

## 表面等离激元纳米结构增效的光电探测器进展 (特邀)

何伟迪<sup>1</sup>, 苏丹<sup>2</sup>, 王善江<sup>1</sup>, 周桓立<sup>1</sup>, 陈 雯<sup>1</sup>, 张晓阳<sup>1</sup>, 赵 宁<sup>1</sup>, 张 彤<sup>1</sup>

- (1. 东南大学 电子科学与工程学院 信息显示与可视化国际合作实验室, 江苏 南京 210096;
2. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 光电探测器作为航空航天、深空探测和环境监测等领域的核心器件之一, 具有重要的科学研究和实用价值。表面等离激元具有可突破光学衍射极限、实现纳米聚焦的性质, 为光电探测器的性能提升提供了全新的技术手段, 是近年来光电探测增效研究领域的热点之一。文中围绕表面等离激元纳米结构增效的光电探测器研究展开综述, 首先介绍了各类表面等离激元纳米结构的物理特性, 主要包括局域表面等离激元结构和传导型的表面等离极化激元结构, 以及由表面等离激元金属和半导体材料构成的异质结构; 然后重点从探测器性能、探测原理和工艺方法等角度, 介绍了等离激元纳米结构增效的光电探测器的研究进展; 最后对表面等离激元纳米结构增效的光电探测器及其在未来面临的挑战进行了总结和展望。

**关键词:** 表面等离激元; 纳米结构; 光电探测器

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211014

## Progress of surface plasmon nanostructure enhanced photodetector (*Invited*)

He Weidi<sup>1</sup>, Su Dan<sup>2</sup>, Wang Shanjiang<sup>1</sup>, Zhou Huanli<sup>1</sup>, Chen Wen<sup>1</sup>,  
Zhang Xiaoyang<sup>1</sup>, Zhao Ning<sup>1</sup>, Zhang Tong<sup>1</sup>

- (1. Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, School of Electronics  
Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As one of the core devices in the field of aeronautic and astronautics, deep space exploration, environmental monitoring, there is significant scientific research and practical application value for photodetector. In recent years, surface plasmon has become one of the research hotspots in the field of enhanced photodetection, due to the properties of breaking through the optical diffraction limit and realizing nanometer focusing. Hence, surface plasmon is a novel technical method for improving the performance of photodetectors. In this article, the research progress based on the photodetector with enhancement effect was reviewed, the enhancement effect can attribute to the surface plasmon nanostructure. Firstly, various kinds of physical properties of surface plasmon nanostructures were introduced, mainly included localized surface plasmon structure and surface plasmon polaritons structure with propagating nature, as well as the heterostructure that consisted of surface plasmon metal and semiconductor materials. Then, the research progress of photodetector enhanced by surface plasmon nanostructures was introduced focusing on the aspects of performance of photodetector, detection mechanism and fabrication process method. Finally, the photodetector enhanced by surface plasmon nanostructures and the related challenges in the future were both summarized and prospected.

**Key words:** surface plasmon; nanostructure; photodetector

收稿日期: 2020-10-02; 修订日期: 2020-12-30

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0205804); 国家自然科学基金面上项目 (61875241)

## 0 引言

光电探测器在高速光通信、航空航天、深空探测、成像等领域有着广泛的应用,并逐步向着高集成度、高效的光电转换、快速响应、宽光谱、多维探测的方向发展,对于响应度和响应时间、波长范围等指标提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。

在多种增强探测的技术手段中,表面等离激元(Surface Plasmon, SP)纳米结构具有突破衍射极限的性质,为高性能的光电探测器的研究提供了全新的技术方法<sup>[4-5]</sup>。近年来,研究人员利用表面等离激元结构在拓展探测波段、提高响应速度、提高响应度,以及实现探测器件的小型化和集成化方面开展了大量的研究工作,并通过调整等离激元纳米结构的形貌、尺寸参数,有望获得窄带宽、偏振敏感的探测效果<sup>[4]</sup>,是目前较为活跃的研究方向,值得重点关注和介绍。

在此背景下,文中综述了近几年来利用表面等离激元增强光电探测器的最新研究进展。首先,文中从基本概念入手,分别介绍了局域表面等离激元(Localized Surface Plasmon, LSP)结构、表面等离极化激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)结构、金属半导体异质结构的基本性质,以及相关的制备工艺。接下来,对上述三种纳米结构在探测器上的增效原理和对应的相关工作分别进行了阐述。

## 1 表面等离激元纳米结构及其性质

表面等离激元是指外界电磁场与金属表面的自由电子相互作用产生的一种沿着金属表面传输的电磁振荡模式<sup>[4-6]</sup>。对于亚波长的表面等离激元纳米结构而言,如各种形貌的纳米颗粒,特定波长的入射光会激发出等离激元共振,光场集中在纳米结构附近,这种非传导型的表面等离激元称为局域表面等离激元<sup>[6]</sup>。当金属结构为纳米线或光栅等结构时,在金属薄膜和介质处,表面等离激元可以沿着界面进行传播,这种传导型的表面等离激元为表面等离极化激元。

### 1.1 局域表面等离激元纳米结构及其性质

局域表面等离激元一般发生在金属纳米结构上,如图 1(a)所示<sup>[6]</sup>。以金属纳米球为例,当入射光照射

在尺寸小于波长的金属纳米球上时,其表面的自由电子气受电场影响发生偏移,产生极化电场并发生振荡。这时可将金属纳米球看作一个方向随入射光电场方向改变的偶极子。在这种情况下,金属纳米球与光发生强烈的相互作用,将光局域在金属纳米颗粒周围,产生局域场增强效应(Local Field Enhancement, LFE)<sup>[7]</sup>。当入射光频率与金属纳米球的本征频率一致时,光与金属纳米球表面自由电子形成谐振,使这种相互作用达到最强,光场密度得到极大的提高<sup>[5,7]</sup>。此外,当入射光照射到由两个或两个以上相互靠近的金属纳米颗粒之间(间距在纳米尺度时)时,颗粒间的光场耦合效应使得间隔处的光场密度得到极大提升<sup>[8]</sup>。相比于单个金属纳米颗粒,其光场密度可进一步增加两个数量级<sup>[8]</sup>。因此相互靠近的金属纳米颗粒的间隔被称为“hot spots”<sup>[8]</sup>。

通过调节金属纳米结构的形貌、尺寸,可实现对等离激元谐振峰的调控,当金属纳米颗粒为各向异性的形状时,沿不同的方向会产生不同的谐振模式<sup>[9-10]</sup>。图 1(b)是一组不同尺寸银纳米三角板的消光谱,在主要的谐振方向可以将纳米三角板视作四极子,通过改变三角板的尺寸,可以调节其主吸收峰的位置<sup>[11]</sup>。纳米颗粒的形貌和材料性质也会影响其光谱宽窄,如图 1(c)所示<sup>[12]</sup>。金、银等金属具有较低电阻率,有利于降低表面等离激元的损耗,是主流的等离激元纳米材料<sup>[6-7]</sup>。

经过几十年的发展,人们探索出了许多制备表面等离激元结构的方法,主要可以分为“top-down”和“bottom-up”两种工艺路线。“top-down”泛指各种利用纳米光刻技术在金属膜上制备微纳图形结构的工艺,包括聚焦离子束刻蚀(FIB),电子束光刻(EBL)等<sup>[13-14]</sup>,适用于研制排布规则、阵列化、一致性高的纳米结构,但所制备的金属纳米结构的特性往往对加工精度依赖性高,而且工艺成本较高。“bottom-up”<sup>[9-10,13-14]</sup>常通过调整化学合成中的各项参数控制纳米颗粒的合成,制备出不同形貌的金属纳米颗粒具有成本低、合成出的纳米颗粒形状易控制、晶向排布规则、表面粗糙度低、光学损耗小等优势,但可控性有待进一步发展。在实际的器件制备中,往往结合这两种技术路线的优势,制备性能更好的纳米结构。

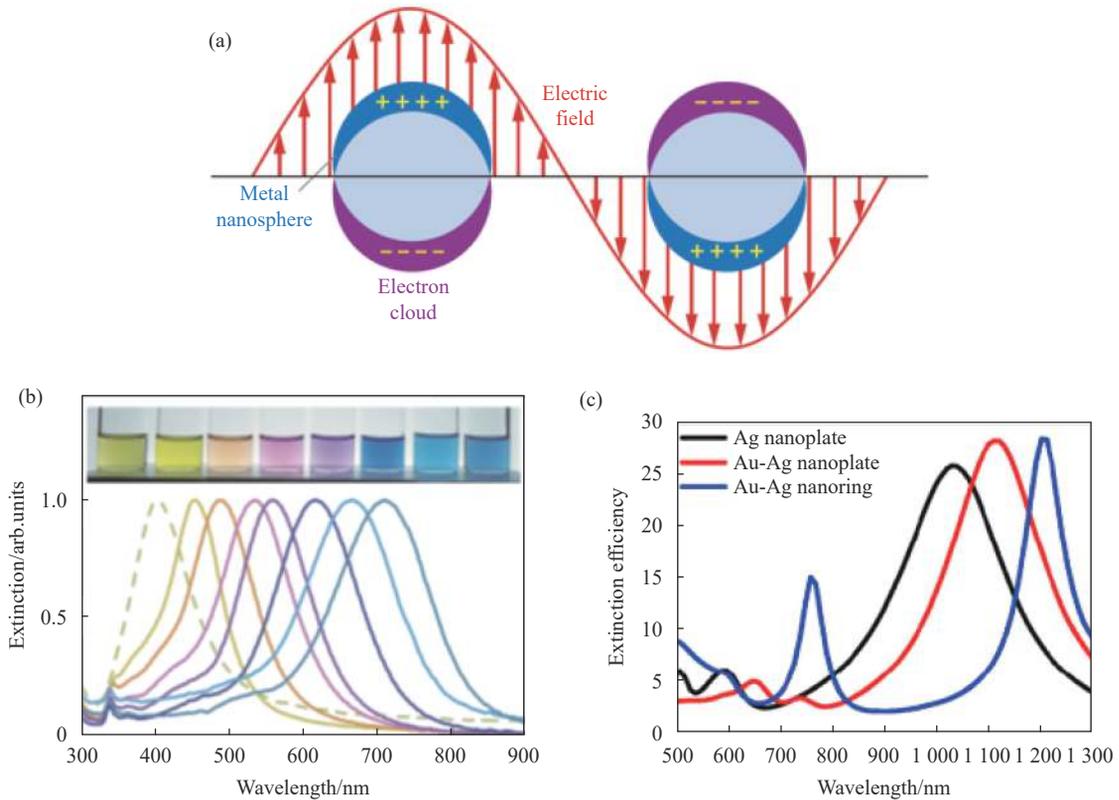


图 1 (a) 金属纳米球的局域表面等离激元效应示意图<sup>[6]</sup>; (b) 不同尺寸的银纳米三角板消光谱<sup>[11]</sup>; (c) 银纳米三角板 (黑色)、金银纳米合金三角板 (红色)、金纳米空心三角板 (蓝色) 的消光谱<sup>[12]</sup>

Fig.1 (a) Schematic diagram of local surface plasmon effects on metal nanospheres<sup>[6]</sup>; (b) Extinction spectra of silver triangle plate in different sizes<sup>[11]</sup>; (c) Extinction spectra of silver triangle plate (black), gold-silver alloy triangle plate (red) and hollow gold triangle plate (blue)<sup>[12]</sup>

1.2 表面等离极化激元纳米结构及其性质

表面等离极化激元是外场作用下金属中自由电子气的集体振荡与入射光子耦合形成的电磁混合模式<sup>[6, 15]</sup>。如图 2(a) 所示, 不同于传统介质光波导中的导波模式, 这种特殊的电磁模式沿金属/介质界面传输, 场强在垂直于界面的方向呈指数衰减, 因此电磁场能量被有效地束缚在界面附近小于波长的距离内<sup>[16]</sup>。利用这一性质可设计出模式尺寸不受光学衍射极限限制的纳米波导器件。有报道表明, 这种强束

缚的 SPPs 模式可以通过逐渐减小传输波导横截面积的方式实现模式尺寸~10 nm 的纳米聚焦, 远超光学衍射极限。较小的模式体积不但提升了器件的集成度, 而且呈指数级地 (~12 000 倍) 提高了局域电磁场能量密度<sup>[17]</sup>。未来将 SPPs 波导器件与探测器件集成, 有望提高入射光子与探测器件的耦合效率, 从而改善探测器低响应率的问题。另一方面, SPPs 是单偏振的横磁 (Transverse Magnetic, TM) 模式, 器件本身具有良好的偏振敏感特性。图 2(b) 为常见的具有偏振敏感

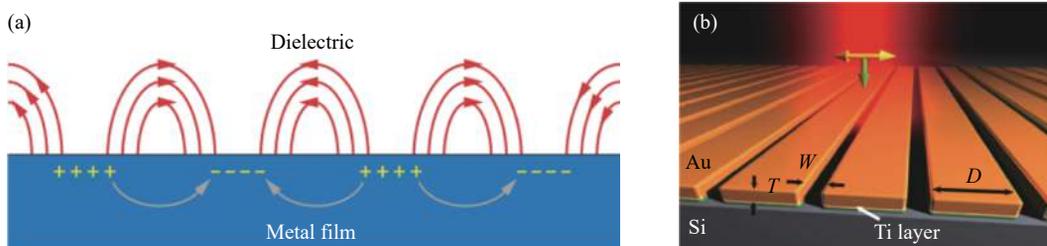


图 2 (a) 传导型表面等离极化激元效应示意图<sup>[6]</sup>; (b) 具有表面等离极化激元效应的金属光栅结构<sup>[19]</sup>

Fig.2 (a) Schematic diagram of propagating SPPs<sup>[6]</sup>; (b) Metal grating structure with SPPs effect<sup>[19]</sup>

特性的光栅结构<sup>[18]</sup>。

### 1.3 表面等离子激元异质结构及其性质

近年来,基于金属和半导体构成的异质结构得到了广泛的研究,尤其是在光电探测增效领域得到了应用<sup>[20-21]</sup>。表面等离子激元异质结构具有独特的等离子激元诱导的热电子 (Surface Plasmon Induced Hot Electron, SPIHE) 效应,这种效应可以用于调控半导体材料的能级能带特性。同时,由于表面等离子激元的局域场增强和纳米聚焦的特性,对半导体材料的光吸收能力也有进一步改善。金属等离子激元纳米结构和半导体接触构成异质结构,此时,导体中的电子会向金属中流动,直至达到费米能级的平衡,此时在界面处会形成一个阻碍电子继续流动的势垒,即肖特基势垒<sup>[22]</sup>。如图 3 所示,在金属-半导体异质结构中,等离子激元热电子的产生和输运可归纳为以下三个过程:(1) 入射

光与金属纳米结构的本征频率匹配时,产生等离子激元共振,此时,金属纳米结构的吸收和散射截面达到最大;(2) 激发态的光子将以辐射和非辐射跃迁的形式进行衰减(见图 3(a)),辐射跃迁以光子的形式将能量再次辐射出去,非辐射跃迁则将吸收的光能传给电子,即通常所说的热电子,热电子包含两个部分(见图 3(b)),一部分是来自于带间激发(d 能带电子),另一部分来自于费米能级附近的带内激发(s 能带电子),即等离子激元热电子,这部分电子具有高激发效率、高能量、对金属形貌结构敏感等特点<sup>[20, 22]</sup>;(3) 产生的热电子到达金属-半导体异质结构界面,由于界面肖特基势垒的存在,低能电子因不具有足够的能量而无法越过势垒,只有能量高于肖特基势垒的电子才能越过势垒,注入到半导体中,并最终被半导体结构吸收和利用<sup>[20]</sup>。

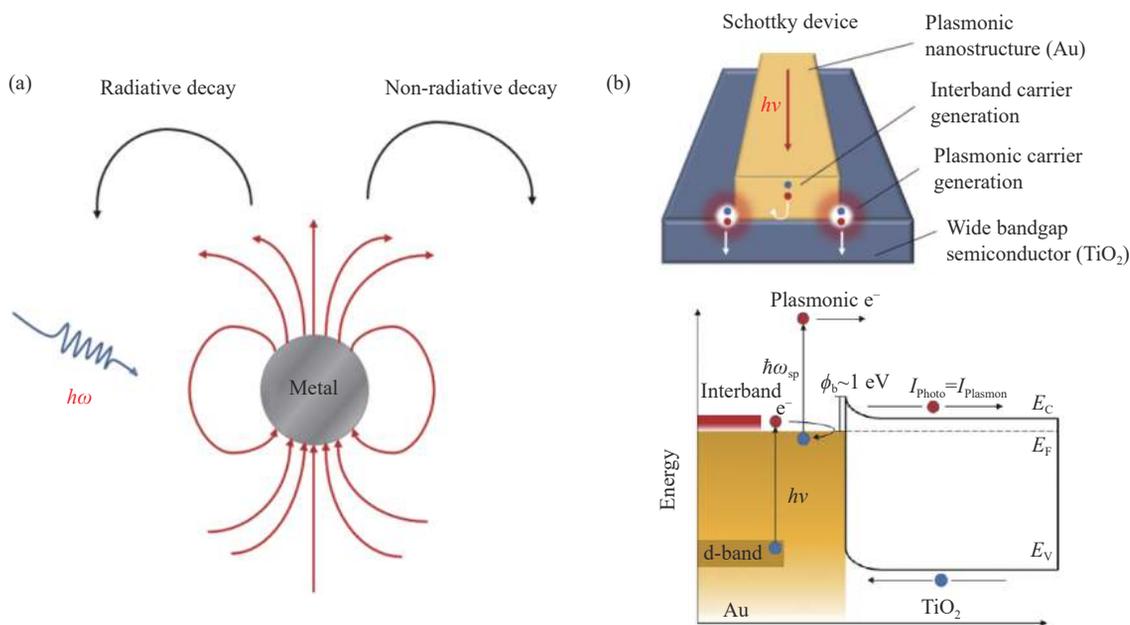


图 3 (a) 表面等离子激元的激励与弛豫<sup>[22]</sup>; (b) 金属-半导体异质结构器件中热电子的产生与输运机理<sup>[22]</sup>

Fig.3 (a) Excitation and relaxation of surface plasmon<sup>[22]</sup>; (b) Generation and transport mechanism of hot electrons in metal-semiconductor heterostructure devices<sup>[22]</sup>

## 2 表面等离子激元纳米结构的增效应用

### 2.1 局域表面等离子激元纳米结构的增效应用

以石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷等材料为代表的二维材料是一种具有原子层厚度的超薄材料,具有光与物质相互作用强、高电子迁移率、带隙可调、可室温工作等特点,因而基于二维材料的探测器是近年

来光电探测器研究的一个热点方向<sup>[2, 23]</sup>。二维材料对入射光的吸收受材料种类、厚度以及吸收波长范围等诸多因素影响,但受限于其自身的超薄厚度,整体上二维材料的光吸收率较低<sup>[23-24]</sup>,这大大限制了其在光电探测领域的发展。局域表面等离子激元结构的近场增强效应可以极大提高纳米结构的光场密度,因此,将 LSP 纳米结构与探测器结合,可以极大地提升探测

材料对光的吸收,从而产生更大的光电流。根据响应度公式  $R=I/P$  ( $R, I, P$  分别为响应度,光电流,光功率),光电流的增大会提高响应度<sup>[1,5]</sup>。对于弱光吸收的二维材料探测器,这种结构有着最为显著的光吸收能力的提升,因而众多研究团队在这一方面开展了大量研究工作<sup>[8,25]</sup>。

金属纳米颗粒与放置于其下的金属膜由于相互作用会形成偶极子,因而两者的间隙内会形成很强的电磁场耦合,光场密度得到几个数量级的提高,极大地提高了间隙内材料的光吸收<sup>[8,25]</sup>。2018年,浙江大学林时胜课题组设计了一种间隙型的单层  $\text{MoS}_2$  光电探测器,如图 4(a) 所示,  $\text{SiO}_2$  包裹的银球与底部的金基底构成间隙,入射光被局域在间隙内并与其中的  $\text{MoS}_2$  产生强烈的相互作用。银球外包裹的  $\text{SiO}_2$  是为了防止银球的氧化。如图 4(b) 所示,相比于普通结

构,这种加装了核壳结构的探测器最终实现了 8.8 倍的光电流提高,在 532 nm 其响应度可达 287.5 A/W,响应时间约为 19 s<sup>[8]</sup>。2019年,孙博等人进一步研究了纳米颗粒的形貌对间隙结构探测器的影响。通过仿真分析了不同的  $\text{SiO}_2$ -银纳米颗粒核壳结构(包括纳米立方体,纳米柱,纳米球)与银膜、氧化铝膜组成的间隙结构下电场的大小和分布,结果表明此时的“热点”区域位于银膜和纳米结构之间,并且银纳米立方体在 520 nm 入射光的激发下电场增幅高出银纳米球和银纳米棒约四个量级<sup>[25]</sup>。在仿真的基础上,该研究团队制备了  $\text{SiO}_2$  包裹的银纳米立方体- $\text{MoS}_2$  探测器,其结构如图 4(c) 所示。在 520 nm 的入射光下,这种间隙结构的探测器的响应度约为 7940 A/W,相比于无纳米结构的  $\text{MoS}_2$  探测器提升了 38 倍<sup>[25]</sup>。图 4(d) 展示了三种不同结构的  $I-V$  曲线,结果从实验上证明

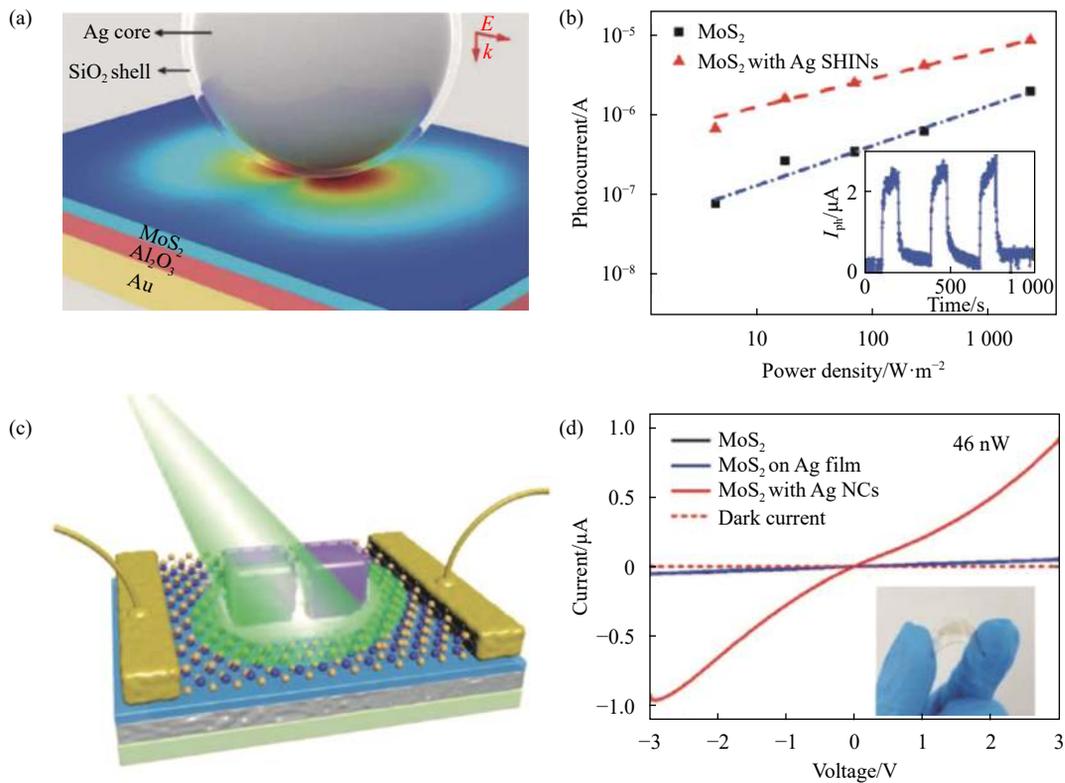


图 4 (a) 银纳米颗粒- $\text{MoS}_2$ -Au 异质结构图<sup>[8]</sup>; (b) 二硫化钼光电探测器沉积银纳米颗粒前后光电流与功率密度间的关系图,附图:532 nm 激光器作为泵浦源下,间隙型等离激元增强  $\text{MoS}_2$  光电探测器的时间响应曲线<sup>[8]</sup>; (c) 银纳米颗粒修饰的二硫化钼探测器的结构示意图<sup>[25]</sup>; (d)  $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoS}_2$ -Ag 膜、以及 Ag 膜- $\text{MoS}_2$ -Ag 纳米立方体间隙结构三种光电探测器的  $I-V$  曲线<sup>[25]</sup>

Fig.4 (a) Schematic of Ag SHINs- $\text{MoS}_2$ -Au hybrid nanostructures<sup>[8]</sup>; (b) Power-density-dependent photocurrent of a  $\text{MoS}_2$  photodetector before and after dropping the Ag SHINs, Inset: The time response of a gap-mode plasmon-enhanced  $\text{MoS}_2$  photodetector at 532 nm laser pump source<sup>[8]</sup>; (c) Schematic of Ag nanoparticle- $\text{MoS}_2$ <sup>[25]</sup>; (d)  $I-V$  characteristics of the PD constructed by pristine  $\text{MoS}_2$  film,  $\text{MoS}_2$  film with underneath Ag film, and the  $\text{MoS}_2$  film in the gap of Ag film and Ag nanocubes<sup>[25]</sup>

了相比于普通 MoS<sub>2</sub> 探测器和 MoS<sub>2</sub>-Ag 膜结构探测器,这种间隙结构的探测器具有更加显著的光电转换能力。上述“gap”结构显著提升了探测器的响应度,但器件响应速度较慢,仍在秒量级。

在阵列化的金属纳米结构中,一方面金属纳米的近场局域效应提高了纳米结构附近的光场密度,另一方面金属纳米颗粒间的耦合效应会提高耦合区域内光场密度。2014 年,哈佛大学 Capasso 课题组提出了一种天线增强型的中红外探测器,其结构如图 5(a) 所示。阵列化的金耦合天线可将自由空间中的光集中到纳米级亚波长天线间隙中,大大增强了石墨烯和光的相互作用。由图 5(b) 可知,相比于没有天线结构的探测器,基于天线结构的石墨烯探测器的响应度提高

了 200 多倍,可达 0.4 V/W,探测波长可远至 4.45 μm<sup>[26]</sup>。2020 年, Li 等人提出了纳米颗粒光栅阵列结构的 MoS<sub>2</sub> 探测器,如图 5(c) 所示,纳米结构由两种不同直径的金球以不同密度阵列化排布组成。该结构结合了纳米颗粒的局域场增强效应与光栅的耦合效应,实现了高效的光电转换,与简单的金纳米颗粒阵列相比,纳米粒子光栅结构的光吸收增加了一倍;在 532 nm 的光照下,与普通器件相比,纳米颗粒光栅 MoS<sub>2</sub> 探测器的光电流增加了 111 倍<sup>[27]</sup>。图 5(d) 显示了两种不同直径的金属纳米颗粒以及纳米颗粒光栅的消光谱。上述金属纳米阵列结构的探测器的响应度得到了两个数量级的提升。

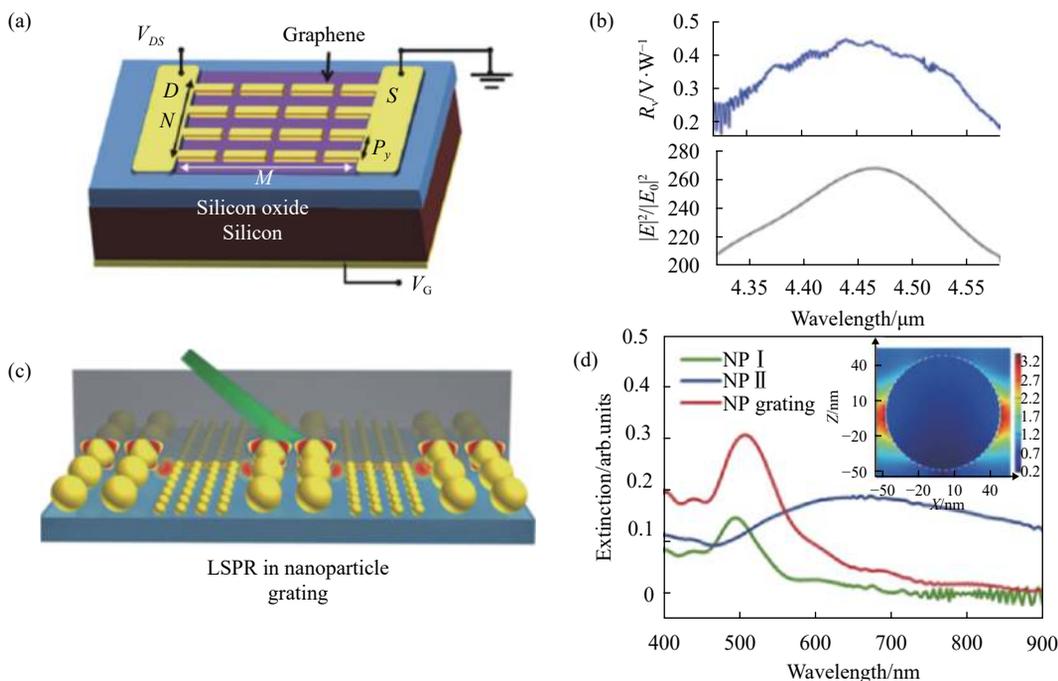


图 5 (a) 硅衬底上金天线结构的石墨烯光电探测器的示意图<sup>[26]</sup>; (b) 波长相关光响应 (上图) 和等离激元天线之间纳米间隙中心的电场强度增强<sup>[26]</sup>; (c) 纳米颗粒光栅/二硫化钼结构光电探测器示意图<sup>[27]</sup>; (d) 纳米颗粒 I、纳米颗粒 II 和纳米颗粒光栅的消光光谱, 插图: 纳米颗粒 I 周围的模拟电场分布<sup>[27]</sup>

Fig.5 (a) Schematic of the antenna-assisted graphene photodetector on a silicon substrate<sup>[26]</sup>; (b) Measured wavelength-dependent photo response (top) and electric field intensity enhancement in the nanogap between the plasmonic antennas<sup>[26]</sup>; (c) Schematic view of the nanoparticle grating/MoS<sub>2</sub> hybrid photodetector<sup>[27]</sup>; (d) Extinction spectra of nanoparticle I, nanoparticle II, and nanoparticle gratings, inset: simulated electric field distribution around nanoparticle I<sup>[27]</sup>

金属纳米的结构、尺寸、材料和周围环境的介电特性共同决定了 SP 纳米结构的共振吸收峰的位置, 调节这些参数可对共振吸收峰进行调谐, 因而可根据需要设计金属纳米结构、调节尺寸来实现不同波段的

选择性增强<sup>[9-10, 28-29]</sup>。香港中文大学许建斌团队通过调节金纳米三角板结构的尺寸, 将等离激元谐振峰调至红外波段。一方面, 由于局域场增强导致光生载流子数目增加; 另一方面, 硅基底与石墨烯之间的肖特

基接触会在界面处形成一个内建电场,在内建电场的作用下,电子(空穴)会进入硅衬底,减少石墨烯中电子-空穴的复合,从而延长光生载流子寿命,提高光电导增益。与普通石墨烯探测器相比,金三角板-石墨烯结构探测器的响应度在 1550 nm 入射光下提升了近 10 倍,可达 83 A/W,响应时间约为 600 ns<sup>[28]</sup>。电子科技大学黄文等人调整金属纳米柱阵列的周期半径、高度等几何参数实现了光响应波长可调的光电探测器,可将谱峰从 0.6 μm 调至 1.2 μm。在波段为 800 nm 时,其响应度可达 7 A/W<sup>[29]</sup>。该课题组又通过调节磁控溅射条件控制纳米颗粒的尺寸,进而将谐振峰调谐至带隙之外所对应的波段,将多层 MoS<sub>2</sub> 光电探测器的光谱响应扩宽至 700~1600 nm。在 980 nm 的入射波长下,MoS<sub>2</sub> 探测器的光电流可显著地从 0.59 nA 提高到 480 nA,最大响应度可达 64 mA/W,并且其响应时间可达 2.4 ms<sup>[30]</sup>。通过调整不同金属纳米结构的形貌尺寸,实现了可见至红外波段特定波长或波长范围内响应度的提升。

## 2.2 表面等离极化激元结构的增效应用

目前报道的 SPPs 增效的研究工作中,最典型的是在探测器器件中集成 SP 光栅。研究表明,通过设计光栅周期、厚度等结构参数,可以控制共振吸收频率以及响应光谱的强度及半高宽。莱斯大学 Sobhani 等人对硅衬底上的金膜进行图案化处理得到光栅结构,通过控制光栅的厚度及光栅的宽度,可以得到具有窄带的电流响应,其半高宽可降至 100 nm 左右,以完成对特定波段范围内入射光的探测<sup>[19]</sup>。保持光栅的厚

度及间隔不变,增大光栅的宽度光谱响应会发生红移,因此可在波长 1295~1635 nm 间调节选择性吸收响应的范围<sup>[19]</sup>。苏州大学吴凯等人采用金属-绝缘体-金属结构对窄带探测的光谱响应进行了进一步探索,引入二氧化钛来构造肖特基势垒,设计了被 SiO<sub>2</sub> 包覆的银光栅-二氧化钛-银的结构。基于“五步法”的仿真过程优化了光栅周期、光栅厚度、光栅宽度以及底层银介质的厚度,在通信波段(1550 nm)处得到了半高宽约为 10 nm 的极窄的响应峰,无偏置电压的情况下其响应度可达 0.1 mA/W。这里的五步仿真过程是指相比于金属-半导体中热电子传输的三步过程,增加了热电子穿过氧化物、热电子到达二氧化钛/银界面并以高概率传输到底部银层这两步<sup>[31]</sup>。

除此之外,有研究表明,利用 SPPs 结构的偏振敏感的特性,可实现偏振敏感探测,图 6 展示了几种常见的偏振敏感探测器结构<sup>[18, 32-32]</sup>。如图 6(a) 所示, Afshinmanesh 等人将多种不同形状(四种不同方向的线性狭缝和两种螺旋狭缝)的金狭缝与硅基底结合,可以实现对不同偏振态入射光的响应,以确定光束的完整偏振状态<sup>[18]</sup>。在 830 nm 的探测波长下,实验结果显示线性和圆偏振态的对比度分别为 25 和 1.13<sup>[18]</sup>。2018 年, Mirzaee 等人介绍了一种基于等离激元热电子效应的偏振敏感探测器,这种金纳米膜-ITO 结构的探测器可区分线偏振光和圆偏振光。在入射光角度为 30° 方向和 90° 的方向分别测量了线偏振光和圆偏振光的相关特性,结果发现 s 偏振光具有最强的光响应。2020 年,周等人以 Si/SiO<sub>2</sub> 为衬底,通过聚焦离子

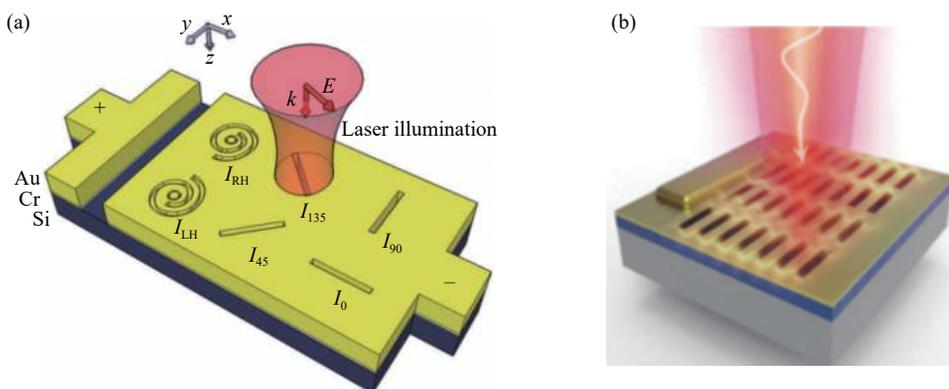


图 6 (a) 具有六种不同形状的等离激元狭缝结构的硅基肖特基探测器<sup>[18]</sup>; (b) 纳米孔阵列偏振结构<sup>[32]</sup>

Fig.6 (a) Schematic diagram of six different shaped plasmonic slit structures Si-based Schottky detector<sup>[18]</sup>; (b) Polarization structure of nanopore array<sup>[32]</sup>

束刻蚀在金膜上刻出纳米孔阵列,制备出纳米光电二极管,其结构如图 6(b) 所示。这种多孔纳米结构的金膜既可以用作电极,又可用作吸收光的天线,并具有偏振探测的能力,横向偏振的光对应的光电流不到沿纵向偏振的光所对应光电流的 50%<sup>[32]</sup>。

### 2.3 表面等离激元异质结构中热电子效应的增效应用

与其他等离激元效应所不同的地方在于,借助等离激元热电子效应,可实现突破半导体带隙限制的光吸收,极大地拓展器件的光响应能力<sup>[21, 33]</sup>。此外,热电子的产生也提高了光电流的大小,由此可提高探测器的响应度。由于热电子产生和弛豫的时间非常短(百飞秒量级),使其能够被再次与空穴复合之前就利用,可以降低在弛豫和复合等过程中的能量损失,实现快速响应<sup>[22, 34]</sup>。

利用 SP 热电子效应,可在响应波长范围和响应时间方面显著提升探测性能。典型的方式是将 SP 结构集成在探测器表面,SP 衰减产生的热电子注入半导体材料,然后在电极作用下沿水平方向完成收集。如图 7(a) 所示,范德堡大学 Wang 等人设计了一种双层 MoS<sub>2</sub>-金等离激元天线结构的近红外光电探测

器。图 7(b) 所示为入射光为偏振光时,不同偏置电压下天线结构探测器的响应度与波长之间的关系。在近红外光(1070 nm)的激发下,天线结构表面产生等离激元共振现象,然后经过非辐射衰减产生能量大于 MoS<sub>2</sub> 与 Au 之间肖特基势垒的热电子,热电子注入 MoS<sub>2</sub> 形成了光电流<sup>[21]</sup>。探测器的响应度和探测波长范围均得以提高,在 1070 nm 处响应度可达 5.2 A/W。为了区分探测器的光电转换机制,将 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 插入 MoS<sub>2</sub> 和金纳米天线之间,此时该结构中的光电流几乎为 0,这说明热电子的注入是光电流产生的主要原因<sup>[21]</sup>。北京大学方哲宇课题组通过模板溅射法制备了大面积的金纳米颗粒-MoS<sub>2</sub> 异质结,通过飞秒泵浦探针光谱仪测得等离激元衰减产生的热电子在异质结构上的转移时间约为 200 fs。基于这种异质结构的探测器将具有超快的光响应时间<sup>[34]</sup>。复旦大学陈宜方研究团队利用电子束光刻技术在硅纳米线上制得周期性的金长方体天线。金-硅异质界面处产生的热电子能够高效地注入硅纳米线中,显著提高了产生光电流的大小,使得在 1150 nm 入射光的照射下,响应度达到 94.5 mA/W<sup>[35]</sup>。

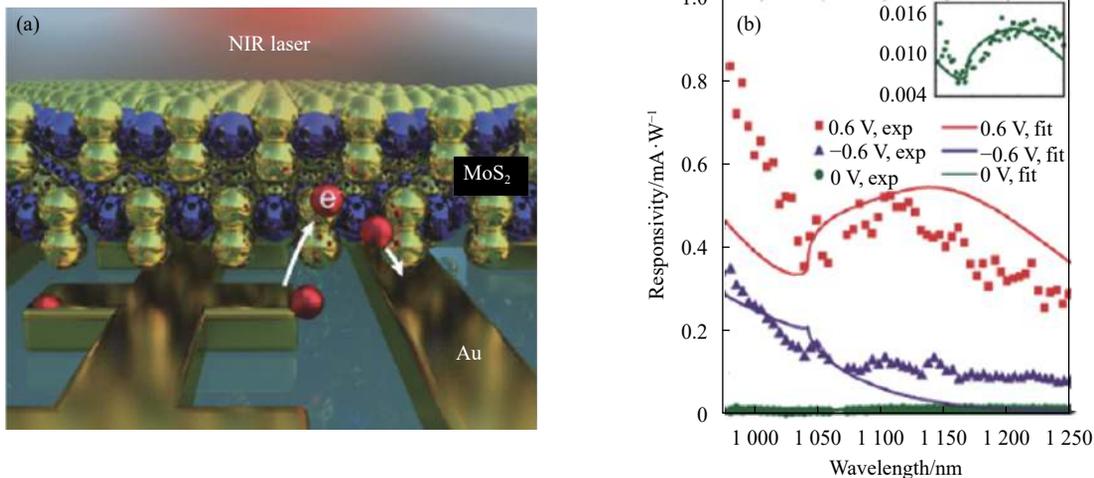


图 7 (a) 等离激元天线器件的结构图<sup>[21]</sup>; (b) 偏振光入射下,响应度和波长在不同偏压下的关系<sup>[21]</sup>

Fig.7 (a) Schematic diagram of the plasmonic antenna device<sup>[21]</sup>; (b) Relationship between responsivity and wavelength at different biased voltage under incident polarization light<sup>[21]</sup>

此外,还有研究表明,利用电极-半导体材料-电极结构可构造具有垂直隧穿效果的 SP 增强探测器。2017 年,北京大学方哲宇团队制备的具有隧穿效应的

金纳米颗粒-石墨烯探测器的电流沿垂直方向<sup>[36]</sup>。该探测器的具体结构如图 8(a) 所示,这种顶电极-石墨烯-底电极的垂直结构大大缩短了电极之间的距离,

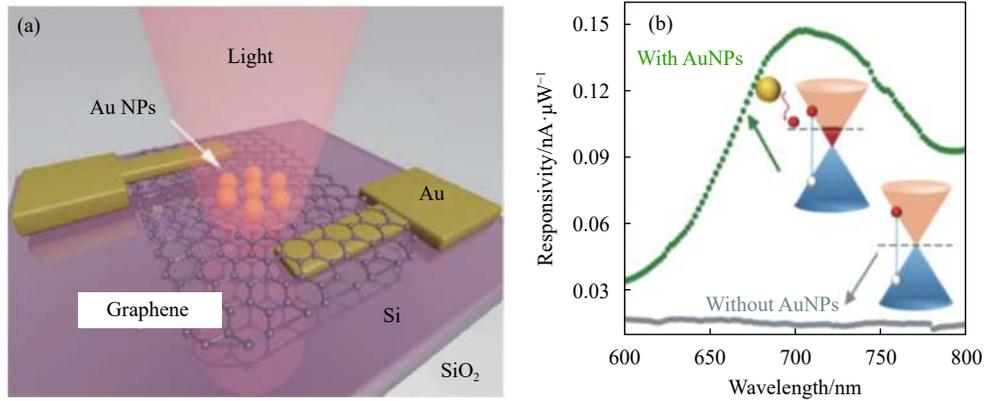


图 8 (a) 垂直金-石墨烯异质结构光电探测器原理图<sup>[36]</sup>; (b) 沉积金纳米颗粒前后石墨烯光电探测器的响应度与波长间的关系<sup>[36]</sup>

Fig.8 (a) Schematic of a vertical gold-graphene heterostructure photodetector <sup>[36]</sup>; (b) Wavelength-dependent responsivity of a graphene photodetector before and after dropping the Au nanoparticles <sup>[36]</sup>

减小了光电器件的尺寸,从而为实现快速响应提供一种新的途径。金纳米颗粒处产生的热电子注入石墨烯中,然后在顶部和底部电极之间电压的作用下隧穿石墨烯,最终进入底部电极完成探测。图 8(b) 显示了沉积金属纳米颗粒前后探测器响应度的变化,在入射光 710 nm 处具有金属纳米结构的探测器的最大响应度可达 0.16 mA/W<sup>[36]</sup>。

从材料角度考虑,相比于 Au, Ag 中产生的热电子更窄的能量分布使其具有更高的光电转换效率,同时 TiO<sub>2</sub> 导带内的高密度态可以实现快速的电子注入。因此相比于其他基于热电子效应的探测器,基于 Ag/TiO<sub>2</sub> 肖特基结的热电子光电探测器具有更高的探测能力和较快的响应速度<sup>[37]</sup>。中国科学院合肥物质科学研究院费光涛等人制备了一种多孔银膜-TiO<sub>2</sub> 肖特基结热电子探测器。该探测器在 450 nm 的入射光下,响应时间约为 112 μs,响应度可达 7.4 mA/W<sup>[37]</sup>。通常由于 Ag 的功函数太低,无法与 n 型 TiO<sub>2</sub> 形成肖特基接触,为解决这一问题,通过化学吸附在 TiO<sub>2</sub> 表面的氧以改变 TiO<sub>2</sub> 表面能带,进而使得 TiO<sub>2</sub> 与 Ag 形成肖特基接触。

表 1 从响应度、响应时间、响应波长范围等性能参数方面介绍了各种增效原理 (LFE、SPIHE) 的特点。基于 LFE 效应的探测器产生了更强的光电流,在响应度方面有了极大的提高,最高可达 10<sup>4</sup> A/W 量级。基于 LFE 效应的响应时间多集中在毫秒、秒量级,仍有很大的提升空间。通过不同形貌的 LSP 结构

与不同探测材料的结合,LFE 效应的响应波段可覆盖可见光至中红外波段。基于 SPIHE 效应的探测器具

**表 1 等离激元纳米结构增强探测器的各项性能参数以及增效原理**

**Tab.1 Parameters and enhance mechanism of the surface plasmon enhanced nanostructure detector**

Enhance effect	Responsivity	Response time	Wavelength	Ref.
LFE	287.5 A·W <sup>-1</sup>	19 s	532 nm	[8]
LFE	7 940 A·W <sup>-1</sup>	1.6 s	520 nm	[25]
LFE	~0.4 V·W <sup>-1</sup>	-	4 450 nm	[26]
LFE	38.57 A·W <sup>-1</sup>	27 ms	532 nm	[27]
LFE	7 A·W <sup>-1</sup>	-	600-1 200 nm	[29]
LFE	64 A·W <sup>-1</sup>	2.4 ms	700-1 600 nm	[30]
LFE	2.97 × 10 <sup>4</sup> A·W <sup>-1</sup>	18 s	610 nm	[38]
LFE	518 mA·W <sup>-1</sup>	-	3.4 μm	[39]
LFE	1 050 A·W <sup>-1</sup>	300 ms	590 nm	[40]
LFE	0.38 A·W <sup>-1</sup>	-	1 550 nm	[41]
LFE	0.386 A·W <sup>-1</sup>	-	860 nm	[42]
SPIHE	385.2 A·W <sup>-1</sup>	-	1 070 nm	[21]
SPIHE	83 A·W <sup>-1</sup>	600 ns	1 550 nm	[28]
SPIHE	94.5 A·W <sup>-1</sup>	1.3 ms	1 150 nm	[35]
SPIHE	0.16 mA·W <sup>-1</sup>	-	550-850 nm	[36]
SPIHE	7.4 A·W <sup>-1</sup>	112 μs	450 nm	[37]
SPIHE	8.17 mA·W <sup>-1</sup>	-	1 200-1 475 nm	[43]

有快速的响应时间(可达微秒级),这可归因于热电子较快的产生时间和弛豫时间。SPIHE 效应也提高了产生光电流的大小,因此该效应可提高探测器的响应度,其响应度最高可达几百 A/W。此外, SPIHE 效应可突破带隙限制,拓展了响应波长的范围。

### 3 结 论

文中从局域场增强效应、热电子效应以及金属纳米结构的偏振敏感、窄带吸收等方面介绍了表面等离激元纳米结构在光电探测器增效方面的应用。结果表明,表面等离激元纳米结构可实现突破衍射极限的纳米聚焦,可将探测器的响应度实现两个数量级的提升,拓展响应波长并实现百纳秒级别的快速响应。此外表面等离激元纳米结构可在可见至中红外的波段实现光电探测器的探测增强。然而,当前基于等离激元纳米结构的多种物理效应有待进一步深入研究,未来通过调控散射吸收比、优化工艺等有望实现探测器各项性能的进一步提升。

#### 参考文献:

- [1] Buscema M, Island J, Groenendijk D, et al. Photocurrent generation with two-dimensional van der waals semiconductors [J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(11): 3691-3718.
- [2] Long M, Wang P, Fang H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1803807.
- [3] Tan C, Mohseni H. Emerging technologies for high performance infrared detectors [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(1): 169-197.
- [4] Jon A S, Edward S B, Cai W, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 193-204.
- [5] Tali S, Zhou W. Multiresonant plasmonics with spatial mode overlap: overview and outlook [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(7): 1199-1225.
- [6] Lu X, Rycenga M, Skrabalak S, et al. Chemical synthesis of novel plasmonic nanoparticles [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2009, 60: 167-192.
- [7] Huang J, Luo L. Low-dimensional plasmonic photodetectors: recent progress and future opportunities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(8): 1701282.
- [8] Wu Z, Yang J, Nallappagar K M, et al. Gap-mode surface-plasmon-enhanced photoluminescence and photoresponse of MoS<sub>2</sub> [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(27): 1706527.
- [9] Nikolai G K, Lev A D. Optical properties and biomedical applications of plasmonic nanoparticles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, 111(1): 1-35.
- [10] Ndokoye P, Li X, Zhao Q, et al. Gold nanostars: Benzyltrimethylammonium chloride-assisted synthesis, plasmon tuning, SERS and catalytic activity [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 462(1): 341-350.
- [11] Zhang X, Zhou H, Shan F, et al. Synthesis of silver nanoplate based two-dimension plasmonic platform from 25 nm to 40 nm: growth mechanism and optical characteristic investigation in situ [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(88): 55680-55690.
- [12] Qian H, Xu M, Li X, et al. Surface micro/nanostructure evolution of Au-Ag alloy nanoplates: synthesis, simulation, plasmonic photothermal and surface-enhanced raman scattering applications [J]. *Nano Research*, 2016, 9(3): 876-885.
- [13] Li Z, Butun S, Aydin K, et al. Ultranarrow band absorbers based on surface lattice resonances in nanostructured metal surfaces [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(8): 8242-8248.
- [14] Li Z, Palacios E, Butun S, et al. Visible-Frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1615-1621.
- [15] Tong J, Suo F, Ma J, et al. Surface plasmon enhanced infrared photodetection [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, 2(1): 180026.
- [16] Wang H, Li S, Ai R, et al. Plasmonically enabled two-dimensional material-based optoelectronic devices [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(15): 8095-8108.
- [17] Vladimir A Z, Andrei A, Radu M, et al. Boosting local field enhancement by on-chip nanofocusing and impedance-matched plasmonic antennas [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(12): 8148-8154.
- [18] Brongersma M L, Afshinmanesh F, Cai W, et al. Measurement of the polarization state of light using an integrated plasmonic polarimeter [J]. *Nanophotonics*, 2012, 1(2): 125-129.
- [19] Sobhani A, Knight M W, Wang Y, et al. Narrowband photodetection in the near-infrared with a plasmon-induced hot electron device [J]. *Nature Communication*, 2013, 4(1): 1643.
- [20] Brongersma M, Halas N, Nordlander P, et al. Plasmon-induced

- hot carrier science and technology [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(1): 25-34.
- [21] Mirzaee S, Lebel O, Nunzi J M, et al. Simple unbiased hot-electron polarization-sensitive near-infrared photodetector [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(14): 11862-11871.
- [22] Zheng B, Zhao H, Manjavacas A, et al. Distinguishing between plasmon-induced and photoexcited carriers in a device geometry [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7797.
- [23] Xia F, Wang H, Xiao D, et al. Two-dimensional material nanophotonic [J]. *Nature Photonics*, 2014, 4(2): 899-907.
- [24] Li Q, Lu J, Gupta P, et al. Engineering optical absorption in graphene and other 2D materials: advances and applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(20): 1900595..
- [25] Sun B, Wang Z, Liu Z, et al. Tailoring of silver nanocubes with optimized localized surface plasmon in a gap mode for a flexible MoS<sub>2</sub> photodetector [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(26): 1900541.
- [26] Yao Y, Shankar R, Rauter P, et al. High-responsivity mid-infrared graphene detectors with antenna-enhanced photocarrier generation and collection [J]. *Nano Letter*, 2014, 14(7): 3749-3754.
- [27] Li J, Nie C, Sun F, et al. Enhancement of the photoresponse of monolayer MoS<sub>2</sub> photodetectors induced by a nanoparticle grating [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(7): 8429-8436.
- [28] Chen Z, Li X, Wang J, 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.
- [29] Liu Y, Huang W, Gong T, et al. Ultra-sensitive near-infrared graphene photodetectors with nanopillar antennas [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(44): 17459-17464.
- [30] Guo J, Li S, He Z, et al. Near-infrared photodetector based on few-layer MoS<sub>2</sub> with sensitivity enhanced by localized surface plasmon resonance [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 483(1): 1037-1043.
- [31] Wu K, Zhan Y, Wu S, et al. Surface-plasmon enhanced photodetection at communication band based on hot electrons [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(6): 063101.
- [32] Zhou S, Chen K, Guo X, et al. Antenna-coupled vacuum channel nano-diode with high quantum efficiency [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(3): 1495-1499.
- [33] Lee K Y, Lee H, Lee C, et al. Hot-electron-based solar energy conversion with metal-semiconductor nanodiodes [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2016, 28(25): 254006.
- [34] Yu Y, Ji Z, Zu S, et al. Ultrafast plasmonic hot electron transfer in Au nanoantenna/MoS<sub>2</sub> heterostructures [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(35): 6394-6401.
- [35] Feng B, Zhu J, Lu B, et al. Achieving infrared detection by all-Si plasmonic hot-electron detectors with high detectivity [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(7): 8433-8441.
- [36] Du B, Lin L, Liu W, et al. Plasmonic hot electron tunneling photodetection in vertical Au-graphene hybrid nanostructures [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(1): 1600148.
- [37] Gao X, Fei G, Xu S, et al. Porous Ag/TiO<sub>2</sub>-schottky-diode based plasmonic hot-electron photodetector with high detectivity and fast response [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(7): 1247-1254.
- [38] Jing W, Ding N, Li Y, et al. Ag nanoparticles modified large area monolayer MoS<sub>2</sub> phototransistors with high responsivity [J]. *Optical Express*, 2017, 25(13): 14565-14574.
- [39] Chen X, Lu X, Deng B, et al. Widely tunable black phosphorus mid-infrared photodetector [J]. *Nature Communication*, 2017, 8(1): 1672.
- [40] Liu Y, Huang W, Chen W, et al. Plasmon resonance enhanced WS<sub>2</sub> photodetector with ultra-high sensitivity and stability [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 481(1): 1127-1132.
- [41] Wang L, Zhang Y, Wang B, et al. High-performance infrared Ge-based plasmonic photodetector enhanced by dual absorption mechanism [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(9): 096104.
- [42] Feng B, Zhu J, Xu C, et al. All-Si photodetectors with a resonant cavity for near-infrared polarimetric detection [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 39.
- [43] Qi Z, Zhai Y, Wen L, et al. Au nanoparticle-decorated silicon pyramids for plasmon-enhanced hot electron near-infrared photodetection [J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(27): 275202.



**第一作者简介：**何伟迪 (1996-), 男, 硕士生, 主要从事二维材料、红外光电探测器件、表面等离子激元金属纳米材料以及表面等离子激元纳米结构在探测增强等方面的研究。硕士期间, 参与了多项研究项目, 发表中国发明专利一篇。Email: 1264959147@qq.com



**导师简介：**张彤 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士。2005 年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”, 美国光学学会会员、美国矿物、金属及材料学会会员、美国陶瓷学会会员、美国金属学会会员、中国光学学会光电子技术专业委员会委员、中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会委员。研究领域包括表面等离子激元金属纳米光电器件及功能材料、微纳光电集成功能芯片及器件、微波光子器件及芯片技术、新型低维红外半导体光电器件以及光学惯性器件及传感芯片等。先后承担科技部国家重点研发计划、国家自然科学基金、863 计划、预研基金等数十项国家和省部级项目, 共发表 SCI 论文 140 余篇, 总引用次数 2000 余次。授权美国发明专利 4 项, 中国发明专利 50 项。Email: tzhang@seu.edu.cn