图 3 器件制作的工艺流程图

Fig. 3 Fabrication procedure for the proposed photodetectors

溅射镀膜仪和热退火工艺在样品表面制备无序金纳米结构,通过在 450 °C 下退火 2 min 获得如图 4(a) 所示的带状结构。再使用金属辅助湿法化学刻蚀,将金带状结构刻蚀进 SOI 基底中,刻蚀深度约为 80 nm;接着使用 ALD 设备在样品表面沉积 40 nm 厚的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  绝缘层,以减小器件的暗电流,进而通过反转光刻和湿法刻蚀得到器件进光窗口,并用金

腐蚀液去除金带状结构,直至露出无序  $\text{SiNH}_s$  结构,如图 4(b) 所示;然后利用反转光刻技术和磁控溅射技术制备薄叉指电极 [ $\text{Ti}(2\text{ nm})/\text{Au}(20\text{ nm})$ ],得到如图 4(c) 所示的结构;最后使用反转光刻技术和电子束蒸发制备厚引出电极 [ $\text{Ti}(15\text{ nm})/\text{Au}(120\text{ nm})$ ],得到如图 4(d) 所示的最终器件结构。

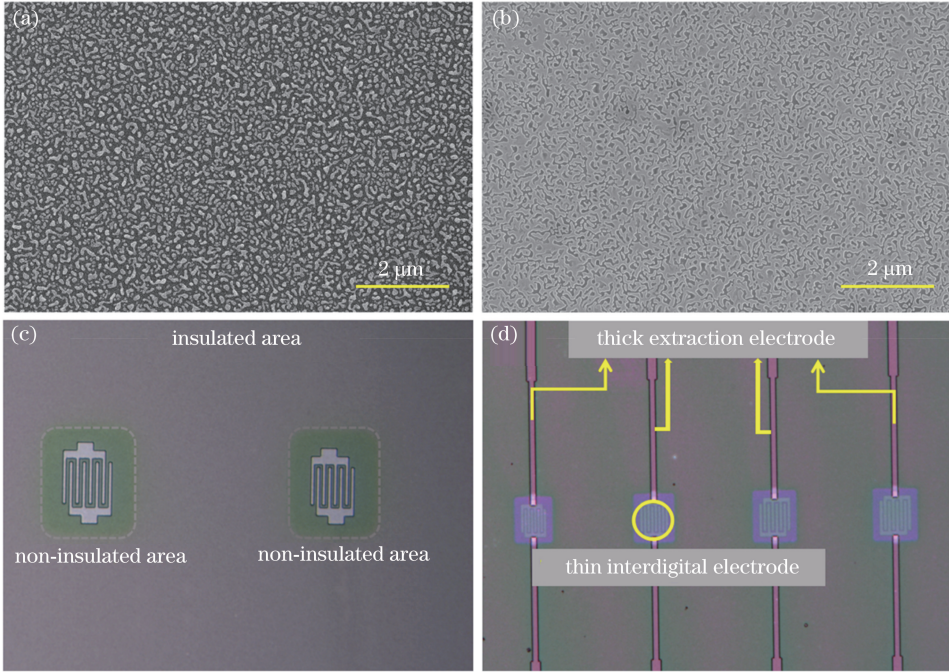


图 4 器件制作过程中关键步骤的显微镜图片。(a)热退火处理后无序带状结构的 SEM 图; (b)无序带状  $\text{SiNH}_s$  结构的 SEM 图;器件在制作完(c)薄叉指电极和(d)厚引出电极后的光学显微镜图片

Fig. 4 Microscope pictures of important steps in device fabrication procedure. (a) SEM image of disordered banded structure after annealing; (b) SEM image of disordered banded  $\text{SiNH}_s$  structure; optical microscope pictures with (c) thin interdigital electrode and (d) thick extraction electrode

### 3.2 测试分析

器件的光电测试系统如图 5(a) 所示,利用数字

源表和锁相放大器进行光电信号测试。图 5(b) 显示了器件的电流-电压 ( $I-V$ ) 曲线测试结果,在 6 V

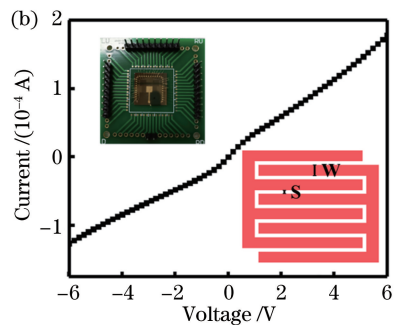
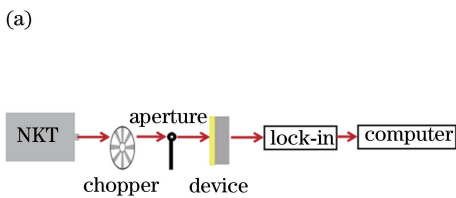


图 5 器件的测试原理图及电学测试结果。(a)器件的测试原理图;(b)暗态下器件的  $I-V$  特性曲线, 左上插图为器件实物图,右下插图为叉指电极示意图

Fig. 5 Test schematic diagram and electrical test results of device. (a) Schematic diagram of device test; (b)  $I-V$  characteristic curve of device under dark state. The upper left inset is picture of device, and lower right inset is diagram of interdigitated electrode

偏压下器件的暗电流为  $178.5 \mu\text{A}$ 。可以看出,  $I$ - $V$  曲线表现出一定的对称性, 出现该现象的原因是 MSM 探测器中的背对背对称的金硅肖特基接触, 但可能因为所制备的绝缘层有点薄, 在某些地方存在着穿孔现象, 造成  $I$ - $V$  曲线不完全对称。此外, 从  $I$ - $V$  曲线可以看出该器件中 Au 与 p 型硅之间存在一定高度的肖特基势垒 (约为  $0.32 \text{ eV}$ ), 但由功函数匹配关系得知其远小于 Au 和 n 型硅的势垒高度 (约为  $0.8 \text{ eV}$ )<sup>[24]</sup>, 因此该器件具有更高的热载流子发射效率。图 5(b) 左上插图展示了器件制作完成后的实物图, 右下插图则为器件叉指电极示意图, 其中  $W$  为叉指电极线宽,  $S$  为叉指电极间的间隙宽度, 在所制作的器件中  $W = 12 \mu\text{m}$ ,  $S = 4 \mu\text{m}$ , 器件有源区面积为  $0.01404 \text{ mm}^2$ 。通过调整叉指电极的参数来进一步调整器件的暗电流特性, 如通过减小叉指电极线宽  $W$ , 可使器件电极面积变小, 故暗电流也会减小<sup>[25]</sup>, 但在具体的器件制作过程中应结合光刻工艺进行考量。

在不同偏压下, 依次用单色光照射器件有源区进行光电流的测试, 并将单色光照射器件与平面参考器件进行对比。测得器件的时间分辨光电流谱如图 6(a) 所示, 平面参考器件在大于  $1200 \text{ nm}$  波长的光照射下的光电流响应几乎为零, 这是因为硅带间跃迁响应的截止波段在  $1200 \text{ nm}$  左右, 且平面器件中没有金纳米结构, 无法激发出热载流子。相比而言, 有无序金纳米结构的器件则输出强得多的光电流。随着偏压由  $2 \text{ V}$  增加到  $8 \text{ V}$ , 器件的光电流响应也逐渐增大, 这是因为随着外加电压的增大, 肖特基势垒降低,

从而使得热载流子跃迁概率提高, 且外电场加速了电子空穴对的分离和迁移, 提供了大光电导增益。从时间分辨光电流谱中可以看出所制备的近红外光电导器件具有较大的开关速度。

将光电流谱转化为光响应谱可以更好地分析器件性能, 因为光响应谱排除了波长变化的入射光功率对器件光电转换性能评估的影响。器件的光电流响应度可以表示为<sup>[26]</sup>

$$R = \frac{I_p}{P} = I_p / [P_1 S / (\pi r^2)], \quad (1)$$

式中:  $I_p$  为光电流;  $P$  为照射在器件有源区上的激光光功率;  $P_1$  为照射在样品上的激光光功率;  $S$  为器件有源区面积;  $r$  为照射在样品上激光光斑的半径, 在该次测试中其值为  $1 \text{ mm}$ 。基于此得出的器件的光电流响应谱如图 6(b) 所示, 因为硅带间跃迁响应截止波长在  $1200 \text{ nm}$  左右, 故在各个偏压下的光电流响应在该波长处都存在着一个凹谷。波长大于  $1200 \text{ nm}$  的光电流响应再次提升, 这是因为在对应波段, 无序金属纳米结构的局域表面等离子激元效应增强了器件光吸收。无序结构的吸收是由多个不同尺寸结构引起的局域表面等离子激元共振的协同作用引起的, 故而产生了一个较宽峰位的光电流响应谱。实验最终获得了硅亚带隙的宽带光电响应, 在  $8 \text{ V}$  偏压下, 该器件在  $1100 \sim 1550 \text{ nm}$  波段的光电流响应度达到  $0.26 \sim 5.95 \text{ A/W}$ , 且通过叉指电极宽度和间距调控有望得到更大的光电流响应度。而已有报道的基于 Au-n 型无序硅纳米复合结构的光伏型热载流子光电导探测器在同样波段下的光电流响应度仅为  $1.4 \sim 13 \text{ mA/W}$ <sup>[15]</sup>。

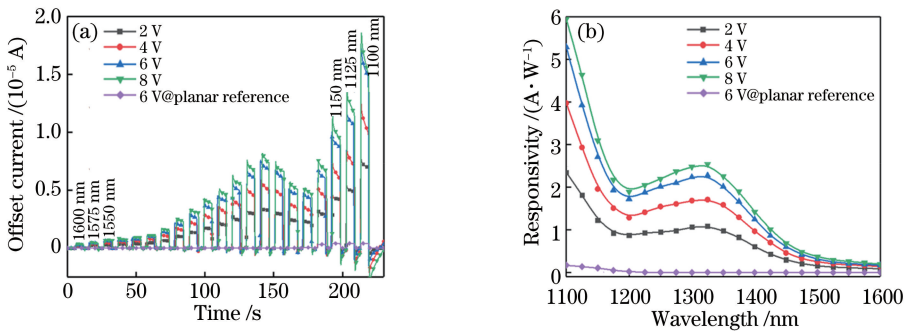


图 6 器件光电转换性能的测试。(a) 器件及平面参考器件在相关偏压下的时间分辨光电流谱以及其对应的入射光波长; (b) 器件及平面参考器件在相关偏压下的光电流响应谱

Fig. 6 Test of device photoelectric conversion performance. (a) Time-resolved photocurrent spectra of detector and planar reference device under relevant bias voltage and corresponding incident light wavelengths; (b) photocurrent response spectra of detector and planar reference device under relevant bias voltage

## 4 结 论

为了得到高光电响应度的硅基等离激元热载流子近红外光电导探测器,设计了一种金属-硅复合无序纳米结构的近红外光电导探测器,旨在利用无序金属纳米结构的表面等离激元局域热点效应、Au/p-Si 接触的较小势垒高度、多叉指 MSM 电极的显著光电导增益及其优异的横向载流子收集能力来提高器件的光电流响应度。进一步地,对器件的电学和光电转换性能进行了表征和测试。实验研究结果表明,无序金属纳米结构富集大量的等离激元热点,使得器件在近红外波段都有着较强的光场局域和光学吸收。所提器件呈现出典型的 MSM 背对背二极管的反对称  $I$ - $V$  特性,通过施加一定的外部偏压可实现光电响应特性的调控,最后测得该热载流子近红外光电导探测器在硅吸收限外的 1310 nm 处的热载流子的光电流响应度高达 2.50 A/W。

## 参 考 文 献

- [1] Mueller T, Xia F, Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 297-301.
- [2] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(9): 091101.
- [3] Yu Y F, Miao F, He J, et al. Photodetecting and light-emitting devices based on two-dimensional materials[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(3): 036801.
- [4] Shi Z, Li L Z, Zhao Y, et al. Implantable optoelectronic devices and systems for biomedical application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207001.  
史钊, 李丽珠, 赵钰, 等. 植入式生物医疗光电子器件与系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207001.
- [5] Yu Y F, Ni Z H. Photodetection based on surface plasmon-induced hot electrons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202403.  
于远方, 倪振华. 表面等离激元热电子光电探测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202403.
- [6] Liu Y Z, Li G H, Cui Y X, et al. Research progress in perovskite photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 010001.  
刘艳珍, 李国辉, 崔艳霞, 等. 钙钛矿光电探测器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 010001.
- [7] Beling A, Campbell J C. InP-based high-speed photodetectors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 343-355.
- [8] Kang Y, Mages P, Clawson A R, et al. Fused InGaAs-Si avalanche photodiodes with low-noise performances [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(11): 1593-1595.
- [9] Koester S J, Schaub J D, Dehlinger G, et al. Germanium-on-SOI infrared detectors for integrated photonic applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1489-1502.
- [10] Harnme D L, Koester S J, Freeman G, et al. The revolution in SiGe: impact on device electronics[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 224(1/2/3/4): 9-17.
- [11] Brongersma M L, Halas N J, Nordlander P. Plasmon-induced hot carrier science and technology [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(1): 25-34.
- [12] Yu Y F, Sun Y, Hu Z L, et al. Fast photoelectric conversion in the near-infrared enabled by plasmon-induced hot-electron transfer [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(43): 1903829.
- [13] Wang Y, Shen L, Wang Y, et al. Hot electron-driven photocatalysis and transient absorption spectroscopy in plasmon resonant grating structures [J]. *Faraday Discussions*, 2019, 214: 325-339.
- [14] Liu W K, Wang W Q, Guan Z Q, et al. A plasmon modulated photothermoelectric photodetector in silicon nanostripes [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(11): 4918-4924.
- [15] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, et al. Photodetection with active optical antennas [J]. *Science*, 2011, 332(6030): 702-704.
- [16] Wen L, Chen Y F, Liu W W, et al. Enhanced photoelectric and photothermal responses on silicon platform by plasmonic absorber and omni-Schottky junction[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(5): 1700059.
- [17] Ajiki Y, Kan T, Yahiro M, et al. Silicon based near infrared photodetector using self-assembled organic crystalline nano-pillars[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(15): 151102.
- [18] Wen L, Chen Y, Liang L, et al. Hot electron harvesting via photoelectric ejection and photothermal heat relaxation in hotspots-enriched plasmonic/photonic disordered nanocomposites [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 581-591.
- [19] Yang Z, Liu M, Liang S H, et al. Hybrid modes in plasmonic cavity array for enhanced hot-electron photodetection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20268-20273.
- [20] Goykhman I, Desiatov B, Khurgin J, et al. Locally oxidized silicon surface-plasmon Schottky detector for

- telecom regime [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(6): 2219-2224.
- [21] Yakubovsky D I, Stebunov Y V, Kirtaev R V, et al. Ultrathin and ultrasmooth gold films on monolayer MoS<sub>2</sub> [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(13): 1900196.
- [22] Rosenblatt G, Simkhovich B, Bartal G, et al. Nonmodal plasmonics: controlling the forced optical response of nanostructures [J]. *Physical Review X*, 2020, 10: 011071.
- [23] Gao L H, Lemarchand F, Lequime M. Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 520(1): 501-509.
- [24] Li W, Valentine J. Harvesting the loss: surface plasmon-based hot electron photodetection [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 177-191.
- [25] Chen B. Structure optimization and temperature dependent characteristics study of SiC MSM ultraviolet detector [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.  
陈斌. 碳化硅 MSM 紫外探测器结构优化与温度特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [26] Chen Y F. Hot electron infrared detector based on surface plasmon effect [D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.  
陈义富. 基于表面等离激元效应的热电子红外探测器 [D]. 上海: 上海大学, 2018.