下载日志已记录，仅供内部参考

国海证券 SEALAND SECURITIES

证券研究报告
机械设备
2026年10月12日

光模块设备行业深度研究：CPO工艺重构——制造与测试体系持续演进

评级：推荐(维持)

张钰莹(证券分析师)
S0350524100004
zhangyy03@ghzq.com.cn

下载日志已记录，仅供内部参考

最近一年走势



相对沪深300表现

表现	1M	3M	12M
机械设备	-10.2%	-19.7%	-4.9%
沪深300	-5.6%	-11.5%	-8.3%

相关报告

《2023年以来工程机械月度行情复盘：预期与数据（推荐）*工程机械*张钰莹》——2026-10-09

《机械行业专题报告：工程机械2026年8月海关数据更新（推荐）*工程机械*张钰莹》——2026-09-23

《机械行业专题报告：摩托车行业2026年8月数据更新（推荐）*机械设备*张钰莹》——2026-09-17

下载日志已记录，仅供内部参考

核心提要

- **本篇报告核心研究CPO技术演进下光模块制造与测试设备的变化，重点回答三大问题：1、CPO相较传统可插拔光模块新增和改变了哪些制造工艺？2、贴片、键合、耦合等环节的设备需求如何随芯片级集成而变化？3、CPO测试体系如何由传统模块终测向晶圆、芯片、光引擎及系统级测试延伸？**

- **贴片设备：由分立器件贴装向芯片级、高精度和自动化组装升级。**

  1）贴装对象由分立器件转向芯片粒与光引擎。 CPO推动贴装对象由传统可插拔光模块的激光器、探测器、透镜等分立器件，转向芯片粒与光引擎，电子与光子芯片通过并排放置或背靠背等方式实现更高程度集成。

  2）贴装精度进一步提升至亚微米级。 CPO对芯片级贴装提出更高精度要求，贴装精度由传统微米级进一步提升至亚微米级，高精度倒装固晶成为重要制造环节。

  3）设备由传统器件贴装向自动化组装平台升级。 设备进一步集成高精度对准、器件拾取、芯片贴装、光纤连接及固化等功能，并向更多自动化、更少人工光纤处理和更高吞吐量发展。

- **键合设备：由传统引线键合向先进键合工艺演进。**

  1）芯片集成度提升带来先进键合需求。 CPO芯片集成度提升，推动芯片互连由传统引线键合向热压键合、混合键合等先进工艺演进。

  2）热压键合与混合键合对应不同互连场景。 热压键合主要用于芯片到基板的互连，混合键合则用于芯片到晶圆的混合键合及三维光子封装。

  3）混合键合提升集成密度，同时提高工艺要求。 相比传统微凸点堆叠，混合键合可实现更小的互连间距和更高的集成密度，但同时对颗粒、残留物及制造环境提出更高要求。

- **耦合设备：由分立光学对准向光引擎与共封装体耦合拓展。**

  1）耦合对象和位置发生变化。 CPO将耦合对象由传统模块内的分立光学转向光引擎与共封装体，耦合位置由模块内进一步延伸至光引擎与共封装体。

  2）对准方式由主动对准向主动与被动对准并存发展。 V形槽可实现光纤的被动自对准和并行组装，并可耐受无铅回流焊，推动被动对准在CPO耦合中的应用。

  3）新增光纤阵列组装与保偏耦合需求。 CPO侧新增光纤阵列组装和保偏耦合需求，对准工作站也由模块内分立光学对准转向光引擎与共封装体对准。

- **测试设备：由模块终测向多制造节点、多层级测试体系延伸。**

  1）测试关口由模块终测向前端制造环节迁移。 CPO测试体系由传统可插拔光模块的模块终测向多个制造插入点延伸，形成覆盖光子芯片晶圆级探针测试、电子加光子芯片晶圆级测试、光引擎级测试、封装体终测及系统级测试的多层级测试体系。

  2）光引擎级测试成为重要质量主闸门。 插入点3为单粒裸片/芯片级光引擎测试，需要电与光两类探针或插座以及特殊的裸片搬运方案，在进入后续封装前完成测试与筛选。

  3）后续测试进一步覆盖封装体和系统级性能。 封装级与模块级测试进一步转向全系统覆盖，评估误码率、眼图与链路裕量等端到端性能指标，量产测试则聚焦环回方式。

- **行业评级：**光模块设备兼具技术升级与产能扩张双重驱动，行业景气度有望持续提升。维持光模块设备行业“推荐”评级。
- **相关标的：**联讯仪器、电科思仪、日联科技、科瑞技术、华盛昌、罗博特科、凯格精机、博众精工、奥特维、快克智能、智立方等。
- **风险提示：**技术成熟度不及预期风险，产业化落地不确定性风险，早期大额投入周期长及项目执行不及预期风险，政策环境变动风险，知识产权纠纷风险。

下载日志已记录，仅供内部参考

1、CPO设备：相较于可插拔光模块变化如何?

下载日志已记录，仅供内部参考

1 可插拔光模块与CPO设备变化全对比

表：可插拔光模块 VS CPO

设备类别	对比维度/设备工序	可插拔光模块	CPO
贴片设备	贴装对象	探测器、激光器、透镜等分立器件，每封装通常有2对或4对PD和VCSEL	芯片粒与光引擎（光子器件集成于硅光光引擎）
	芯片组合	探测器/激光器与计算芯片分体封装	电子与光子芯片并排放置或背靠背键合
	贴装精度	环氧优于正负7微米；设备5-7微米（3σ）→优于1.5微米（3σ）	±0.2微米（3σ）、后贴装±0.3微米，支持金锡共晶
	贴装位置	集中在模块级（模块即最终封装形态）	封装级：热压键合、芯片到晶圆混合键合、三维光子封装
	高精度倒装固晶	服务光器件贴装，精度在微米级	亚微米精度（正负0.2微米@3σ、后贴装正负0.3微米），支持金锡共晶
	热压键合	——	芯片到基板热压键合
	混合键合	——	芯片到晶圆混合键合、三维光子封装
	贴片/组装设备形态	传统器件贴装	光子器件自动化组装平台
	设备功能	以器件贴装为核心	集成高精度对准、贴装及连接等功能
	组装对象	光电器件及组件	光学元件、光纤/光纤阵列、芯片、光子集成电路等
	自动化方向	—	更多自动化、更少人工光纤处理、更高吞吐量
键合设备	互连方式	金丝球焊（引线键合），低弧高/热超声高速球-缝焊	——
耦合设备	耦合对象	分立光学（透镜-光纤耦合）	光引擎光路
	耦合位置	模块内	光引擎与共封装体
	对准工作站	模块内分立光学对准	光引擎与共封装体对准
	光纤阵列组装	—	V形槽自对准并行组装，可耐受无铅回流焊
	保偏耦合	—	保偏耦合工艺
	光纤对准	主动对准，通过实时光功率反馈调整光纤位置至最大耦合后固定	由主动对准扩展为主动对准与被动对准并存
	被动对准	—	增加基于V形槽的被动/自对准方式，利用精密机械结构实现光纤定位
	对准设备能力	通过光功率反馈进行主动位置调整	在主动对准基础上增加基于V形槽等机械结构的自对准能力
测试设备	测试分割方式	按产品层级展开、以模块终测为关口；模块终测在光、电芯片的晶圆级测试之后进行	按五个制造插入点展开、把关前移到光引擎级：光子芯片晶圆级探针测试、电子加光子芯片晶圆级测试、光引擎级测试、自动测试设备终测与系统级测试（其中两个位于晶圆级）
	质量关口	以模块终测为关口	插入点3确保有缺陷的光引擎不与昂贵的处理器芯片封装在一起；CPO单元的良率是各项通过率的乘积，器件须同时满足电指标与光指标；测试内容前移以保证已知合格裸片（KGD），终测仍不可省略
	晶圆级光子测试	光/电芯片的晶圆级测试	晶圆级单面探针测试（插入点1）
	键合后光电测试	—	键合后光电测试（插入点2）
	光引擎级测试	—	单粒光引擎测试（插入点3）
	封装体终测与系统级测试	以模块终测为关口	封装体终测（插入点4）+系统级测试（插入点5，模拟任务模式）
	测试判据		CPO的封装级与模块级测试转向全系统覆盖，评估误码率、眼图与链路裕量等端到端性能指标；量产测试策略则聚焦环回方式，将发射端输出回环至接收端输入，可选配光学仪器
	测试方案	可插拔模块支持400G以太网帧与纠错测试（直接安装QSFP-DD或OSFP）	CPO光学器件发射端测试采用码型发生器（最多8通道）、带时钟恢复的采样示波器与光谱分析仪的组合
	晶圆级测试设备		双面电光晶圆测试机面向垂直集成的光子与电子裸片堆叠设计，可在晶圆相对的两面同时进行电与光探针测试，并以高精度六轴对准机构驱动3D打印光纤阵列探针实现边缘或光栅耦合接入，是实现可扩展CPO量产的关键设备；配套的晶圆级光子测试平台则具备混合信号电光探针能力与可复现的低损耗对准

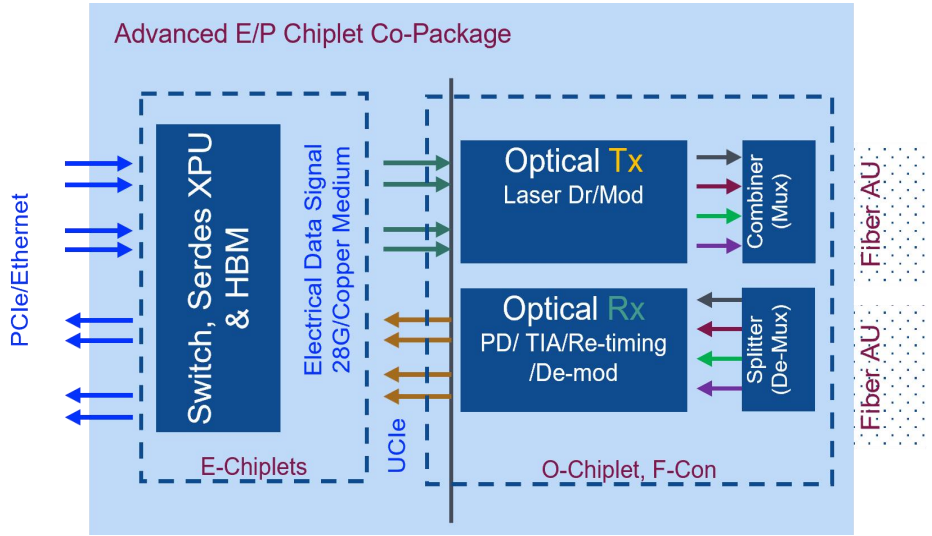
资料来源：SEMICONDUCTOR ENGINEERING、各公司官网、Palomar Technologies、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.1.1 贴片：贴装对象由器件转向芯片与光引擎

- **贴片设备的差异首先体现在贴装对象——可插拔光模块贴装分立光电器件，CPO贴装芯片粒与光引擎。**可插拔光模块封装由探测器与垂直腔面发射激光器构成，经透镜与光纤相连、另一侧连接计算芯片；CPO则将光子器件集成于硅光光引擎，电子与光子芯片并排放置或背靠背键合。
- **可插拔光模块贴装对象：**探测器与垂直腔面发射激光器构成模块封装的收发核心，每个封装通常有2对或4对PD和VCSEL；两者经模塑透镜与光纤相连，透镜中心具有特定间距，探测器与激光器的光孔必须与透镜对准，贴装因此成为整机装配中最关键的工序。计算芯片到探测器与激光器的互连采用金丝球焊完成。
- **CPO的贴装对象：**电路与光路可以分别制造、也可以同片制造；在2.5维或3维组装器件中，电子芯片与光子芯片并排放置或背靠背键合。光子器件集成于硅光光引擎，多个光引擎共享外置光源。

图：共封装光学的组成——电子芯片粒、光子芯片粒与激光器



表：贴装对象对比

	可插拔	CPO
贴装对象	探测器、激光器、透镜等分立器件，每封装通常有2对或4对PD和VCSEL	芯片粒与光引擎（光子器件集成于硅光光引擎）
芯片组合	探测器/激光器与计算芯片分体封装	电子与光子芯片并排放置或背靠背键合

下载日志已记录，仅供内部参考

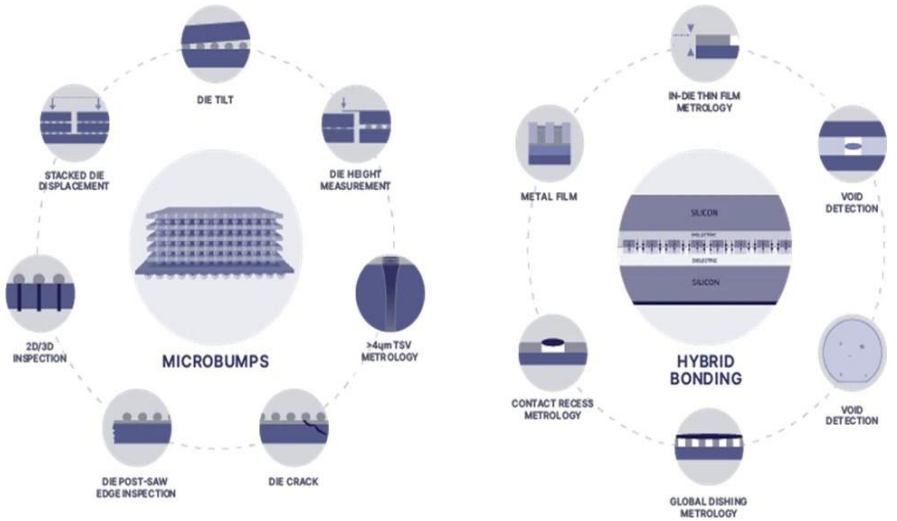
1.1.2 贴片：先进键合成为CPO新增工艺

- **贴片设备变化：高精度倒装固晶升级为光子组装的重要设备，热压键合与混合键合为新增环节。**
- **升级与新增：**高精度倒装固晶从可插拔侧的光器件贴装设备，升级为CPO侧光子组装的重要设备，贴装精度进入亚微米级并支持高速金锡共晶；热压键合与混合键合为新增环节——芯片到基板的热压键合、芯片到晶圆的混合键合与三维光子封装进入贴装设备序列。
- **混合键合可实现更小的互连间距和更高的互连密度。**混合键合可实现小于10μm的互连间距，在更小区域内实现更多I/O端子，从而提升带宽和整体性能。相比传统微凸点堆叠在芯片之间形成约30μm的间隙，混合键合采用直接铜-铜连接，可实现芯片间接近零的间距，降低封装厚度，并具有更低的互连电阻和更好的热传导能力，从而改善信号完整性、降低功耗并提升散热性能。
- **混合键合对制造过程提出更高要求。**混合键合对颗粒和有机残留物高度敏感，即使约1μm的颗粒也可能造成缺陷；残留物可能导致接触不良、气体或水分滞留，并形成空洞，进而造成分层或键合不完整，降低机械完整性和电气连接能力。同时，混合键合成本高于传统微凸点技术，并可能需要新增设备和工艺流程。

表：贴片设备变化

设备/工序	可插拔	CPO
高精度倒装固晶	服务光器件贴装，精度在微米级	亚微米精度（正负0.2微米@3σ、后贴装正负0.3微米），支持金锡共晶
热压键合	——	芯片到基板热压键合
混合键合	——	芯片到晶圆混合键合、三维光子封装

图：微凸点和混合键合技术中的互连挑战



资料来源：SEMICONDUCTOR ENGINEERING、MRSI官网、ASMPT官网、SET公司官网、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.1.3 贴片：热压键合与混合键合

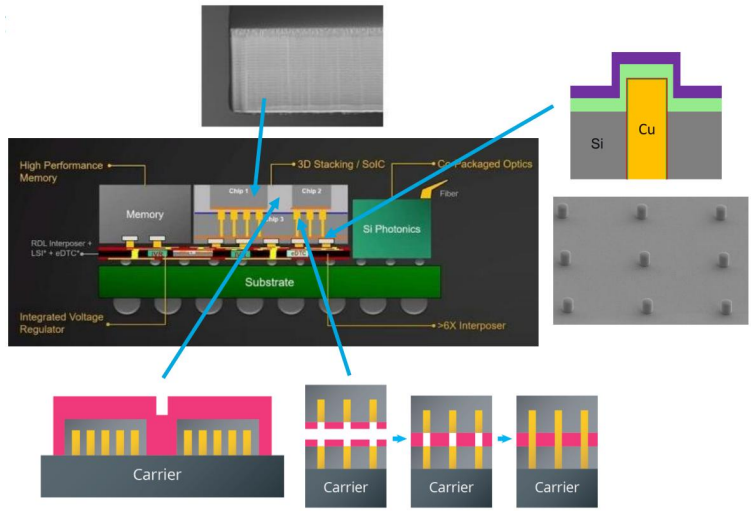
- **热压键合通过热量与压力实现芯片间互连，并配合通孔暴露和UBM金属形成完整的封装互连结构。**在CPO封装中，相关工艺包括通孔暴露刻蚀、通孔暴露后的CVD以及用于再布线层（RDL）的UBM金属，其中通孔暴露CVD采用125–250℃的低温CVD工艺，为后续芯片互连和封装提供工艺基础。

- **混合键合通过引入专用键合层和芯片间填充工艺，实现芯片之间的高密度集成。**CPO中的相关工艺包括等离子切割、SiCN键合层CVD、芯片间TEOS填充CVD以及RDL的PVD，其中键合层和芯片间填充均采用125–250℃的低温CVD工艺；相比热压键合，其工艺链进一步引入键合层和芯片间填充等环节。

表：热压键合VS混合键合

对比维度	热压键合（TCB）	混合键合（HB）
CPO中的定位	芯片互连与封装集成	高密度芯片集成
主要工艺	通孔暴露刻蚀、通孔暴露CVD、UBM金属	等离子切割、SiCN键合层CVD、TEOS填充CVD、PVD
关键工艺	Via Reveal、UBM	键合层、芯片间填充
低温CVD	125–250℃	125–250℃
工艺特点	配合通孔和UBM金属形成互连	引入专用键合层及芯片间填充工艺

图：热压键合与混合键合



资料来源：Dave Thomas《Implications on Wafer Processing of the move from Pluggable to Co-Packaged Optics》、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.1.4 键合：CPO减少传统打线互连需求

- **键合的差异在于互连方式：可插拔光模块以引线键合完成芯片互连，CPO基本不需要打线设备。**
- **可插拔光模块的引线键合：**可插拔模块内，计算芯片到探测器与激光器的互连采用金丝球焊完成，这一引线键合工艺与气密封装共同构成光子封装的基础工艺——金丝键合、铝丝键合、楔焊与气密封装构成光子封装的完整工艺链；用于该互连的全自动热超声高速球-缝焊设备具备低弧高能力。
- **打线设备仅对应可插拔光模块的键合需求：**球焊对应金丝键合、楔焊对应铝丝键合，服务于模块内芯片与基板的丝线互连，而CPO基本不需要打线设备。围绕光子封装场景，打线设备还发展出低弧高能力与全自动热超声高速球-缝焊工艺，以及球凸点、钉头凸点、晶圆凸点、芯片凸点等工艺能力；键合设备的技术分类还包括立式键合，与球焊、楔焊并列。

表：键合设备变化

分点	可插拔	CPO
互连方式	金丝球焊（引线键合），低弧高/热超声高速球-缝焊	——

下载日志已记录，仅供内部参考

1.1.5 贴片：CPO贴装精度迈入亚微米级

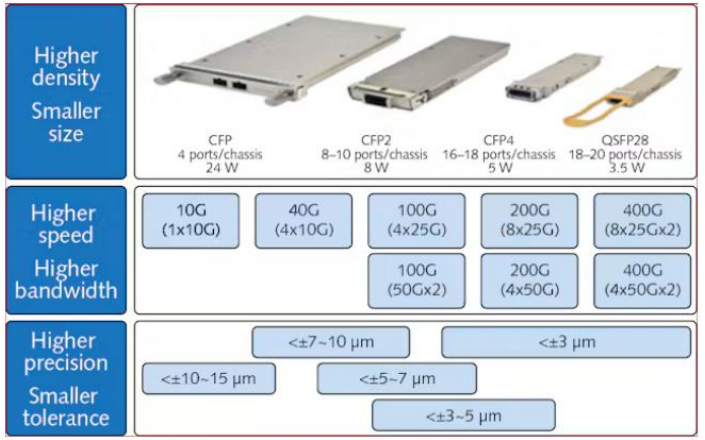
- **贴装精度是贴片设备的核心差异之一 ——可插拔光模块侧在微米级，CPO侧进入亚微米级。**
- **可插拔光模块侧的贴装精度：**据Palomar Technologies官方博客，导电环氧贴装须保持优于正负7微米的精度；设备方面，主流贴片机约为5-7微米（3σ），面向高速光器件提升至优于1.5微米（3σ）。
- **CPO侧的贴装精度：**面向硅光、共封装与晶圆级封装的亚微米贴片方案成为主流，贴装精度收紧至±0.2微米（3σ）、贴装后精度达±0.3微米，并支持高速金锡共晶。

- **贴装位置的差异——可插拔的贴片工序集中在模块级，CPO的贴片延伸到封装级。**
- 可插拔光模块的贴装位置：贴片工序集中在模块级完成，可插拔模块即为最终封装形态。
- CPO的贴装位置：光引擎与计算芯片共封装，2.5维封装将光与电芯片集成于中介层与基板；贴装进入芯片到基板的热压键合、芯片到晶圆的混合键合与三维光子封装等先进封装环节。

表：贴装精度与位置

	可插拔	CPO
精度	环氧优于正负7微米；设备5-7微米（3σ）→优于1.5微米（3σ）	±0.2微米（3σ）、后贴装±0.3微米，支持金锡共晶
位置	集中在模块级（模块即最终封装形态）	封装级：热压键合、芯片到晶圆混合键合、三维光子封装

图：光模块封装、速率与精度演进对比



下载日志已记录，仅供内部参考

1.1.6 贴片：贴片设备向光子组装平台升级

- **贴片设备由传统器件贴装进一步向光子器件自动化组装平台延伸。**光子器件自动化组装平台以光子器件的芯片级组装为核心，通过高精度对准与贴装，实现光学元件、光纤及光纤阵列，以及芯片和光子集成电路的集成与混合集成，并可用于CPO、光子集成电路等组装场景。
- **光子器件组装平台进一步将高精度对准、贴装和连接等功能集成于同一设备平台。**相关设备具备高精度对准、器件拾取与放置、芯片贴装，并支持光纤对准、光纤阵列组装以及环氧粘接、焊接等工艺。
- **CPO制造中的组装环节进一步向高自动化、减少人工操作和提高吞吐量方向发展。**随着更多光学结构和测试环节转移至晶圆级，CPO制造可更多采用高产量硅制造模式，实现更多自动化、更少人工光纤处理和更高吞吐量。

表：贴片设备变化

	可插拔光模块	CPO
贴片/组装设备形态	传统器件贴装	光子器件自动化组装平台
设备功能	以器件贴装为核心	集成高精度对准、贴装及连接等功能
组装对象	光电器件及组件	光学元件、光纤/光纤阵列、芯片、光子集成电路等
自动化方向	—	更多自动化、更少人工光纤处理、更高吞吐量

下载日志已记录，仅供内部参考

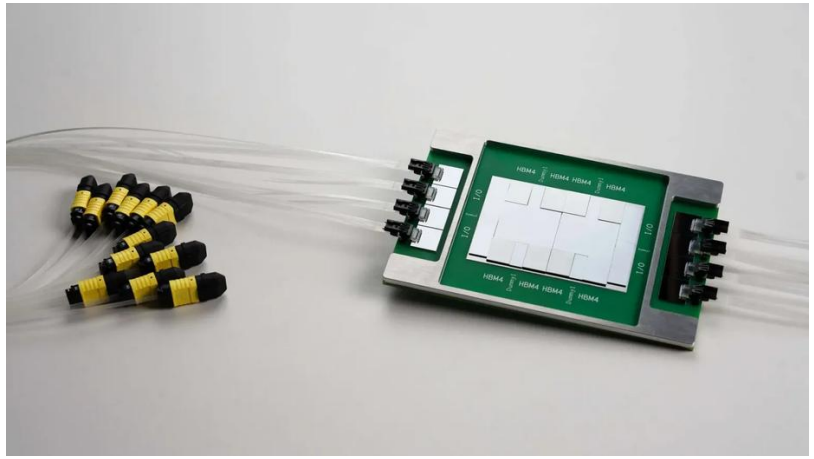
1.2.1 耦合：由模块级向光引擎级升级

- **耦合的差异在于耦合对象与位置——可插拔在模块内耦合分立光学，CPO在光引擎级耦合光纤。**
- **可插拔光模块：**光子组装的本质，是微光学元件、光纤连接与光电器件芯片的对准-贴装。在可插拔模块内，探测器与激光器经透镜与光纤相连，透镜-光纤耦合属于典型的分立光学耦合。
- CPO：进入CPO后，耦合对象上移到光引擎与共封装体，相应的对准-贴装平台面向所有光学元件、光纤与芯片的装配任务，应用覆盖共封装与光子芯片组装。

表：耦合对象与位置对比

	可插拔	CPO
耦合对象	分立光学（透镜-光纤耦合）	光引擎光路
耦合位置	模块内	光引擎与共封装体

图：内含8颗光引擎+2颗AI加速器的CPO方案结构图



下载日志已记录，仅供内部参考

1.2.2 耦合：从少量对准向多通道并行对准

- 针对面板式可插拔收发器优化的传统主动对准方法，难以跟上CPO模块的复杂性与规模。
- CPO侧需要以纳米级精度、跨六个自由度，将数千根光纤对准光子集成电路（PIC）（据SENKO）；据Aerotech专访，现代CPO器件可搭载12至16个或更多光引擎、每个光引擎20至42个或更多通道。每个CPO模块可能需要100次以上主动对准操作，速度与精度对成本效益型制造至关重要。
- 据Marvell，其与SENKO、Jabil、Mikros联合发布的CPO交换机参考设计中，以太网交换芯片周围环绕16个光引擎块与1152根光纤（128根激光光纤与1024根数据光纤）。为满足经济高效制造的速度与精度要求，单次对准须以秒计；据Santec，目前多通道主动对准系统可在约1.5秒内对准至全局最优0.1dB以内，并同时监测全部器件通道而非仅外侧回路。

表：可插拔光模块和CPO 耦合对比

对比维度	可插拔光模块	CPO
对准对象	面板式可插拔收发器	CPO模块（纳米级精度、跨6个自由度，将数千根光纤对准PIC)
对准方式	针对面板式可插拔收发器优化的传统主动对准方法	多通道主动对准：同时监测全部器件通道，而非仅外侧回路
对准次数	—	每个CPO模块可能需要100次以上主动对准操作
单次对准耗时	传统方法难以跟上CPO模块的复杂性与规模	约1.5秒内对准至全局最优0.1dB以内
集成规模	—	单个CPO模块可集成16个光引擎块与1152根光纤

资料来源：SENKO公司官网、Santec公司官网、Marvell官网、machinebuilding（Aerotech专访）、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.2.3 耦合：光纤阵列与保偏需求提升

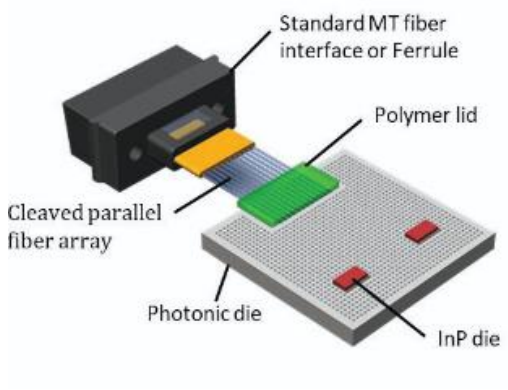
- **焊接兼容与保偏，是CPO侧光纤耦合新增的两个要求：前者来自可回流焊光纤阵列带来的先测试、后焊接流程，后者来自外置光源对保偏光纤与偏振消光比的要求。**
- **焊接兼容：**光纤阵列在光子芯片上定义的V形槽中实现自对准并行组装，并可耐受无铅回流焊，这使光引擎可以先测试、后焊接，为光电共集成铺平了道路；该并行组装工艺与标准的自动化高速贴装机兼容，改善了光子封装的可扩展性与成本效率，实现光引擎的预测试。
- **保偏：**外置光源输出须采用保偏光纤并控制偏振消光比，保偏耦合由此成为光源侧的重要工艺；同时应尽量减少光路中的连接器数量，因为所有连接器都会增加插入损耗与偏振损耗、降低偏振消光比；并确保所有连接器精确对准与抛光、以优化偏振消光比，建立持续的校准与验证流程，定期检查光路是否满足规格要求，确保光信号路径达标。

- **升级与新增：**对准工作站虽为两条路线通用，其对准对象却由模块内分立光学升级为光引擎与共封装体；光纤阵列组装与保偏耦合则是CPO侧新增的工艺环节。

表：耦合设备变化

设备/工序	可插拔	CPO
对准工作站	模块内分立光学对准	光引擎与共封装体对准
光纤阵列组装	—	V形槽自对准并行组装，可耐受无铅回流焊
保偏耦合	—	保偏耦合工艺

图：并行光纤示意图



资料来源：《The future of packaging with silicon photonics》、IBM公司官网、EPDT（爱德万署名技术文章）、ficonTEC公司官网、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.2.4 耦合：主动与被动对准并存演进

- **由以主动对准为主，扩展至主动对准与被动对准并存。**主动对准通过实时光功率反馈迭代调整光纤位置，在达到最大耦合后固定；同时，被动对准依靠半导体精度的机械结构实现光纤定位，其中芯片边缘刻蚀的V形槽可提供光纤的自对准定位。
- **由依靠光功率反馈进行主动调节，扩展至可利用V形槽实现光纤被动自对准。**CPO中，V形槽结构用于光纤边缘耦合的被动对准；据IBM（转引自SEMICONDUCTOR ENGINEERING），在芯片上刻蚀V形槽、将光纤放入夹具压入槽内，组装过程中无需分析光路，具备被动自对准与高吞吐量。
- **对准方式由主动调节进一步扩展至基于精密机械结构的自对准。**主动对准需要根据实时光功率反馈不断调整光纤位置，而被动对准则利用芯片边缘V形槽等精密机械结构，使光纤实现自对准定位。

表：主动对准→主动与被动并存

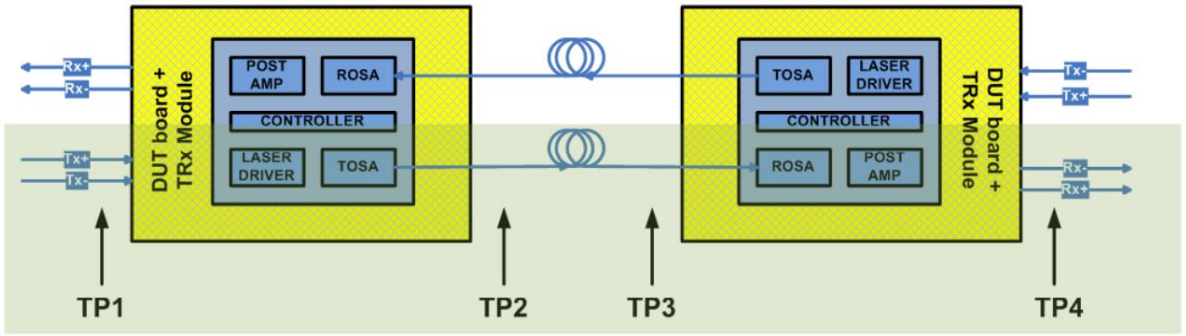
设备/工艺	可插拔光模块	CPO变化
光纤对准	主动对准，通过实时光功率反馈调整光纤位置至最大耦合后固定	由主动对准扩展为主动对准与被动对准并存
被动对准	—	增加基于V形槽的被动/自对准方式，利用精密机械结构实现光纤定位
对准设备能力	通过光功率反馈进行主动位置调整	在主动对准基础上增加基于V形槽等机械结构的自对准能力

下载日志已记录，仅供内部参考

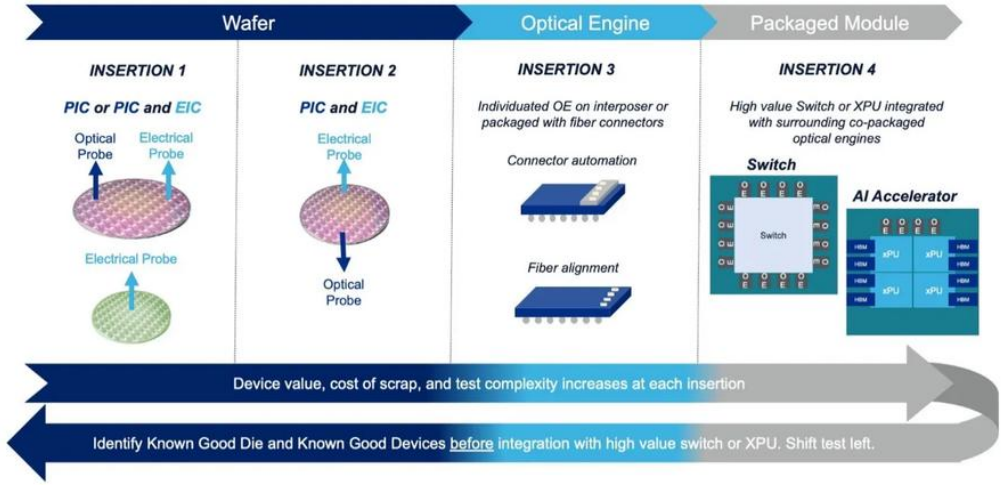
1.3.1 测试：测试关口前移至制造环节

- **测试设备的分割方式与质量关口双双改变：**可插拔按产品层级展开、以模块终测为关口，CPO则按五个制造插入点展开、把关前移到光引擎级；行业层面，200G/通道已有CPO采用，400G/通道时代CPO成为必选。
- **分割方式：**可插拔的模块终测在光、电芯片的晶圆级测试之后进行；CPO则把测试拆分为五个插入点——光子芯片晶圆级探针测试、电子加光子芯片晶圆级测试、光引擎级测试、自动测试设备终测与系统级测试，其中两个位于晶圆级。
- **质量关口：**在质量关口的设置上，插入点3确保有缺陷的光引擎不与昂贵的处理器芯片封装在一起——这正是因为CPO单元的良率是各项通过率的乘积，器件须同时满足电指标与光指标；为此测试内容前移以保证已知合格裸片（KGD），终测仍不可省略，因其反馈的封装良率学习价值巨大。

图：可插拔光模块测试插入点



图：CPO测试插入点



资料来源：《Optical Transceivers:Evaluation of Commercial Optical TRx》、EPDT（爱德万署名技术文章）、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.3.2 测试1-2：晶圆级电光测试加速发展

- **插入点1-2：**插入点1为光子芯片单面晶圆级探针测试；光子晶圆与电子晶圆键合后，插入点2为电子加光子芯片的单/双面晶圆级测试。两个插入点的共同作用，是经光栅或边缘耦合器提取插损、偏振相关损耗、响应度等高保真数据，在缺陷裸片进入昂贵封装工序之前将其拦截丢弃。
- **晶圆级测试设备：**对应设备上，双面电光晶圆测试机面向垂直集成的光子与电子裸片堆叠设计，可在晶圆相对的两面同时进行电与光探针测试，并以高精度六轴对准机构驱动3D打印光纤阵列探针实现边缘或光栅耦合接入，是实现可扩展CPO量产的关键设备；配套的晶圆级光子测试平台则具备混合信号电光探针能力与可复现的低损耗对准。

表：insertion2：电测试与光测试

类别	EIC 测试	PIC 测试
原理	使用电探针进行接触式测试。	使用具有特定间距和角度的光学探针（光纤阵列），将光信号传输至波导。
对准精度	μm（微米级）	nm（纳米级）
行业成熟度	已实现批量生产和自动化。	——
主要探针卡厂商	MPI、FormFactor、Technoprobe、Micronics	ficonTEC、FormFactor

下载日志已记录，仅供内部参考

1.3.3 测试3：光引擎级测试成为关键关口

- **插入点3是CPO的质量主闸门，测试对象由模块变为光引擎；判据体系随之换轨，测试方案也相应不同。**
- 质量主闸门：插入点3为单粒裸片/芯片级光引擎测试，需要电与光两类探针或插座，并需要特殊的裸片搬运方案。
- 判据换轨：CPO的封装级与模块级测试转向全系统覆盖，评估误码率、眼图与链路裕量等端到端性能指标；量产测试策略则聚焦环回方式，将发射端输出回环至接收端输入，可选配光学仪器。
- 测试方案：可插拔模块支持400G以太网帧与纠错测试（直接安装QSFP-DD或OSFP），而CPO光学器件发射端测试采用码型发生器（最多8通道）、带时钟恢复的采样示波器与光谱分析仪的组合。

图：Teradyne UltraFLEXplus搭配Photon 100单面光学晶圆探针测试单元



表：CPO光引擎测试：质量主闸门、判据与测试方案

	CPO
质量主闸门	插入点3为单粒裸片/芯片级光引擎测试
测试对象	光引擎
测试接口	需要电与光两类探针或插座
搬运方案	需要特殊的裸片搬运方案
判据体系	封装级与模块级测试转向全系统覆盖，评估误码率、眼图与链路裕量等端到端性能指标
量产测试策略	聚焦环回方式，将发射端输出回环至接收端输入，可选配光学仪器
测试方案	发射端采用码型发生器（最多8通道）、带时钟恢复的采样示波器与光谱分析仪的组合

资料来源：Teradyne官网、picmagazine、SEMICONDUCTOR ENGINEERING、安立公司官网、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.3.4 测试4、5：向封装及系统级测试延伸

◆ **CPO的整机测试由轻变重，外置光源是CPO特有的配套测试对象。**可插拔的测试以模块终测为关口，CPO则延伸到插入点4封装体自动测试设备终测与插入点5模拟任务模式的系统级测试。其中终测单元须集成光与电测试、同时验证单个器件与CPO系统整体功能，而连接器设计无标准化、需定制运动与对准系统；测试机与搬运系统采用分体架构，热头、机械搬运、测试插座、负载板等各自独立运行；加之半导体测试行业缺少光学探针、光纤连接器操作与光学仪器的明确标准，光路校准相当耗时。

表：可插拔光模块和CPO测试环节对比

设备/环节	可插拔	CPO
晶圆级光子测试	光/电芯片的晶圆级测试	晶圆级单面探针测试（插入点1）
键合后光电测试	—	键合后光电测试（插入点2）
光引擎级测试	—	单粒光引擎测试（插入点3）
封装体终测与系统级测试	以模块终测为关口	封装体终测（插入点4）+系统级测试（插入点5）

资料来源：EPDT（爱德万署名技术文章）、SEMICONDUCTOR ENGINEERING、国海证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

2、投资建议与风险提示

下载日志已记录，仅供内部参考

2 投资建议与风险提示

- **行业评级：**光模块设备兼具技术升级与产能扩张双重驱动，行业景气度有望持续提升。维持光模块设备行业“推荐”评级。
- **相关标的：**联讯仪器、电科思仪、日联科技、科瑞技术、华盛昌、罗博特科、凯格精机、博众精工、奥特维、快克智能、智立方等。
- **风险提示：**
- **1）技术成熟度不及预期风险：**光模块制造设备涉及高精度耦合、贴装及测试等前沿技术，目前仍处于工程验证阶段。设备在长期运行稳定性、批量生产良率及故障率等方面缺乏大规模产线数据支撑，技术路线尚未收敛，长期可靠性存在不确定性。
- **2）产业化落地不确定性风险：**设备高度定制化，需与下游光模块厂商的工艺配方、产品型号及扩产节奏深度绑定。当前行业以样机验证和小批量试用为主，尚未形成标准化商业交付模式，订单放量节奏受制于客户认证与产能投资，商业化路径存在不确定性。
- **3）早期大额投入周期长及项目执行不及预期风险：**研发投入大、周期长，涉及光学、机械、软件等多学科交叉。项目推进中易受技术迭代、客户工艺变更或供应链中断等影响，可能导致设备方案调整、交付延期甚至终止，影响投资回收节奏。
- **4）政策环境变动风险：**高端精密设备受出口管制、技术禁运等政策影响较大，关键零部件（如高精度运动平台、光学镜头）可能面临供应不确定风险。同时，国内智能制造扶持政策及国产化率要求亦有调整可能，政策变化将影响技术路线选择与市场准入节奏。
- **5）知识产权纠纷风险：** 光模块设备涉及精密光学、自动耦合、封装测试及软件控制等多领域核心技术，相关企业在研发过程中可能涉及专利布局、技术授权及核心人才流动等知识产权问题。随着行业技术迭代加速，企业间围绕关键工艺、设备结构及核心算法的专利竞争可能加剧，若发生知识产权诉讼或技术限制，可能影响产品交付、客户认证及市场拓展。

下载日志已记录，仅供内部参考

免责声明和风险提示

免责声明

本报告的风险等级定级为R3，仅供符合国海证券股份有限公司（简称“本公司”）投资者适当性管理要求的客户（简称“客户”）使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。客户及/或投资者应当认识到有关本报告的短信提示、电话推荐等只是研究观点的简要沟通，需以本公司的完整报告为准，本公司接受客户的后续问询。

本公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。本报告中的信息均来源于公开资料及合法获得的相关内部外部报告资料，本公司对这些信息的准确性及完整性不作任何保证，不保证其中的信息已做最新变更，也不保证相关的建议不会发生任何变更。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。报告中的内容和意见仅供参考，在任何情况下，本报告中所表达的意见并不构成对所述证券买卖的出价和征价。本公司及其本公司员工对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。本公司或关联机构可能会持有报告中所提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，还可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等服务。本公司在知晓范围内依法合规地履行披露义务。

风险提示

市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告为作出投资决策的唯一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在决定投资前，如有需要，投资者务必向本公司或其他专业人士咨询并谨慎决策。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，请公众投资者慎重使用未经授权刊载或者转发的本公司的证券研究报告。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。

若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。通过此途径获得本报告的投资者应自行联系该机构以要求获悉更详细信息。本报告不构成本公司向该机构之客户提供的投资建议。

任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。本公司、本公司员工或者关联机构亦不为该机构之客户因使用本报告或报告所载内容引起的任何损失承担任何责任。

郑重声明

本报告版权归国海证券所有。未经本公司的明确书面特别授权或协议约定，除法律规定的情况外，任何人不得对本报告的任何内容进行发布、复制、编辑、改编、转载、播放、展示或以其他任何方式非法使用本报告的部分或者全部内容，否则均构成对本公司版权的侵害，本公司有权依法追究其法律责任。

下载日志已记录，仅供内部参考

研究小组介绍

机械小组介绍

张钰莹，机械行业首席分析师，致力于前瞻研究及深度研究，擅长自上而下与自下而上相结合挖掘机械板块投资机会。
闫智，机械行业分析师，现阶段聚焦燃气轮机、PCB设备、金刚石等AI设备成长方向。

分析师承诺

张钰莹，本报告中的分析师均具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度，独立，客观的出具本报告。本报告清晰准确的反映了分析师本人的研究观点。分析师本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收取到任何形式的补偿。

国海证券投资评级标准

行业投资评级

推荐：行业基本面向好，行业指数领先沪深300指数；
中性：行业基本面稳定，行业指数跟随沪深300指数；
回避：行业基本面向淡，行业指数落后沪深300指数。

股票投资评级

买入：相对沪深300指数涨幅20%以上；
增持：相对沪深300指数涨幅介于10%～20%之间；
中性：相对沪深300指数涨幅介于-10%～10%之间；
卖出：相对沪深300指数跌幅10%以上。

下载日志已记录，仅供内部参考

国海证券·研究所·机械研究团队

心怀家国，洞悉四海

国海研究上海

上海市黄浦区绿地外滩中心C1栋国海证券大厦

邮编：200023

电话：021-61981300

国海研究深圳

深圳市福田区竹子林四路光大银行大厦28F

邮编：518041

电话：0755-83706353

国海研究北京

北京市海淀区西直门外大街168号腾达大厦25F

邮编：100044

电话：010-88576597