

包埋 Pt 纳米粒子对金属-半导体-金属结构 ZnO 紫外光电探测器性能的影响

裴佳楠 蒋大勇 田春光 郭泽萱 刘如胜 孙龙 秦杰明 侯建华 赵建勋 梁庆成 高尚

Effect of Pt NPs in the film on the performances of ZnO-based metal-semiconductor-metal structured ultraviolet photodetector

Pei Jia-Nan Jiang Da-Yong Tian Chun-Guang Guo Ze-Xuan Liu Ru-Sheng Sun Long Qin Jie-Ming Hou Jian-Hua Zhao Jian-Xun Liang Qing-Cheng Gao Shang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 067802 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.067802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.067802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属有机物化学气相沉积生长 GaN 薄膜的室温热电特性研究

Room-temperature thermoelectric properties of GaN thin films grown by metal organic chemical vapor deposition

物理学报.2015, 64(4): 047202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.047202>

中子辐照对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管器件电特性的影响

Effect of neutron irradiation on the electrical properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

物理学报.2014, 63(4): 047202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.047202>

新型 AlGaInP 系发光二极管饱和特性与寿命的研究

Investigation of the saturation characteristic and lifetime of the novel AlGaInP lightemitting diodes

物理学报.2014, 63(3): 037201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.037201>

原子层沉积 Al₂O₃/n-GaN MOS 结构的电容特性

Capacitance characteristics of atomic layer deposited Al₂O₃/n-GaN MOS structure

物理学报.2013, 62(19): 197203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.197203>

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管漏电流退化机理研究

Degradation mechanism of leakage current in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

物理学报.2013, 62(15): 157202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.157202>

包埋Pt纳米粒子对金属-半导体-金属结构ZnO 紫外光电探测器性能的影响*

裴佳楠 蒋大勇[†] 田春光 郭泽萱 刘如胜 孙龙 秦杰明 侯建华
赵建勋 梁庆成 高尚

(长春理工大学材料科学与工程学院, 长春 130022)

(2014年9月10日收到; 2014年10月18日收到修改稿)

利用射频磁控溅射设备制备ZnO薄膜, 最终制备ZnO/Pt纳米粒子/ZnO结构的金属-半导体-金属型紫外光电探测器. 研究了Pt纳米粒子处在ZnO薄膜层中的不同深度对金属-半导体-金属型紫外光电探测器响应性能的影响. 结果表明, 探测器的响应度随着Pt纳米粒子在ZnO薄膜层中所处深度的增大而升高. 在60 V偏压下, 包埋Pt最深的探测器在波长365 nm处取得响应度最大值 $1.4 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$, 包埋有Pt探测器的响应度最大值为无Pt纳米粒子探测器响应度最大值的7倍. 结合对ZnO薄膜表面的表征及探测器各项性能的测试, 得出包埋Pt纳米粒子增强器件的响应性能可归因于表面等离子体增强散射.

关键词: ZnO薄膜, 紫外光电探测器, 表面等离子体, Pt纳米粒子

PACS: 78.66.-w, 72.80.Ey, 73.20.Mf, 73.63.-b

DOI: 10.7498/aps.64.067802

1 引言

近年来, 宽禁带半导体材料ZnO的研究已经引起了人们广泛的关注. ZnO是一种新型的直接宽带隙II-VI族化合物半导体材料, 其室温禁带宽度为3.37 eV. ZnO原材料资源丰富、价格低廉、无毒无污染、制备工艺简单. ZnO具有高熔点、高热稳定性及化学稳定性等优点, 是制作紫外光电探测器的理想材料^[1-3]. 近些年, ZnO紫外光电探测器已从单晶薄膜发展到复杂的纳米结构^[4-8]. 长期以来, 增强ZnO紫外光电探测器的性能一直是主要问题之一, 许多研究致力于解决这个问题^[9-13]. 近些年, 表面等离子体基础科学的重要性及其实际应用已经受到了人们的广泛重视^[14-18]. 表面等离子体可以增强入射光的散射, 从而增强光吸收^[19-21], 这使得人们可以利用表面等离子体增强散射来获得高性能的探测器. 如2013年, Shen等^[14]制备出表面等离子体增强型的ZnO同质结发光设备; 2010

年, Harry和Albert^[22]研究了薄膜的相同深度处不同粒径Ag纳米粒子(nanoparticles, NPs)对探测器响应性能的影响; 2013年, 陈洪宇^[23]探讨了在MgZnO薄膜的相同深度处不同密度Ag NPs对探测器响应性能的影响. 但是, Pt NPs在ZnO薄膜层中的不同深度对金属-半导体-金属(MSM)型紫外光电探测器响应性能影响的相关研究仍很匮乏. 本文使用射频磁控溅射法制备ZnO薄膜, 并将Pt NPs内埋于ZnO薄膜不同深度处, 利用这种薄膜结构制备紫外光电探测器. 通过合理设计优化器件结构, 利用Pt NPs的表面等离子体增强散射效应增强器件对入射光的吸收, 从而大幅提高了探测器的响应性能.

2 实验

使用射频磁控溅射法制备ZnO薄膜, 最终制备SiO₂衬底ZnO/Pt NPs/ZnO结构的MSM型紫外光电探测器. 靶材是纯度为99.99%的ZnO陶瓷靶,

* 吉林省科技发展计划项目(批准号: 2012011121, 20120435, 20130204033GX, 20140101052JC)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: dayongjiangcust@126.com

溅射气体为高纯的氩气和氧气混合气体, 氩氧气流比为 45 : 15, 溅射气压为 3 Pa, 衬底温度为 400 °C, 溅射功率为 120 W, 溅射速率为 1.2 nm·min⁻¹. 制备过程如下: 第一步, 如图 1 所示, 分别制备 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 五组不同的 ZnO 薄膜样品, 它们的溅射生长时间依次为 3, 2.75, 2.5, 2.25, 2 h; 第二步, 以第一步为基础分别在 S(1), S(2), S(3), S(4) 四组 ZnO 薄膜表面上溅射沉积 20 s Pt NPs, 粒径约为 10 nm; 第三步, 在已沉积的 Pt NPs 的 S(1), S(2), S(3), S(4) 四组样品表面采用与第一步相同的 ZnO 生长条件, 分别溅射生长时间依次为 0.25, 0.5, 0.75, 1 h ZnO 薄膜; 最后在相同的条件下, 在五组样品表面生长相同厚度的 Au 膜, 通过光刻工艺, 制备出指长为 500 μm, 指间间距为 5 μm 的 MSM 型紫外光电探测器, 如图 2 所示.

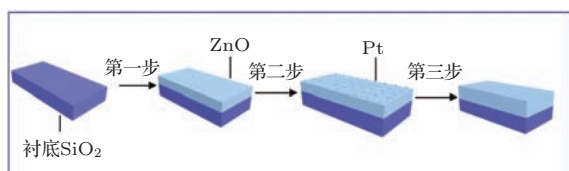


图 1 (网刊彩色) 五组探测器 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 的成膜过程

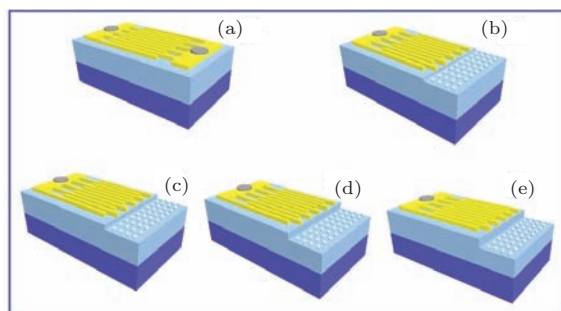


图 2 (网刊彩色) (a), (b), (c), (d), (e) 分别为制备的五组探测器 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 的结构图 它们的薄膜结构分别为: S(0) 为 ZnO (3 h); S(1) 为 ZnO (2.75 h)/Pt NPs/ZnO (0.25 h); S(2) 为 ZnO (2.5 h)/Pt NPs/ZnO (0.5 h); S(3) 为 ZnO (2.25 h)/Pt NPs/ZnO (0.75 h); S(4) 为 ZnO (2 h)/Pt NPs/ZnO (1 h)

3 结果与讨论

图 3 为 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 五组 ZnO/Pt NPs/ZnO 结构的 X 射线衍射 (XRD) 图谱. 由图中可以观察到五组样品只在 34.4° 附近出现一个衍射峰, 且为六角结构 ZnO 的 (002) 衍射峰, 五组样品的半高宽均小于 0.5°. 这表明所制备的五组样品的薄膜为六角结构, 具有 *c* 轴择优取向, 而相对较窄的 XRD 半高宽则表明五组样品的薄膜

的结晶质量较好. 从图中可以看出, 五组样品薄膜的峰位、半高宽重合, 说明五组样品薄膜生长过程中条件控制精准, 薄膜质量差别很小, 有利于对后期制备的探测器的各项性能进行对照讨论.

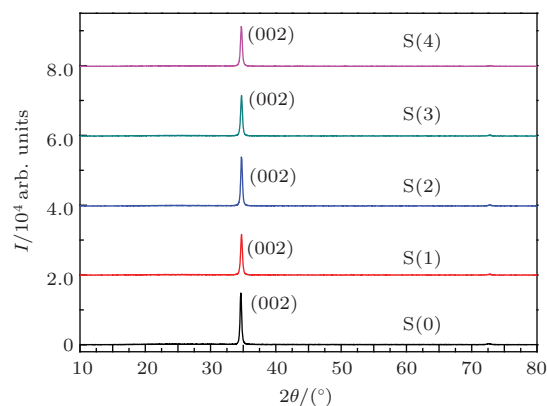


图 3 (网刊彩色) 五组器件薄膜系统的 XRD 图谱

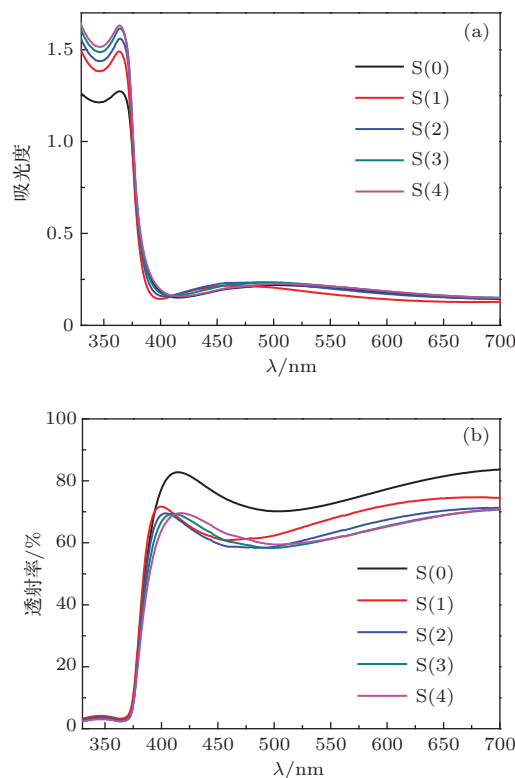


图 4 (网刊彩色) (a), (b) 分别为五组器件薄膜系统的吸收透射光谱

图 4 为 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 五组 ZnO/Pt NPs/ZnO 结构的薄膜系统吸收透射光谱. 从图 4 (a) 中可以看出, 五组样品的吸收峰均在 365 nm 左右, 且无 Pt NPs 的 S(0) 组吸收峰值最小, 吸收峰值大小为 S(1) > S(2) > S(3) > S(4) > S(0). 从图 4 (b) 中观察到 Pt NPs 的存在对薄膜的

透射率影响很大, 有 Pt NPs 的薄膜透射率很低. 由图谱可以看出, Pt NPs 的存在可显著增强光吸收能力, 尤其是在紫外光波段. 有 Pt NPs 的 S(1), S(2), S(3), S(4) 四组样品在紫外波段的吸收能力随着 Pt NPs 在 ZnO 薄膜层中所处深度的增大而升高.

图 5 为 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 五组 MSM 结构探测器的 I - V 特性曲线. 在 10 V 偏压下, 测得的 S(0) 器件暗电流约为 1.0 nA, 而 S(1), S(2), S(3), S(4) 四组暗电流也均约为 1.0 nA, 说明 Pt NPs 没有引起器件暗电流的明显增大. 这是由于器件 ZnO 薄膜层可被理解为一个体电阻, 当在体电阻的上表面接通电路时, 由于体电阻内部电阻比外表面大, 所以电流必然从体电阻的上表面通过, 因此, Pt NPs 所处位置对器件暗电流的影响小.

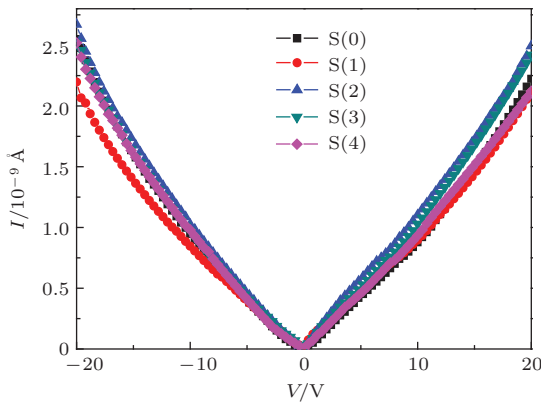


图 5 (网刊彩色) 五组探测器的 I - V 特性曲线

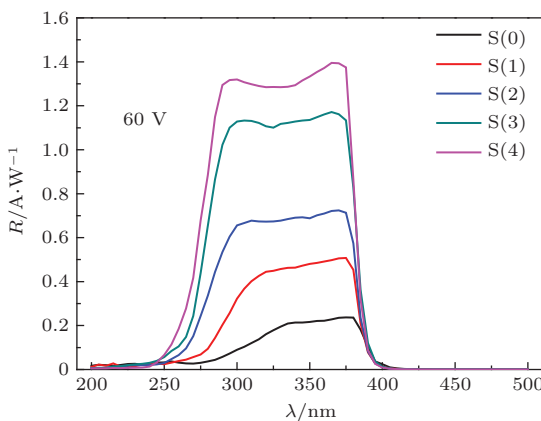


图 6 (网刊彩色) 五组探测器在 60 V 偏压下的光谱响应特性曲线

图 6 为 S(0), S(1), S(2), S(3), S(4) 五组紫外探测器在 60 V 偏压下的光谱响应特性曲线. 从图中可明显看出, 无 Pt NPs 的 S(0) 组响应度 (R) 值在紫外光波段最小. 有 Pt NPs 的 S(1), S(2), S(3),

S(4) 四组样品在紫外波段的响应度随着 Pt NPs 在 ZnO 薄膜层中所处深度的增大而升高, 即 $S(1) > S(2) > S(3) > S(4)$. 这一规律与图 3 中吸收率的大小规律一致.

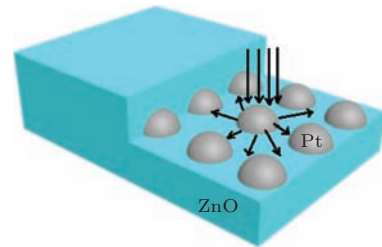


图 7 (网刊彩色) Pt NPs 在 ZnO 层中的散射效应

表面等离子体散射效应的机理已在已有文献中做了描述 [24], 而对于包埋 Pt NPs 增强了探测器光响应性能的现象, 合理的解释是表面等离子体散射增强了薄膜光吸收, 从而改善了探测器的响应性能. 图 7 显示了一个 Pt NPs 在 ZnO 层中的散射效应. 表面等离子体散射效应将会产生大的散射横截面 [25], 从而增强入射光的散射, 使更多的光散射在 ZnO 薄膜中, 增加了 ZnO 表层的光吸收, 促进了更多电子空穴对的产生, 因此器件的光响应性能得到改善.

根据米氏定理, 散射横截面 C_{sca} 可以由方程 (1) 计算 [25]:

$$C_{sca} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 |\alpha|^2, \quad (1)$$

(1) 式中 λ 是入射光波长 $\pi = 3.14$, α 是球形和椭球形金属纳米粒子极化率参数, 可以由方程 (2) 计算:

$$\alpha = 3V \left[\frac{\frac{\epsilon_p}{\epsilon_m} - 1}{\frac{\epsilon_p}{\epsilon_m} + 2} \right], \quad (2)$$

(2) 式中 V 是 Pt NPs 的体积, ϵ_p 和 ϵ_m 分别为金属粒子和 ZnO 的介电函数, 因此, 在特定波长下, ϵ_p 和 ϵ_m 为常数. α 正比于纳米颗粒的体积 (V), 因此 C_{sca} 与 NPs 的体积平方成正比. 根据方程 (2), 大尺寸比小尺寸的纳米粒子散射效率更高. 但 S(1), S(2), S(3), S(4) 四组器件中包埋的 Pt NPs 是等数量、等粒径的, 因此四组器件中所包埋的 Pt NPs 的散射横截面 C_{sca} 是相等的. 如图 8 所示, 当有光源照射在有 Pt NPs 探测器时, 射入到 ZnO 薄膜层中的光线会在 Pt NPs 表面发生大量散射, 散射出的光线会在介质中其他的 Pt NPs 表面再次发生散射,

散射的光线将会在介质中获得一定角度继续传播,从而实际上增加了光程长度 L .包埋有Pt NPs的四组器件的实际光程长度分别为 L_1, L_2, L_3, L_4 ,随着Pt NPs包埋深度的增加,光程长度将随着增加,即: $L_1 < L_2 < L_3 < L_4$.而有Pt NPs的四组器件的光程长度与无Pt NPs S(0)探测器 L_0 相比,必然为 $L_0 < L_1 < L_2 < L_3 < L_4$.光程长度增加使ZnO表层对光吸收增强,促进了更多的电子空穴对产生,从而器件获得了更高的响应性.所以探测器的响应度随着Pt NPs层在ZnO薄膜层中所处深度的增大而升高.

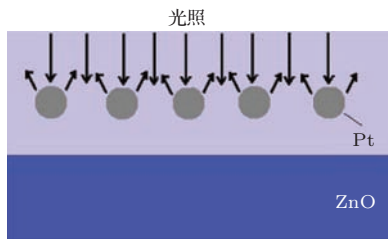


图8 (网刊彩色) 入射光线会在Pt NPs表面发生大量散射

4 结 论

为了提高ZnO基紫外光电探测器的响应性能,本文利用射频磁控溅射技术沉积ZnO薄膜,并制备了ZnO/Pt NPs/ZnO结构的MSM型紫外光电探测器.将ZnO薄膜与表面等离子体结合起来制备的器件的响应性能得到改善,同时,其暗电流未有大的改变.通过详细分析ZnO薄膜的XRD图谱、吸收透射光谱和器件的 I - V 特性曲线以及光谱响应特性曲线,可以得出探测器优良的响应性能归因于Pt NPs表面等离子体散射增强效应.同时,MSM型紫外光电探测器的响应度随着Pt NPs在ZnO薄膜层中所处深度的增大而升高,器件的响应度最大值提高7倍,这说明ZnO/Pt NPs/ZnO结构的设计对于提高紫外光电探测器的探测性能有很大的帮助,可促进一种技术成熟的、性能优异的紫外光电探测器走出实验室,应用到实际生活中.

参考文献

[1] Hahn E E 1951 *J. Appl. Phys.* **22** 855

- [2] Razeghi M, Rogalski A 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 7433
- [3] Liu K W, Sakurai M, Aono M 2010 *Sensors-Basel.* **10** 8604
- [4] Qin J M, Tian L F, Zhao D X, Jiang D Y, Cao J M, Ding Y, Guo Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 107307 (in Chinese) [秦杰明, 田立飞, 赵东旭, 蒋大勇, 曹建明, 丁摇, 郭摇 2011 物理学报 **60** 107307]
- [5] Wu P, Zhang J, Li X F, Chen L X, Wang L, Lü J G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 018101 (in Chinese) [吴萍, 张杰, 李喜峰, 陈凌翔, 汪雷, 吕建国 2013 物理学报 **62** 018101]
- [6] Jiang D Y, Shan C X, Zhang J Y, Lu Y M, Yao B, Zhao D X, Zhang Z Z, Shen D Z, Yang C L 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 025106
- [7] Liu M J, Kim H K 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 173
- [8] Cao M M, Zhao X R, Duan L B, Liu J R, Guan M M, Guo W R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047805
- [9] Yu J, Shan C X, Huang X M, Zhang X W, Wang S P, Shen D Z 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 305105
- [10] Chen Y, Ko H J, Hong S K, Yao T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 559
- [11] Xue S W, Zu X T, Zhou W L, Deng H X, Xiang X, Zhang L, Deng H 2008 *J. Alloys Compd.* **448** 21
- [12] Li M, Anderson W, Chokshi N, Deleon R L, Tompa G 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 053106
- [13] Ali G M, Chakrabarti P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 031116
- [14] Shen H, Shan C X, Qiao Q, Liu J S, Li B H, Shen D Z 2013 *J. Mater. Chem. C* **1** 234
- [15] Ren Y D, Hao S J, Qiu Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 147302 (in Chinese) [任艳东, 郝淑娟, 邱忠阳 2013 物理学报 **62** 147302]
- [16] Kwon M K, Kin J Y, Kim B H, Park I K, Cho C Y, Byeon C C, Park S J 2008 *Adv. Mater.* **20** 1253
- [17] You J B, Zhang X W, Zhang S G, Yin Z G, Wang J X, Yin Z G, Tan H R, Zhang W J, Chu P K, Cui B, Wowchak A M, Dabiran A M, Chow P P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 201102
- [18] Chang D E, Sørensen A S, Demler E A, Lukin M D 2007 *Nat. Phys.* **3** 807
- [19] Bohren C F 1998 *In Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (2nd Ed.) (New York: Wiley-Interscience) p93
- [20] Stuart H R, Hall D G 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 5663
- [21] Stuart H R, Hall D G 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3815
- [22] Harry A A, Albert P 2010 *Nat. Mater.* **9** 205213
- [23] Chen H Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈洪宇 2013 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [24] Steven S 2011 *Phys. Today* **64** 39
- [25] Li D B, Sun X J, Song H, Li Z, Chen Y R, Hong J, Miao G Q 2012 *Adv. Mater.* **24** 845

Effect of Pt NPs in the film on the performances of ZnO-based metal-semiconductor-metal structured ultraviolet photodetector*

Pei Jia-Nan Jiang Da-Yong[†] Tian Chun-Guang Guo Ze-Xuan Liu Ru-Sheng Sun Long
Qin Jie-Ming Hou Jian-Hua Zhao Jian-Xun Liang Qing-Cheng Gao Shang

(School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(Received 10 September 2014; revised manuscript received 18 October 2014)

Abstract

In this paper, by a radio frequency magnetron sputtering equipment, the ZnO/Pt nanoparticles/ZnO thin film structure is fabricated on a SiO₂ substrate via three-step. And the metal-semiconductor-metal (MSM) structured ultraviolet (UV) photodetectors are built up. It is studied that the Pt nanoparticles in different depths of the layer of ZnO thin film affect the photoresponse performances of the MSM ultraviolet photodetector. The results show that the responsivity of the detector increases as Pt nanoparticles in ZnO thin film layers augment with the depth increasing. The responsivity of device is measured under 60 V bias, its photoresponse peak is at 365 nm, and the peak photoresponse is 1.4 A·W⁻¹, which is enhanced by 7 times that of the photodetector without Pt NPs. Considering the performance analyses of ZnO films and the photodetectors, it is clear that the excellent performances of the detector with Pt NPs in the film can result from the scattering of Pt NPs.

Keywords: ZnO films, ultraviolet photodetector, surface plasmon, Pt nanoparticles

PACS: 78.66.-w, 72.80.Ey, 73.20.Mf, 73.63.-b

DOI: 10.7498/aps.64.067802

* Project supported by the Technology Research and Development Program of Jilin Province, China (Grant Nos. 201201121, 20120435, 20130204033GX, 20140101052JC).

[†] Corresponding author. E-mail: dayongjiangcust@126.com