

适用于光子、微波及 RF 电子产品量产的先进共晶封装

作者：Daniel F. Crowley, Yi Qian [MRSI Systems]

日益增长的数据和带宽需求对光子及 RF 电子产品的大量生产提出了前所未有的要求。而这一要求又加速了批量生产以及高级产品设计的全自动化进程和先进共晶封装工艺改进。本文介绍了自动化及共晶工艺领域所取得的最新进展，并着重介绍了光子及 RF 电子产品元件以及微波组件所面临的挑战。这些进展为元件和组件厂商带来了高精度、高产量、更高的产量以及全新的产品。

电信产业和美国铁路系统之间存在着有趣的隐喻关系。作为对照，1850 年全美轨道里程为 9,021 英里，而在 1916 年这一数字则上升到了 397,014 英里。在连通各大城市的第一次主干铁路建设浪潮期间，并没有足够的货物和人员来消化铁路运力。铁路系统出现了过度建设状况而不得不暂时停止，以等待需求的跟进。随后，新的火车站逐渐沿着铁路建立起来，一旁的商铺也逐渐多了起来。他们建设了更多短距路线，以连通小型城镇、乡村和农场。最终，贸易的扩张超出了铁路系统的运力，迫使新一轮建设周期开启。历史表明，随着时间的推移，总会有新的推动力量驱使变革周期不断出现。

近年来，电信产业已进入了变革周期，并伴有受多种宏观技术和经济要素驱动的快速扩张阶段。我们都还记得，上轮周期止于 2000 年左右的互联网泡沫破裂。但应该指出的是，上轮周期的确为我们留下了伟大的遗产，那就是期间完成的长距基础设施部署。此举为当前的城域网和接入网的扩张奠定了坚实的基础，从而使访问全球个人及企业用户成为现实。此次扩张维持了两位数的高增长率，驱动因素则是网页端和移动端的应用。

当 IBM 和思科等一众跨国公司努力应对基于移动设备和互联网的新商业模式时，云计算正在悄然改变传统的商业模式。经由无线途径的移动数据以及经由超大规模数据中心的云计算和存储正日益增加，由此对提升容量提出了要求，尤其是包括无线和数据中心基础设施在内的数据通信领域。反过来，个人及企业用户的数据带宽需求又对升级长距网络、数据中心和城市通信系统提出了要求。值得注意的一些数据点包括 IDC 对数据增长的预测，该等数据预测，行业有望达到 35 泽字节的数据规模，这一数字相当于 44 的 2009 次幂。一些分析人士称，移动设备上的数据通信正在以每年 61% 的速度增长。如今，我们正处在用户需求拉动和基础设施建设推进保持相对平衡的阶段。

而光子及 RF 电子产品则始终处在网络基础设施扩张的前沿位置。近来，向 10Gps、40Gps 乃至 100Gps/200Gps/400Gps 光纤网络系统的过渡催生出了大量光子元件的迭代更新，如激光基座芯片 (COS)、微积可调激光设备、100G/200G/400G 调制器、相干接收器 (ICR)、100G CFP2-ACO 以及 QSFP28+ 收发器。无线基站的扩建离不开关键部件，如采用砷化镓和氮化镓制成的 RF 功率放大器。多数此类产品在金属封装内的通用平台或基座上焊有多个管芯。

典型的焊接工艺均会用到共晶和环氧材料。出于对清洁、高效散热工艺以及长期可靠性的追求，共晶焊成为了光子、微波及 RF 电子产品的重点研究领域。因此，本文将重点关注共晶加工所面临的挑战以及相关的自动化解方案。

批量生产所面临的挑战

新一代光子及 RF 电子产品元件的预测产量之高是史无前例的。这一需求水平对降低制造成本提出了要求。然而，中国等主流生产基地的劳动力成本呈不断上升趋势，因此行业有必要借助更高水平的自动化进行生产。此外，密度更高的先进封装对设备精密度有更高的要求，从而对自动化工艺提出了要求，这是因为人工和半自动工艺无论从成本还是质量角度来看效率均远低于前者。

从上述需求和大环境来看，面临的挑战包括：产量和精度、精密材料加工、处理大型和多样元件库存的能力、全天候生产要求、伴随需求而出现的扩展能力，以及市场对于零件追溯能力的要求。各项挑战均在下文当中有详细描述。

产量和精度。无论从任何角度作比较，自动化都比人工或半自动生产的产量水平更高。具体来说，在管芯粘合领域，根据实际工艺的不同，自动化生产的产量是人工生产的 3 到 10 倍。另一方面，产量只有在保证精度的前提下才有意义。随着元器件产品及新工艺取得技术进步，例如硅和磷化铟光子集成回路 (PIC)，我们看到 $5\mu\text{m}$ 拾取和放置精度 ($\pm 3\sigma$ ，目前的主流水平) 正在朝着 $3\mu\text{m}$ ($\pm 3\sigma$) 或更高精度迈进，这一现象在光子和成像应用中尤为明显。

精密材料加工。薄砷化镓、磷化铟和氮化镓管芯等 III-V 族材料需要精细处理。焊接工具不得接触边缘发射激光二极管上的晶面、垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的上发射表面

以及其他有源区域，因为会损坏这些装置。在需要焊接倒装芯片时，上述要求尤为重要。由于氮化镓 RF 晶体管芯均质地纤薄且具有较大纵横比，因此力和压力控制是拾取和放置管芯的关键所在。在长期可靠性存在问题的情况下，对力和高度控制提供实时、闭环反馈是非常实用的做法。

管理尺寸各异的零部件。光学和 RF 应用常需要处理包括从小型、大型和特殊形状在内的多样化设备。包括激光二极管和监测二极管在内，封装中使用的很多设备多是小型设备。薄金属预制件必须水平放置并谨慎处理。人工处理这些预制件的工作会非常繁重。纵横比愈发极端的设备被用于阵列当中。这些设备的极端纵横比甚至可达到 15:1。外壳同样可能外形奇特，其中一些大型封装的小外壳还带有突出的接头和引脚。灵活性是确保自动机械能够在同一个平台上执行多种管芯粘合工艺的关键所在。处理多种元器件（从 150 微米二极管到较大的特殊形状盖板）并借助环氧和热压焊进行共晶粘合的能力，是相比人工或半自动组装的一个巨大优势。

稳定性。批量生产常要求使用最少的人员进行全天候作业或连夜赶工。自动化设备的稳定性成为了避免或最大限度减少错误，进而降低材料及生产力损失的关键所在。系统稳定性可通过严格步骤进行测试，但更重要的是，该平台需要经过实际生产的检验。能够为光子、微波及 RF 应用提供本地技术服务和专业知识的可靠自动化供应商是保证成功的关键。

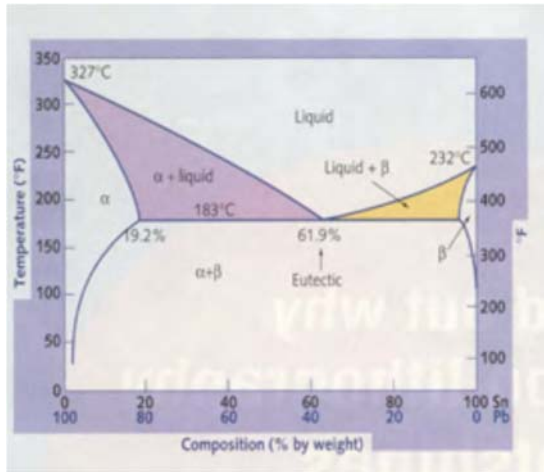
扩展能力。在今天的动态市场环境下，重要的不再是抢先上市，而是在需要更高产量的情况下能够快速且安全地扩大产能。您的制造合作伙伴进行规模化生产的速度有多快？产品周期正日渐转为按月而非按年衡量。快速变化的市场要求供应链内的所有供应商都能做出快速响应。掌握可扩展的产品或工艺至关重要，因为这往往是决定供应商能否取得主宰地位的关键所在。更短的产品周期意味着生产线的频繁更换。生产系统要适合进行大批量生产，但也要足够灵活以进行小批次生产和设计转换。

追溯能力。在集成时要具备针对设备调优和原件选择的追溯能力。出于这些原因，根据设备序列号追踪管芯批次和序列号信息的能力就显得至关重要了。若对这一信息采用人工记录的方式，则耗时费力且容易受人为错误的影响。自动化设备要不断编译信息并将其导出到日志文件中，以备今后检查。这就要求所有相关信息随成品一同交付。

全自动共晶焊

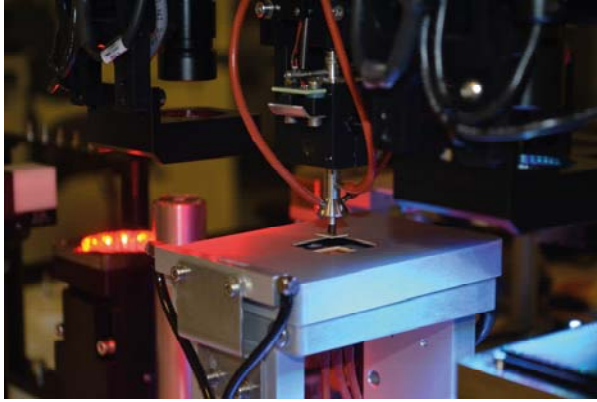
虽然光子、微波及 RF 电子元器件的量产面临某些特殊要求和挑战，但仍有一些可靠的解决方案采用了颇具成本效益的自动化生产工艺，以降低生产成本并提高产能。本文剩余部分将探讨共晶工艺及特性可如何解决此类问题。

焊料回流共晶焊。共晶焊是指采用合金焊料作为第三种材料在两个元器件之间进行连续焊接的工艺。就光电子而言，共晶焊通常是指采用铅锡、金锡或金锗焊料将两块镀金材料焊接在一起。要想实现焊接目的，通常要放置预制焊片在一个元器件上- 通常称为载体或基板-然后另一个元器件，通常是微波单片集成电路 (MMIC)、光电探测器或激光芯片，则会被放置在预制焊片上。通过加热组装底座或者向组装件吹送高温气体，使温度略高于焊料的熔点即可。随着焊料的融化，芯片被恒定的压力粘合在一起。等待零部件冷却到回流温度以下时，共晶焊即告完成 (图 1)。视乎设备类型和结构的不同，放置过程中可能需要进行擦洗。



擦洗步骤包括向芯片施加纵向力以及横向力。芯片通常向反方向移动三到五密耳，然后在正向 x 或 y 方向上移动几圈，也可能交替方向移动。有时会使用旋转擦洗。擦洗参数包括在 x, y 和 θ 方向的振幅、速度和频率。参数取决于工艺要求，例如，芯片的表面积，载体的质量以及相邻管芯的接近度等工艺约束。擦洗是在三种材料之间形成共同材料（粘合）过程的组成部分。强制排出空气以减少空洞。而且，焊料会更好地区分布在管芯上，压力有助于扩散过程。

在零件受热时，控制大气压是很重要的。共晶焊通常在惰性环境中进行，防止粘合表面氧化 (图 2)。可以使用 90-95% 氮氢混合物，氢在形成粘合时可以发挥作用。



从设备制造商的角度来看，共晶过程的控制涉及几个关键要素和过程。包括精确控制装置温度、精确控制接触力、通过擦洗擦去氧化层、加入能量使温度达到尖峰、混合焊料中的各种金属、提供有覆盖气体的惰性环境或有覆盖气体的助熔剂、控制冷却和底座。

薄砷化镓（GaAs）和磷化铟（InP）管芯需要精细处理。焊接工具不得接触边缘发射二极管上的晶面以及垂直腔二极管和其它有源区域的发射注入表面，因为会损坏这些装置。表 1 说明了所需的精细程度。

Force

- 15-20g for .020 square die
- 40g for .050 square die
- 80g for .070 square die

Scrub

- Typically .003 to .008 inches in X, Y, or both directions
- Usually 3 to 5 cycles

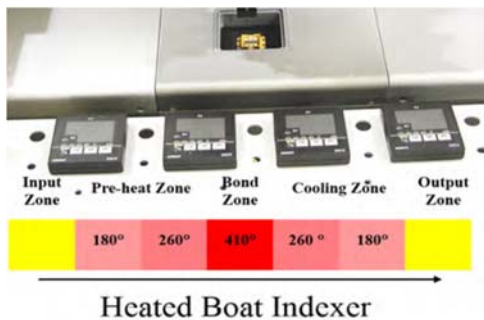
多管芯共晶焊。出于各种目的，例如高导热性、高可靠性和特殊混合集成，一些先进的光子装置需要通过共晶焊将多个管芯粘合在基板或载体上。载体上更复杂的可调谐激光芯片可能包括其他附加组件，例如，用于带宽优化的电容。有时，也可能需要通过共晶焊将用于光纤对准的其它机械部件粘合在激光器所在的相同载体上。

为了实现封装内多部件粘合，经常需要温度分级。为了实现温度分级，需要使用快速升温加热工作站。采用温度分级的原因有很多。例如，可能需要在在一个温度下通过共晶焊将监测二极管粘合到间隔物上（例如，在温度 Y 下的金-锗共晶焊），也可能需要使用较低温度的焊料将子组件（监测二极管和间隔物）粘合到衬底上（例如，在温度 X 下的金-锡共晶焊）。然后，可能需要使用较低温度的回流焊料将该衬底安装到封装上（例如，在温度 Z 下的铅-锡共晶焊）（表 2）。这种快速升温是通过低质量热板来实现的。

Solder Alloy Melting Points

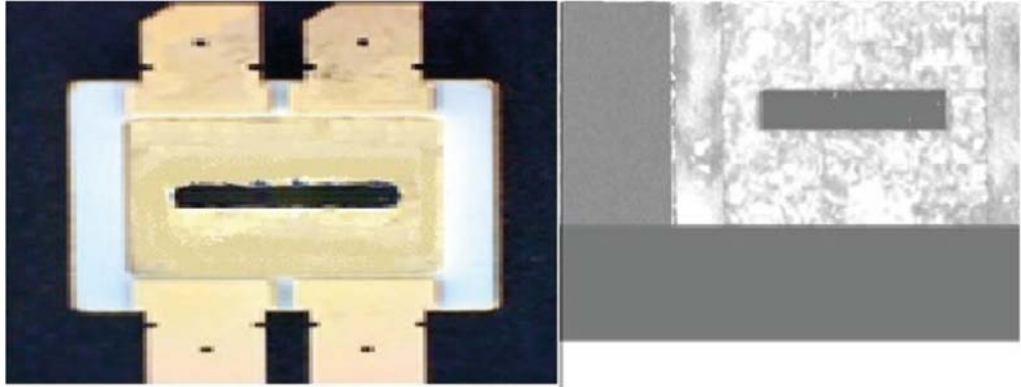
- Pb38 -- Sn62 183° C
- Au80 -- Sn20 280° C
- Au88 -- Ge12 356° C
- Au97 -- Si03 363° C
- Au06 -- Pb94 304° C
- Au82 -- In18 451° C

串联共晶加工。串联共晶加工是一种实现高产量的手段。使用渐进热板系统，在整个加热区发挥指示作用。输送线可以自动装卸，“船”或载体位于输送线上，用于输送部件。共晶管芯粘合就是在“船”或载体上进行。在预热区、装配区和后热区对零件进行索引编制，从而严格控制温度。分析每个加热区的温度分布有助于快速处理高质量零件。通过限制焊接站的升温时间可实现高产量。所有温度区都在氮氢混合覆盖气体下，以防止受热零件氧化（图 3）。



就金-硅共晶焊而言，视觉系统调准封装，然后使用擦拭动作（可变幅度和频率）拾取并放置管芯，实现共晶焊。受热氮氢覆盖气体位于粘合区域上。就焊料回流共晶焊而言，例如金-锡（Au/Sn）和砷化镓（GaAs）和氮化镓（GaN）管芯粘合，系统调准包装，然后拾取并放置预成型件于受热封装上（如有需要，预成型件可以预先沉积）（图 4）。然后，拾取并放置管芯。同时，使用脉冲加热共晶台使粘合位置的温度上升，并擦洗该粘合位置（可变幅度和频率），实现共晶回流。船被指引至下一个衬底位置，重复上述过程直到所有船位置已经粘合。当索引器传送船时，零件经过冷却区而逐渐冷却。完成后，分度输送机将船转移到输出端自动储存送料装置。最后，任何管芯共晶焊工艺上都有一种功

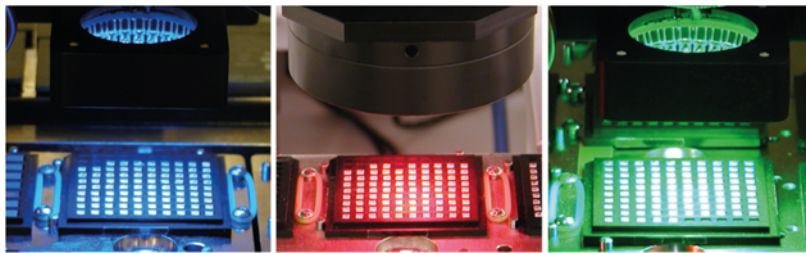
能：高级视觉系统。请看如下描述。



高级视觉系统。 机器视觉就准确放置而言至关重要。实现装置精确放置的基础是一台经验证的超精密机器平台，具备机械性能稳定和热稳定，没有悬臂部件。此外，需要精确对准装置的基准点以实现微米级精度。最终精确放置还需要许多其他主要功能。

局部和全局视觉对准用于嵌套衬底和特征对齐。软件必须允许用户将管芯和衬底基准点、管芯边缘或先前放置的管芯的特征对齐。将激光芯片对准光电二极管或者将透镜对准 VCS EL 都是光电领域的常见示例。再比如，将临界芯片对准 MMIC 和梁式引线二极管。此功能确保光学和微波设备的可重复精确对准。

通过视觉成功地处理各种各样的材料时需要多色照明设备。三色（即，红、绿、蓝）可编程照明设备能处理棘手的对准表面，例如，氧化铝上的黄金痕迹（图 5）。照明强度必须是可编程的，完整的照明解决方案包括环形光和平行光。另外，必须对每个管芯和衬底基准点分别编制最优照明设置。



不论材料对比和检测如何，高级视觉必须快速执行稳健的衬底基准点对准，并且 360° 确定芯片的方位。模式识别和边界轨迹工具能够为管芯中心或边缘定位，或者关键应用特性识别方面提供完整的解决方案。从而快速无误地处理复杂装配体。

光学和照相机系统必须包括多个放大率，用于向上和向下拍摄的照相机。机器视觉用于对准组件底部特征和倒装芯片。向上的相机用于拍摄在放置之前位于真空底座上的管芯的特征。集成视觉在放置之前对准装置底部的特征。软件、硬件、照明和光学缺一不可。光电检测器就是示例之一。向下的相机首先对准衬底封装上的特征。然后，向上的相机对准管芯底部的透镜。系统放置并粘合装置。

总结

本文讨论了通信市场需求，光子、微波和 RF 电子设备和工艺需求，以及共晶焊自动化技术进步的最新趋势。最近，手机应用和云计算存储技术的不断涌现对带宽提出了更高需求，使得光子和 RF 电子设备成为基础设施扩建中最重要的通信组件。在成功的制造环境中，更高产量和更先进产品需要高速、高精度和高可靠性的自动管芯粘合解决方案。这些解决方案都离不开设备性能、专用软件应用程序、高级视觉系统、工艺理解和技术支持服务。

作者简介

Daniel F. Crowley 获得普渡大学工程学硕士学位和北大学理学士学位，担任 MRSI Systems 销售副总裁；电子邮件：Dan.Crowley@mrsisystems.com

Yi Qian 获得中国科学院半导体研究所物理学博士学位和浙江大学电气工程学士学位，担任 MRSI Systems 产品管理副总裁。

图表列表

表 1：薄砷化镓和磷化铟管芯处理要求。

表 2：不同的金属复合物具有特定回流曲线。

图 1：金属复合物的共晶转变—此例为金-锡共晶焊。

图 2：脉冲加热快速升温共晶台。

图 3：串联共晶焊。

图 4：共晶封装（左）采用 Sonoscan 检验结果（右）。

图 5：可编程照明强度和颜色。

表 1.

力

- 施加 15-20g 力于 .020 方形管芯
- 施加 40g 力于 .050 方形管芯
- 施加 80g 力于 .070 方形管芯

擦洗

- 通常在 X 方向、Y 方向、或 XY 两个方向为 .003 到 .008 英寸
- 通常 3 到 5 圈

表 2：不同的金属复合物具有特定回流曲线。

Solder Alloy Melting Points

- Pb38 -- Sn62 183° C
- Au80 -- Sn20 280° C
- Au88 -- Ge12 356° C
- Au97 -- Si03 363° C
- Au06 -- Pb94 304° C
- Au82 -- In18 451° C