文章编号:1001-5078(2009)05-0468-05　　·综述与评论·

ZnO 基紫外探测器及关键技术研究

范晓玲[1],刘俊成[1],刘云燕[2]
(1. 山东理工大学材料科学与工程学院,山东 淄博 255049;2. 山东理工大学物理与光电信息学院,山东 淄博 255049)

摘　要:对 ZnO 基紫外光探测器的原理、结构、特点进行了论述,并对探测器制备过程中的关键技术进行了探讨。

关键词:ZnO;紫外探测器;光电导;肖特基势垒;p-n 结
中图分类号:TN36　　**文献标识码**:A

Research of ZnO-based UV detectors and key technologies

FAN Xiao-ling[1], LIU Jun-cheng[1], LIU Yun-yan[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;
2. School of Physics and Optoelectronic Information, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: ZnO has been regarded as a promising material for UV detector due to its predominant optical and electrical properties recently. The principle, the structure and the characteristics of several types of ZnO-based UV detectors are introduced. Moreover, the influencing factors to the manufacturing process of detectors are also be discussed.

Key words: ZnO; UV detectors; photoconductive; Schottky barrier; p-n junction

1　引　言

近年来,人们越来越多地关注紫外光的辐射与测量,对紫外探测技术和器件的需求日益增长。ZnO 是一种直接的宽带隙半导体材料,室温禁带宽度为 3.37eV,激子复合能高达 60meV[1]。ZnO 薄膜在紫外区具有高的光电导特性,与 GaN,SiC 等其他宽带隙材料相比具有化学和热稳定性好,原料易得,电子诱生缺陷低,成膜性强、薄膜的外延生长温度低、易于找到晶格匹配的衬底材料等优点,有利于制备高性能的紫外探测器[2]。此外,ZnO 基紫外探测器在苛刻的物理和化学环境中具有很高的稳定性,性能可靠,且构造简单、体积小。因此,ZnO 基紫外探测器的研究逐渐成为近年来紫外探测器领域研究中的热点之一。

2　ZnO 基紫外光探测器的原理、结构及特点

光电探测器是一种把光辐射信号转变为电信号的器件,其工作原理是基于光辐射与物质的相互作用所产生的光电效应。按照器件的构造,ZnO 基光电探测器可分为光电导型紫外光电探测器和光伏型紫外光电探测器两种,光伏型紫外探测器又分为:p-n 结型、p-i-n 结型、肖特基势垒型。

2.1　光电导型紫外光探测器

ZnO 基紫外光电导探测器的基本原理是能量足够的紫外光的光子作用于 ZnO 基半导体薄膜上,由于本吸收和杂质吸收,产生非平衡光生载流子,引起 ZnO 基半导体的电导率增大。外加电压作用下,在探测器输出回路中产生光电流或光电压,基本结构如图 1 所示。

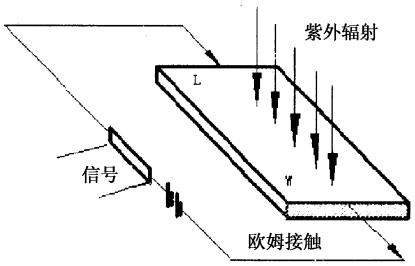

图 1　紫外光电导探测器

光电导紫外光光电探测器是目前品种最多的探

作者简介:范晓玲(1984 -),女,研究生,主要从事光电信息材料与器件的研究。E-mail:fxling2007@163.com
收稿日期:2008-10-28

测器。不仅有 Au-ZnO-Au 结构[3-4]、Al-ZnO-Al 结构[5-6]的紫外光电导探测器,赵鹏[7]等人还在体单晶 ZnO 的 Zn 极性面和 O 极性面上制备了体晶 ZnO 基 Pt/ZnO/Pt 结构的紫外光导探测器,此外 Soci. C.[8]进行了 ZnO 纳米线紫外光电导探测器的研究,制备了 ZnO 基纳米线可见盲区紫外光电探测器。Xu[6]等在石英衬底上沉积了 ZnO 薄膜,使用剥离技术制作平面叉指 Al 电极指宽及指间距均为 3μm,指长为 500μm 获得紫外光电导探测器,5V 偏压下的暗电流为 38μA,光响应度为 18A/W,探测器的上升时间为 100ns,下降时间为 1.5μs,器件响应速度的提升,但制备器件的暗电流较大。器件的响应速度提升是由于是所制备的膜结晶度较高和光学特性较好,载流子的迁移率较高,且指间距比之前的探测器小。Liu K W[4]等用同样方法在石英衬底上制备了 ZnO 薄膜,并用蒸镀法沉积了 Au 叉指电极,制备了 MSM 结构的光电导型探测器,但器件的暗电流较低,在 3V 偏压下为 250nA,此外,探测器显示出快速的光响应,上升时间为 20ns,下降时间为 10μs,器件的性能更加优良。ZnO 纳米线紫外光电导探测器[8]内部增益高达 10^8,响应时间范围从 10^{-9} 到 10^2s,上升时间为 20ns,下降时间为 10s,探测器在 1ns 的时间内就开始显示出高的效率。纳米线探测器高响应、低消耗为探测器领域开创了新的时代。

2.2 光伏型紫外光电探测器

利用半导体的光伏效应制作的光探测器称为光伏探测器。其基本原理是光照产生电子-空穴对被内建电场分离,形成与入射光功率大小相关的光生电动势。根据内建电场形成的结势垒的不同,光伏探测器又可分为 p-n 结、p-i-n 结、肖特基势垒等形式。

2.2.1 p-n 结型紫外光探测器

未掺杂的 ZnO 由于本征 Zn 间隙和 O 空位,呈现 n 型导电。本征施主缺陷引起的自补偿效应和 p 型掺杂杂质在 ZnO 中的溶解度很低,因此难以生长稳定的、重复性好的 p 型 ZnO 薄膜。这就限制了 p-n 型同型异质结探测器的研究。较常见的是在 n 型 ZnO 和其他 p 型材料构成异质结。

Alivov[9]等在 p 型 6H-SiC 上制作出 n-ZnO/p-SiC 结型紫外探测器,在 10V 的反向偏压下,探测器的漏电流密度小于 2×10^{-4} A/cm^2。7.5V 偏压下,光响应度为 0.045A/W;Zhang L[10]等用 PLD 方法在 MgO(111)衬底上制备了 p 型 $Li_{0.15}Ni_{0.85}O$(LNO)薄膜,后制备了 n 型 ZnO 薄膜形成了透明的宽禁带异质结。在室温下获得了特有的 $I-V$ 特性,异质结的透射比为 50% ~60%,在 1V 的电压下,具有很好的整流特性,漏电电流很小。5μW 的紫外光照射在波长为 350nm 处的光响应为 3.4×10^3 V/W。p-n 异质结型探测器,工作偏压低、输入阻抗高、漏电电流小、工作频率大、制作技术与半导体平面工艺相容,有望在紫外探测器件领域具有广泛的应用。

近年来 p 型掺杂的 ZnO 材料研究取得了突破,继而开展了 ZnO 同质 p-n 结型探测器的研究。

Moon T H[11]等在 GaAs 衬底上利用磁控溅射技术首次制作出 p-ZnO/ n-ZnO 同质结型紫外探测器,在 3V 偏压下,同质结紫外探测器光生电流为 2mA。Mandalapu[12]等用 MBE 方法在 p-Si(111)衬底上制备了掺 Sb 的 p-ZnO 和掺 Ga 的 n-ZnO 薄膜,并用电子束蒸发法制备了 Al/Ti 金属做欧姆电极,制备了同质 p-n 结紫外探测器。探测器显示出良好的整流特性,对紫外光有较好的响应。该探测器属于透明氧化物半导体(TOS)器件,对可见光和近紫外光完全透过,对环境无污染,热性能和化学稳定性好。但 p-n 结界面上有高暗电流。

为了提高光电探测器的量子效率和响应速度,需要加宽耗尽层的厚度,最好的方法是减少 n 区的掺杂浓度并在 p 区与 n 区间添加轻施主掺杂的近本征区,这就是 p-i-n 结构的紫外光探测器。通过加入 i 层扩展了耗尽区,增加了漂移电流相对于扩散电流的比例,两种电流机制一起使 $I-V$ 曲线下移,灵敏度提高。在不太高的偏压下,随偏压增加,耗尽区加宽,降低了结电容,提高了响应率。这种探测器光响应大,响应速度高,漏电电流和噪声小。2007 年,Kai Wang[13]等对此进行了研究,制作了 NiO/ZnO/ITO p-i-n 异质结紫外光探测器,获得了较低的暗电流,在 -5V 偏压下,暗电流仅为 10nA。

2.2.3 肖特基型紫外光探测器

当金属与半导体(N 型或 P 型)接触时,由于载流子所处的能级不同,他们将向低能级方向移动,从而在接触区形成阻挡层(耗尽层)。阻挡层内的正电荷与金属接触面的负电荷形成电偶极层——接触势垒,即肖特基势垒。由于肖特基势垒存在内建电场,当光照这种半导体时,由于半导体对光的吸收而产生了光生电子和空穴,它们在内建电场的作用下就会向相反的方向移动和积聚而产生电位差。

肖特基型探测器具有高的响应度和低的暗电流,Haruyuki[14]制作肖特基结紫外探测器,在 -10V 的反向偏压下暗电流密度为 1.3×10^{-10} A/cm^2,光响应度达到 0.185A/W,Bi Zhen[15]等制备的探测器在 5V 偏压下的光响应为 2069A/W;与 PN 结型探测

器相比,肖特基型探测器制作简单,不存在高温扩散的过程,光响应速度快,上升下降时间分别达到20ns和250ns[16]。肖特基结构探测器是在所有结构中响应最平直的,而且适合制作探测器阵列。但制造肖特基接触时,存在一定的困难,主要有:首先需要做极薄的金属接触电极,其次要求电极具有较好的稳定性和紫外透光性,再次制备过程中产生的表面态、表面缺陷、本征缺陷等都会影响器件的性能。

3 关键技术

3.1 衬底的选择

在ZnO基紫外探测器的研制方面,衬底是紫外光探测器的重要组成部分,因此选择合适的衬底是制备性能优良探测器的关键。目前研究中常用的衬底有石英、蓝宝石和硅衬底三种。由于硅和ZnO的晶格之间热膨胀系数失配较大,因而会在薄膜中引入位错等缺陷,在ZnO的禁带宽度中引入深能级,诱捕光生电子-空穴,由于深能级的复合是一个缓慢的过程,从而降低了探测器对波长的敏感性。此外硅对紫外光的吸收特别强,使紫外光透入很浅,影响了紫外光探测器量子效率的提高。蓝宝石、石英衬底上可生长优质的外延ZnO薄膜,但蓝宝石价格昂贵、不导电、不易加工。石英玻璃和石英单晶都可用来生长c轴取向较好的ZnO薄膜。石英玻璃具有密度低、热膨胀系数小、优良的透紫外性能,以及较高的机械强度和耐热温度,优良的抗热冲击性、抗腐蚀性等优良特性,是制备紫外探测器的优良材料。石英单晶较石英玻璃具有良好的结晶性能和更优良的紫外透过性,可以用来制备性能更优良的紫外探测器。

3.2 ZnO薄膜

在探测器研制方面ZnO薄膜的质量也起着关键的作用,制备性能优良的探测器关键在于提高ZnO薄膜的质量,减少陷阱的数量,降低载流子的复合几率。

3.2.1 ZnO薄膜的制备方法

ZnO薄膜常用的制备方法大致可分为物理和化学两个大类,物理方法有溅射法[4,6]、脉冲激光沉积法(PLD)[5,10]、分子束外延(MBE)法[9,12]和蒸发法等,化学方法主要有金属有机化合物气相沉积法[7]、水热法[17]和溶胶凝胶法[3]等。制备方法的不同对ZnO薄膜的性能也会有一定的影响。

磁控溅射是一种应用较为成熟和应用广泛的成膜技术,具有沉积速率高,反应衬底温度低,能有效地抑制固相扩散及薄膜与衬底之间的界面陡峭等优点。因此可制备c轴高度择优取向的ZnO薄膜。用此方法已经制备出了光电导型[7]和p-n结型探测器[11]。

脉冲激光法(PLD)是近年来发展起来的一种真空物理沉积工艺,其生长参数独立可调,化学计量精确可控,膜的平整度高,易于实现多层膜结构的生长,而且采用了光学系统避免了不必要的玷污。边继明[18]等采用了此方法制备了性能较好的光电导紫外探测器。

MBE法具有极好的膜厚可控性.通过控制束流,可实现原子级层状生长并进行原位观察,因此可得到晶体生长中的薄膜结晶性和表面状态数据,可立即反馈以控制晶体生长并且可实现实时掺杂使得掺杂剂在薄膜中均匀分布。目前已经用此方法制备出了p-n结型探测器[12]。

MOCVD法是制备ZnO薄膜特有的单晶薄膜的一种有效方法,可以方便的实现掺杂,因此可以用于生长p-ZnO薄膜。此外,已经用此方法在蓝宝石上制备出了光电导型[19]和肖特基型的紫外探测器[20]。

此外用水热法生长的ZnO的电阻率很高,能够很好地抑制器件的暗电流,实现较高的信噪比。目前已经用水热法制备了ZnO基肖特基型探测器[17]。溶胶凝胶法设备简单易于掺杂,但制备的薄膜易吸附其他物质。也有人用此方法制备出了ZnO基探测器[3]。

3.2.2 ZnO薄膜的掺杂

ZnO薄膜中往往本征的存在O空位和Zn间隙等缺陷,这些点缺陷起施主作用,因此所制备的薄膜一般为低阻n型导电。而紫外探测器要求暗电流尽量小,以有助于提高器件的信噪比,因此需要制备高阻的ZnO薄膜。通过退火可一定程度上提高ZnO薄膜的质量,但还不能满足器件的要求,要想获得高阻的ZnO薄膜需要对其掺杂施主或受主杂质。

近年的研究表明掺Mg可以调节ZnO的禁带宽度,使薄膜的光学吸收边向紫外波长方向移动,此外掺入Mg可取代ZnO中的氧空位缺陷,获得高阻的ZnO薄膜,降低器件的暗电流。有人在Si衬底上用MBE方法生长了系列$Zn_{1-x}Mg_xO$合金薄膜,并制作成紫外探测器。他们发现当x值由0增加到0.43时,探测器的截止峰所对应的禁带宽度由E_g = 3.37eV变为E_g = 4.45eV,出现明显蓝移[22]。

而且随Mg组分增加,探测器的可见-紫外光响应比从1个数量级增加到3个数量级。但随着Mg掺杂的增多薄膜的微结构的改变,会导致响应度的急剧下降。如何解决这一难题是制备出较高的迁

移率和量子效率的探测器的关键。

载流子浓度的提高导致禁带宽度展宽,载流子浓度大于 $10^{20}cm^{-3}$ 的 ZnO:Ga 薄膜为简并半导体,费米能级进入了导带,根据 B－M 效应,在简并半导体中,费米能级进入了导带将导致禁带展宽,吸收边发生蓝移。2007 年,L. J. Mandalapu[23] 等用 MBE 法在蓝宝石衬底上外延生长了一层 ZnO 缓冲层,然后生长了掺 Ga 的 ZnO 薄膜,利用电子束蒸发法和光刻剥离技术制备了 Ti/Al 的叉指电极。20V 偏压下光响应度为 1.68A/W。由于薄膜中有深的缺陷,响应较慢,上升时间 95s,下降时间 2068s。

一般情况下生长的 ZnO 由于存在 Zn 间隙,载流子浓度较高。为了获得低载流子浓度,可通过氮掺杂的方法制备 ZnO 薄膜。原因在于:①N 能和 Zn 形成 Zn－N 键,降低间隙锌的浓度;②N 的掺入,可以提供一个浅受主能级,补偿部分施主杂质。Oh D C[24] 等采用 MBE 法制备电子浓度 $6\times10^{16}cm^{-3}$ 的 ZnO:N 薄膜,并与 Au 接触,器件显示出了良好的肖特基特性。

3.3　ZnO 的金属与半导体接触

金属－半导体接触可分为欧姆接触和肖特基接触两类。高可靠的金属－半导体接触是器件制备中的关键工艺和重要组成部分,对器件性能有重要影响。

金属－半导体接触势垒与两者的功函数之差以及金属功函数和半导体的电子亲和势有关。当金属的功函数大于半导体的功函数时,半导体表面形成正的空间电荷区,形成表面势垒,金属和半导体形成肖特基接触;当金属的功函数小于半导体的功函数时,在半导体表面形成负的空间电荷区,半导体表面电子浓度比体内高得多,形成高电导区,金属和半导体形成欧姆接触。有研究[25] 表明采用金属功函数低的 In,Ti 做中间导电层,可与 ZnO 薄膜形成良好的欧姆接触,并降低接触电阻。

由于 ZnO 表面物理吸附、化学吸附等因素引入许多杂质,使得界面处存在大量的表面态、界面态,直接影响了 ZnO 的接触特性,所以样品表面预处理对于提高是势垒的高度,减少理想因子,改善器件的工作特性等有着重要的作用。

ZnO 是极性半导体材料,各个晶向的极化方向不同,(0001)为 Zn 极化面,负电性较小;而 ZnO (000－1)面为 O 极化面负电性较强,易于吸附 OH^-、C 等杂质,所以 n 型 ZnO(000－1)表面高的载流子浓度很大程度是来自表面吸附的 OH^-[26],若能有效地去除表面吸附杂质,则可大大改善接触特性。B J Coppa[27] 等将(000－1)ZnO 单晶样品放在 525℃下、20% O_2 +80% He 等离子体中 30min,结果发现经过 O_2 + He 等离子体处理后,大大降低表面吸附 OH^- 的浓度,可以有效地去除表面的电荷积累层,同时 ZnO 在 O_2 等离子体中吸附了氧间隙,降低了表面载流子浓度。

为了提高载流子收集能力,接触电极通常采用叉指结构(如图 2 所示)制作成 MSM,此结构的器件具有响应强度高,速度快,侧向平面结构电容小,随偏压变化小,工艺简单,易于单片集成等的优点。

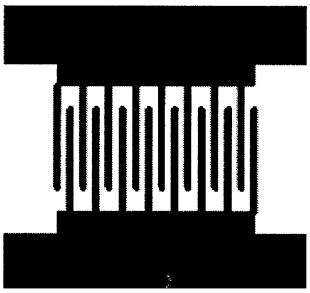

图 2　叉指电极的结构

由于金属和探测区域 ZnO 的表面反射,影响了光响应度。生长高质量的无裂缝的 ZnO 外延材料和薄的金属,在一定程度上可以增强了光响应度。此外,在 ZnO 薄膜表面淀积 Al 电极后选择性地进行阳极氧化,形成氧化铝微纳结构。微纳结构的阳极氧化铝作为光耦合器对入射光的衍射使光波以大角度进入 ZnO 薄膜,容易在其中形成全反射和谐振,增加光波在 ZnO 薄膜中的光程,提高了探测器的响应度。

另外接触电极制作过程中引入的表面缺陷同样会影响接触特性。从而影响探测器的性能。采用溅射沉积金属,由于溅射粒子的能量高,使 ZnO 表面产生缺陷,所以目前一般采用电子束蒸发来沉积接触金属。

4　结束语

随着军用、民用对紫外探测器技术的需求不断增长,迫切需要一种高量子效率、大面积高分辨率、宽动态范围、高速低噪声且波长完全处于紫外光谱的紫外探测器。ZnO 基紫外光探测器以其独特的优点将在军事民用领域中发挥巨大的作用。目前研究中主要存在的问题有:高质量的、重复性好的 ZnO 薄膜的制备,尤其是 p 型 ZnO 薄膜的制备非常困难,极大的限制了 ZnO 探测器的发展;ZnO 薄膜中本征材料中的施主缺陷,及晶体缺陷,影响了探测器的响应速度和量子效率;接触电极对紫外光的吸收以及接触的不均匀性会极大的降低探测器的性能。未来 ZnO 基紫外探测器研究工作重点在于:进一步

研究 ZnO 基紫外光探测器材料的微观结构;选取合适的衬底,改进 ZnO 薄膜的生长工艺、制备条件从而制备高质量、重复性好的 ZnO 薄膜,发展 ZnO 纳米线膜;采用合适的预处理工艺,减少 ZnO 薄膜的表面吸附,增加接触势垒的高度,降低暗电流;选取合适的接触金属(接触金属对紫外透过率要高,吸收系数要小),改进金属 - 半导体的接触性能,使探测器具有最优的性能从而实现光电集成化。

参考文献:

[1] Look D C, et al. Point detect characterization of GaN and ZnO[J]. Mater Sci Eng B, 1999, 66 (1 - 3): 30 - 34.

[2] 赵懿琨,连洁. ZnO 基紫外探测器的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(1): 109 - 112.

[3] Xu Ziqiang, Deng Hong, et al. Photoconductive UV detectors based on ZnO films prepared by sol-gel method[J]. Sol-gel Sci techn, 2005, 36(2): 223 - 226.

[4] Liu K W, Ma J G, Zhang J Y, et al. Ultraviolet photoconductive detector with high visible rejection and fast photoresponse based on ZnO thin film[J]. Solid-State Electronics, 2007, 51(5): 757 - 761.

[5] Zheng X G, et al. Photoconductive ultravilolet detectors based on ZnO film[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(4): 2264 - 2267.

[6] Xu Q A, et al. ZnO thin film photoconductive ultraviolet detector with fast photoresponse[J]. Cryst Growth, 2006, 289(1): 44 - 47.

[7] 赵鹏,周旭昌,等. 体晶 ZnO 光导探测器制备与测试[J]. 红外技术, 2007, 29(10): 567 - 569.

[8] Soci C, Zhang A, Xiang B, et al. ZnO nanowire UV photodetectors with high internal gain[J]. Nano Letters, 2007, 7(4): 1003 - 1009.

[9] Alvio YaI, et al. photoresponse of n-ZnO/p-SiC heterojunction diodes grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy[J]. Appl Phys Lett, 2005: 240 - 280.

[10] Zhuang L, Wong K H. Fabrication of transparent p-n junction composed of heteroepitaxially grown p-$Li_{0.15}Ni_{0.85}O$ and n-ZnO films for UV-detector applications[J]. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 2007, 87 (4): 787 - 791.

[11] Moon T H, Kamiya T, et al. The fabrication and characterization of ZnO UV detector[J]. Applied Surface Science, 2005, 240(1 - 4): 280 - 285.

[12] Mandalapu L J, et al. Homojunction photodiodes based on Sd-doped p-type ZnO for ultraviolet detection[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(9): 92 - 103.

[13] Wang Kai, Vygranenko, Yuriy, et al. Optically transparent ZnO-based n-i-p ultraviolet photodetectors[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(17): 6981 - 6985.

[14] Haruyuki Endo, et al. Schottky ultraviolet photodiode using a ZnO hydrothermally grown single crystal substrate [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90: 121906.

[15] Bi Zhen, Zhang Jingwen, BianXuming. A high-performance ultraviolet photoconductive detector based on a ZnO film grown by RF sputtering[J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(5): 760 - 763.

[16] Jiang Dayong, Zhang Jiying, Lu Youming. Ultraviolet Schottky detector based on epitaxial ZnO thin film[J]. Solid-State Electronics, 2008, 52(5): 679: 682.

[17] 高晖,邓宏,李燕. 肖特基势垒紫外探测器[J]. 发光学报, 2005, 26(1): 135 - 139.

[18] 边继明,李效民,等. PLD 法生长高质量的 ZnO 薄膜及其光电导特性研究[J]. 无机材料学报, 2006, 21(3): 701.

[19] Feng Shi Wei, Li Ying, Sun Jing Ying, et al. Fabrication and study of ZnO photoconductive UV detector[J]. Journal of Beijing Polytechaic University, 2007, 33(7): 678 - 681. (in Chinese)

[20] Liang S, Sheng H, Liu Y, et al. ZnO Schotty ultraviolet detectors in thin sputtered ZnO films[J]. Apply opitics, 1986, 25: 2764.

[21] Miller P H, et al. Photoconductivity Conf[M]. New York: Wiley, 1956: 288.

[22] Takagi Tsuyoshi, Tanaka Hiroshi, Fujita Shizuo, et al. Molecular beam epitaxy of high magnesium content singlephase wurzite $Zn_{1-x}Mg_xO$ alloys (z [asymptotically equal to] 0.5) and their application to solar-blind region photodetectors [J]. Japanese J Appl Phys, Part 2: Letters, 2003, 42(4): 401 - 403.

[23] L J Mandalapu, F X Xiu, Z Yang, et al. Ultraviolet photoconductive detectors based on Ga-doped ZnO films grown by molecular-beam epitaxy[J]. Solid-State Electronics, 2007, 51 (7): 1014 - 1017.

[24] Oh D C, Suzuki T, Makino H. Electrical properties of ZnO/GaN heterostructures and photoresponsvity of ZnO layers[J]. Physica Status Solidi C: Conferences, 2006, 3 (4): 946.

[25] 孙腾达,谢家纯. ZnO 欧姆电极制备与 n-ZnO/p-Si 异质结紫外光电特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(3): 328 - 332.

[26] Mosbacker H L, Strzhemechny Y M, White B D, et al. Role of near-surface states in ohmic-Schottky conversion of Au contacts to ZnO[J]. Appl. Phys. Lett, 2005, 87: 012 - 102.

[27] Coppa B J, Davis R F, Nemanich R J, et al. Cold Schottky contacts on oxygen plasma-treated, n-type ZnO (0001) [J]. Appl. Phys. Lett, 2003, 82(3): 400 - 402.