

射频功率放大器的自动化生产加速 5G 无线网络的推广

作者：周利民 Julius R. Ortega 翻译：赵晓明

[MRSI System, Mycronic Group]

5G 无线网络的成功推广，主要是基于超大规模数量基站布局，这些基站的射频（RF）功率放大器（PA）与上一代 4G 技术相比密度更高。每一个 5G 的基站都具有更多的信道，而每一个信道都需要一个射频功率放大器件。这些功放器件是增强基站射频功率信号的关键部件。

在 5G 时代到来之前，硅基的横向扩散金属氧化物半导体(Si-LDMOS)是 4G 长期演进(LTE)技术射频放大市场的主流解决方案。这些器件现在几乎被视为技术成熟程度很高的产品。传统的 Si-LDMOS 在 3.5GHz 及以下频段性能良好，但无法满足 5G 应用对更高频率的要求。砷化镓(GaAs)应用的工作频率主要在 8GHz 以内，适用于 5G 基站的中、低功率器件。在高功率射频应用中，氮化镓(GaN)具有明显的优势，是 5G 宏基站的必备材料。由于 GaAs 和 GaN 具有更好的电力系统效率、性能和成本，GaAs 和 GaN 正在逐渐取代硅作为电力开关的主流技术。作为宽禁带(WBG)半导体材料，GaAs 和 GaN 器件比 Si 器件效率更高。GaAs/GaN 器件正在 5G 基站、雷达、航空电子设备以及其他宽带应用中取代 Si-LDMOS 器件。在未来的网络设计中，由于其物理性能的限制，GaAs/GaN 和其他 WBG 材料将取代大多数现有的 Si-LDMOS 器件[1]。一般来说，5G 基站会将 GaAs/GaN 为基础的放大器应用到更高的频率，而 Si-LDMOS 将只会混合在较低频段中保留一部分份额[2]。根据 Yole 的报告[3]，到 2025 年，GaN RF 市场规模将从 2020 年的 7.4 亿美元增加到 20 亿美元以上，复合年增长率(CAGR)为 12%。通信基础设施和军用雷达是 GaN 射频器件的主要驱动因素。5G 无线通信的电信基础设施市场将享有 15%的复合年增长率。

这篇文章主要讨论射频功率放大器器件自动化制造的一个关键要素---一个全自动化的芯片封装解决方案，以支持在 5G 应用中大规模布局射频放大器器件所需的灵活性、高精度、大批量生产的要求。

制造要求及挑战

射频功放器件有两种主要的芯片键合组装方法：共晶和环氧树脂。共晶工艺是电力电子器件中最常见的芯片键合工艺，历来是制造基站中使用的较高功率射频功放器件的唯一方法。芯片和热沉之间的共晶合金通常是金硅(AuSi)或金锡(AuSn)，它们在键合后具有最佳的热导性和最低的空洞率。

另一方面，传统的环氧树脂工艺可能比较便宜，但导热性较低，封装后空洞率较高。这对于一些低功率/低可靠性的器件来说可能已经够用了。近年来，为了降低高功率器件的成本，一些新的键合粘合材料和工艺被开发出来，用以取代 AuSi/AuSn 焊料。例如，无压纳米银烧结材料有望对大功率器件带来良好的导热性，并能够适应标准的环氧树脂点胶设备和工艺。这类封装材料和工艺对于射频功放器件的应用还不够成熟。为了实现 5G 基站射频功放器件生产所需的多工艺和多芯片制造，使用全自动解决方案实现良好的芯片键合工艺存在五个主要挑战。接下来的部分将讨论这些面临的挑战。

射频功放芯片的处理。静电放电(ESD)是导致射频功放芯片损坏的一个重要因素。为解决这一问题，芯片贴装设备应正确安装并定期对所有接触产品的工作表面进行防静电合规测试，以减少或消除生产过程中的 ESD 风险。这些射频功放芯片具有独特的特点——它们芯片相对比较大，纵横比可超过 10。它们是又长又薄的芯片(厚度可低至 30 μm)，而且顶部有空气桥或敏感结构，如果在顶部施加过大的压力或应力，它们可能会被损坏。这些特性需要精细的处理，包括只有实时的力反馈才能实现的精密贴装力控制。芯片的吸取和装贴工艺过程要使用真空夹钳夹住芯片边缘。砷化镓和氮化镓是天然脆性材料。封装的力在 10g ~ 100g 之间，所以必须严格控制力的大小以避免损坏芯片，从而达到最好的键合效果。

GaAs 和 GaN 共晶工艺。金锡焊料(AuSn 80/20)是行业中用于封装砷化镓(GaAs)和氮化镓(GaN)芯片的最常用合金，因为它与金基成分的相容性并具有长期稳定性，GaAs 和 GaN 芯片的背面要镀上金层，以提供良好的导热和导电界面，这样也可在芯片键合方法中具有灵活性。在工艺过程中通常使用厚度为 12~50 μm 的预制焊料片。焊料片的尺寸是通过实验确定的。Al₂O₃、Cu-W、Cu-Mo、Si 和 SiC 等是常用的基底材料。AuSn80/20 合金的最低熔点是 280°C。锡含量降低两个百分点至 18%，AuSn82/18 合金熔点会增加到 350°C。一般共晶回流温度应比 AuSn80/20 合金熔点高出 20-40°C。考虑到可靠性，GaAs 和 GaN 的最大回流温度建议为 320°C，最长回流时间应不超过 30 秒。温度曲线取决于共晶台，芯片的尺寸、数量，以及基底等等。该工艺的第一步是在预热温度下吸取和贴装预制焊料片。工艺的第二步是吸取和贴装芯片。在回流温度下，或者刚好在达到回流温度前，将芯片放置在预制焊料片的上方。芯片以 10~100g 的力进行键合，并根据一些预先设定的参数进行摩擦。在某些情况下，预制焊料也会预先沉积在基底或射频功放芯片上。

LDMOS 共晶工艺。AuSi 用于超高热需求应用中，如硅基 LDMOS。LDMOS 射频功放器件的壳体材料或基底材料为 Cu-W 或 Cu-Mo。对于 AuSi 材料键合时，是没有其他额外的合金材料。而是这个工艺过程取决于金和硅在高温下的扩散。整个过程是在含有 5-10%氢的保护气体中进行的。由于 AuSi 键合是发生在 363°C 的高熔点温度下，为了保持 LDMOS 的性能，需要快速处理芯片到基板 (CoS) 上的键合，并尽快将其从加热台移出。共晶工艺的键合力可以设置为 30~100g。在芯片键合时必须进行摩擦以消除空洞。

空洞的处理。为去除任何现有的(来自加工、包装、搬运等方面造成的)表面污染物，建议对预制焊料片和基板/壳体的进行溶剂清洗。GaAs 和 GaN 可在共晶工艺之前使用氧气或等离子体清洁工艺进行清洗。在共晶过程中，使用惰性气体(纯氮气或含 5-10%氢的氮气)包围器件，以便回流过程在无氧环境，防止结合表面材料氧化。大功率/高频器件的可靠共晶芯片键合需要一个几乎无空洞的贴装。借助使用摩擦辅助工艺可以实现 95%以上的无空洞的贴装。氧含量>10,000ppm 会导致焊点质量变差。共晶台中的氧含量<5000ppm 是实现低空洞率的必要条件。氧的含量应该控制在<1000ppm，以便为不同的共晶工艺提供一些工艺余量。在工艺控制方面，必须优化摩擦的周期，幅度、摩擦时间、摩擦力度，以便形成良好的无空洞键合。摩擦辅助自动芯片键合是一种常用的工艺，它依靠“摩擦”芯片进入金或壳体表面，打破氧化层，进行良好的混合，形成共晶合金。摩擦过程通常是在一定的振幅和频率下，沿 X-Y-Z 方向进行 5-10 个周期的摩擦运动。在共晶过程中，摩擦过程会将焊料分散并消除气泡，这些气泡是产生空洞的主要原因之一。

环氧树脂工艺。环氧树脂工艺主要用于连接无源元件，如电容器，而不是用于射频放大的有

源元件器件。近年来，新的粘合材料被开发出来代替 AuSn。大阪大学 Katsuaki Suganuma 教授开发的银微米颗粒烧结连接技术，实现了环境温度下低成本的无压芯片键合。由于该技术在超过 250°C 的高温下可以表现出较高的可靠性，作为下一代功率半导体芯片键合技术的关键技术将得到推广。大量的纳米银无压烧结材料和烧结工艺的研究和开发工作仍在进行中 [4]。这种新材料有可能用于高功率射频放大器 [5-7]。环氧键合线越细，其热导率越高。实现这些细的键合线，需要对点胶、芯片键合、环氧树脂工艺过程中的参数进行精心的设计。较厚的键合线可能有助于减轻芯片和基底之间的热导率的不匹配，对于 GaN 芯片(可以处理稍高的热导率不匹配)而言，导致的热阻增加可能不是一个可接受的折中。芯片键合设备提供的高性能蘸胶和点胶功能，以及键合力控制，是实现满意键合线控制所必需的。

MRSI 自动化解决方案

MRSI 自主研发的全自动芯片键合解决方案，完全可以应对 5G 基站射频功放器件的多种工艺和多种芯片制造要求。这些系统具有灵活和高产出的特性，适应多品种的大批量制造环境，并同时可以解决上面描述的挑战。下面的章节会总结 MRSI 键合的解决方案。

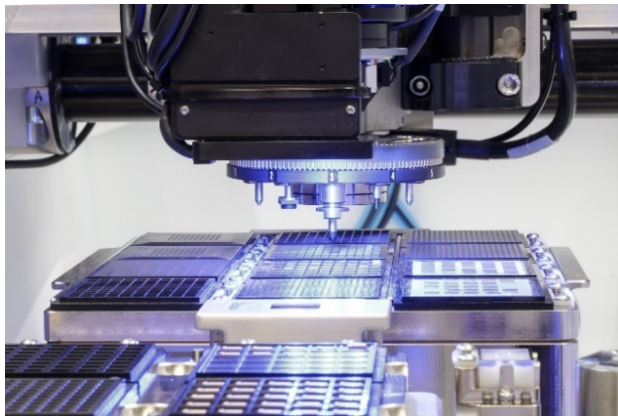


图 1 MRSI “动态”工具更换器

射频功放器件的自动化解决方案。我们新的芯片键合解决方案有两个平台，1.5 μm MRSI-H-LDMOS 和传统的 5 μm 带水平转塔的 MRSI-705。这两个平台都支持 AuSi 和 AuSn 工艺要求，并具有高性能的蘸胶和点胶功能可选。两种产品都带有一个集成转塔，可以容纳多达 12 个芯片吸嘴或蘸胶头。该转塔可以在设备运行中进行“动态”的工具切换，以实现吸嘴的零时间更换。图 1 展示了我们的“动态”工具更换器。任何版本的客制化芯片吸头或蘸胶头都可以搭载于此转塔。可在一台机器上灵活处理多个芯片、多个工艺和多个产品。这有助于用户创建灵活的生产线，可以针对不同的产品快速重新配置生产线产能。此外，我们开发的在线共晶芯片键合系统有助于大批量生产。通过使用一个渐进的热台系统，通过加热区分度，芯片共晶键合可以在器件运输的“舟”或载体上进行，工件可以自动装载，完成键合工艺和自动卸载到夹具中。在线共晶系统是一个“通用的”渐进式分度输送机(图 2)。它是跨多个机器平台(MRSI-705, MRSI-M3, MRSI-H)的模块化设计的通用架构，并同时支持 AuSn 和 AuSi 共晶过程。这种在线模式也适用于环氧树脂工艺。

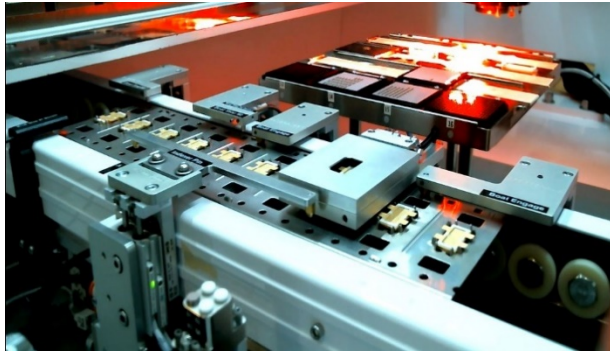


图 2 “通用的”渐进式分度输送机

温度曲线控制。为了实现共晶键合，通常采用一个加热台，可以快速和精确地提高和降低温度，以保持加热板上良好的温度均匀性。我们的共晶台是一个脉冲加热器，最高温度为 450°C ，温度控制精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，升温速度高达 40°C/s ，冷却速度为 30°C/s 。氧环境控制。因为射频功放器件被动受热，所以共晶过程要在惰性环境中进行，以防止芯片键合表面氧化。我们在共晶台上加装了一个专门设计的保护气罩。合成气体的流动要非常小心地进行管控，目的是为共晶工艺创造一个无氧的环境。通过使用纯氮气的保护气，标准共晶台可以实现 $<100\text{ppm}$ 的氧气水平环境，渐进式共晶台可以实现 $<500\text{ppm}$ 的氧气水平环境。这两种情况都远远超出了前面提到的工艺过程要求。

摩擦工艺。通过挤出空气来减少空洞，摩擦是 AuSi 和 AuSn 之间形成共同材料(键合)的关键步骤。而且，焊料可以更均匀地分布在整個芯片，同时压力有助于整个焊料的扩散过程。作为起始，我们的软件包括一个预编程的摩擦模式库，以指导用户快速开发他们自己的工艺。对于特定的工艺，摩擦参数是完全可定制化编程的。摩擦包括贴装过程中从 X 方向和 Y 方向对芯片施加的力。芯片通常以 8 字形移动，并重复多次。向不同方向移动进行摩擦也是可以的。有时会使用旋转摩擦。摩擦参数包括 x、y 和 θ 方向上的振幅、速度和频率。参数是由工艺要求决定的，如芯片的表面积，和工艺限制，如接近相邻的芯片。

环氧树脂工艺的键合线控制。我们的环氧树脂蘸胶工艺是采用一个旋转的蘸胶盘和多个环氧树脂槽来提供环氧树脂用于蘸胶。点胶工艺是采用具有精密流体控制技术的时间-压力点胶装置。基底表面由三点激光高度系统进行测量，该系统绘制映射平面，以确保针头和表面之间的间隙在所有位置都保持不变。我们还提供一个共聚焦高度传感器的选项来测量键合线的厚度。键合线的一致性是通过精密的环氧树脂容量控制和闭环力控制相结合来实现的。

射频放大器工艺结果

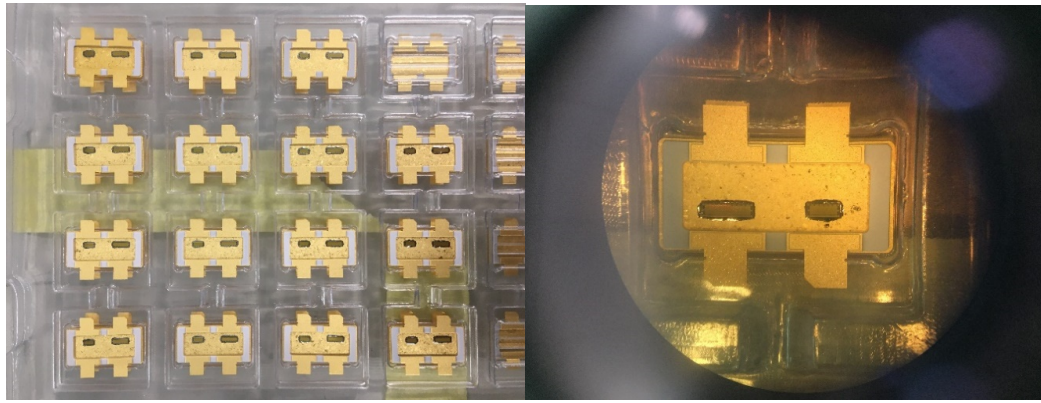
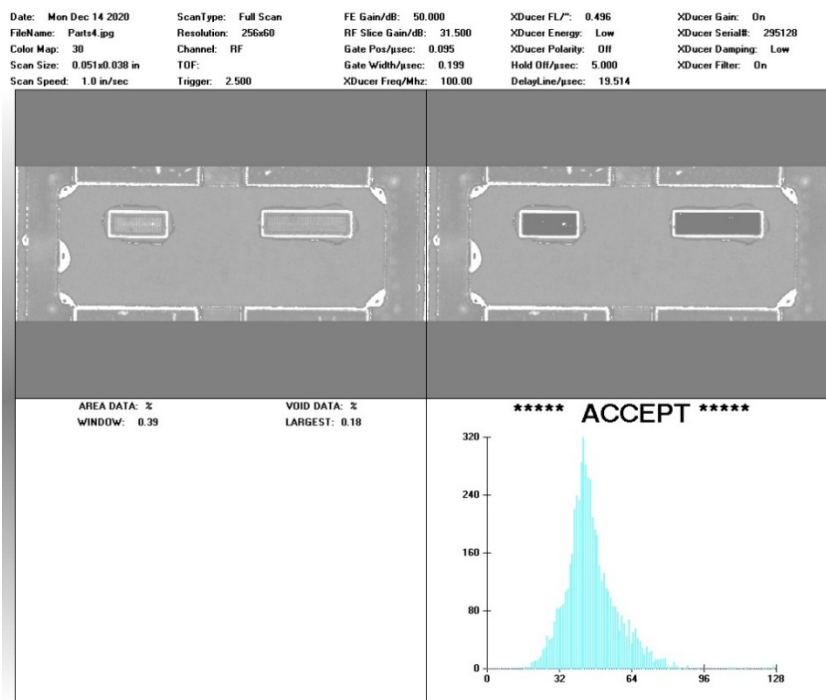


图 3 15 个样品焊料流动均匀，没有氧化

接下来我们将分享使用 MRSI-H-LDMOS 实现的性能结果。该系统包括一个用于大批量生产的渐进式分度输送机。采用 60 个行业标准玻璃芯片对该机的拾取和贴片精度进行了测试，结果显示 $x < 1.21\mu\text{m}$ 和 $y < 0.84\mu\text{m}$ 的拾取和贴装精度均超过了设备规格书中的 $1.5\mu\text{m} @ 3\sigma$ 。使用 Pro OX-100 数字氧气净化监测仪测试了共晶台的氧含量。结果表明，共晶封装区域的氧含量 $< 100\text{ppm}$ 。真正的 AuSn 工艺是通过使用 AuSn 预制焊料片，在基底上对两个不同尺寸的 GaN 芯片完成芯片键合。芯片尺寸约为 $3 \times 1\text{mm}$ 和 $4 \times 1\text{mm}$ 。两个芯片均为 $100\mu\text{m}$ 厚。AuSn 预制焊料片尺寸略小于芯片尺寸。芯片载体通过输送机到达不同的加热工位，器件在到达共晶台之前被加热到一个预热温度。在工艺过程中，共晶台再从预热温度上升到回流温度。通过工艺优化找到最佳的键合力和摩擦工艺参数。测试结果表明，键合工艺精度满足要求。结果如图 3 所示。左图显示 15 个样品，右图显示真实大小的样品。这些图像显示，所有 15 个样品的焊料流动均匀，没有氧化。键合完成后，使用扫描声学显微镜(SAM)对五个样品进行了空洞率测试。平均总空洞率为 1.6%，平均单个空隙率为 0.89%。结果如图 4 所示。



Parameter	MIL-STD 883K Method 2030.2	Typical RF PA specification	Measured	Result
Total voids	<50%	<5%	1.60%	Passed
Single void	<15%	<1%	0.89%	Passed

图 4. 样品空洞率测试结果

总结

我们自主研发的高度灵活的自动化解方案，可以支持用于 5G 基站的射频功放器件的多芯片、多工艺生产。测试表明，该设备具有较高的芯片键合精度、较低的空洞率及较高的生产率，可以支持 GaN AuSn 共晶工艺。通过设置不同的预热和共晶温度，该设备还支持 AuSi 的共晶工艺，并可以增加环氧树脂点胶和环氧树脂蘸胶的配置。我们为射频功率放大器生产制造提供的全自动化解方案是有极具吸引力的投资回报率，可以应对 5G 加速部署带来的挑战。

参考文献

1. M. Di Paolo Emilio, "RF power semiconductors for 5G shift to WBG materials," September 4, 2020, Electronic Products.
2. MARK LAPEDUS, "Power Amp Wars Begin For 5G," Aug. 24, 2020, Semiconductor Engineering.
3. "GaN RF market applications, players, technology, and substrates 2020," Yole Développement report, May 2020.
4. Paul Shepard, "Pressureless sinter joining for next-gen GaN & SiC power semis," Sept. 01, 2017, EEPower.
5. H. Yang, et al., "Improvement of sintering performance of nanosilver paste by tin doping, 22 Jan. 2020, J. of Nanomaterials.
6. Xiaomin Wang, et al., "Pressureless sintering of nanosilver paste as die attachment on substrates with ENIG finish for semiconductor applications," Volume 777, 10 Mar. 2019, pp.: 578-585, J. of Alloys and Compounds.
7. K. S. Siow, Die-Attach Materials for High Temperature Applications in Microelectronics Packaging, Materials, Processes, Equipment, and Reliability, pub. Springer, 2019

作者介绍

周利民，美国马萨诸塞州 Mycronic 集团 MRSI 系统战略营销高级总监。在 2019 年加入公司之前，他曾担任新飞通中国的高级研发总监、奥兰若亚洲的新产品导入和产品工程总监、JDSU 和 SAMN-SCI 中国的新产品导入运营总监。他还曾在一家激光初创公司担任联合创始人。他的职业生涯始于新加坡特许半导体公司。西安交通大学自动化专业博士;电子邮件: limin.zhou@mycronic.com

Julius R. Ortega 是美国马萨诸塞州 Mycronic 集团 MRSI 系统的首席应用工程师。他于 2000 年加入公司，在 Texas Instruments(菲律宾 Baguio City)开始了他的职业生涯，担任测试设备工程师(制造);他也是 Schlumberger (半导体测试和组装部门)的现场服务支持工程师，支持英特尔(菲律宾、马来西亚和以色列)亚洲。他拥有圣路易斯大学(菲律宾 Baguio City)的电子与通信工程学士学位。