

文章编号: 1672-8785(2016)02-0022-07

AlGaIn 紫外探测器 p 电极的 Ni/Au/Ni/Au 欧姆接触结构研究

祁昌亚¹ 胡正飞^{1*} 张 燕² 李向阳² 张 振¹ 童 慧¹

(1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804;

2. 中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 研究了 AlGaIn 半导体 p 电极的 Ni/Au/Ni/Au 接触结构的性能和组织结构。退火前, p 电极接触具有明显的整流特性。经空气中 550 °C/3 min 一次退火和 N₂ 气氛中 750 °C/30 s 二次退火后, 电极呈现出了良好的欧姆接触。采用扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)、透射电镜 (Transmission Electron Microscope, TEM)、能量分散谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 和 X 射线光电子能谱 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 观察了电极退火后金-半界面微结构的演化过程。结果表明, 完全退火后的 p 电极界面及金属层出现了明显的互扩散和界面反应现象; 金-半界面上形成了存在良好共格/半共格关系的外延结构。初始沉积的金属电极分层现象消失, 形成了单一的电极结构。Ni 向外扩散并与 O 发生反应, Au 扩散至 p-GaIn 表面。在金-半接触界面上, Ga 扩散至金属电极, 造成界面附近的金属层中富集 Au 和 Ga 元素; Au 和 Ni 明显扩散至半导体表层, 在金-半界面附近形成了 Au、Ga 和 Ni 富集现象。这些现象应该对于降低势垒高度和形成欧姆接触具有重要作用。

关键词: AlGaIn; 欧姆接触; 退火; 扩散; 微结构

中图分类号: TN23; TN304.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.02.004

Research on Ni/Au/Ni/Au Ohmic Contact Structures of p-AlGaIn Ultraviolet Detector

QI Chang-ya¹, HU Zheng-fei^{1*}, ZHANG Yan², LI Xiang-yang², ZHANG Zhen¹, TONG Hui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The performance and structure of Ni/Au/Ni/Au contact of p electrode of AlGaIn semiconductor are studied. Before annealing, the p electrode has obvious rectifying characteristics. After being annealed in air at 550 °C for 3 min and then being annealed in N₂ at 750 °C for 30 s, a good ohmic contact is obtained. To uncover the ohmic contact forming mechanism of this structure, the Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM), Energy Dispersive Spectrometer (EDS) and X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) are used to study the microstructure evolution of

收稿日期: 2016-01-25

基金项目: 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室基金项目

作者简介: 祁昌亚 (1990-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件的结构表征。

* 通讯作者: E-mail: huzhengf@tongji.edu.cn

metal-semiconductor interface. The results show that the metal schemes change sharply and an interdiffusion and interface reaction happens during annealing. The as-deposited four-layer electrode is missing and is replaced by a single metal layer. A coherent or semi-coherent relationship is established at the interface. Thus, Ga diffuses to the metal electrode and Au and Ni diffuse into the upper layer of the semiconductor at the interface. Ga, Au and Ni are enriched across the interface. Ni has an outward diffusion and reacts with O. Au has an inward diffusion to the p-GaN surface. All of these phenomena are critical to the formation of the ohmic contact.

Key words: AlGaN; ohmic contact; annealing; diffusion; microstructure

0 引言

近年来, 紫外探测技术得到了快速发展, 已经广泛应用于航空飞行物跟踪、火灾隐患探测与预警、大气环境监测等众多领域^[1-2]。通过对紫外光谱进行表征, 可以提供发射源的很多重要信息。然而紫外光发射时经常伴有可见光及红外辐射背景, 因此紫外探测器必须对长波辐射不敏感。由于具有对可见光不敏感、热导率高、电子漂移速度快、化学键能强等特点, 以 AlGaN 为代表的宽禁带半导体材料被选用于制备高温、高功率紫外探测器。作为 AlN 和 GaN 的三元合金, AlGaN 是一种宽禁带直接带隙半导体, 其截止波长从 365 nm (GaN) 到 200 nm (AlN) 锐利可调。AlGaN 紫外器件因量子效率高、吸收系数大、噪声小、抗干扰能力强、受背景辐射影响小而被广泛应用。但是某些方面的缺点限制了 AlGaN 器件的发展, 其中就包括 p 型欧姆接触的实现问题。

任何器件的电信号都需要通过良好的欧姆接触电极顺利导出。对于 AlGaN 半导体器件来说, 其 n 电极欧姆接触的制备技术已经比较成熟。通常, 在一定条件下对 Ti/Al/Ti/Au 金属体系进行退火后就可得到较小的比接触电阻^[3-4]。然而其 p 电极欧姆接触的实现一直是制备工作的难点, 原因有两个: 其一, AlGaN 最有效的 p 型掺杂剂是 Mg, 而 Mg 的杂质激活效率低。相关研究表明, 只有约 1% 的 Mg 受主能够离化而在 p-GaN 半导体中产生空穴^[5-6]。为了实现较好的导电率, 一般要求 Mg 的掺杂浓度达到 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。高浓度掺杂会产生层错和反相畴等生长缺陷, 从而降低半导体质量^[7]。其二, p-AlGaN

的功函数高 (p-GaN 的功函数为 7.5 eV; Al 含量越高, 功函数越大)。根据金半接触理论, 只有功函数大于 p-AlGaN 功函数的金属才能形成良好的欧姆接触, 因而难以找到相匹配的金属。目前, p-AlGaN 的接触电极主要采用功函数较高的多层金属结构以减小金半接触的肖特基势垒, 其中尤以 Ni/Au 体系性能最优而得到广泛研究。

伴随着 p 型欧姆接触制备困难的问题, 其欧姆接触的形成机制同样没有定论。目前对于 Ni/Au 体系来说存在多种解释: 一种是退火后电极生成 NiO、Au 和非晶化合物 Ni-Ga-O 等三部分。其中, NiO 是一种 p 型半导体, 其载流子浓度 (霍尔测量) 达到 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 有效降低了界面的势垒高度, 减小了接触电阻^[8]。第二种解释是通过去除与 Mg 掺杂原子相结合的 H 原子, 增加了 GaN 表面的空穴浓度, 最终减小了接触电阻^[9-10]。最后一种解释是退火时 Au 向内扩散至 GaN 表面, Ga 原子向外扩散至 Au 中, 由此半导体中产生 Ga 空位, 增加了 p-AlGaN 内的空穴浓度, 进而提高了接触性能^[11]。

本文制备了一种 AlGaN 紫外探测器件, 并采用 SEM、TEM、EDS 和 XPS 研究了 p 电极上的 Ni/Au/Ni/Au 金属体系经退火后的微观组织结构。结合退火前后 p 电极的电学参数, 探索了 p 型欧姆接触的形成机制。

1 实验

样品以 (0001) 蓝宝石为衬底, 半导体层采用金属有机化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD) 方法制备。首先在低温下沉积一层 AlN 缓冲层, 然后在缓冲层上生长 p-i-n 外延层结构: 依次是厚度为 800 nm 的高掺杂 n 型 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 薄膜 (Si 掺杂)、厚度为

100 nm 的非掺杂本征 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 薄膜和厚度为 150 nm 的 p 型 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 薄膜 (Mg 掺杂)。最后在 p 型层上再生长厚度为 20 nm 的 p-AlGaIn 缓冲层和厚度为 10 nm 的 p-GaN 帽层。薄膜生长完毕后, 采用 750 °C /10 min/ N_2 原位激活, 其载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。采用化学清洗和等离子处理两种方法去除半导体表面上的污染物, 以提高电极的接触水平^[12]。利用三氯甲烷-丙酮-无水乙醇对有机污染物进行处理, 并利用酒精基盐酸对表面氧化物进行处理。在电子束蒸发法中, 蒸镀 Ni/Au/Ni/Au (20 nm/20 nm/20 nm/20 nm) 作为 p 电极, 然后在空气气氛中 (550 °C) 退火 3 min。采用感应耦合等离子体方法对样品进行刻蚀, 形成台面并露出 n 型 AlGaIn 层。采用电子束蒸发法蒸镀 n 型欧姆电极, 电极接触为 Ti/Al/Ti/Au (50 nm/50 nm/30 nm/30 nm) 金属层。然后在 N_2 气氛中 (750 °C) 退火 30 s。图 1 所示为制备完成的样品结构。

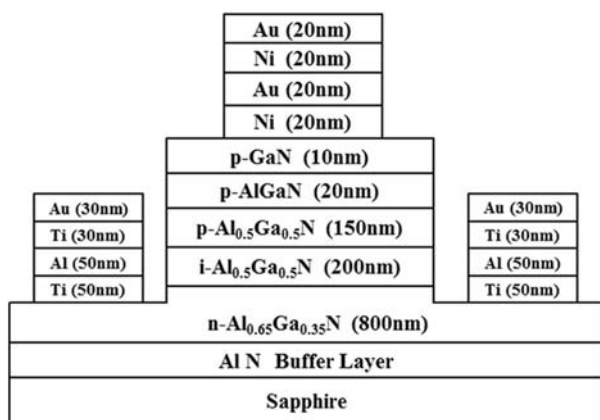


图 1 AlGaIn 器件的结构示意图

通过由计算机控制的 Keithley 236 型电流-电压源对 AlGaIn 器件 p 电极的电学性能进行了测量。测试电压范围为 -10 ~ +10 V, 电压间隔为 0.2 V, 仪器的测试精度为 0.1 pA。退火后, 采用美国 FEI 公司生产的 QUANTA 250FEG 型 SEM 对 p 电极的表面形貌进行了观察。采用日本电子株式会社生产的 JEM-2100F 型 TEM 对电极截面尤其是金-半界面的组织结构进行了观察和分析。操作电压为 200 kV, 点分辨率为 0.194 nm。采用 TEM 配备的美国 Gatan 公司生产

的 EDS 对电极的元素成分进行了分析。采用美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的 ESCALAB 250Xi 型 XPS 对电极进行了刻蚀分析, 其射线源为单色 Al K α 射线 (1486.68 eV), 工作功率为 50 W。测试时, 分析室的真空度为 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。Ar⁺ 离子刻蚀的束斑大小为 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 能量为 3 keV, 电流为 10 mA, Ar⁺ 离子束的入射角为 30°。

2 结果及讨论

我们分别对制备完成的器件和退火后的器件进行了电学测量, 图 2 所示为退火前后 p 电极的 I-V 特性曲线。退火前, p 电极具有较大的肖特基结, 约为 4 V; 零偏压电阻为 $1.95 \times 10^8 \Omega$, 零偏压电流为 $1.26 \times 10^{-9} \text{ A}$; -10 V 下的暗电流为 $9.31 \times 10^{-5} \text{ A}$, 表现出了明显的整流特性。退火后, 肖特基结明显减小; 零偏压电阻为 $2.97 \times 10^7 \Omega$, 零偏压电流为 $6.64 \times 10^{-11} \text{ A}$; -10 V 下的暗电流为 $8.22 \times 10^{-5} \text{ A}$, 就此形成了欧姆接触。

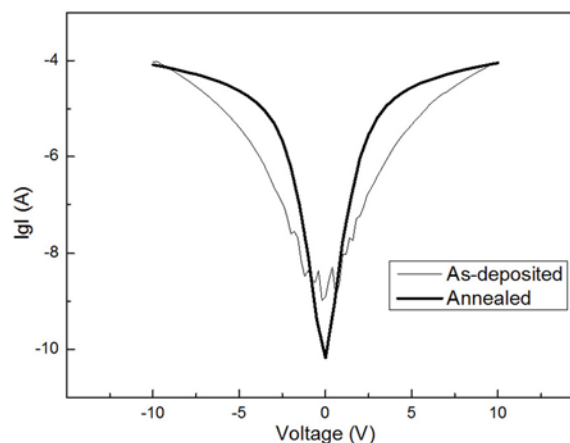


图 2 退火前后 p 电极的 I-V 特性曲线

图 3 所示为器件退火后 p 电极截面的 TEM 明场像。从中可以清楚地看出, 退火后 p 电极的金属层发生了明显变化, 由初始的 Ni/Au/Ni/Au 四层结构转变为了差异明显的两层物质。根据文献 [13-15] 可知, 在 O_2 气氛中, Ni/Au 双层金属在一定条件下经退火后可转变为 Au/NiO 双层结构。本文采用 EDS 初步确定了这两层的元素组成。图 4(a) 和图 4(b) 分别为图 3 中 a、b 两点的 EDS 谱图。由图 4(a) 可知, 与 p-GaN 直接接

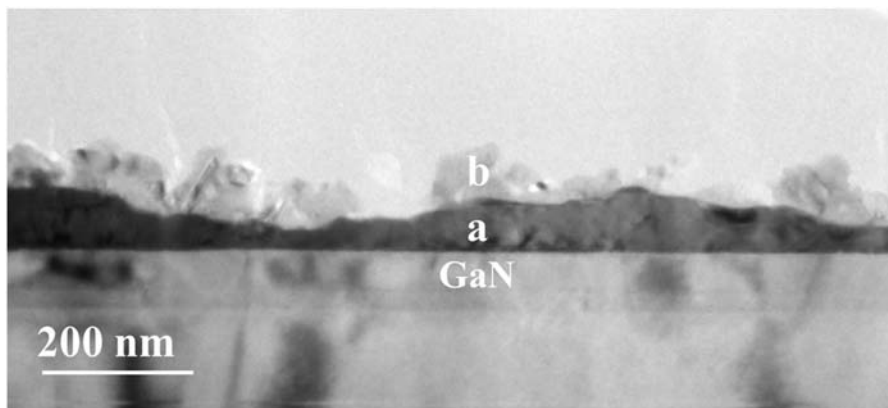


图 3 退火后 p 电极的 TEM 图像

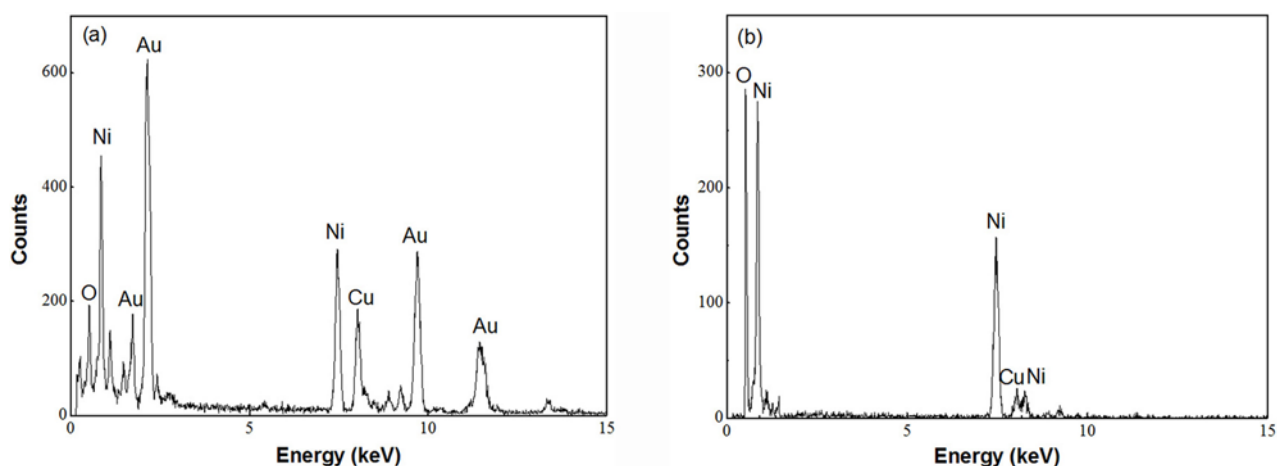


图 4 (a) a 点的 EDS 谱图; (b) b 点的 EDS 谱图

触的一层物质的主要组成元素是 Au，同时还含有一小部分 Ni 和 O。其中，Au 层的厚度不均匀，从 20 nm 到 90 nm 不等。由图 4(b) 可知，电极最上层中颜色稍亮的一层物质的主要组成元素是 Ni 和 O，而且 NiO 层由很多尺寸、形状均不规则的晶粒构成。

样品 p 电极的 TEM 图像表明，器件在空气中 (550 °C) 退火 3 min，接着在 N₂ 中 (750 °C) 退火 30 s 后，Ni 和 Au 元素均发生了明显扩散。对于扩散的动力学原因，Chen L C 等人^[15]认为是 Au 薄膜的晶界为 Ni 向外扩散到电极表面提供了快速通道，而 Ni 和 O 的亲合能大于 Au 和 O 的亲合能则是 Ni 原子源源不断地向外扩散的驱动力。Ho J K 等人^[8]认为，Ni 倾向于通过 Au 薄膜的缺陷扩散到电极表面并与 O₂ 反应，而扩散后的 Au 仍维持在金属态上。

Ni/Au 金属体系的 P 电极在空气中退火后，电极内元素扩散，同时 Ni 与 O 反应，导致表面形貌发生较大变化。直接观察退火后 Ni/Au/Ni/Au 电极的表面形貌，其 SEM 图像见图 5。可以看出，P 电极表面粗糙，分布着很多形状不规则的孔洞和突出物。结合图 3 中的 TEM 截面图像，很容易理解粗糙表面就来源于退火反应产物 NiO 的晶粒大小、形状以及分布不均匀等因素。

为了进一步确定欧姆接触电极各层的精细成分，我们对电极进行了剖面观察和 EDS 点分析。图 6 中的测试点依次从电极外表面排到 p-GaN 表面。表 1 列出了 EDS 实验结果。可以看出，Au 不单存在于 Au 层中，在 NiO 层内 (点 1 处) Au 的原子含量百分比也高达 30.4%，因此 Ni 是通过 Au 薄膜向外扩散，而并未完全把 Au “挤”到下层使其与 GaN 接触。文献 [16] 也曾报

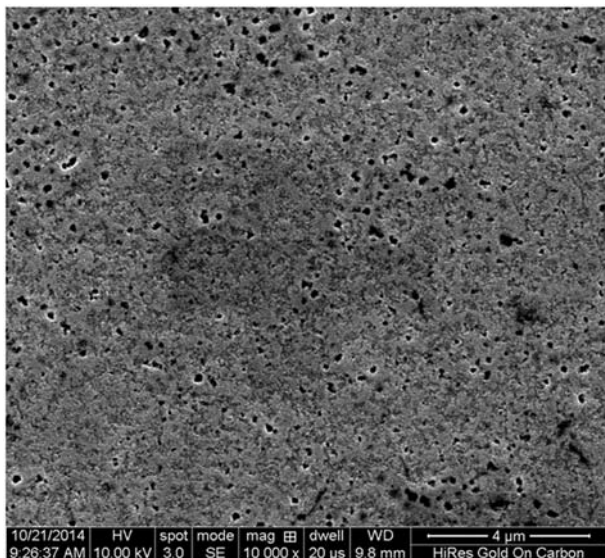


图 5 退火后 p 电极表面的 SEM 图像

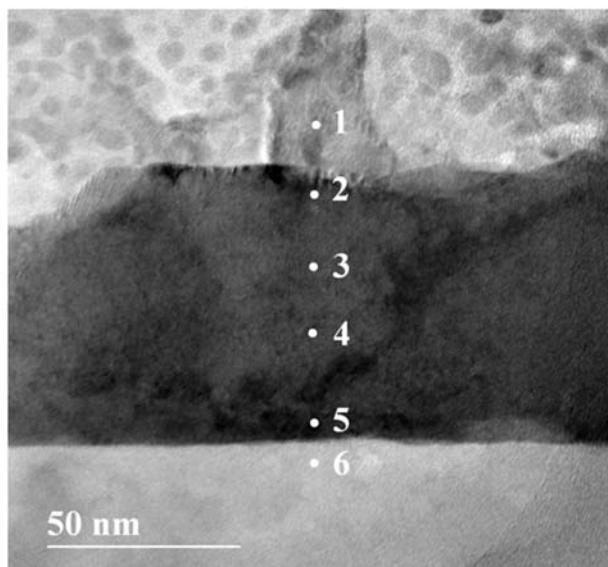


图 6 退火后 p 电极的 EDS 点分析示意图

道由于 Kirkendall 效应的存在, Ni 原子向外扩散引起 Au 原子向 p-GaN 表面扩散, 但仍有 23 at% 的 Au 原子留在 NiO 层中。同样地, Ni 也并没有完全扩散至电极表面, 有一部分存在于 Au 层内, 比如点 3 和点 4 两处的含量分别为 32.1 at% 和 24.7 at%。Ni 的含量由电极表面至半导体表面呈梯度下降趋势。

从表 1 中还可以看出, Ga 元素从 p-GaN 向金属电极扩散后, 其在电极内达到了较高含量, 点 4 和点 5 处分别达到了 14.5 at% 和 25.4 at%。有趣的是, Ga 原子主要富集于金属电极层的下

表 1 退火样品 p 电极的 EDS 点分析元素的相对含量

atom%	Ni	O	Au	Ga
1	33.4	34.3	30.4	1.9
2	34.3	23.9	39.9	1.8
3	32.1	18.2	44.8	5.0
4	24.7	14.4	46.4	14.5
5	18.1	6.8	49.7	25.4
6	11.4	3.9	31.4	53.3

表面, 并形成了 Ga 含量达到 20% 左右的 AuGa 固溶体结构。Ga 向外扩散增加了 p-GaN 表面上的 Ga 空位含量, 而受主型 Ga 空位的增加则有利于 p-GaN 中的空穴传输, 可有效提高金-半界面的接触特性。

图 7 为退火后 p 电极的金-半接触界面两相的高分辨率 TEM 图像。p-GaN 与金属电极层界面之间显现为共格/半共格关系。GaN 的晶面间距 d 的测量值为 0.276 nm, 正好对应于 $(10\bar{1}0)_{\text{GaN}}$ 晶面。GaN 以上金属的晶面间距为 0.235 nm, 对应于 $(111)_{\text{Au}}$ 晶面。由图 7 可知, 金属层和 GaN 层在晶体取向上存在以下关系: $(0001)_{\text{GaN}} // (111)_{\text{Au}}$, $[11\bar{2}0]_{\text{GaN}} // [111]_{\text{Au}}$ 。这是一种有利于形成欧姆接触的结构^[17-18]。

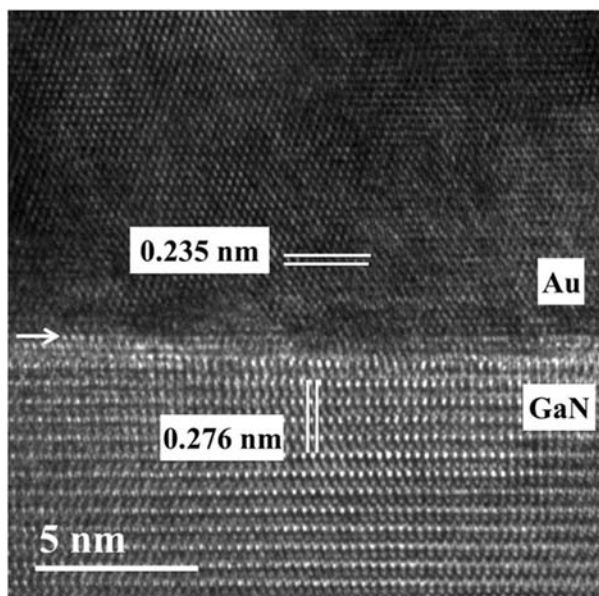


图 7 退火后金-半接触界面的高分辨率 TEM 图像

图 8 为通过 XPS 深度刻蚀得到的各刻蚀层元素的相对含量谱图。其中, 各元素含量随深度的变化情况与 EDS 结果相近。以刻蚀层数为横坐标, 以刻蚀层元素的相对含量为纵坐标, 可以反映退火后各元素在 p 电极内的含量分布的相对变化。从图 8 中可以看出, 在电极表面上只探测到 O 和 Ni 元素的存在。O 含量从电极表面开始迅速下降, 到第三刻蚀层已基本消失。而 Ni 在电极内的含量维持在约 30 at% 的较高水平; 靠近金-半界面时, 该含量开始减少。一部分 Ni 扩散到电极表面上, 与退火气氛空气中的 O 发生反应, 此时认为是生成 NiO; 一部分 Ni 没有扩散到表面上, 而是分布在电极内部的 Au 层中。到第五层时, Ga 峰开始出现, Au 和 Ni 的含量仍然较高但已呈现出下降趋势; 到第六层时, Ga 含量陡增, 表明已刻蚀到 GaN 层, 但 Au 和 Ni 的含量明显, 超过 10 at%, 表明 Au 和 Ni 原子明显扩散进入到半导体中; 到第七层时, Ga 含量很高, Au 和 Ni 几乎不存在, 表明刻蚀已经深入到 GaN 内部, 同时也表明扩散到半导体层的 Au 和 Ni 原子主要分布在 GaN 表层中。由此可见, Au、Ni 和 Ga 在界面处发生互扩散, 并在界面附近富集。界面的这种化学成分结构有利于降低化学势, 减小势垒高度。

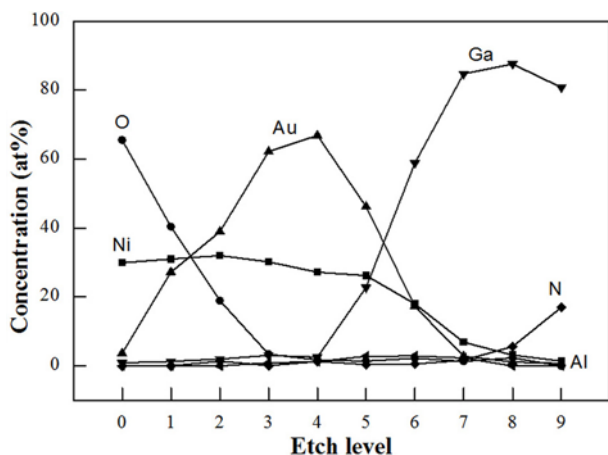


图 8 XPS 分析结果

3 结束语

通过在空气中进行 550 °C/3 min 和在 N₂ 中进行 750 °C/30 s 退火后, 在 p-AlGaIn 材料上制备

的 Ni/Au/Ni/Au 多层金属电极呈现出了良好的欧姆接触特性。采用 TEM、SEM、EDS 和 XPS 对退火后电极的微观结构进行了表征。结果表明, 完全退火后的 p 电极界面及金属层出现了明显的互扩散和界面反应现象, 金-半界面上形成了存在良好共格/半共格关系的外延结构。初始沉积的金属电极分层现象消失。Ga 扩散至金属电极, 造成界面附近的金属层中富集 Au 和 Ga 元素; Au 和 Ni 明显扩散至半导体表层, 在金-半界面附近形成了 Au、Ga 和 Ni 富集现象。这些现象应该对于降低势垒高度和形成欧姆接触具有重要作用。

参考文献

- [1] 张燕, 龚海梅, 白云, 等. 空间用紫外探测及 AlGaIn 探测器的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(11): 1009-1012.
- [2] Yan Z, Sun J, Wang N, et al. Fabrication and Characterization of an AlGaIn/PZT Detector [J]. *Journal of Semiconductors*, 2010, **31**(12): 124015-124017.
- [3] 王玲, 许金通, 陈俊, 等. 高 Al 组分 N-Al_xGa_{1-x}N 材料的欧姆接触 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(S1): 967-970.
- [4] Wang D F, Shiwei F, Lu C, et al. Low-resistance Ti/Al/Ti/Au Multilayer Ohmic Contact to n-GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(11): 6214-6217.
- [5] Litwin-Staszewska E, Suski T, Piotrkowski R, et al. Temperature Dependence of Electrical Properties of Gallium-nitride Bulk Single Crystals Doped with Mg and Their Evolution with Annealing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(12): 7960-7965.
- [6] Piotrkowski R, Litwin-Staszewska E, Suski T, et al. Study of Dopant Activation in Bulk GaN:Mg [J]. *Physica B Condensed Matter*, 2001, **308**: 47-50.
- [7] Kamler G, Borysiuk J, Weyher J L, et al. Selective Etching and TEM Study of Inversion Domains in Mg-doped GaN Epitaxial Layers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **282**(S1-S2): 45-48.
- [8] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance Ohmic Contacts to p-type GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(9): 1275-1277.
- [9] Koide Y, Maeda T, Kawakami T, et al. Effects of Annealing in an Oxygen Ambient on Electrical Properties of Ohmic Contacts to p-type GaN [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(3): 341-346.
- [10] Maeda T, Koide Y, Murakami M. Effects of NiO on Electrical Properties of NiAu-based Ohmic Contacts

- for p-type GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **75**(26): 4145–4147.
- [11] Lee J L, Weber M, Kim J K, et al. Ohmic Contact Formation Mechanism of Nonalloyed Pd Contacts to p-type GaN Observed by Positron Annihilation Spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(16): 2289–2291.
- [12] 张燕, 储开慧, 邵秀梅, 等. GaN 基 512×1 元紫外长焦平面探测器组件 [J]. *光学学报*, 2009, **31**(12): 3515–3518.
- [13] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance Ohmic Contacts to p-type GaN Achieved by the Oxidation of Ni/Au Films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **86**(8): 4491–4497.
- [14] Smalc-Koziorowska J, Grzanka S, Litwin-Staszewska E, et al. Ni-Au Contacts to p-type GaN - Structure and Properties [J]. *Solid-State Electronics*, 2010, **54**(7): 701–709.
- [15] Chen L C, Chen F R, Kai J J, et al. Microstructural Investigation of Oxidized Ni/Au Ohmic Contact to p-type GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **86**(7): 3826–3832.
- [16] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance Ohmic Contacts to p-type GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(9): 1275–1277.
- [17] Narayan J, Wang H, Oh T H, et al. Formation of Epitaxial Au/Ni/Au Ohmic Contacts to p-GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(21): 3978–3980.
- [18] Qiao D, Yu L S, Lau S S, et al. A Study of the Au/Ni Ohmic Contact on p-GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **88**(7): 4196–4200.

(上接第 11 页)

5.2 借助军民结合模式缓解投资压力

军民结合模式乐意培养以市场需求为引导的意识, 可以极大地缓解单纯依靠国防投入和资金不足的问题。同时, 国家应在收取税收、鼓励使用等方面予以扶植, 提高企业面对国外公司的竞争力。

6 结束语

信息产业已经成为 21 世纪的先导产业, 而光电子技术则将成为信息产业的支柱学科。目前, 光电子技术研究和应用的势头相当迅猛, 每年都会有若干新器件和新系统问世。光电子器件将会成为研究热点和趋势, 并将朝着高速、高可靠性、高灵敏度、小型化以及多功能性等方面发展。光电子产业将会成为国民经济中举足轻重的一部分, 人们的生活也将会与光电子技术紧密结合, 共同迈向现代化和智能化。

参考文献

- [1] Jerram P, Burt D, Guyatt N, et al. Back-thinned CMOS Sensor Optimization [C]. *SPIE*, 2010, **7598**: 759813.
- [2] Albert J P. CMOS Image Sensor: State-of-the-art [J]. *Solid-State Electronics*, 2008, **52**(9): 1401–1406.
- [3] Deyer B, Holland A, Murray N J, et al. Gamma Radiation Damage Study of 0.18 μm Process Image Sensors [C]. *SPIE*, 2010, **7742**: 77420E.
- [4] 王昕. 光电显示技术发展研究 [J]. *光电技术应用*, 2006, **21**(3): 9–13.
- [5] 何文瑶. 光电子技术发展态势分析 [J]. *科技进步与对策*, 2008, **25**(9): 194–196.
- [6] 刘颂豪. 光电子技术与产业 [J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(4): 1–4.
- [7] 石广田, 杨龙. 光学电流传感器及其研究现状 [J]. *传感器与微系统*, 2014, **33**(10): 1–4.
- [8] ISTIS. 国际光电子产业发展现状及趋势 [EB/OL]. http://www.istis.sh.cn/hykbq/wenzhang/list_n.asp?id=3431&sid=1, 2006.
- [9] 激光技术与产业的应用与创新 [EB/OL]. <http://www.ztlaser.com/gsjsgjgy/JGZS/200611/3-36.html>, 2006.