

AlGaIn/GaN HEMT 器件金丝球焊键合电极高温特性

陈帅昊¹, 张贺秋¹, 韩永坤¹, 薛东阳¹, 刘力涛¹, 徐瑞良¹, 梁永凤¹, 梁红伟¹, 夏晓川¹, 梁晓华²

(1. 大连理工大学微电子学院, 大连 116024;

2. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理研究中心, 北京 100049)

摘要: 本文采用金丝球焊键合方法制备了 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 的电极引线, 键合金丝纯度为 99.99%, 直径 25 μm , 在空气氛围下进行了 200 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、500 $^{\circ}\text{C}$ 存储 12 h 的高温试验, 在高温存储前后, 进行了键合表面扫描电子显微镜 (SEM) 表征、欧姆接触电学特性测试以及拉力试验。结果表明, 随着存储温度的不断提升, 键合表面逐渐出现空洞、裂纹、键合电极 (PAD) 表面不平整等缺陷, 虽然两个键合接触点之间阻值有所减小, 但是这些缺陷的产生伴随着键合强度的下降; 金丝球焊键合表面形貌的变化可能是键合金丝内部应力受温度影响造成的, 两个键合接触点之间电阻的减小可能是高温处理使欧姆接触电极不同金属层之间互扩散再合金造成的。可见, 在保证键合强度的前提下, 高温处理有利于改善键合电极电学特性。

关键词: 金丝球焊; 高电子迁移率晶体管; 高温存储; 互扩散

中图分类号: TN386.3

High temperature characteristics of AlGaIn/GaN Au wire ball welding bonding electrode

CHEN Shuaihao¹, ZHANG Heqiu¹, HAN Yongkun¹, XUE Dongyang¹, LIU Litao¹, XU Ruiliang¹, LIANG Yongfeng¹, LIANG Hongwei¹, XIA Xiaochuan¹, LIANG Xiaohua²

(1. School of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Research Center for Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In this paper, the electrode leads of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT) were prepared by Au wire ball bonding method. The purity of the bonding Au wire is 99.99% and the diameter is 25 μm . The high temperature tests were carried out at 200 $^{\circ}\text{C}$, 300 $^{\circ}\text{C}$, 400 $^{\circ}\text{C}$ and 500 $^{\circ}\text{C}$ for 12 h in air atmosphere. Scanning electron microscopy (SEM) characterization, ohmic contact electrical characteristics test and tensile test were carried out before and after high temperature storage. The results show that with the increase of storage temperature, defects such as voids, cracks and uneven bonding electrode (PAD) surface gradually appear on the bonding surface. Although the resistance between two bonding contacts decreases, these defects are accompanied by the decrease of bonding strength. The change of the bonding surface morphology may be caused by the influence of temperature on the internal stress of the bonding wire, and the decrease of the resistance between the two bonding contact points may be caused by the interdiffusion re-alloying between different metal layers of the ohmic contact electrode due to the high temperature treatment. It can be seen that high temperature treatment is beneficial to improve the electrical properties of the bonding electrode on the premise of ensuring the bonding strength.

Key words: Au wire ball welding; High electron mobility transistor; high temperature storage;

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11975257, 11675198, 12075045, 11875097, 61574026, 61774072); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (DUT20RC(3)042, DUT19RC(3)074, DUT19LK45); 大连科技创新基金项目 (2018J12GX060)

作者简介: 陈帅昊 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 宽带隙半导体材料、器件

通信联系人: 张贺秋 (1974-), 女, 副高级、硕导, 主要研究方向: 宽带隙半导体材料、器件. E-mail: hqzhang@dlut.edu.cn

interdiffusion

45

0 引言

GaN 作为第三代半导体材料, 具有较好的物理特性, 相比较于其他材料, GaN 具有宽禁带、高电子饱和速度、高击穿电场和高电子迁移率的优良性能^[1-2]。在半导体照明、电力电子器件和探测器等领域发挥重要作用。

50

随着 GaN 基高电子迁移率晶体管 (High electron mobility transistor, HEMT) 器件的不断研究, 应用越来越广泛^[3]。但是, 在一些恶劣、严峻的环境下, 器件的寿命、稳定性等面临着严峻的挑战。在高温环境下应用, 器件封装可靠性对保证器件的工作性能、寿命非常重要。封装工艺中最为关键的一步是引线键合, 其决定着芯片的性能和可靠性。引线键合是用金属丝将芯片的 I/O 端与对应的封装引脚或者基板上布线焊区互连的固相焊接过程, 通过加热、加压和超声能, 产生塑性变形, 界面亲密接触产生电子共享和原子扩散形成焊点的高新技术^[4]。因引线键合技术具有低成本、高可靠、高产量等特点成为芯片互连的主要技术。

55

2018 年 3 月, 北京理工大学材料学院刘丽君等人进行了热超声金丝键合工艺及其可靠性研究, 研究了超声功率、时间和压力对金丝球焊时金丝引线结合性能的影响, 以及键合引线在不同测试温度下的结合性能, 并通过对键合界面的研究分析了影响界面可靠性的原因^[5]。结果表明焊接压力对金丝引线结合性能的影响最大; 并且随着测试时基板加热温度的升高, 金丝球焊第一焊点的剪切断裂载荷以及金丝引线的拉伸断裂载荷均逐渐降低。2020 年 6 月, 中国电子科技集团公司第二十四研究所进行了金丝球焊复合键合工艺的可靠性研究^[6]。结果表明, 剪切强度呈下降趋势, 推断可能是由于复合键合时, 施加的超声能量非但没有形成新的金属原子扩散, 其产生的应力反而对已有的金属间化合物 (Intermetallic Compound, IMC) 形成了一定程度的破坏, 高温储存结果表明复合键合拉力值依然满足国标要求。

60

65

本实验采用纯度为 99.99%、直径 25 μm 金丝, 用热超声球焊的方法在 AlGaN/GaN HEMT 器件键合电极 (PAD) 上进行键合, 研究 200 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、500 $^{\circ}\text{C}$ 高温存储 12 h 对键合拉力、表面微观形貌、电学特性的影响, 并进一步分析其接触特性。

70

1 实验

本实验采用的是蓝宝石衬底的 GaN 外延片, 从下向上依次为 Al_2O_3 衬底层、GaN 缓冲层、400 nm GaN 沟道层、0.8 nm AlN 插入层、23 nm $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}$ 势垒层、2.5 nm GaN 帽层, AlGaN/GaN HEMT 器件结构如图 1 所示。

75

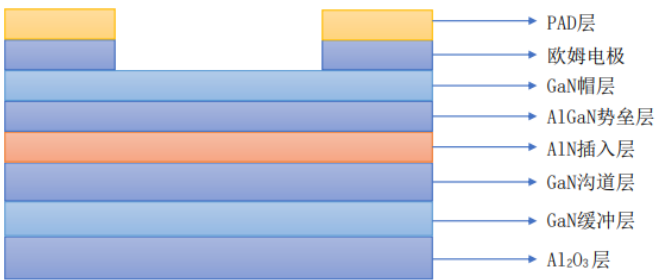


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of AlGaIn/GaN HEMT device structure

80 在外延片上进行欧姆接触电极和 PAD 金属层蒸镀，其中欧姆接触电极蒸镀有七层金属，分别为 Ti/Al/Ti/Al/Ni/Au/Pt（20/150/10/30/30/50/20 nm），欧姆接触电极镀膜完成后，在 850 ℃氮气氛围中进行 120 s 快速热退火，之后进行 PAD 金属层蒸镀，PAD 金属层有 9 层金属，分别为 Cr/AlCu/Ti/Pt/Ti/Pt/Ti/Pt/Au(1.5/150/75/50/75/50/75/50/2200 nm)。PAD 完成后，采用纯度为 99.99%、直径 25 μm 的金丝，使用伟天星 WT-2330 热超声金丝球焊机进行引线键合，将电极引出的金丝键合到器件外部的 PAD 电极上，示意图如图 2 所示。

85

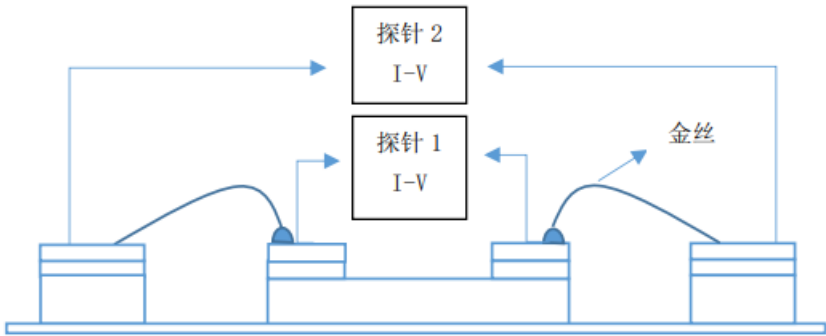


图 2 AlGaIn/GaN HEMT 器件引线键合连接示意图
Fig.2 Schematic diagram of wire bonding connection of AlGaIn/GaN HEMT device

90 金丝球焊键合完成后，在满足国家军用标准最小键合强度（0.030 N）的前提下，对四个各自独立的 AlGaIn/GaN HEMT 器件样品在空气氛围下，分别进行 200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃的 12 h 高温存储试验，在存储前后利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对微观形貌进行表征、利用 Keithley 4200A-SCS 半导体测试分析仪对电学特性进行测试、同时对引线部分进行拉力试验，对比高温存储前后的形貌、电学特性及键合强度的变化，并进一步分析其键合接触特性。

95

2 结果与分析

采用 WT-2330 伟天星金丝球焊机进行键合，经过多次测试，键合成功且强度满足 <<GJB548B-2005 微电子器件试验方法和程序>>的最小键合强度要求，金丝球焊机键合参数

如表 1 所示。

100

表 1 金丝球焊键合参数
Tab. 1 Bonding parameters of Au wire ball welding

键合参数	一焊	二焊
时间(ms)	40	40
压力(N)	0.495	0.64-1
功率(W)	0.6	0.9
烧球电流(mA)	14	---
烧球时间(ms)	40	---
温度(℃)	20	

对四个独立的 AlGaIn/GaN HEMT 器件样品进行金丝球焊键合及高温存储实验，并对表面接触进行测试与表征。

105

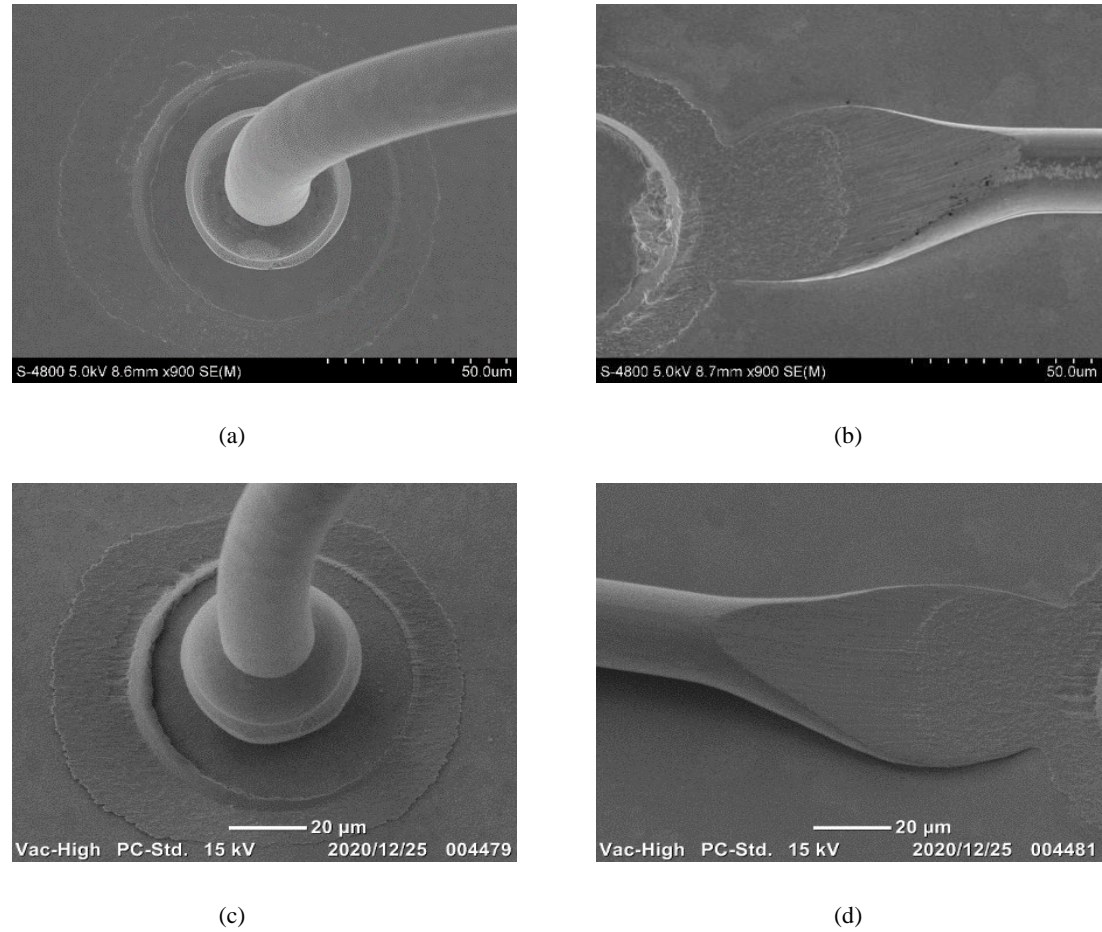


图 3 (a)25 °C 下一焊 SEM 图；(b)25 °C 下二焊 SEM 图；(c)200 °C 存储 12 h 后一焊 SEM 图；(d) 200 °C 存储 12 h 后二焊 SEM 图

Fig.3 (a)The SEM image of first welding at 25 °C；(b) The SEM image of secondary welding at 25 °C；(c) The SEM image of the first welding was stored at 200 °C for 12 h；(d) The SEM image of the second welding was stored at 200 °C for 12 h

115

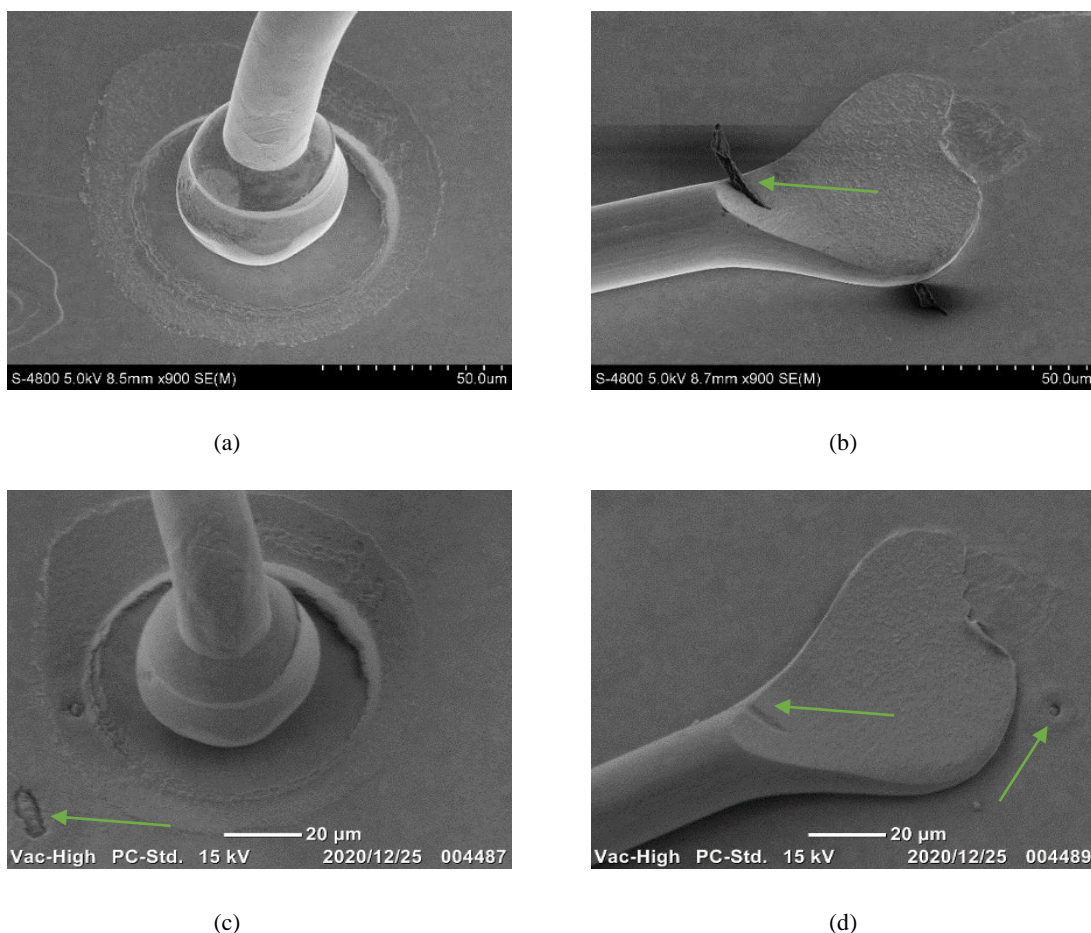


图 4 (a)25 °C 下一焊 SEM 图; (b)25 °C 下二焊 SEM 图; (c)300 °C 存储 12 h 后一焊 SEM 图; (d) 300 °C 存储 12 h 后二焊 SEM 图

Fig.4 (a)The SEM image of first welding at 25 °C; (b) The SEM image of secondary welding at 25 °C; (c) The SEM image of the first welding was stored at 300 °C for 12 h; (d) The SEM image of the second welding was stored at 300 °C for 12 h

图 3、图 4 分别为 200 °C、300 °C 高温存储 12 h 前后 SEM 图。由图 3 可知，在 200 °C 下存储 12 h 后，其接触部分未发生变化，也无缺陷产生。由图 4 可知，常温下金丝球焊二焊接触表面有残留物，这个残留物是键合时键合瓷嘴上残存的金丝，在压力的作用下，留存在二焊接触面上，在 300 °C 下存储 12 h 后，该残留物脱落，同时高温存储后 PAD 上出现少许的空洞缺陷，可能是 PAD 金膜的间隙在高温存储氛围中产生的空洞。

图 5 为 400 °C 高温存储 12 h 前后 SEM 图。由图 5 可知，400 °C 高温存储后，金线未发现有缺陷出现，而接触表面形貌变化较大，主要是以裂纹形式为主，同时在 PAD 表面裂纹较多，其表面平整性明显变差，可能的原因是：一、键合接触点的金丝在压应力作用下键合在 PAD 层表面，使得金丝接触部分内部应力不均匀，在 400 °C 高温存储的情况下，经过热胀冷缩的作用，使得内部应力得到释放，从而产生裂纹等缺陷。正如常保华副教授在研究 Cu/低 k 芯片铜引线键合中应力状态的数值分析时得出：键合过程中高应力区位于铜微球与芯

片接触区边缘的下方,呈环形分布,Cu/低k芯片中有效应力主要集中于Cu/低k层,有效应力在键合初期快速增长,随后增速变缓;Cu/低k芯片中的应力较高,分布不均匀,键合过程中应力在Cu/低k层的高度集中及高应力值的形成是新型Cu/低k芯片易发生分层和开裂失效的根本原因^[7]。由此可知,金丝键合接触因内应力分布不均匀,而在高温存储

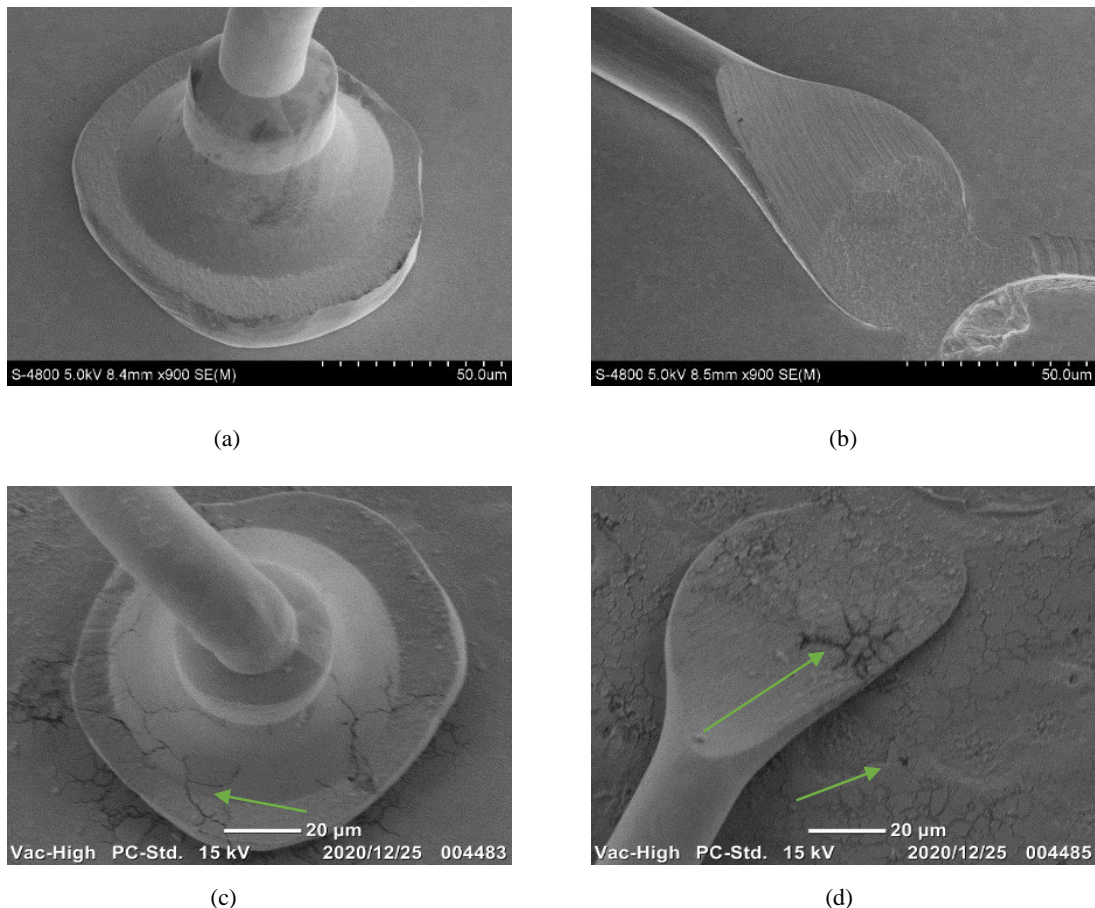


图5 (a)25 °C下一焊 SEM 图; (b)25 °C下二焊 SEM 图; (c)400 °C存储 12 h 后一焊 SEM 图; (d) 400 °C 存储 12 h 后二焊 SEM 图

Fig.5 (a)The SEM image of first welding at 25 °C; (b) The SEM image of secondary welding at 25 °C; (c) The SEM image of the first welding was stored at 400 °C for 12 h; (d) The SEM image of the second welding was stored at 400 °C for 12 h

后产生裂纹的行为是存在的。二、在高温试验中,400 °C存储使得PAD层下的Pt、Ti、甚至Cr、AlCu等金属层扩散至表面,并且在高温空气氛围中形成脆性合金相,也是导致的键合接触部分开裂的原因之一。类似情况在电子科技大学肖剑研究Au/Al界面的高温存储测试中同样指出:当老化温度和时间在一定范围内时,键合界面的剪切力高于没有进行高温存储实验界面的数值,但剪切力值的稳定性下降,伴随IMC的生长,孔洞现象随即产生,且随着老化温度的升高和时间的延长,孔洞和裂纹不断增大,降低了键合界面的力学性能、电学性能和键合可靠性^[8]。

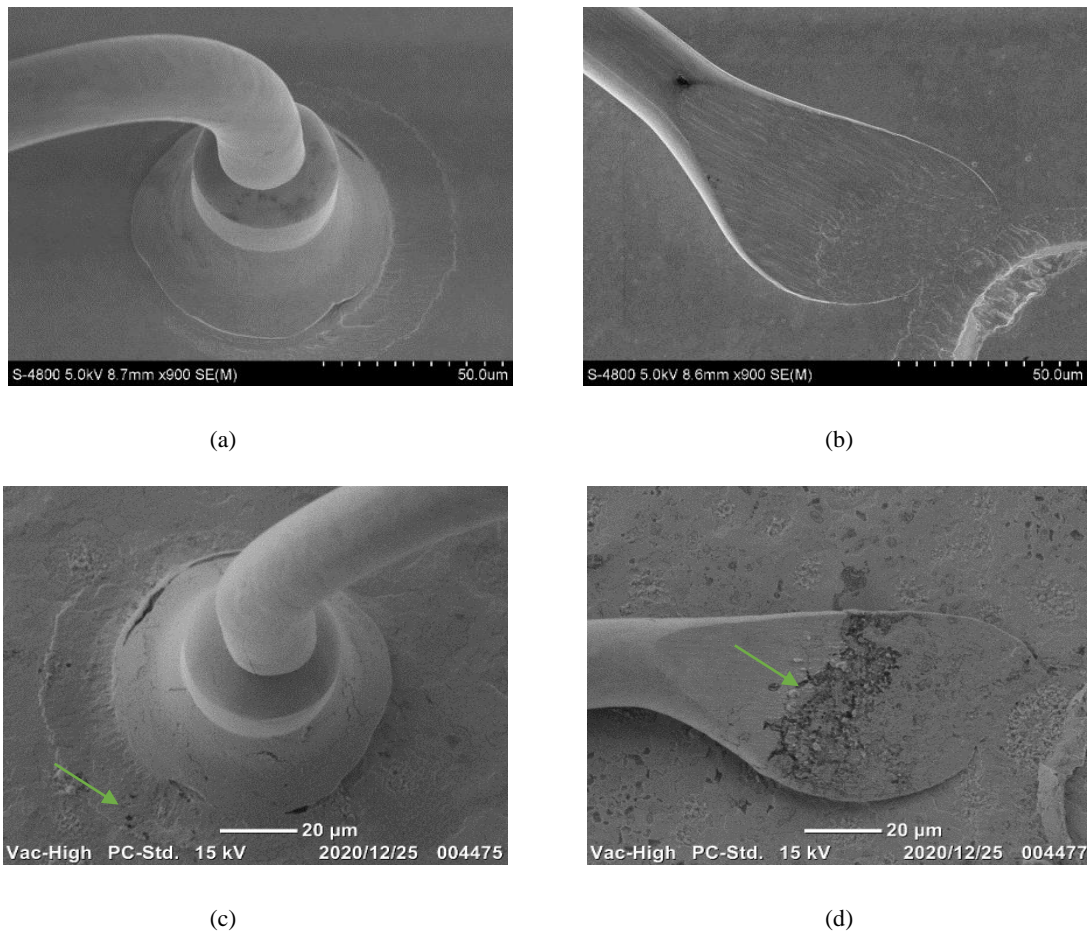


图 6 (a)25 °C 下一焊 SEM 图; (b)25 °C 下二焊 SEM 图; (c)500 °C 存储 12 h 后一焊 SEM 图; (d) 500 °C 存储 12 h 后二焊 SEM 图

Fig.6 (a)The SEM image of first welding at 25 °C; (b) The SEM image of secondary welding at 25 °C; (c) The SEM image of the first welding was stored at 500 °C for 12 h; (d) The SEM image of the second welding was stored at 500 °C for 12 h

图 6 为 500 °C 高温存储 12 h 前后 SEM 图。图 6 显示在 500 °C 存储后，二焊接触表面变化较大，其中一焊无明显裂纹产生，但一焊焊点周围表面不平整，存在空洞等缺陷；二焊键合接触表面上有颗粒、空洞、裂纹等缺陷。一焊和二焊的键合点在 500 °C 高温存储 12 h 后有明显差异，可能与一焊和二焊的键合条件有关，一焊键合是金丝在电流的作用下熔化形成熔融金球，然后施加一定压力，以使金属原子间相互结合形成牢固的焊接接触；二焊键合是对金丝施加更大的压力，借助于压力引起的塑性变形，以使金属原子间相互接近而获得牢固的挤压接触。二焊键合完全是靠压力的作用与 PAD 电极接触，造成键合点处金丝的内应力更强，在 500 °C 的存储条件下，一焊在释放了应力后可能重新熔融，使裂纹减少，而二焊点由于内应力释放产生裂纹较宽，难于再次熔融。对于 PAD 电极，500 °C 存储后，不再存在裂纹，但是表面的粗糙度明显变差，这可能是高温下金属层间的金属互扩散及再熔融合金形成的。

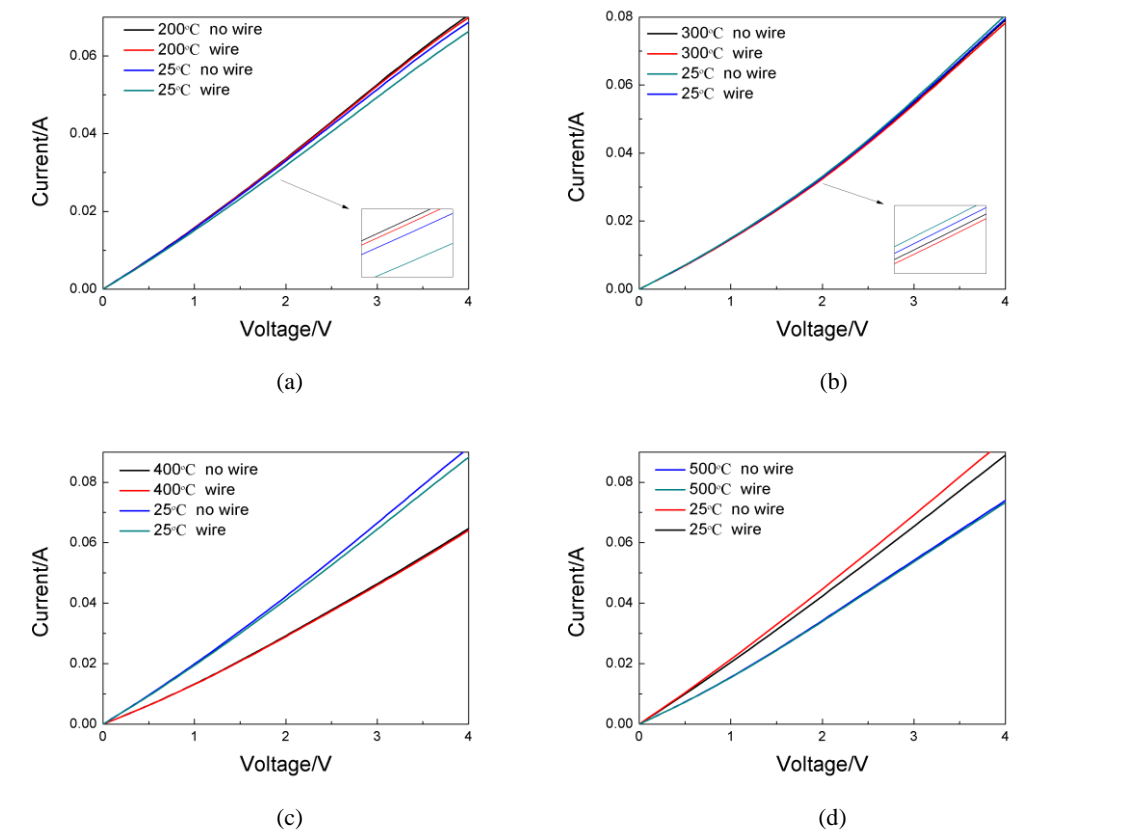


图 7 (a)200 ℃高温存储 12 h 前后欧姆电极 I-V 曲线；(b) 300 ℃高温存储 12 h 前后欧姆电极 I-V 曲线；
(c)400 ℃高温存储 12 h 前后欧姆电极 I-V 曲线；(d) 500 ℃高温存储 12 h 前后欧姆电极 I-V 曲线
注：no wire:图 2 示意图探针 1 测试 I₁-V₁ 曲线；wire:图 2 示意图探针 2 测试 I₂-V₂ 曲线

Fig.7 (a)I-V curve of Ohmic electrode before and after 12 h storage at 200 ℃；(b) I-V curve of Ohmic electrode before and after 12 h storage at 300 ℃；(c) I-V curve of Ohmic electrode before and after 12 h storage at 400 ℃；(d) I-V curve of Ohmic electrode before and after 12 h storage at 500 ℃

Note: no wire: Fig. 2 Diagram of probe 1 testing I₁-V₁ curve；wire: Fig. 2 Diagram of probe 2 testing I₂-V₂ curve

表 2 高温存储 12 h 前后两个键合接触点间总电阻值

Tab. 2 Total resistance value between two bonding contacts before and after 12 h storage at high temperature

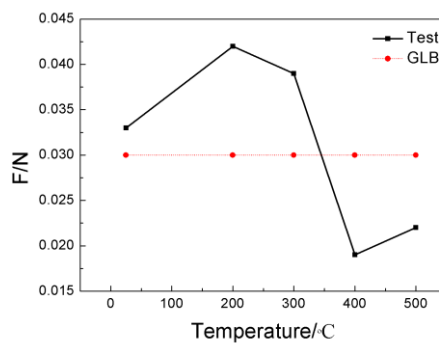
样品序号	$R/\Omega(25\text{ }^{\circ}\text{C})$	$R/\Omega(\text{不同存储温度})$
1	2.21	0.3056(200 ℃)
2	0.464	0.243(300 ℃)
3	1.12	0.649(400 ℃)
4	2.25	0.539(500 ℃)

图 7 为 200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃高温存储 12 h 前后欧姆电极电流-电压(I-V)曲线。为了研究高温存储对键合接触的电学特性的影响，如图 2 显示，在高温存储前后分别进行了探针 1 之间和探针 2 之间的 I-V 特性测试。两个键合接触点之间总电阻值 R 可以表示为：

200

$$R = \frac{V_2}{I_2} - \frac{V_1}{I_1}$$

表 2 显示 4 个样品在高温存储前后的两键合接触点总电阻值, 高温存储后总电阻值减小, 可见高温存储有利于电学特性的改善。电阻减小原因可能是键合电极的接触面与 PAD 层在高温下进行互扩散及再合金, 使得电阻减小。



205

图 8 高温存储 12h 后键合拉力测试值

Fig.8 Test value of bonding tension after 12h storage at high temperature

210

图 8 所示为拉力测试数据, 常温下对样品进行拉力测试, 数据显示键合拉力值均满足国家军用标准。高温存储后对样品进行破坏性拉力测试, 在 200 °C、300 °C 存储 12 h 之后, 拉力值有所增加, 在 400 °C、500 °C 存储 12 h 之后, 键合强度有明显的下降, 已经不满足最小键合强度要求。对不满足键合拉力标准的样品进一步观察发现, 其接触断裂位置均出现在第二键合点界面处, 由图 5、图 6 分析可知, 在 400 °C 与 500 °C 高温下的存储, 在键合二焊位置出现有较多的缺陷, 如裂纹、PAD 表面不平整、空洞以及颗粒物等等, 这些缺陷可能导致了键合强度的显著降低。可见, 在金丝球焊键合高温试验中, 第二键合点决定着键合强度的大小以及键合可靠性。

215

3 结论

220

通过对 AlGaIn/GaN HEMT 器件金丝球焊键合的探究与分析可知: 在金丝球焊键合方法下进行 12 h 的高温存储实验, 两个键合接触点间电阻随着存储温度的不断增加, 其电阻阻值有所减小, 但同时在较高温 (400 °C、500 °C) 存储时, 键合接触会逐渐出现缺陷 (裂纹、颗粒物、空洞、PAD 表面不平整等问题), 这些缺陷明显降低了键合强度, 使其强度低于最小键合强度值标准。可见, 使用当前的工艺条件进行引线键合封装, 在 300 °C 以下, 具有较好的稳定性。而高于 300 °C 的工作温度下, 仍需对键合引线的工艺或特性进行进一步的研究, 以保证器件在高温下工作的稳定性。

225

[参考文献] (References)

- [1] 斛彦生, 宇若祺, 银军, 张志国, 李静强, 黄雒光.S 波段 GaN 高效率内匹配功率放大器的设计与实现[J].通讯世界, 2017 (12): 25-26.
- 230 [2] 裴晨.高效率 S 波段 GaN 线性功率放大器的设计与实现[D].南京: 南京理工大学, 2013.
- [3] 唐健翔.AlGaIn/GaN HEMT 器件耐压新结构模拟研究[D].杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- [4] 韩雷.微电子封装超声键合机理与技术中的科学问题[J].中国基础科学, 2013, 15 (03): 14-26+2+65.
- [5] 刘丽君, 赵修臣, 李红, 王迎春.热超声金丝键合工艺及其可靠性研究[J].新技术新工艺, 2018 (03): 27-31.
- 235 [6] 燕子鹏, 赵光辉, 谢廷明, 周成彬.金丝球焊复合键合工艺可靠性研究[J].微电子学, 2021: 1-4.
- [7] 常保华, 白笑怡, 都东.Cu/低 k 芯片铜引线键合中应力状态的数值分析[J].半导体技术, 2014, 39 (10): 768-773.
- [8] 彭成, 梁爽, 黄福祥, 钟明君, 冉小杰.键合丝键合界面研究进展[J].材料导报, 2019, 33 (S2): 501-504.