

文章编号 1004-924X(2018)03-0517-06

基于等离激元热电子效应的光电晶体管 制备及其特性

陈广甸, 翟雨生, 李裕培, 王琦龙*

(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)

摘要:为了解决典型宽禁带半导体光电探测器件的工作波段限制材料禁带宽度的问题,对基于表面等离激元热电子效应的光电晶体管进行了制备和光电性能研究,提出一种采用重掺杂的硅片作为背栅极、二氧化硅(SiO_2)氧化层作为绝缘层,且能利用等离激元热电子效应的光电晶体管,有望实现响应光谱的调控。利用热退火方法在绝缘层表面修饰金纳米颗粒,并结合射频溅射、物理掩模和真空热蒸镀的方法实现了热电子效应铟镓锌氧化物(IGZO)光电晶体管。器件的光学和电学性能测试结果表明:修饰金纳米颗粒的光电晶体管在 658 nm 红光入射下产生明显的光电响应,外加 90 V 栅极偏压时,光电流提升约为 2.2 倍。金纳米颗粒修饰的等离激元热电子结构有效调控了该型晶体管的响应光谱范围,不受材料禁带宽度的限制,而且晶体管的背栅调控进一步放大光电流,提高了器件的量子效率。

关键词:光电探测;等离激元;热电子;禁带宽度;铟镓锌氧化物

中图分类号: TN364.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0517

Fabrication and properties of plasmonic hot-electron phototransistor

CHEN Guang-dian, ZHAI Yu-sheng, LI Yu-pei, WANG Qi-long*

(Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization,
School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding author, E-mail: northrockwql@seu.edu.cn

Abstract: Windows of traditional wide band gap photodetectors are limited by the band gap of the semiconducting material used. In order to address this issue, the photoelectric properties of a plasmonic hot-electron phototransistor were fabricated and investigated. We have developed a plasmonic hot-electron phototransistor using a heavily doped silicon wafer as the back gate and insulating layer. Gold nanoparticles (AuNPs) were fabricated on the surface of the insulator via thermal annealing and the plasmonic hot-electron indium gallium zinc oxide (IGZO) phototransistor was developed. We investigated the optical and electrical properties of the phototransistor. The results revealed that the presence of AuNPs increased the photocurrent by a factor of 2.2 under a gate voltage of 90 V as compared to the IGZO phototransistor without AuNPs. The plasmonic hot-electron structure can effec-

收稿日期:2017-09-28;修订日期:2017-10-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61372030, No. 91333118, No. 51120125001, No. 61571124);NSAF 基金资助项目(No. U1730113);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20171365);国家高新技术研究开发计划(No. 2015AA016301);111 计划(No. B07027)

tively adjust the spectral response range of the phototransistor. Regulation of the back gate voltage was observed to amplify the photocurrent and improve the quantum efficiency of the device.

Key words: photoelectronic detection; plasmonic; hot-electron; band gap; Indium Gallium Zinc Oxide(IGZO)

1 引言

目前,以氮化镓(GaN)、氧化锌(ZnO)、二氧化钛(TiO₂)以及铟镓锌氧化物(IGZO)为代表的宽禁带半导体由于其优异的光电特性和化学稳定性,在发光器件、透明器件、光探测器件以及光催化等领域得到了广泛的应用^[1-4]。但受本身材料禁带宽度的限制,基于宽禁带半导体的器件或者催化剂只能在紫外光波段工作或者响应,使其发展与应用受到限制。

表面等离子激元光子学的发展有望突破上述限制,表面等离子激元独特的局域光学特性令其在光电探测、光催化和偏振探测等研究领域得到了广泛的应用^[5-8]。将能够激发等离激元的微纳结构应用于经典光电探测器件,一方面增强光吸收使器件的外量子效率得到提高^[9];另一方面等离激元共振中以非辐射衰减方式激发产生的热电子,若其能量高于界面间的肖特基势垒,在能量弛豫耗散之前,电子可以在金属/半导体界面上注入到半导体材料中被收集或者转换^[10]。高能热电子的存在使半导体材料可收集能量小于其禁带宽度的光子,半导体光电器件的设计制备有望突破材料禁带宽度的限制^[11]。

目前,热电子光电探测及热电子光催化的研究工作在国内外均有进行^[12-14],但是量子效率及响应度普遍比较低。为了提高光响应度,部分研究人员提出了多种方案,包括完美吸收体结构^[15-16]、超材料结构^[17]、金属镜面结构^[18]等,用以提高等离激元结构的光吸收率和热电子注入效率。本文提出含有金纳米颗粒的光电晶体管,采用磁控溅射、热退火、热蒸发、物理掩模等工艺方法制备,利用金纳米颗粒实现等离激元共振诱导产生高能热电子突破禁带宽度限制,晶体管的栅极调控用于放大光电流,进一步提升器件的量子效率。

2 光电晶体管的制备及测试

2.1 样品制备

本研究利用重掺杂的氧化硅片首先制备出经典光电晶体管,重掺杂的硅(N型,电阻率:0.001~0.02 Ω·cm)作为背栅,上层的SiO₂氧化层(厚度约为280 nm)作为绝缘层。首先对样品表面进行严格清洗,具体过程如下:在丙酮、酒精和去离子水中分别超声清洗15 min,接着利用高纯氮气吹干,最后把吹干的样品放置于紫外臭氧清洗机中进一步除杂处理。后续实验分为两组(流程如图1所示):一组先在氧化硅片上利用溅射方法沉积金膜,并在空气中进行500 °C高温退火形成金纳米颗粒;另一组洗净的样品与该修饰金颗粒的样品同时放入磁控溅射仪腔室中制备IGZO薄膜,当真空度降至 1×10^{-3} Pa时,向腔室内充入氩气(流量为50 mL/min、纯度为99.999%),先预溅射10 min除去铟镓锌氧化物(IGZO,禁带宽度约为3.5 eV)靶表面的杂质,移开挡板进行IGZO薄膜的溅射沉积,溅射功率为100 W,溅射时间为700 s,基底温度为300 °C,溅射压强为0.5 Pa,利用椭圆仪测得薄膜厚度约为50 nm。

最后利用物理掩模和热蒸发法制备金属源漏电极,电极间沟道长度约为200 μm,宽度约为2 mm。为获得更准确的实验结果,制备IGZO薄膜和源漏电极时两组实验条件完全相同。

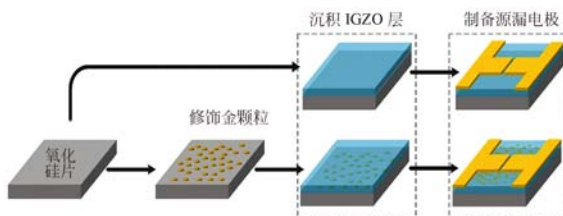


图1 有无金纳米颗粒修饰的IGZO光电晶体管制备流程

Fig. 1 Fabrication procedures of IGZO phototransistors with and without AuNPs

2.2 测试方法

首先利用扫描电子显微镜观察薄膜表面形貌和金纳米颗粒的形貌特征;使用紫外-可见分光光度计分别测量 IGZO 薄膜及金纳米颗粒修饰的 IGZO 薄膜的吸收光谱;利用多功能数字源表并结合电学探针台测试原型器件的输出和转移特性曲线。研究中,形貌表征由 FEI 公司场发射扫描电子显微镜完成;紫外-可见吸收光谱仪为 LabTech 754 系列紫外-可见分光光度计,试验中测试波段为 300~800 nm;光电测试使用 Keithley 2400 型多功能电源电表。

3 测试结果及讨论

图 2 分别显示了制备的 IGZO 薄膜和金纳米颗粒的表面形貌。从图 2(a)中可以看出,利用磁控溅射沉积的 IGZO 薄膜表面呈现颗粒状堆积,颗粒尺寸很小,薄膜表面很平整。图 2(b)中金纳米颗粒不均匀地分散在基底表面,平均尺寸(直径)在 30~40 nm。利用热退火修饰金纳米颗粒是简单便捷的方法,制备结果也基本满足要求。

图 3 是以上两组有无修饰金纳米颗粒的 IGZO 薄膜归一化紫外-可见吸收光谱(彩图见期刊电子版),其中红线为 IGZO 薄膜的紫外-可见吸收曲线,蓝线为修饰有金纳米颗粒的 IGZO 薄膜的紫外-可见吸收曲线。测试结果显示,普通 IGZO 薄膜在入射波长小于 400 nm 时,其吸收较高,接近紫外波段时,吸收得到明显的提升,但波长大于 400 nm 时吸收明显很弱。

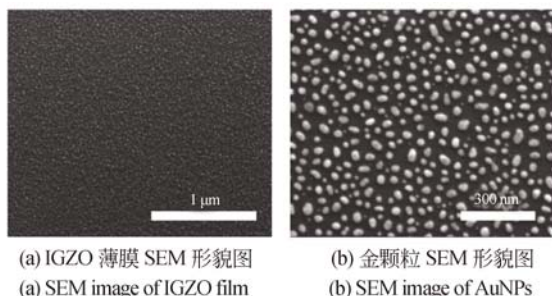


图 2 IGZO 薄膜和金纳米颗粒的形貌表征

Fig. 2 Surface morphology of IGZO film and AuNPs

由于 IGZO 是一种禁带半导体,其禁带宽度约为 3.5 eV,入射光能量大于该值才能激发价带

电子到导带,体现出有效光吸收。修饰有金纳米颗粒的 IGZO 薄膜不仅在波长小于 400 nm 有相似的光吸收,而且在波长为 600 nm 处也有明显的吸收峰。这是由于金颗粒尺寸在 30~40 nm,在红光波段照射下激发了金颗粒的局域等离子共振,增强了光吸收,而且由于颗粒尺寸不均匀导致吸收峰比较宽^[19]。这个吸收峰归因于金纳米颗粒的存在提高了 IGZO 薄膜在此波段的吸收,因此本研究初步实现了 IGZO 薄膜的吸收光谱调节。

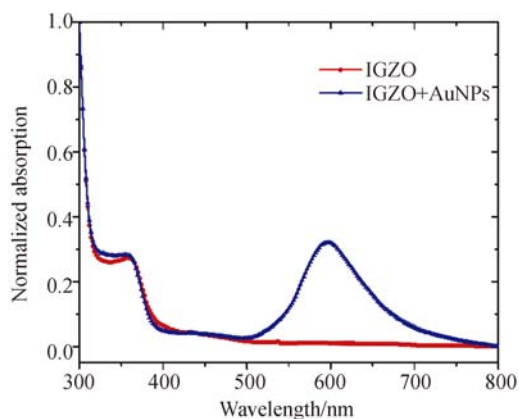
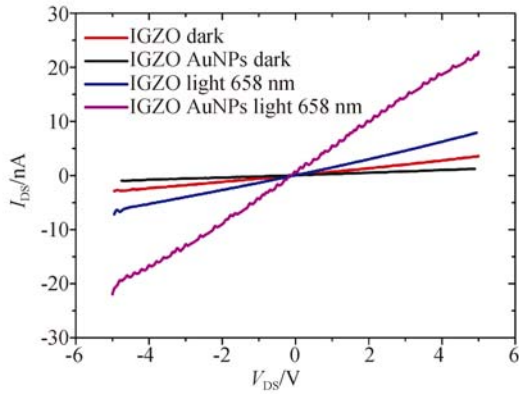


图 3 IGZO 薄膜的紫外-可见吸收光谱

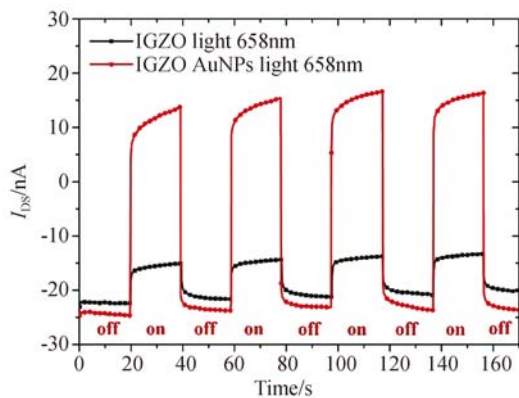
Fig. 3 UV-vis absorption spectra of IGZO film and IGZO film decorated with AuNPs

本研究分别测试了器件在暗态和波长 658 nm 光源照射情况下的电流-电压($I-V$)特性曲线(图 4(a)),从中可以得出:在暗态电流方面,修饰金纳米颗粒的器件比无颗粒修饰的器件小;而在光电流方面,658 nm 红光照射下修饰金纳米颗粒的器件明显大于无纳米颗粒修饰的器件。IGZO 为 n 型半导体,电子是多子,在 IGZO 表面吸附的 O_2 分子会捕获自由电子形成 O_2^- 离子,这样就会在 IGZO 表面形成一层很薄的耗尽层,此时 IGZO 的电导率会降低^[20]。当在 IGZO 表面修饰金纳米颗粒之后,由于金纳米颗粒与 IGZO 接触区域很小, O_2 分子吸附状态并没有发生改变。但是由于金的功函数比 IGZO 的大,这样就会使 IGZO 中自由电子向 Au/IGZO 界面处传输,界面处就会形成肖特基势垒,IGZO 表面处的耗尽层也随之变宽,IGZO 的电导率继续降低,从而使得有金纳米颗粒修饰的 IGZO 的暗电流低于无修饰的 IGZO 的暗电流。当 IGZO 薄膜受到光照射时,由于本身的质量问题,薄膜会吸收较少一部分的

光子形成电子空穴对,空穴会不断向界面处迁移,中和 O^{2-} 离子释放 O_2 分子,在薄膜内部留下大量自由电子,这些自由电子在外电场作用下被外电路收集形成光电流。由于入射光激发了金纳米颗粒的等离激元共振并以非辐射衰减的方式将能量传递给自由电子形成热电子,如果热电子的能量足够高就会越过 Au/IGZO 间的肖特基势垒注入到 IGZO 中,这样会进一步提高薄膜的电导率。这也是在红光 658 nm 照射下修饰有金纳米颗粒的 IGZO 薄膜的光电流明显高于未修饰纳米颗粒的 IGZO 薄膜的光电流的重要原因。图 4(b) 所示的电流-时间 (I - T) 曲线进一步显示了金纳米颗粒对 IGZO 薄膜光电响应的影响。在源漏电极 5 V 偏压的情况下,有金纳米颗粒修饰的 IGZO 薄膜



(a) 电流-电压 (I - V) 曲线
(a) I - V characteristics of phototransistors



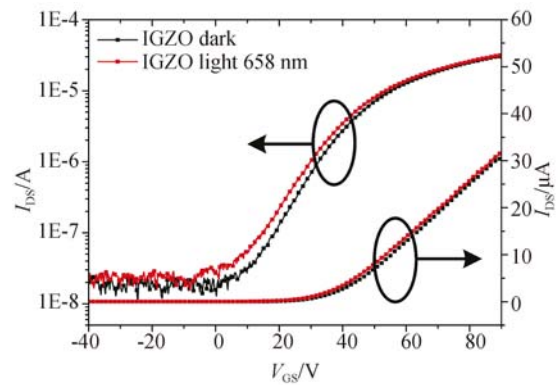
(b) 电流-时间 (I - T) 曲线
(b) I - T characteristics of phototransistors

图 4 有无金颗粒修饰的 IGZO 光电晶体管电学性能测试

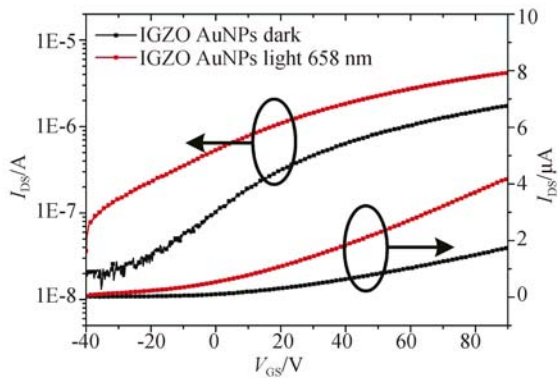
Fig. 4 Electrical properties of IGZO phototransistors decorated with and without AuNPs

的光电流约为 23 nA,明显高于未修饰金纳米颗粒的 IGZO 薄膜的光电流(约为 7 nA)。

图 5 为有无金纳米颗粒修饰的光电晶体管分别在暗态和红光 658 nm 照射下的转移特性曲线。从图中可以看出,无颗粒修饰的 IGZO 光电晶体管的源-漏电流 (I_{DS}) 随着栅极电压 (V_{GS}) 的正向增大而增大,出现了明显开态电流和关态电流特性,这是 n 型场效应管典型的转移特性,说明该 IGZO 光电晶体管的基本电学特性良好,开关电流比达到了 $10^3 \sim 10^4$ 。金纳米颗粒修饰的 IGZO 光电晶体管的转移特性曲线与前者相比有明显差异,说明金纳米颗粒对于器件的性能有重要



(a) 无金纳米颗粒修饰的光电晶体管
(a) Phototransistors without AuNPs



(b) 有金纳米颗粒修饰的光电晶体管
(b) Phototransistors with AuNPs

图 5 有无金纳米颗粒修饰的光电晶体管分别在暗态和红光 658 nm 照射下的转移特性曲线 ($V_{DS} = 5$ V)

Fig. 5 Transfer characteristics of IGZO phototransistors decorated without and with AuNPs under dark and red light (658 nm) illuminations, respectively ($V_{DS} = 5$ V)

的影响。通过对比发现,无金纳米颗粒修饰的IGZO在658 nm红光的照射下其光电流随栅极电压的增大而与暗态下电流保持平衡,两者并无太大差异。修饰金纳米颗粒之后光电流随栅极电压的增大而增大,而且与暗电流差异越来越大,这也进一步说明栅极电压的增大使得金纳米颗粒激发的热电子在内建电场的作用下注入IGZO中,更多电子被收集,从而间接地证明了等离子激元热电子的存在。然而,从图4(b)中可以看出,栅压调控的源-漏电流并没有前者大,而且要小一个量级,这是由于本文修饰的金纳米颗粒位于绝缘层和有源层之间,外加栅压调控时只有部分电压会作用在有源层上,减弱了调控的效果。

4 结 论

本文介绍了基于IGZO的光电晶体管的制备工艺流程,描述了利用磁控溅射、热退火、热蒸发、

物理掩模等薄膜工艺制备光电晶体管的方法,然后利用SEM表征薄膜和金纳米颗粒的表面形貌,获得了其表面形貌特征。再分别对两组实验样品进行光学特性研究,利用紫外-可见分光光度计获取了它们的吸收光谱,实验结果表明,修饰金纳米颗粒的IGZO薄膜的吸收光谱得到了调节,相比于无颗粒修饰的薄膜,新增了600 nm的吸收峰。最后对器件的电学性能进行了研究,实验结果表明,修饰金纳米颗粒的IGZO薄膜的暗电流比未修饰金纳米颗粒的IGZO薄膜的暗电流要小,但是在658 nm红光照射下光电流有明显的提升。外加栅压对光电流的调控效果也很明显,间接证明了等离子激元热电子的存在。本文将经典光电晶体管与金属微纳结构结合,利用等离子激元优越的光学特性,实现了光电器件吸收波段的调节,突破了禁带宽度的限制;同时利用晶体管的背栅电压调控进一步放大光电流,提高热电子的注入效率,实现了器件量子效率的提高。

参考文献:

- [1] KHAN M A, SHATALOV M, MARUSKA H P, *et al.*. III-nitride UV devices[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(10): 7191-7206.
- [2] KEIS K, VAYSSIERES L, LINDQUIST S E, *et al.*. Nanostructured ZnO electrodes for photovoltaic applications [J]. *Nanostructured Materials*, 1999, 12(1-4): 487-490.
- [3] ZHOU J, GU Y D, HU Y F, *et al.*. Gigantic enhancement in response and reset time of ZnO UV nanosensor by utilizing Schottky contact and surface functionalization [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(19): 191103.
- [4] FANG Y R, JIAO Y, XIONG K L, *et al.*. Plasmon enhanced internal photoemission in antenna-spacer-mirror based Au/TiO₂ nanostructures [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(6): 4059-4065.
- [5] BRONGERSMA M L, HALAS N J, NORDLANDER P. Plasmon-induced hot carrier science and technology [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(1): 25-34.
- [6] ATWATER H A, POLMAN A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 205-213.
- [7] SHOKRI KOJORI H, YUN J H, PAIK Y, *et al.*. Plasmon field effect transistor for plasmon to electric conversion and amplification[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 250-254.
- [8] 黎永前, 郭勇君, 苏磊, 等. 矩形块微纳结构材料在红外波段的偏振光吸收[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2998-3003.
- LI Y Q, GUO Y J, SU L, *et al.*. Polarization-dependent absorption of rectangular-block metamaterials in infrared region [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2998-3003. (in Chinese)
- [9] MUBEEN S, LEE J, LEE W R, *et al.*. On the plasmonic photovoltaic [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6066-6073.
- [10] CLAVERO C. Plasmon-induced hot-electron generation at nanoparticle/metal-oxide interfaces for photovoltaic and photocatalytic devices[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 95-103.
- [11] KNIGHT M W, SOBHANI H, NORDLANDER P, *et al.*. Photodetection with active optical antennas[J]. *Science*, 2011, 332(6030): 702-704.
- [12] SIL D, GILROY K D, NIAUX A, *et al.*. Seeing is believing: hot electron based gold nanoplasmonic optical hydrogen sensor[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(8): 7755-7762.
- [13] CUI J B, LI Y J, LIU L, *et al.*. Near-infrared plasmonic-enhanced solar energy harvest for highly

- efficient photocatalytic reactions[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6295-6301.
- [14] PESCAGLINI A, MARTIN A, CAMMI D, *et al.*. Hot-electron injection in Au nanorod-ZnO nanowire hybrid device for near-infrared photodetection [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6202-6209.
- [15] ZHAN Y H, WU K, ZHANG CH, *et al.*. Infrared hot-carrier photodetection based on planar perfect absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4261-4264.
- [16] 刘媛媛, 熊广, 王杨, 等. 多谐振 U 形缝隙纳米天线设计及吸收特性[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(8): 2155-2164.
- LIU Y Y, XIONG G, WANG Y, *et al.*. Design of multi resonant U shaped slots nano-antenna and their absorption properties [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2155-2164. (in Chinese)
- [17] LI W, VALENTINE J. Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3510-3514.
- [18] FANG Y R, JIAO Y, XIONG K L, *et al.*. Plasmon enhanced internal photoemission in antenna-spacer-mirror based Au/TiO₂ nanostructures[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(6): 4059-4065.
- [19] WILLETS K A, VAN DUYN R P. Localized surface Plasmon resonance spectroscopy and sensing[J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2007, 58: 267-297.
- [20] LIU K W, SAKURAI M, LIAO M Y, *et al.*. Giant improvement of the performance of ZnO nanowire photodetectors by Au nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(46): 19835-19839.

作者简介:



陈广甸(1993—),男,江苏盐城人,2015年于湖南科技大学获得学士学位,主要从事等离子体微纳光电器件的研究。
E-mail: gd_chen@seu.edu.cn

导师简介:



王琦龙(1976—),男,安徽蚌埠人,教授,博士生导师,1999年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2002年、2005年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微纳电子器件、光电系统设计与工程、真空光电器件的研究。E-mail: northrockwql@seu.edu.cn