

# 异质结 InP/InGaAs 探测器欧姆接触温度特性研究

曹高奇<sup>1,2,3</sup>, 唐恒敬<sup>1,2</sup>, 李 涛<sup>1,2</sup>, 邵秀梅<sup>1,2</sup>, 李 雪<sup>1,2</sup>, 龚海梅<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为了研究异质结 InP/InGaAs 探测器帽层的欧姆接触特性, 采用 Au/p-InP 传输线模型 (TLM), 对比不同退火温度下的接触特性, 在 480℃、30 s 的退火条件下实现室温比接触电阻为  $3.84 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 同时, 对欧姆接触的温度特性进行了研究, 发现随着温度降低比接触电阻增加, 在 240~353 K 温度范围内界面电流传输主要为热电子-场发射机制 (TFE); 240 K 以下, 接触呈现肖特基特性. 利用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 分别对界面处的扩散程度和化学反应进行了分析, 发现经过 480℃、30 s 退火后样品界面处存在剧烈的互扩散, 反应产物  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  有利于改善 Au/p-InP 的接触性能.

**关键词:** p-InP; 欧姆接触; 比接触电阻; 扫描电子显微镜 (SEM); X 射线衍射仪 (XRD)

**中图分类号:** TN21 **文献标识码:** A

## Temperature-dependent characteristics of ohmic contact in hetero-junction InP/InGaAs detector

CAO Gao-Qi<sup>1,2,3</sup>, TANG Heng-Jing<sup>1,2</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, SHAO Xiu-Mei<sup>1,2</sup>, LI Xue<sup>1,2</sup>, GONG Hai-Mei<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The contact characteristics of Au/p-InP in hetero-junction InP/InGaAs detector were studied in this work. Under the annealing condition of 480℃ for 30s, the ohmic contact was formed with the room-temperature special contact resistance  $3.84 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Temperature-dependent characteristics of ohmic contact were investigated. The results indicate that the special contact resistance increases with decreasing temperature, the current transmission mechanism at the interface is thermion-field emission mechanism (TFE) at the temperature of 243 K to 353 K; while below 240 K, the contact performance presents schottky property. By means of scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer, the diffusion degree and metallurgical reaction at the Au/InP interface were investigated, and the penetration degree is very heavy at the interface of sample after annealed at 480℃ for 30s and the generation of  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  produced by metallurgical reaction contributes to improve the contact performance of Au/p-InP.

**Key words:** p-InP, ohmic contact, special contact resistance, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD)

**PACS:** 73.40.-c

收稿日期: 2014-07-08, 修回日期: 2015-05-26

Received date: 2014-07-08, revised date: 2015-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2012CB619200), 国家自然科学基金 (61205105)

Foundation items: National Key Basic Research and Development Program of China (2012CB619200), National Natural Science Foundation of China (61205105)

作者简介 (Biography): 曹高奇 (1987-), 男, 博士研究生, 主要从事短波红外探测器的研究. E-mail: caogaoqi2008@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn

## 引言

由于 InGaAs 材料成熟的生长技术及其在近红外探测方面优异的性能, InP/InGaAs/InP 异质结红外探测器在民用、商用以及军事等有广泛的应用前景, 如夜视成像、空间遥感、红外精确制导等<sup>[1-4]</sup>. 对于 InP/InGaAs/InP 红外探测器, p-InP 帽层与金属之间的接触特性对探测器的性能如量子效率和响应特性有较大的影响. 目前已有的报道表明, n-InP 的比接触电阻可以做到  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ <sup>[5]</sup>; 但是由于 P 型 InP 的势垒高度高, 而且空穴的有效质量大, 导致实现 P 型 InP 欧姆接触更难. 对于 p-InP, 已有的报道多采用 AuZn 基和 AuBe 基金膜系, 其比接触电阻可以达到  $10^{-5}$  量级<sup>[6-7]</sup>, 由于 Zn 元素不稳定, Zn 与 InP 粘附性差, 而且 Zn 的蒸汽压高, 在 Zn/Au 制备中很难控制 Zn 的比例; 而 Be 具有毒性, 对人体危害较大, 因此发展不含 Zn 或 Be 的 p-InP 欧姆接触合金膜系很有必要; 对于非合金膜系, 只采用一种单层金属作为接触电极, 一般会选取 Au、Pt 等性能稳定、黏附性好的金属材料. 目前, 关于 P-InP 欧姆接触研究的报道, 大部分只集中在室温下比接触电阻的评价和退火前后合金相的变化上, 而对于 Au 基膜系及 Au 与 p-InP 之间的传输机制及温度特性的研究鲜有报道.

本文研究了不同退火条件下的 Au 与 p-InP 的接触特性, 获得了优化的退火参数, 测试了 133 ~ 373 K 温度范围内电学接触特性, 分析了界面电流的传输机制, 并利用光学显微镜、SEM 和 XRD 研究了退火后金属-半导体界面的变化, 为高性能 InGaAs 探测器的制备及应用提供实验基础.

## 1 实验

实验选用了分子束外延生长的晶格匹配 NIN 型 InP/InGaAs/InP 材料, 材料结构如图 1 所示, 其中帽层为 n 型的 InP 材料, 掺杂浓度为  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 吸收层为本征掺杂的 InGaAs 层, 缓冲层为 n 型重掺杂的 InP, 掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

器件采用传输线模型结构, 首先是通过扩散掺杂工艺, 使帽层 InP 由 n 型变成 P 型掺杂; 再经过表面清洗、光刻、等离子清洗等, 并采用离子束溅射沉积 50 nm 的 Au, 制备样品编号为 1#、2#、3#, 分别在不同的退火参数下进行快速退火, 退火工艺参数如表 1 所示, 完成后即制备出了传输线模型 (TLM) 器件, 如图 2 所示, 其中电极大小为  $250 \mu\text{m} \times 120$



图 1 样品剖面结构示意图

Fig. 1 Cross section of sample

$\mu\text{m}$  的矩形, 电极之间的间距从  $10 \mu\text{m}$  开始, 间隔  $2 \mu\text{m}$  逐步增加到  $28 \mu\text{m}$ . 采用控温仪和 Agilent B1500A 仪器在不同温度下测试器件  $I$ - $V$  特性, 采用 SEM 和 XRD 研究界面的互扩散和合金化学反应.

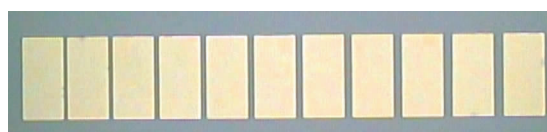


图 2 传输线模型图片样品

Fig. 2 TLM structure picture of sample

表 1 样品的退火工艺参数

Table 1 The annealing parameter of samples

| Sample      | 1#     | 2#     | 3#     |
|-------------|--------|--------|--------|
| Temperature | 450/°C | 480/°C | 480/°C |
| Time        | 30/s   | 30/s   | 15/s   |

## 2 结果讨论与分析

### 2.1 电极接触的电学特性

图 3 为室温下样品 1#、2#、3# 的  $I$ - $V$  曲线. 由图可知, 样品 2# 的  $I$ - $V$  曲线呈线性关系, 表现出明显的欧姆接触特性; 样品 1# 和 3# 的  $I$ - $V$  曲线呈现为“S”型, 表现出明显的整流作用, 为肖特基接触. 在欧姆接触情况下, 比接触电阻是评定性能好坏的重要参数, 其物理上的定义为电流密度对界面上电压降的导数的倒数:

$$\rho_c = (dJ/dV)_{V=0}^{-1} \quad (1)$$

比接触电阻越小, 说明金属-半导体接触性.

TLM 方法是实现比接触电阻测试的一种常用方法, 在 TLM 理论中, 电极间的总电阻与电极距离呈线性关系, 可以导出金属电极与半导体之间的比接触电阻, 其关系式为:

$$\rho_c = R_c^2 W^2 / R_{sh} \quad (2)$$

其中,  $R_c$  为接触电阻,  $R_{sh}$  为半导体材料的方块电阻,

$W$  为金属电极图案的长度. 室温下, 样品 2# 为欧姆接触, 利用式(2) 求出其比接触电阻为  $3.84 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 表明金属与半导体之间形成了良好的欧姆接触.

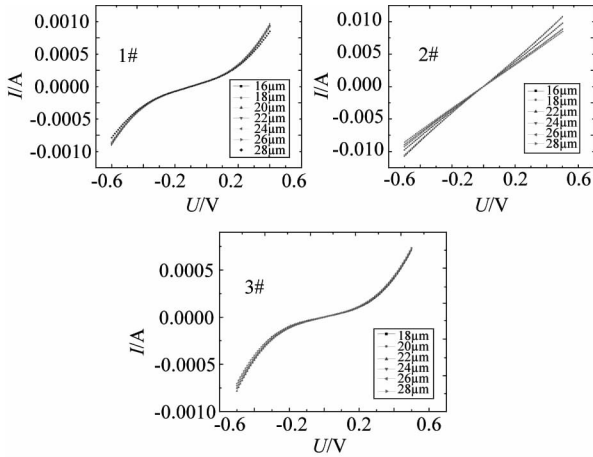


图3 室温下样品 1#、2# 和 3# 的  $I$ - $V$  曲线  
Fig. 3  $I$ - $V$  curves of sample 1#, 2# and 3# at room temperature

### 2.2 电流传输机制分析

为了分析 Au 与 P-InP 接触界面上的电流传输机制, 测试了 373 ~ 133 K 温度范围内的电学接触性能. 图 4 为样品 2# 在不同温度下的  $I$ - $V$  曲线, 其中电极之间的距离为 18  $\mu\text{m}$ . 图中  $I$ - $V$  曲线变化可以分成两部分: 其中线性部分对应的温度范围为 373 ~ 243 K, 且随着温度的降低, 电流变小, 欧姆接触性能变差; 非线性部分对应的温度范围为 233 ~ 133 K, 随着温度的降低, 电流变小, 曲线弯曲的程度越厉害, 表现出一定的肖特基接触, 而且越来越强. 在欧姆接触情况下, 利用(2) 式可以求出不同温度下的, 结果如图 5 所示.

金属-半导体界面上的电流传输机制主要有: 热电子发射机制 (TE)、场发射机制 (FE) 和热电子场发射机制 (TFE). 对于传输机制的判断, 可以通过隧穿几率因子  $E_{00}$  与平均热能  $kT$  之间的对比定性地得出,  $E_{00}$  表示式为:

$$E_{00} q h \sqrt{N/m^* \epsilon_s} / 4 \pi \quad (3)$$

其中  $h$  为普朗克常量,  $q$  为电子电荷量,  $N$  为掺杂浓度,  $m^*$  为电子或空穴的有效质量,  $\epsilon_s$  为材料的介电常数. 当  $kT \approx E_{00}$  时, TE 起主导作用, 肖特基行为占优; 当  $kT \approx E_{00}$  时, FE 起主要作用, 当  $kT \approx E_{00}$  时, TFE 为主要机制.

邓洪海<sup>[8]</sup> 等人研究在该扩散条件下 p-InP 的掺

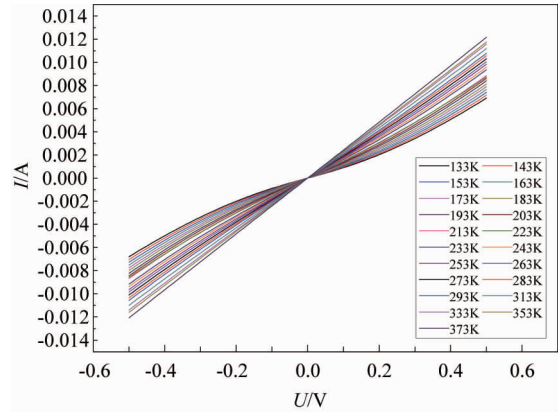


图4 样品 2# 在不同温度下  $I$ - $V$  曲线 (间距 18  $\mu\text{m}$ )  
Fig. 4  $I$ - $V$  curves of sample 2# (spacing 18  $\mu\text{m}$ ) at different temperatures

杂浓度约为  $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ; 已知 p-InP 的空穴有效质量  $m^* = 0.64 m_0$ ,  $m_0$  为自由电子质量, 介电常数  $\epsilon_s = 12.4 \epsilon_0$ ,  $\epsilon_0$  为真空介电常数, 代入(3) 式求得  $E_{00}$  为 0.026 eV. 在 373 K ~ 243 K 温度范围内最大平均热能为 0.032 eV, 最小为 0.021 eV, 满足  $kT \approx E_{00}$ , 所以此温度范围内金属-半导体界面上的电流传输机制主要为 TFE 机制. Padovani、Stratton 和 A. Y. C. YU 研究了金-半接触界面上电流传输机制<sup>[9]</sup>, 得出 TFE 机制下比接触电阻与温度的关系为: 
$$\rho_c = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V=0} = \frac{k^2 \cosh(E_{00}/kT) \sqrt{\coth(E_{00}/kT)}}{(A^{**} q \sqrt{\pi} (\varnothing_{Bp} + \varnothing_p) E_{00})} \times \exp \left[ \frac{q(\varnothing_{Bp} + \varnothing_p)}{E_{00} \coth(E_{00}/kT)} - \frac{q\varnothing_p}{kT} \right] \quad (4)$$
 其中,  $\varnothing_p$  是费米能级与价带顶之间的差值, 即  $\varnothing_p = (E_F - E_V)/q$ ,  $\varnothing_{Bp}$  是势垒高度,  $A^{**}$  是理查德逊常数,  $q$  为电子电量,  $k$  是玻耳兹曼常数.

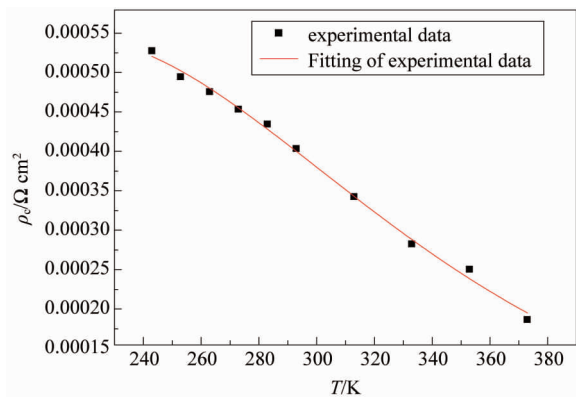


图5 样品 2# 的比接触电阻及拟合曲线  
Fig. 5 The special contact resistances of sample 2# and the fitted curve

利用  $\rho_c$  -  $T$  关系, 对样品 2# 的比接触电阻进行

拟合,如图 5 所示. 得到  $E_{00} = 0.044 \text{ eV}$ ,  $\phi_p = 0.13 \text{ eV}$ ,  $\phi_{Bp} = 0.59 \text{ eV}$ . 由  $E_{00}$  的关系式可以反推出金属与半导体界面处的掺杂浓度为  $N = 4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . 此结果与邓洪海等人<sup>[8]</sup>的二次离子质谱(SIMS)分析结果相比,在数量级上是基本一致的,稍高的原因可能是:Zn 与 InP 之间黏附性差,在退火过程中 Zn 的外扩散并在界面处积累,使得界面处的掺杂浓度增大.

对于 233 ~ 133 K 温度范围内,样品 2# 的  $I-V$  关系表现出肖特基特性,分析认为可能的原因是:一方面由于温度的降低会使平均热能  $kT$  降低,使得空穴所处能级越来越靠近费米能级,而空穴越靠近费米能级,所需穿过的势垒厚度就越大,隧穿概率越低;另一方面是由于温度降低,InP 材料的禁带宽度  $E_g$  增大,导致势垒高度和势垒厚度增大,也使得空穴的隧穿概率降低.

### 2.3 SEM 和 XRD 分析

利用扫描电子显微镜(SEM)来观察退火后接触界面的变化,如图 6 所示. 退火处理后,2#样品的接触界面形貌比较粗糙,界面上的 Au 与 InP 之间的化学反应和互扩散程度比较剧烈;相反地,退火处理后,在 1# 和 3#样品的界面上互扩散程度很小. 这可能是由于退火的温度低或退火时间短所导致的,当温度比较低时,会使得 Au 的流动性比较差和反应速率比较慢,导致扩散和发生反应的程度不够;当退火的时间不够长时,会导致 Au 扩散的时间很短,而且发生反应的量比较少,所以界面变化很不明显.

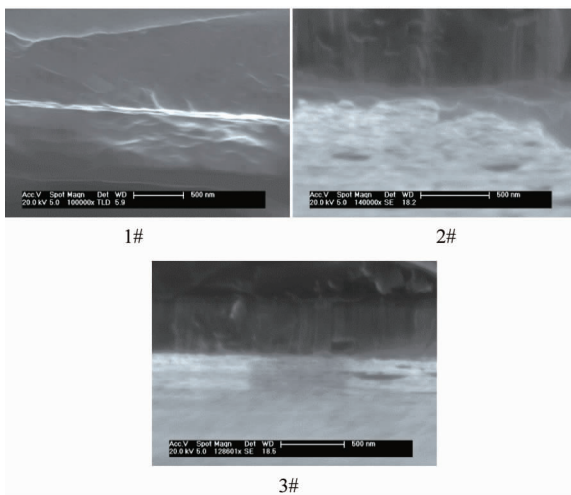


图 6 不同退火条件下样品的 SEM 剖面图  
Fig. 6 SEM cross-sections of sample treated by different annealing conditions

对于退火过程中 Au-InP 界面的化学反应,实验

采用 X 射线衍射进行分析,如图 7 所示. 样品 2# 中出现了 Au、Cr 以及合金化合物  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  的衍射峰,而样品 3# 中出现了 Au、Cr 和合金化合物  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$ 、 $\text{Au}_3\text{In}$  的衍射峰. 合金化合物的出现表明在退火的过程中 Au 与 InP 发生了反应. 对比分析样品 2# 和 3# 的 XRD 图谱,发现 Cr 的衍射峰强度没有变化, Au 衍射峰强度样品 3# 要比样品 2# 大,而  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  的衍射峰强度样品 3# 要比样品 2# 小很多,且  $\text{Au}_3\text{In}$  在样品 2# 中没有出现. 考虑两个样品的退火条件,可能是 480 度退火条件下, Au 与 InP 反应生成了合金  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$ 、 $\text{Au}_3\text{In}$ ;随着时间的延长,有更多的 In 释放到界面处参与反应,同时生成的  $\text{Au}_3\text{In}$  会向  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  转变,在此过程中,会有更多的 Au 原子参与反应,这也就导致 Au 的衍射峰强度降低,  $\text{Au}_3\text{In}$  的衍射峰消失,  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  的衍射峰增强. 这些研究结果与 Victor G 等人<sup>[10-11]</sup>的研究结果一致.

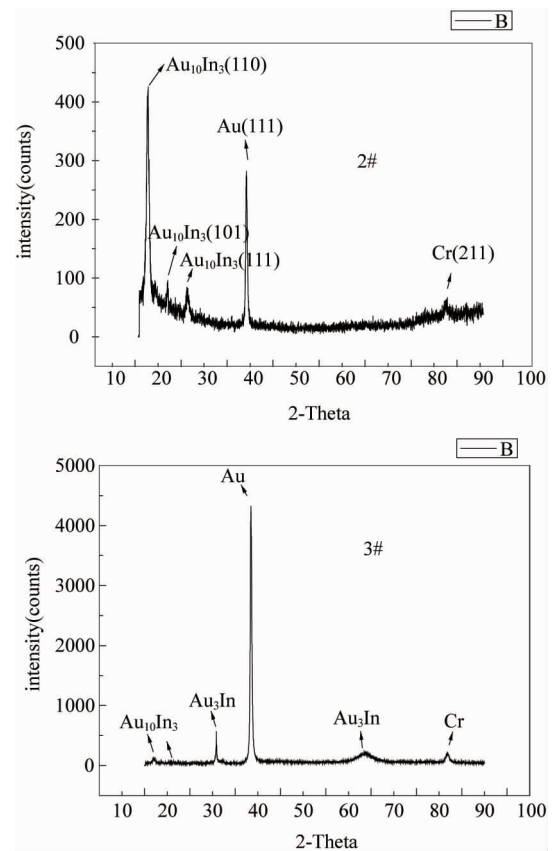


图 7 退火后样品的 XRD 图  
Fig. 7 The XRD figures of sample after annealing

结合室温下  $I-V$  特性和 SEM 以及 XRD 图像,可以看出界面上的 Au 与 InP 反应程度会对界面形貌产生比较大的影响,而且反应生成的合金化合物会影响 Au/InP 的接触性能,当  $\text{Au}_{10}\text{In}_3$  金相化合物增

多,会明显改善金-半界面的接触性能,使其为欧姆接触。

### 3 结论

对不同退火条件下的快速热退火对 Au/p-InP 接触特性的影响进行了研究,结果表明:退火温度在 480、30 s 时形成欧姆接触,比接触电阻  $\rho_c = 3.84 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,而且欧姆接触的形成依赖于金一半界面上的冶金及化学反应、退火的温度和时间。对 Au/InP 界面上的电流传输机制进行分析,获得欧姆接触时电流传输机制为 TFE 机制,拟合得到金-半界面掺杂浓度、势垒高度和费米能级与价带顶之间的差值,分别为  $N = 4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $\phi_p = 0.13 \text{ eV}$ 、 $\phi_{Bp} = 0.59 \text{ eV}$ ,对于低温度下的电学性能变化,分析结果表明这是由于空穴的热能随温度降低和半导体材料的禁带宽度随温度增加导致的。

### References

- [1] MacDougal M, Geske J, Wang C, *et al.* Low dark current InGaAs detector arrays for night vision and astronomy[J]. *SPIE*, 2009, **7298**:72983F-1-72983F-10.
- [2] GONG Hai-Mei, ZHANG Ke-Feng, TANG Heng-Jing, *et al.* Developments of near IR linear InGaAs FPAs in china [J]. *Infrared and Laser Engineering* (龚海梅,张可锋,唐恒敬,等. InGaAs 近红外线列焦平面阵的研制进展. *红外与激光工程*), 2009, **38**(1):14-18.
- [3] GONG Hai-Mei, LIU Da-Fu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering* (龚海梅,刘大幅,航天红外探测器的发展现状与进展. *红外与激光工程*), 2008, **37**(1):18-24.
- [4] Cohen M J, Lange M J, Ettenberg M H, *et al.* A thin film indium gallium arsenide focal plane array for visible and near infrared hyperspectral imaging[C]. *LEOS*, 1999: 744-745.
- [5] Fatemi N' S. The achievement of near-theoretical- minimum contact resistance to InP[J]. *J Appl. Phys*, 1993, **74**(11):6740-6746.
- [6] Hasenberg T C, Garmire E. An improved Au/Be contact to p-type InP[J]. *J Appl. Phys*, 1987, **61**(2): 808-809.
- [7] Baca A G, Ren F, Zolper J C, *et al.* A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors [J]. *Thin Solid Films*, 1997, **308-309**:599-606.
- [8] DENG Hong-Hai, WEI Peng, ZHU Yao-Ming, *et al.* Annealing process on Zn diffusion and its application in fabrication of InGaAs detector[J]. *Infrared and Laser Engineering* (邓洪海,魏鹏,朱耀明,等. 退火对 Zn 扩散的影响及其在 InGaAs 探测器中的应用. *红外与激光工程*), 2012, **41**(2): 279-283.
- [9] Yu A Y C. Electron tunneling and contact resistance of metal-silicon contact barriers [J], *Solid-State electronics*, 1970, **13**: 239-247.
- [10] Weizer V G, Fatemi N S. Contact spreading and the Au<sub>3</sub>In to Au<sub>9</sub>In transition in the Au-InP system [J]. *J Appl. Phys*, 1990, **68**(5): 2275-2284.
- [11] WEI Peng, ZHU Yao-Ming, DENG Hong-Hai, *et al.* Low resistance ohmic contacts to p-InP of mesa-isolated InP/InGaAs PIN photovoltaic detector [J]. *Infrared and Laser Engineering* (魏鹏,朱耀明,邓洪海,等. 台面型 InP/InGaAs PIN 光伏探测器的 p-InP 低欧姆接触. *红外与激光工程*), 2011, **40**(12):2309-2313.