

doi: 10.3788/gzxb20184703.0304001

InGaAs 探测器的盲元分析及 P 电极优化

邓洪海¹, 杨波², 夏辉², 邵海宝¹, 王强¹, 王志亮¹,
朱友华¹, 黄静¹, 李雪², 邵秀梅², 龚海梅²

(1 南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

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

摘 要:采用扫描电容显微镜分析了平面型 PIN In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As 短波红外探测器盲元产生的原因,利用半导体器件仿真工具 Sentaurus TCAD 对探测器中的盲元特性进行了模拟,并利用制备的 Au/P-In_{0.52}Al_{0.48}As 传输线结构芯片对 P 电极的欧姆接触进行优化.研究表明,P 电极与扩散区外的 N⁻-In_{0.52}Al_{0.48}As 帽层形成导电通道导致了盲元的产生,优化后 Au 与 P-In_{0.52}Al_{0.48}As 帽层之间具有更低的比接触电阻为 $3.52 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$,同时 Au 在高温快速热退火过程中的流动被抑制,从而降低了盲元产生的概率.

关键词:短波红外探测器;InGaAs;盲元;比接触电阻;Au

中图分类号:TN362; TN215

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0304001-6

Blind Pixel Analysis of InGaAs Detector and Optimization of P Electrode

DENG Hong-hai¹, YANG Bo², XIA Hui², SHAO Hai-bao¹, WANG Qiang¹,
WANG Zhi-liang¹, ZHU You-hua¹, HUANG Jing¹, LI Xue², SHAO Xiu-mei², GONG Hai-mei²

(1 School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

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

Abstract: The blind pixels existing in planner PIN type In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As short wavelength infrared detector were analyzed with the aid of scanning capacitance microscopy technique. And the simulation of blind pixels by Sentaurus TCAD was also presented. In order to eliminate the blind pixels, the transfer line model chip was fabricated to optimize the ohmic contact of Au electrode on P-In_{0.52}Al_{0.48}As. The result shows that a conductive channel formed between the P electrode and the N⁻-In_{0.52}Al_{0.48}As cap layer outside the diffusion region results in blind pixel generation. Furthermore, the special contact resistivity which is $3.52 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ of Au on P-In_{0.52}Al_{0.48}As was obtained and the problem of Au flowing occurred in rapid thermal processing was suppressed after optimization, so that the probability of blind pixels generation was reduced.

Key words: Short wavelength infrared detector; InGaAs; Blind pixel; Special contact resistivity; Au

OCIS Codes: 040. 3060; 040. 5160; 060. 2330; 110. 3080

0 引言

采用三元化合物 In_{1-x}Ga_xAs 材料制备的短波红外探测器,在 0.9~1.7 μm 波段具有非制冷室温工作、

基金项目:国家自然科学基金(No.61505090),南通市科技项目(Nos.GY12015010, GY12016024),南通大学自然科学基金项目(Nos.14ZY003, 14ZY002, 03080666, 14Z003),江苏省六大人才项目(Nos. 2016-XCL-052, 2013-XCL-013),南通智能信息技术联合研究中心开放课题基金项目(No. KFKT2016A05),江苏省高校自然科学基金(No. 15KJB150023)和江苏省高等学校自然科学研究重大项目(No.17KJA470007)资助

第一作者:邓洪海(1986—),男,讲师,博士,主要研究方向为红外光电探测器技术. Email:denghonghai@ntu.edu.cn

通讯作者:王志亮(1978—),男,副教授,博士,主要研究方向为半导体器件. Email:wangzli@ntu.edu.cn

收稿日期:2017-08-06; **录用日期:**2017-11-28

<http://www.photon.ac.cn>

探测率高、均匀性好等优点,是小型化、低成本和高可靠性的短波红外探测系统的最佳选择,在光学通讯、遥感、医学成像、生产过程监测、夜视等领域有广阔的应用前景^[1-3].特别是 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$,因晶格常数与 InP 相匹配,具有更低的暗电流和噪声,其典型器件在室温下的探测率可以达到 $10^{13}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$. 由于制备工艺、材料特性等原因,红外探测器容易出现掺杂不均、掩膜误差等现象,导致探测器像元光电特性曲线不一致,因此,红外焦平面阵列存在响应不均匀和盲元等问题^[4]. 盲元主要包括光敏芯片和读出电路的盲元、倒装焊工艺进行互连产生的盲元以及在使用过程中性能下降产生的盲元.随着光敏芯片像元规模的扩大以及像元尺寸的减小,盲元出现的几率也大幅提高^[5].如果在成像中不对盲元进行补偿剔除等有效的处理,将会严重影响红外成像质量.文献[3]报道了近红外 256×1 元 InGaAs 焦平面探测器中的无效像元问题,光敏芯片较低的零偏电阻、键压过程引入的损伤和虚焊以及钝化膜侧面覆盖较薄都会导致无效像元产生.文献[5]通过对红外焦平面阵列工艺过程的分析,确定了盲元的 4 种主要类型及相应的判别方法.文献[6]提出了一种将多尺度框架与回归模型相结合的自适应盲元补偿方法,建立了一套基于关键帧提取的多尺度盲元补偿手段来校正不均匀性.文献[7]第一次使用双波段红外图像盲元校正算法,以克服非均匀性校正过程中存在的图像质量缺陷.从目前国内外的文献来看,与红外焦平面阵列盲元相关的研究主要集中在盲元的判别、检测方法和补偿算法等方面,对盲元的产生机理和相应的工艺优化等方面的研究报道相对较少,研究红外焦平面探测器的盲元抑制对应用系统具有重要意义.

本文主要针对平面型 InGaAs 红外探测器中高温快速热退火过程(Rapid Thermal Processing, RTP)引起 Au 电极流动导致盲元的问题进行了研究,首先采用扫描电容显微镜(Scanning Capacitance Microscopy, SCM)对盲元进行了解理分析,然后采用 Sentaurus TCAD 对盲元失效现象进行了模拟验证,最后制备了 $\text{Au/P-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 传输线模型(Transfer Line Mode, TLM)芯片,优化了 P 电极的欧姆接触工艺.

1 实验过程

本文研究的近红外 InGaAs 探测器为正入射平面型线列结构,以 Zn_3As_2 为扩散源采用双温区闭管扩散工艺制备而成,外延材料采用 MBE(Molecular Beam Epitaxy)技术在 InP 衬底上依次外延生长 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 $\text{N}^+-\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层(Si 掺杂 $n\approx 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)、 $2.5\ \mu\text{m}$ 的 $\text{N}^--\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层(Si 轻掺杂 $n\approx 5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$)、 $1\ \mu\text{m}$ 的 $\text{N}^--\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 帽层(Si 轻掺杂 $n\approx 5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$).探测器均采用 Au 作为 P 电极和 N 电极,其中为了使 P 电极和 $\text{P-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 形成良好的欧姆接触,芯片在 N_2 气氛下经过了 480°C 的高温快速热退火.器件为 24 元线列,扩散窗口为 $1\ 000\ \mu\text{m}\times 450\ \mu\text{m}$,光敏元中心距为 $500\ \mu\text{m}$,相邻光敏元之间设置保护环,其宽度为 $10\ \mu\text{m}$,保护环与光敏元之间的距离为 $15\ \mu\text{m}$,器件截面如图 1.

采用红外探测器测试系统对多个 InGaAs 线列器件进行了光电性能测试,根据测试结果确定了盲元的位置.结果显示盲元的 $I-V$ 特性异常,并表现为 PIN 结整流特性消失的漏电现象,即负向偏压下该光敏元的暗电流过大,可与正向偏置电流相比,如图 2.

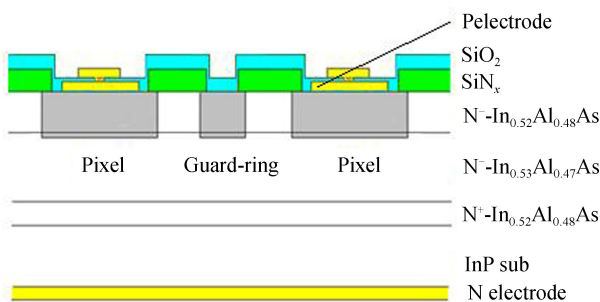


图 1 平面型 InGaAs 探测器结构
Fig.1 Structure of the planar InGaAs detector

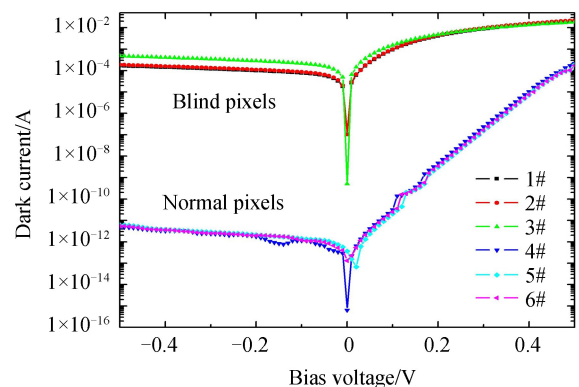


图 2 盲元和正常光敏元的 $I-V$ 特性
Fig.2 $I-V$ characteristics of blind and normal pixels

2 结果及讨论

2.1 光敏芯片中盲元的 SCM 分析

SCM 是获得 PIN 结在纳米尺寸上二维电学分布的重要微观表征手段^[8-13],扫描图像的获得主要依赖材料表面载流子的耗尽和积累,而非本征材料中的载流子主要来源于激活的掺杂元素,在实际应用中,通过对横截面扫描就可以获得光敏元内部掺杂的结构特征.由于此系列平面型 InGaAs 探测器的 PIN 结是通过 P 型 Zn 杂质扩散来形成的,因此如果扩散工艺的稳定性出现问题使光敏元之间产生均匀性差异,可能会使器件内部形成漏电通道导致光敏元失效,基于此采用SCM对器件进行解理获取异常光敏元内部的二维掺杂分布情况.沿图 3 中 X 轴方向进行解理并对截面进行 SCM 测试,结果如图 4,芯片的正常像元与盲元具有相同的扩散结结构,其 PIN 结深度均为 1.28~1.30 μm,像元扩散区与保护环扩散区之间的间隙约为 12 μm.对多个盲元进行解理测试后发现,扩散工艺在不同样品和不同探测器光敏元上具有较好的均匀性,像元扩散区与保护环扩散区并没有在内部连通,因而排除了因扩散工艺差异引起漏电的可能性.

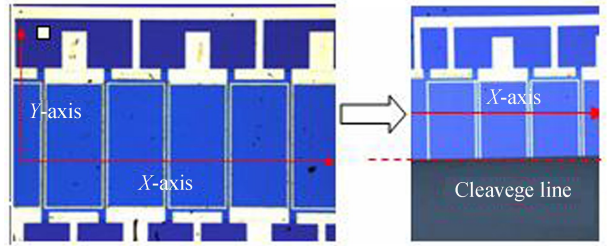


图 3 探测器解理示意图

Fig.3 Partial fracture of detector before and after cleavage

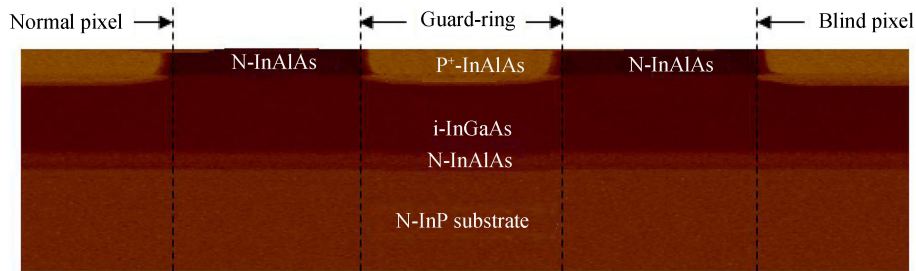
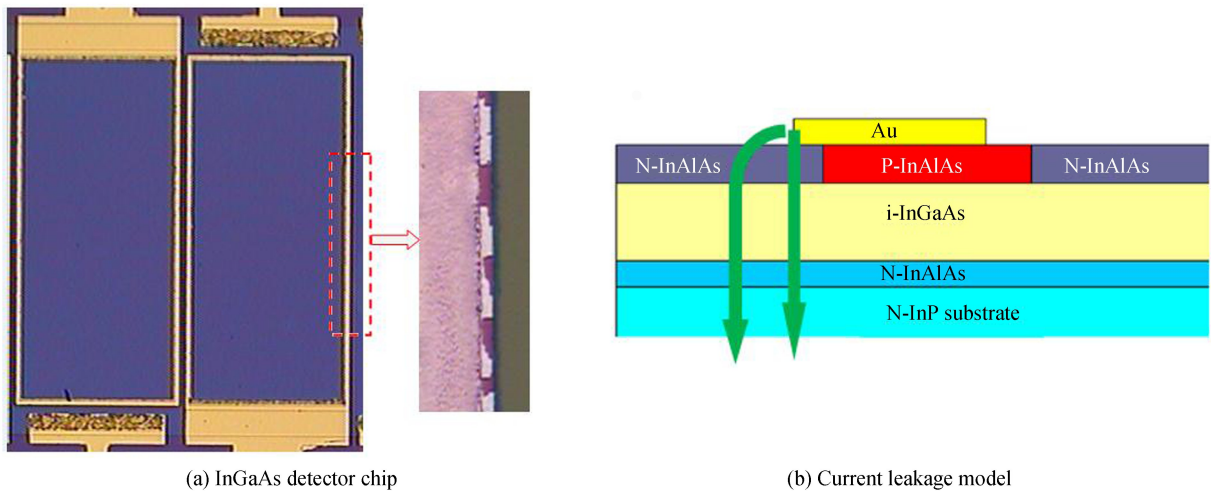


图 4 沿 X 轴的器件横截面 SCM 扫描图

Fig.4 Cross-section of detector along X axis scanned by SCM

对 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 红外探测器, P- $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 帽层与 Au 电极之间需要进行 RTP 处理以形成良好的 P 电极欧姆接触.对盲元的光敏元表面进行光学显微镜检,如图 5.由于 Au 为快扩散杂质,经过高温快速热退火工艺,Au 电极在 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 帽层表面产生了横向流动现象,与 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 互扩散并发生化学反应生成 Au_3In 、 $\text{Au}_{10}\text{In}_3$ 等 In-Au 化合物,如果电极流动后横向扩散到 $\text{N}^- - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{SiN}_x$ 界面,并与界面下的非 P 型掺杂区的 $\text{N}^- - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 帽层接触,那么器件会有 2 条导电通道,其中一条为正常器件的电流流经 PIN 的通道,而另一条则为电流流经 NiN 的通道(图 5(b)箭头所示).为了验证



(a) InGaAs detector chip

(b) Current leakage model

图 5 RTP 后 Au 在 P-InAlAs 帽层的流动

Fig.5 Au flowing on P-InAlAs after RTP

盲元的漏电区域为光敏元的电极区域,采用 Sentaurus TCAD 软件建立了如图 5 所示 NiN 结漏电的器件模型,模拟采用了一些相关物理模型包括浓度依赖迁移率模型、电场依赖迁移率模型、俄歇复合模型、间接复合模型和碰撞离化模型,扩散窗口和 Au 电极宽度与实际器件相同,分别取 $450\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$.拟合采用的吸收层的部分关键参数包括有效导带态密度和有效价带态密度、电子和空穴迁移率、电子和空穴肖克莱-里德-霍尔 (Shockley-Read-Hall, SRH) 寿命等,分别为 $2.1 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 、 $7.7 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 、 $10000\ \text{cm}^2\ \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $500\ \text{cm}^2\ \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $7.7 \times 10^{-6}\ \text{s}$ 、 $7.7 \times 10^{-6}\ \text{s}$ ^[14].通过计算发现理论上得到的 I - V 曲线与真实漏电器件的 I - V 曲线符合得很好,如图 6,从而验证了电流流经 NiN 导电通道的漏电机理,因此为了避免电极流动导致的器件失效,需要对电极的 RTP 工艺进行优化.

2.2 P 型电极工艺优化

良好的欧姆接触对于器件的性能、可靠性和稳定性都至关重要,一个好的欧姆接触其比接触电阻要足够小,使得电极接触电阻与器件的电阻相比可以忽略.对于 In 基 III-IV 族化合物半导体,P 型欧姆接触要比 N 型难做得多,其原因一是由于材料本身的特性,空穴的有效质量要比电子的有效质量大得多,势垒高度也比 N 型材料高^[15-16];另一原因是欧姆接触制备工艺本身的问题,与台面型 InGaAs 探测器采用原位掺杂的材料相比,平面型 InGaAs 探测器采用扩散或者离子注入成结,外延材料的掺杂情况以及表面特性更为复杂.由于 Au/Zn/Au 金属体系表面比较粗糙,与帽层的粘附性不好,容易在浮胶过程中从样品表面脱落,前期的工作已经将 Au/Zn/Au 金属体系优化为离子溅射方式生长的 Au 层 P 电极,其比接触电阻约为 $1.7 \times 10^{-3}\ \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$.在平面型 InGaAs 探测器工艺制备过程中,生长完 P 型电极后,淀积一层 SiN_x 钝化膜,能够阻止帽层中的 In 或 As 元素的向外扩散,降低 InAlAs 帽层表面的组分分解.

针对 RTP 导致 P 电极流动问题,制备了传输线模型芯片对扩散后 P-InAlAs 与 Au 欧姆接触特性进行研究.图 7 为样品在不同退火条件下不同电极间距间的 I - V 曲线,样品在两种退火条件下 I - V 曲线均呈良好的线

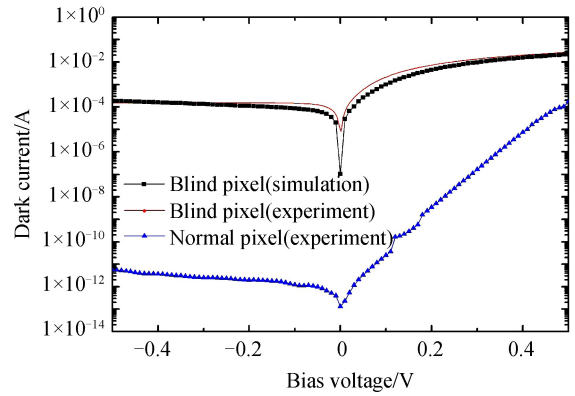


图 6 实验 I - V 曲线和模拟结果
Fig.6 Comparison of experimental and simulated I - V characteristics

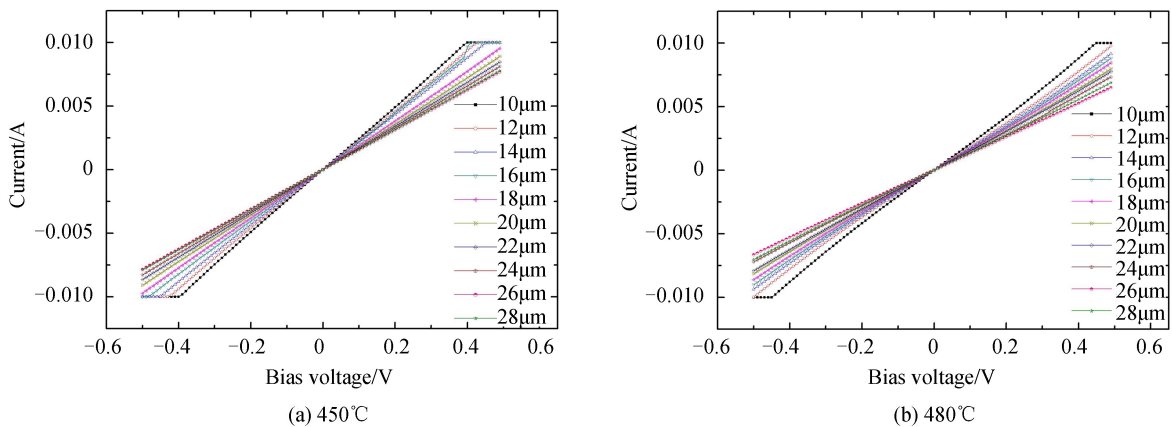


图 7 不同退火温度下 TLM 芯片电极间 I - V 曲线
Fig.7 I - V curves between TLM pads annealed at different anneal temperature

性,说明器件的电极接触已是良好的欧姆接触.传输线模型的比接触电阻 ρ_c (单位: $\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$) 可以表示为

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Big|_{V=0} = R_c^2 W^2 / R_{sh} \quad (1)$$

式中 R_c 为接触电阻, R_{sh} 为半导体材料的方块电阻, W 为接触电极的宽度. $2R_c$ 和 R_{sh}/W 分别为图 7 中直线的截距和斜率.

如图8,采用式(1)线性拟合不同间距的传输线电极之间的电阻,样品在450℃和480℃的比接触电阻分别为 $3.52 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $7.12 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$.与原制备工艺的快速热退火温度480℃相比,样品在450℃退火后具有更低的比接触电阻,而且电极能够保持良好的形貌,并没有出现P电极流动的现象,如图9.

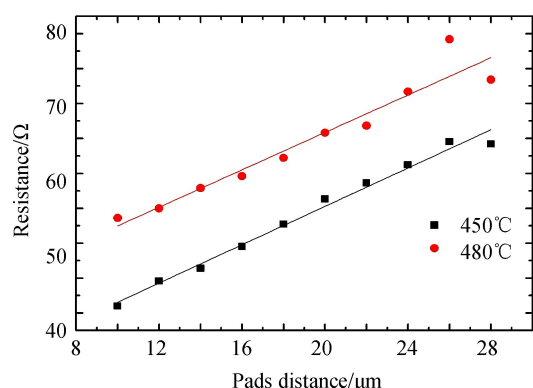


图8 从I-V曲线中提取的传输线模型电极间电阻图
Fig.8 Resistance from I-V curves between TLM pads

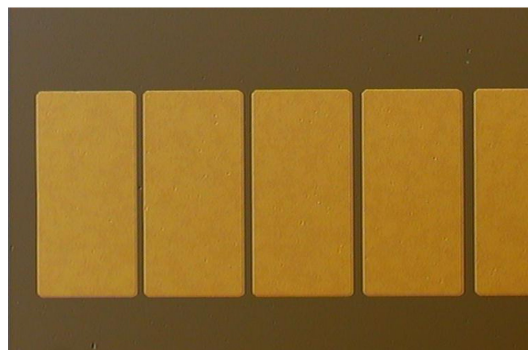


图9 450℃退火后照片
Fig.9 Picture of samples annealed at 450℃

3 结论

本文通过SCM微观分析和器件模拟对正照射平面型InGaAs光敏芯片的盲元进行了研究.结果表明,P型电极在高温快速热退火过程中产生了流动,导致电极与扩散区外的 $\text{N}^- \text{-In}_{0.52} \text{Al}_{0.48} \text{As}$ 帽层形成导电通道,从而产生盲元.通过Au/P-In_{0.52}Al_{0.48}As传输芯片对P电极的欧姆接触进行了优化,实现了更低的比接触电阻,且有效抑制了P电极的流动.

参考文献

- [1] ROUVIE A, HUET Q. SWIR InGaAs focal plane arrays in France[C]. SPIE, 2013, **870403**: 1-9.
- [2] WANG Yun-ji, TANG Heng-jing, LI Xue, et al. Performance of InGaAs detector with SiN diffusion Mask[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, **33**(4): 333-336.
- [3] LI Xue, SHAO Xiu-mei, TANG Heng-jing, et al. Inoperable pixels of 256×1 element linear InGaAs near-infrared focal plane arrays[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, **30**(5): 409-438.
李雪, 邵秀梅, 唐恒敬, 等. 近红外 256×1 元 InGaAs 焦平面探测器无效像元研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(5): 409-438.
- [4] HU Peng-bo, ZHAN Dong-jun, CHEN Hua-wang, et al. A method of bad pixel detection and compensation for IRFPA [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2017, **15**(3): 69-72.
胡鹏博, 詹东军, 陈华旺. 一种红外焦平面阵列盲元检测与补偿方法[J]. *光学与光电技术*, 2017, **15**(3): 69-72.
- [5] WANG Wei, FAN Yang-yu, SI Jun-jie, et al. Types and determination of bad pixels in IRFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(9): 2261-2264.
王巍, 樊养余, 司俊杰, 等. 红外焦平面阵列盲元类型与判别[J]. *红外及激光工程*, 2012, **41**(9): 2261-2264.
- [6] CHEN Su-ting, MENG Hao, PEI Tao, et al. An adaptive regression method for infrared blind-pixel compensation[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2017, **85**: 443-449.
- [7] CHUONG T N, NICK M, JAMES L R. Dead pixel correction techniques for dual-band infrared imagery[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2017, **71**: 227-235.
- [8] TODD H, ALBERT K H, CHRIS L, et al. Capacitive effects on quantitative dopant profiling with scanned electrostatic force microscopes[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1996, **14**(1): 457-462.
- [9] ROGER A, BRYANT M, MICHAEL Y. Junction metrology by cross-sectional atomic force microscopy[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1996, **14**(1): 452-456.
- [10] KOPANSKI J J, MARCHIANDO J F, BERNING D W. Scanning capacitance microscopy measurement of two-dimensional dopant profiles across junctions[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1998, **16**(1): 339-343.
- [11] BUH G H, CHUNG H J, YI J H, et al. Electrical characterization of an operating Si pn-junction diode with scanning capacitance microscopy and Kelvin probe force microscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **90**(1): 443-448.
- [12] SHIKLER R, MEODED T, FRIED N, et al. Potential imaging of operating light-emitting devices using Kelvin force microscop[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(20): 2972-2974.
- [13] PARK S E, NAUVEN N V, KOPANSKI J J, et al. Comparison of scanning capacitance microscopy and scanning Kelvin probe microscopy in determining two-dimensional doping profiles of Si homostructures[J]. *Journal of Vacuum*

- Science and Technology B*, 2006, **24**(1): 404-407.
- [14] ZHU Min, CHEN Jun, LV Jia-bing, *et al.* Optimization of p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0104004.
朱敏, 陈俊, 吕加兵, 等. p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 探测器结构优[J]. 光子学报, 2016, **45**(1): 0104004.
- [15] KATZ A, THOMAS P M, Chu S N G., *et al.* Pt/Ti Ohmic contact to p++-InGaAsP(1.3 μm) formed by rapid thermal processing[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, **67**(2): 884-889.
- [16] LIN J C, YU S Y, MOHNEY S E. Characterization of low-resistance ohmic contacts to n- and p-type InGaAs[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(4): 0445041.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61505090), the Science and Technology Project of Nantong (Nos. GY12015010, GY12016024), the Natural Science Project of Nantong University (Nos. 14ZY003, 14ZY002, 03080666, 14Z003), the Six Top Talents of Jiangsu Province (Nos. 2016-XCL-052, 2013-XCL-013), the Nantong Intelligent information technology Joint Research Center (No. KFKT2016A05), University Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. 15KJB150023) and Jiangsu Provincial Department of Education (No. 17KJA470007)