

测试PIC的光学特征

白皮书

EXFO

测试PIC的光学特征



白皮书



François Couny 博士
EXFO技术专家

简介

今天，光子集成电路（PIC）在很大程度上推动带宽不断发展——400G部署越来越多、5G日益普及、数据中心呈爆炸式增长。PIC虽然体积小，但功能强大，正在推动电信业的未来发展。近年来，这一颠覆性技术的发展速度不断加快，主要应用于电信领域，但同时也应用于医疗、传感和军事领域。PIC经常被拿来与开创性的电子处理器进行对比，它也同样首先在晶圆上被制作出来，然后被切割成单个芯片。

PIC将光子学引入集成电子学领域，以紧凑的设计将光子器件（如激光器和调制器）与光-电、电-光、全电子甚至射频等各种器件结合起来，应用于从医学到数据中心、自动驾驶汽车和量子计算等诸多领域。

然而，测试如此复杂的器件带来了许多挑战。测试每个芯片上包含的各种有源和无源光、电子或射频器件的关键参数可能是件非常棘手的任务。

在PIC发展的早期，设计、制造和测试工作都由学术或高度专业化的研究小组完成。由于这是一个漫长而繁琐的过程，因此PIC测试和测量工程师经常需要创建自己的定制解决方案。现在，将PIC量产的压力越来越大，需要能够更快、更可靠地完成PIC的测试与测量任务。

在测试PIC的光学特征方面，目前有多种测试解决方案和测量方法可供选择。本文介绍了直接在晶圆上进行光测试的基本原理，以及测试PIC芯片上有源和无源器件的最佳方法。

PIC基础知识

PIC是一个紧凑的光子系统，通过将数十个、数百个甚至数千个单独的器件组合到一个拇指大小的芯片上来实现复杂的功能。PIC与电子集成电路（EIC）非常相似，也在可能包含数百个芯片的晶圆上制造出来。然而，与EIC不同的是，PIC的主要优点是能够在紧凑的设计中将光功能与电子和射频功能结合起来。

有源光器件（即自身发光的器件，如激光器或放大器）通常在磷化铟（InP）晶圆上制造，而硅光子晶圆（SiPh）是用于制造无源光器件（如环形谐振器）的首选材料。基底材料的选择也在很大程度上取决于最终应用和工作波长（可见光、近红外光或红外光）。

与块状的光器件相比，PIC除了芯片明显紧凑外，还具有成本低、工作功率低、可批量生产、可重复性高等优点。它们还可以实现传统光模块无法实现的特殊光结构设计。

PIC技术正在迅速发展。下图显示了现有的几种PIC组成方式。将这些器件组合在芯片上，可实现所需的特性和功能：

- 波导、延迟线、分路器和多模干涉耦合器
- 复用器（Mux）/解复用器（Demux），通常基于阵列波导光栅（AWG）
- 基于马赫-曾德尔干涉仪或环形谐振器的电光调制器
- 可嵌入芯片的光电检测器，用于在芯片内进行光功率监测



PIC的效率和可扩展性很高，易于生产制造，而且体积不断减小，因此对于未来的高速网络和技术至关重要。

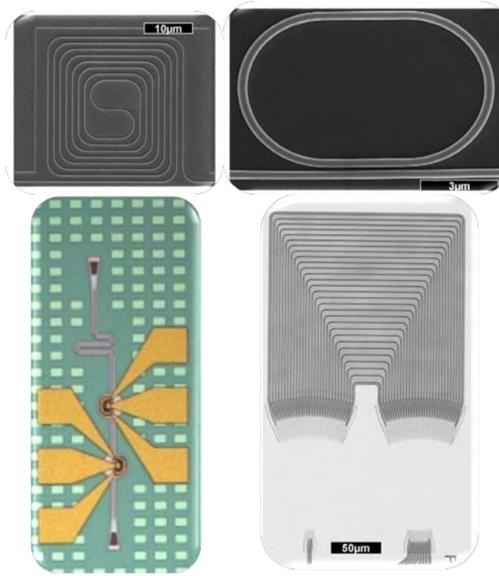


图1: PIC组成部分 (图片由CEA Leti提供)

然而，要充分发挥PIC的潜力，还需要克服一些障碍。由于光本身的原因，光子集成电路存在一些比较严格的限制：操纵光子不像操纵电子那么容易！使用纤芯为 $10\mu\text{m}$ 的光纤对进出PIC的光进行耦合需要专业知识。这使得PIC的测试和封装变得更加艰巨，而这些芯片的测试和测量已经成为制约整个PIC行业发展的瓶颈。必须在满足测试与测量要求的同时，不会对制造商每年生产数以十万计的器件造成影响。

这些组成PIC的器件在电信行业已经使用了十多年，用于制造复杂的系统，如收发器和可调谐激光器。PIC尤其适用于电信领域，因为它们可以应对该行业面临的挑战：对建立高速网络所需的紧凑型设备、更高带宽和能效的需求日益增长。5G以及数据中心和网络其它部分的数据速率从400G提高到800G及更高，都依赖于从设计到封装的PIC全程高效开发。



晶圆级测试的性价比最高。

应用

作为一项渐趋成熟的技术，PIC还在电信以外的多个领域有巨大的应用潜力，包括传感、政府和军事应用、医疗和生物成像，以及随着自动驾驶汽车的出现而变得日益普及的激光雷达。潜在应用的爆炸式增长使得政府采取多项措施——主要是在美国和欧洲，以支持从事PIC设计、研发以及量产的公司和企业的发展。因此，PIC技术正以更快的速度从大学实验室走向主流应用。

PIC：测试与挑战

带宽持续增长，推动PIC技术不断发展，从而对PIC的测试和测量提出了更严格的要求。制造商和运营商比以前更加需要更迅速、可靠的测试方法。

测试：PIC发展项目中的关键步骤

TAP（测试、封装）占PIC芯片生产总成本的80%。测试是PIC项目每个阶段都必不可少的一部分：从设计和制造到封装。代工厂的工程师直接对晶圆进行测试，以改善制造工艺，并确定每个晶圆性能的公差和极限。这些测试结果被反馈到工艺设计工具包（PDK）中，PDK本质上是光器件的光电特征数据库，通过它可以建立精确的芯片最终特征模型。功能测试在包装阶段进行，在将芯片交付给客户之前检测这些芯片。这种测试类似于典型的无源器件规格和可靠性测试（光纤输入/输出或电子输入/输出测试）。

晶圆级测试

晶圆级测试的性价比最高。即使需要专业设备来执行关键的参数测量，也可以自动测试和选择数百个PIC。甚至可以直接在晶圆上进行更高级的芯片测试，从而真正地验证裸片。

您知道吗？

如何就进出晶圆的光耦合起来

光纤用于将光从光源传输到晶圆，以及从晶圆传输到光器件测试仪。这些光纤的芯径为10 μm，需要与晶圆上的一个测试点对齐。高效的测试点包括一个刻在晶圆表面的光栅耦合器。光纤在测试点的顶部以8度的入射角对齐，以确保光耦合效率最佳，光损耗通常为1-3 dB。同样的方法被用来将设备的输出光耦合起来。在测试具有多个输入和输出的复杂器件时，也可以使用光纤阵列或光纤束来代替单个光纤，将光同时耦合到几个光栅耦合器中，这样可以同时测试多个功能以及输入和输出。

测试从晶圆边缘到中心的多个芯片，可以提供有关芯片制造工艺的关键信息。在开发过程中，当测试为研究目的而生产的晶圆时，可以收集到大量使用特定生产配方时出现了哪些工艺问题或导致了哪些异常的相关信息。这有助于将可接受的工艺和公差与缺陷或异常联系起来。在生产过程中，晶圆级测试的目标是将坏芯片和好芯片区分开来，以便可以尽早丢弃有缺陷的PIC，因为切割和包装坏芯片会造成很高的成本。需要迅速、可靠地完成工业规模的PIC测试。因为有许多芯片要测试，所以将好芯片和坏芯片区分开来至关重要。

探针台已经得到了广泛的发展，应用于电子领域，如CMOS（互补金属氧化物半导体）晶圆测试，但升级这些系统以便对进出芯片的光进行光子耦合则是一个全新的挑战。



图2：MPI Corporation使用EXFO CTP10组建的完整晶圆PIC测试系统

首先，由于光子耦合点的尺寸比电垫小许多，因此校准系统的精度至关重要。其次，使用纤芯直径为10 μm的光纤进行光耦合，需要6轴对准（参见左侧“您知道吗？”部分）。

在完成测试的校准部分后，就可以开始光学特征测试。上图显示的是使用EXFO的CTP10器件测试平台进行的测试过程。接下来，可以从PC上的定制软件控制所有设备，从而将整个测试过程自动化。

封装

在切割之后，将PIC最终封装起来也需要进行测试。此时，功能测试比参数测试更加重要。仍然可以使用EXFO的CTP10这样的器件测试仪，以确保对准以及插损和偏振相关性正确无误。



光器件的基本特征是其光谱。

使用光电二极管的优势

光电二极管很容易地刻在晶圆上，并可以用来简化和加快测试过程。在光路上设置测试点，这些测试点不需要进行光纤耦合，从而节省了宝贵的测试时间：光路中的光电二极管可以代替光栅耦合器。它们不需要在电垫上精确对准，并且比光纤耦合更稳定。此外，这些测试点可以轻松地在成品PIC产品上切出。芯片上的多个光电二极管也可以排列起来以便于测试，就像光栅耦合器可以排列成光纤阵列一样。

PIC关键参数：测试什么

参数测试

光器件的基本特征是其光谱会随着波长的变化而变化。对于激光器或放大器等有源器件，光谱是波长变化时光功率输出的测量结果。

对于无源器件（本身不发光的器件），所测量的光谱与插损（IL）相对应，即由于插入所述器件而导致的透射光与入射光的比率（单位为分贝，dB）。测量器件的回损（被器件反射的光的比率）和偏振相关损耗（光的偏振导致的插损变化）光谱印记也很有意义。对无源器件的光谱分析可以得到光精细度、峰值波长、通带特征、开/关比、滤波器隔离度、滤波器带宽等结果。

功能测试

如果设计允许，晶圆级测试也可以从一开始就包括功能测试。例如，可以直接在晶圆上将马赫-曾德尔干涉仪用作调制器，并通过使用BERT和采样示波器分析得到的眼图来对其进行功能测试。这将进一步降低集成有缺陷芯片的风险。

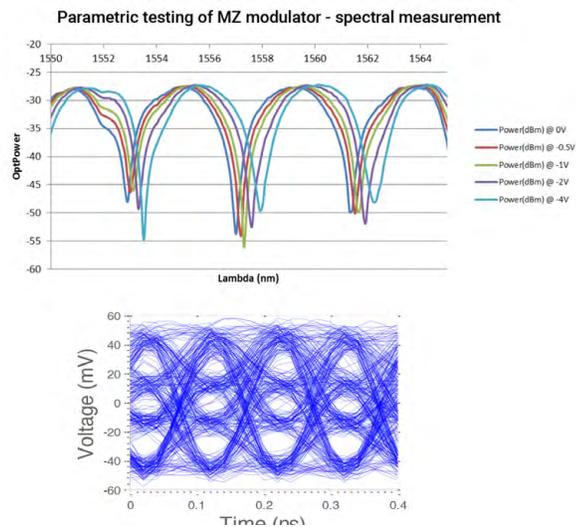


图4：（上）马赫-曾德尔调制器的参数测试——光谱。
（下）马赫-曾德尔调制器的功能测试——眼图。（图片由CEA Leti提供）

PIC的挑战与测试方法

今天，有各种各样的解决方案来执行先进的参数或功能测试。如前所述，PIC开发人员正在寻找更快、更可靠的方法来测试这些器件。下面，我们将介绍最适合这些新芯片的参数测试技术。

制造商正在寻找可提供很高灵活性、可靠性和速度的解决方案。他们还希望确保以同样简单的方式测试所有PIC，并且测试结果可信。

测试PIC的有源器件

PIC上的激光器和放大器等有源器件测试起来非常简单，可以通过光谱分析仪（OSA）完成。对这些有源器件进行频谱分析，可以获得详细的器件信息。检测收发器内部激光器的中心波长和边模抑制比（SMSR）。此外，还检测采用AWG结构的波分复用信号的光信噪比（OSNR）。

OSA用来测试有源器件，只需要使用OSA收集来自激光器输出端口的光，便可以得到光源的光谱信号。



先进的OSA具有非常迅速的优点，能够以2000 nm/s的速度进行测试，每秒完成五次扫描。

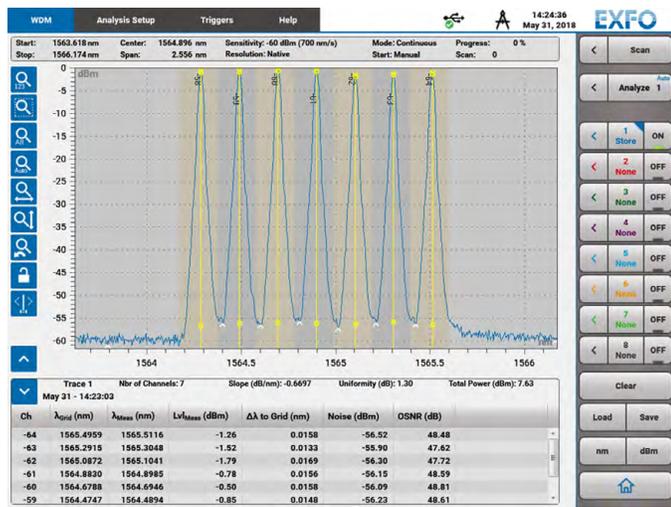


图5：使用EXFO的OSA20测试有源器件

先进的OSA具有非常迅速的优点，能够以2000 nm/s的速度进行测试，每秒完成五次扫描，这足以进行实时的器件校准，且分辨率非常高，可以测量关键的参数，如OSNR和SMSR。

测试PIC的无源器件

使用OSA测试无源器件

也可以使用OSA进行无源器件测试。OSA与宽带光源（在较宽的波长范围内有一些功率）一起使用，具有既大又平坦的光谱和稳定的功率。光在被耦合到芯片内后，可以被收集并耦合起来，发送到OSA。OSA随后将进行扫描，以记录被测设备（DUT）的光谱响应。

这种技术的优点是速度非常迅速，但在可测量的动态范围和光谱对比度以及偏振控制等方面存在不足，且一次只能测试一个输出端口，因此对于一些端口数高的PIC应用来说不太实用。

步进式激光器测试法

在标准、非PIC、无源的器件测试中已经开始使用一种方法，即步进式激光器技术。该方法绕过了OSA技术存在的问题：如果需要，激光器可以与一个由几百个功率计组成的检测系统结合使用。所有的功率集中在一个波长上，这意味着由于激光器的光功率密度原因，动态范围会非常宽。这可提供很好的光谱覆盖范围，通过将几个激光器起来，大多数时候可在1250-1700 nm之间进行测量。最后，由于激光器的偏振度很高，因此也很容易控制偏振度，从而能够进行PDL测量。步进式测量依赖于可连续调谐到不同波长的可调谐激光器。



使用OSA测试无源器件的优点是非常快。



该方法对粗光谱采样 (>100 pm) 具有很好的结果，在与外腔激光器 (ECL) 结合使用时，可以在几分钟内完成宽光谱范围的测量，具有良好的动态范围。然而，当被测器件需要更高的分辨率（通常为1 pm甚至更低）时，这种技术的速度就太慢了。对于光谱响应达到皮米级的环形谐振器来说，这是一大局限。

扫频测试法

为了可靠地测量现有的复杂器件，最有效的方法是扫频测试法。这种方法使用一个连续可调谐的激光源和一个器件测试仪，当激光器扫描波长时，该测试仪会同步记录波长和功率检测结果。该方法能在几秒钟内，以皮米级光谱分辨率和很大的光功率动态范围完成测试。

这种方法集连续可调谐的激光器的优点和器件测试仪的优点于一身。器件测试仪是一种专用仪器，具有非常短的测试时间和非常好的精度：它在扫描激光器时同时记录测试波长和输出功率，而不是进行步进式波长测量——每次将激光器移动一个步长。如果光谱范围较大（在鉴定涵盖所有电信波段的器件时很重要），也可以使用几个可调谐激光器进行测试，每个可调谐激光器覆盖被测总光谱的一部分，并将插损或回损结果合并到一个光谱中。此外，它是唯一能够在合理的时间内提供皮米级分辨率PDL光谱测量的方法。



为了可靠地测量目前的复杂器件，最有效的方法是扫频激光器方法。

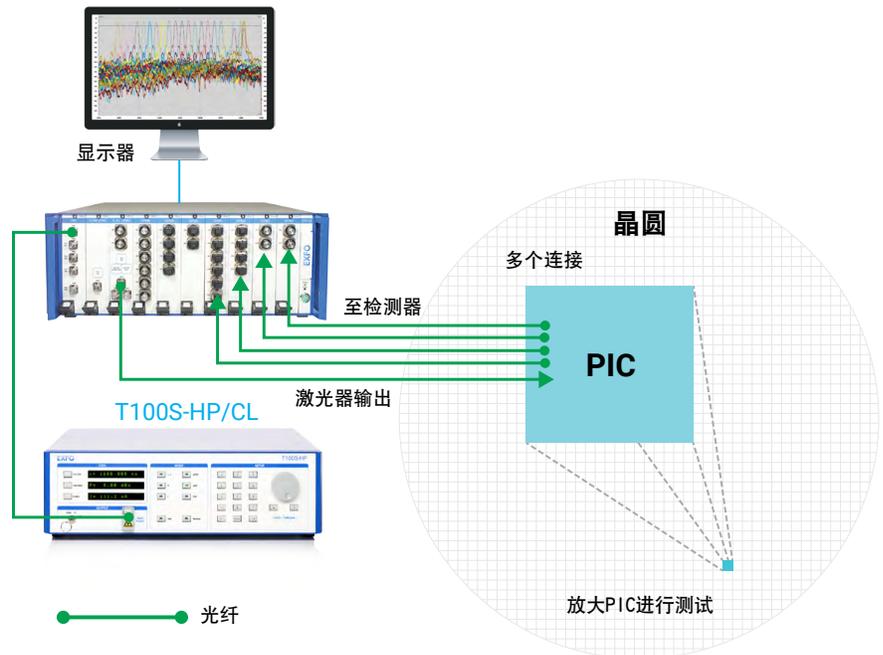


图6：直接在晶圆上进行PIC测试。器件测试仪可以鉴定多个光输出端口的特征。

下图说明了使用器件测试仪可以完成的操作，显示在一次扫描中能够同时测试25个通道。CTP10在几秒内以1皮米的分辨率完成整个动态范围的测试。

CTP10功能

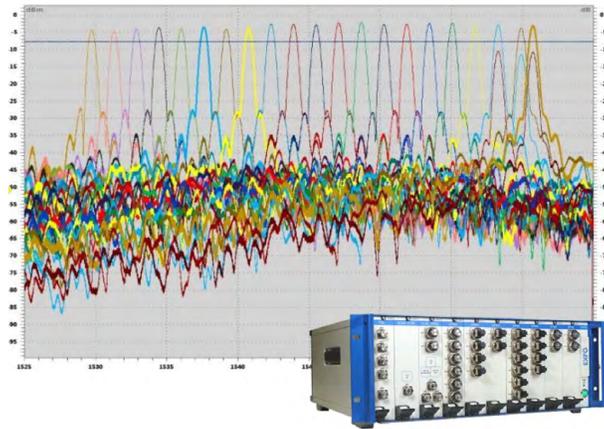


图7：使用CTP10测量AWG



端到端收发器验证不仅需要光参数测试，更需要功能测试。

功能测试

随着收发器变得越来越紧凑和高效，电信行业已经开始充分利用PIC技术。端到端收发器验证不仅需要光参数测试，更需要功能测试。

为了帮助收发器厂商确保整个产品生命周期的合规性，EXFO提供了一系列从晶圆级到封装的电气和光测试解决方案，包括EA-4000采样示波器和BA-4000误码率测试仪。

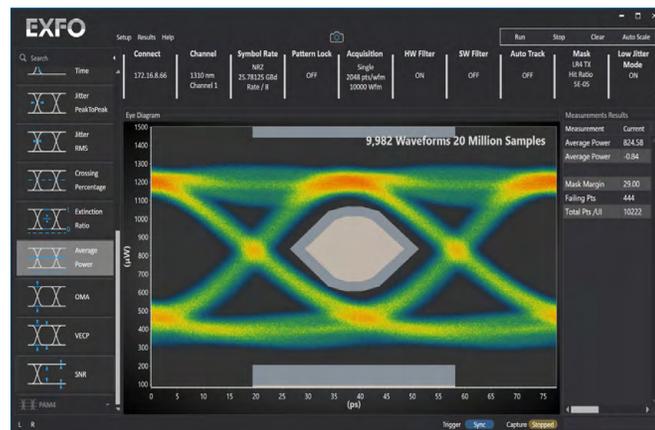


图8：EA-4000采样示波器眼图

了解详情

[OSA20](#)

[T100S-HP](#)

[CT440](#)

[CTP10](#)

[BA-4000](#)

[EA-4000](#)

PIC光谱测试的未来

光子集成电路具备无限的潜力，这意味着对这些功能强大的器件的需求十分巨大，且进一步发展这项技术有很大的推动力。由于PIC结合了一系列的光子和电子器件，因此测试它们非常具有挑战性。鉴于对PIC的需求不断增长且PIC快速发展，现在就拥有更可靠、更快的测试解决方案至关重要。

从这些发展过程中我们可以清楚地看出，“按测试设计”PIC芯片对于缩短测试时间，同时提高可靠性非常关键。设计、制造和测试之间的共生关系为我们在整个PIC开发过程中了解和解决任何问题提供了一个途径。同样的整体方法可以应用于PIC组装和最终封装，以进一步降低TAP对芯片最终成本的影响。

如欲更多地了解PIC以及EXFO如何帮助您满足独特的测试要求，请访问[EXFO的PIC解决方案页面](#)。



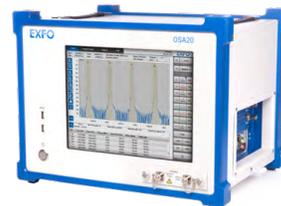
T100S-HP
扫频和步进式可调谐激光器



CT440
最多可配备4个检测器的器件测试仪



CTP10
用于高端口数DUT的器件测试平台



OSA20
光谱分析仪



BA-4000
误码分析仪——100G/400G电口
误码仪



EA-4000
眼图分析仪——光、电采样示波器

EXFO为100多个国家的2000多家客户提供服务。
如欲了解当地分支机构联系详情，敬请访问www.EXFO.com/contact。