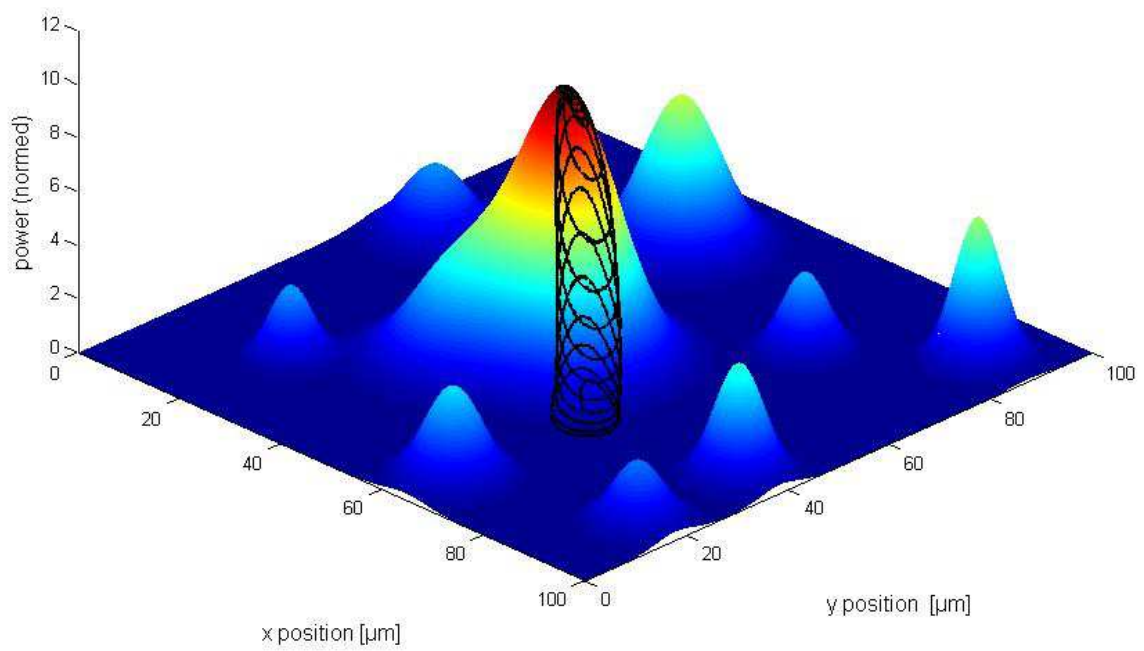


## 并行对准自动化的实际示例



PI 的快速、多通道光子对准(FMPA)技术是一套固件级命令，内置于其最高性能的数字纳米定位和六足位移台控制器中。这些命令允许光子与其他光学器件和组件之间的快速耦合优化，包括跨多个自由度、输入和输出、元件和通道的优化。重要的是，即使各个优化相互作用，这些优化通常也可以并行执行。从多通道硅光子器件到 LIDAR 传感器到智能手机相机组件的频谱范围可以实现显著的工艺节省。

## 1 串行对准与并行对准

例如，在硅光子学(SiP)器件中越来越多地使用的短波导中，输入和输出耦合可以相互引导。由于一方是优化的，另一方略有变化，需要重新优化。以前，这需要一个耗时的、连续的输入的来回调整序列，然后是输出的来回调整序列，重复直到最终实现全局一致的对准。类似地，当优化角度时，横向对准将受到影响并且通常需要再次在耗时的串行回路中重新优化。

但是使用 FMPA，可以同时并行优化这些相互作用的对准。这样就可以一次性实现全局一致对准。在许多情况下，也可以实现所有对准的跟踪和连续优化，并且可以补偿漂移和固化应力等特性。

结果是提高了生产能力，并且通常大幅降低了成本。随着设备变得越来越复杂和精确，并且随着它们的生产和测试要求变得越来越苛刻，这种并行性对于过程经济学越来越至关重要。

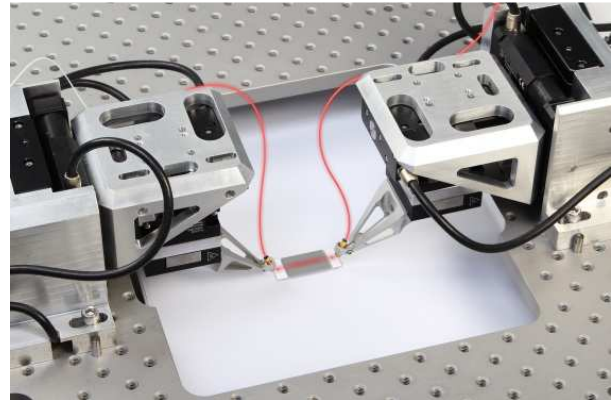


Fig. 1 以工业速度对准波导器件的输入和输出需要并行优化和纳米级精度。

### 1.1 查找循环

充分利用此功能可以最大限度地节省总体成本，但这可能需要转换思路，不再拘泥于使用经典对准硬件时的思路。通常，人们会查找顺序对准循环，通常可以将其替换为同步优化。本文回顾了一些示例应用程序并讨论了几个实现问题，以说明如何利用这一卓越的新功能来最大限度地提高测试和封装阶段的生产效率。

## 2 FMPA 运作背景

应将器件对准分解为几个离散对准过程。例如，使用透镜光纤探测具有一个输入和一个输出的波导通常涉及四个对准过程：

1. 横向优化程序，输入
2. 横向优化程序，输出
3. Z 优化程序，输入（束腰寻找）
4. Z 优化程序，输出（束腰寻找）。

如果器件有一个或多个附加输入或输出，请根据需要添加以下程序：

5. theta-Z 优化程序，输入
6. theta-Z 优化程序，输出。

如果器件需要对 theta-X 和 theta-Y 进行优化，请添加以下程序：

- 7. 万向节优化程序，输入
- 8. 万向节优化程序，输出。

以此类推。将整个对准任务划分为这些子流程是确定可以同时执行哪些流程的关键所在。

使用 FMPA，可以获取对准程序列表并将这些程序直接定义到控制器中。这只需要完成一次（并且可以随时更改或更新）。定义某个程序后，可以重复执行该程序。可以一次执行多个程序 - 这就是并行性！

定义一个流程意味着指示控制器哪些轴参与该流程、哪个模拟输入代表要优化的量（光功率、MTF...）以及各种流程选项。给每个流程起一个名字... 刚才创建的列表中的数字就非常适合。

通过调用“快速程序启动”命令 FRS 来执行程序。参考刚才构建的列表，FRS 1 将开始对输入进行横向优化。FRS 2 将开始对输出进行横向优化。而 FRS 1 2 将同时对输入和输出进行横向优化！

### 3 对准程序类型

对于器件的每一侧，独立的对准引擎硬件当然是必要的。可以使用任意数量的对准引擎；最常见的配置使用一个或两个对准引擎，但随着 SiP 技术的成熟，使用三个或更多对准引擎将会越来越普遍。

通常，每个对准引擎由多轴长行程装配件和较短行程、高速、高分辨率压电多轴纳米级定位平台构成。该方法的模块化是一个关键优势。一些应用不需要长行程机构；一些应用不需要纳米级定位平台的速度、分辨率或连续跟踪功能。在任何情况下，无论所涉及的运动系统类型如何，所有 FMPA 算法和过程实际上都是相同的。只是在功能方面有所不同。



Fig. 2 F-712.MA2 高精度光纤对准系统。

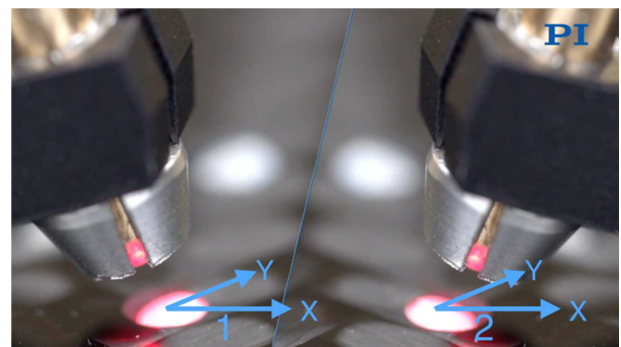


Fig. 3 将波导 I/O 耦合等任务划分为多个子任务（如所示的“1”和“2”）将说明并行执行的机会。在这里，即使这两个流程相互作用，也可以并行进行，特别是在输入和输出互相引导的短波导情况下。类似地，可以并行执行在几何上相关的流程（诸如在上述情况下的横向优化和 Z 优化，具有成角度的光束）。



Fig. 4 NanoCube®是一款基于压电的高动态 3 轴扫描仪，行程范围为 100 微米。除了纳米级分辨率和超高速外，这种基于柔性铰链的子系统还可以无磨损地执行连续跟踪。

#### 3.1 长行程选项

对于不需要角度优化或阵列对准的情况，一个线性平台叠

层就足够了。否则需要六足位移台 - 不仅在需要完全六自由度定位和优化的情况下，而且在更简单的情况下，因为六足位移台可以将单个角度优化的旋转中心点放置在腰束处的光轴上。这对于减少寄生几何误差至关重要，这是提高整体生产率的另一个关键因素。有时需要在一个或两个轴上进行非常长的行程以进行装载操作，并且在这些情况下，可以将六足位移台安装在长行程的电动平台上。（六足位移台控制器可以容纳两个额外的直流伺服电机轴。或者，可以集成本力传感器元件。）



Fig. 5 单面光纤对准系统。

## 4 对准流程

有两种类型的流程：用于在既定区域定位峰值的区域扫描，以及用于有效优化耦合（并且可以跟踪耦合以缓解漂移流程、干扰等）的梯度搜索。

### 4.1 梯度搜索

梯度搜索执行一个器件相对于另一个器件的小圆形抖动运动，即调制耦合。正在优化的优值参数（例如光功率或MTF）的调制量是耦合局部梯度的一个量度。在最佳情况下，调制降至零（图6）。

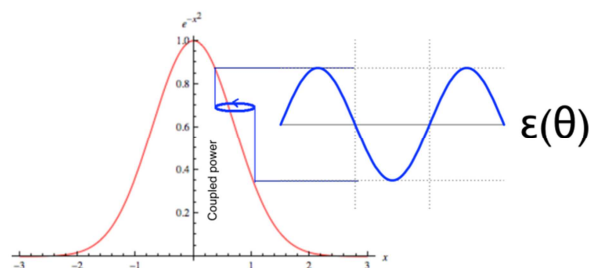


Fig. 6 通过圆形抖动确定梯度的图形描述，即调制观察到的耦合功率（或其他量）。相对于抖动的调制相位表示朝向最大值的方向，而其幅度在最佳情况下降至0。

$$|\epsilon(\theta)| = \nabla I = (I_{\text{min}} - I_{\text{max}}) / I_{\text{min}}$$

等式1：观察到的梯度用作对准误差的一个量度。

根据观察到的调制，可以通过非常简单的计算（如等式1）用数学方法推导出局部梯度。请注意，梯度 $\nabla I$ 在最佳情况下降至零。

FMPA 系统中的任何轴都可以执行任何这些类型的对准（当然，取决于轴的物理功能）。因此，可以使用电动平台轴执行区域扫描，这可以非常方便地找到第一条光线。梯度搜索在横向优化中最常用，但也可以在单个线性轴中执行（例如），这非常适合在透镜耦合中定位束腰，或者以方向节方式优化角度方向。有很多可能性！这些是高度通用的算法，适用于各种优化，包括体光学、腔体和针孔对准。

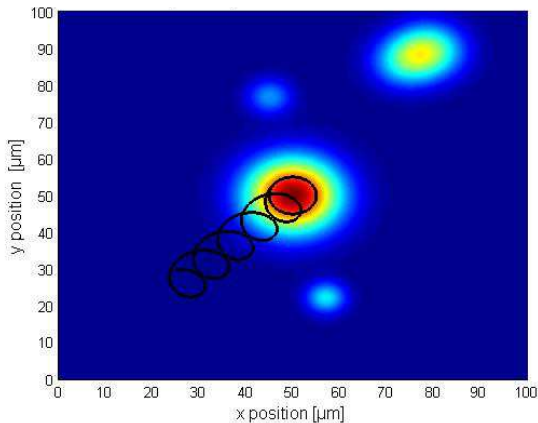


Fig. 7 光学功率分布

总体而言，FMPA 的一个独特功能是可以并行执行不同的梯度搜索。横向优化往往是最敏感的，也是最容易受到其他对准影响的。因此，横向程序倾向于降级为高速、高分辨率的压电级平台，如 PI 的 P-616 NanoCube。NanoCube 的高速和连续跟踪功能允许在 Z 优化和角度优化期间保持横向优化，而 Z 优化和角度优化通常需要耗时的循环顺序方法。

## 4.2 区域扫描

扫描某个区域以确定最高耦合峰值的大致位置对于各种任务都非常有用：

- 寻找第一条光线。
- 分析耦合的尺寸表征。这可能是一个重要的过程控制步骤。
- 通过梯度搜索来确定主要耦合模式以便后续优化。这种混合方法有助于防止锁定到局部最大值并且非常强大。

除了将区域扫描减少到单个命令以外，FMPA 控制器还具有内置的自动曲线拟合功能，以及可以即时捕获配置文件以便以后检索、分析或存入数据库的数据记录器。对于典型的 NanoCube 应用和负载，FMPA 区域扫描非常快 - 300 毫秒左右。曲线拟合功能可以将高斯拟合到相当稀疏的扫描（意味着特别快速的扫描），同时能够有效定位最佳耦合点，而无需花费大量时间进行非常精细的扫描。另一个功能是找到平顶（“顶帽”）耦合的质心，例如使用单模光纤探测沉积的光电探测器时所看见的。这可以让扫描在光纤处于平坦或倾斜的顶帽耦合的几何中心处终止。

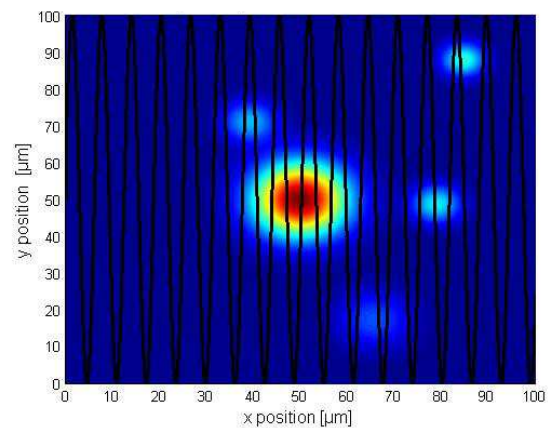


Fig. 8 光学功率分布

独特之处在于，FMPA 的区域扫描选项包括单频正弦和螺旋扫描。这些扫描比传统的光栅或蛇形扫描快得多，因为它们是真正连续的并且避免了传统扫描中使用的停止和启动运动的稳定要求，而且可以选择频率以避免激发结构共

振。另外，还可以选择恒速螺旋扫描，能够在螺旋上以恒定密度采集数据。

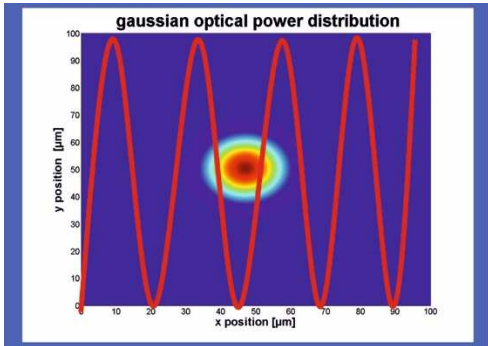


Fig. 9 正弦区域扫描

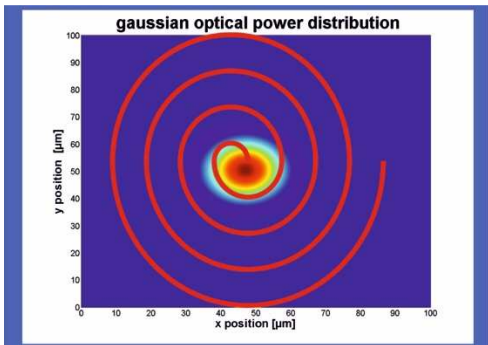


Fig. 10 螺旋区域扫描

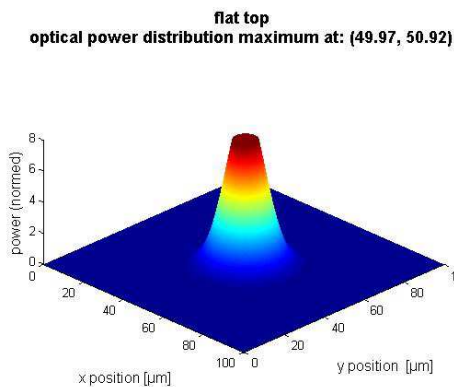


Fig. 11 独特之处在于，PI FMPA 控制器可以执行快速区域扫描，自动计算直立和倾斜顶帽耦合的质心位置并稳健地对准至该位置。

## 5 示例 1：角度不敏感器件的晶圆探测

即使是最简单情况下，例如仅具有一个输入和一个输出的短波导器件，上述偏转相互作用也可能带来令人沮丧的过程瓶颈。添加角度敏感耦合器和阵列器件所需的额外对准，这种情况会非常迅速地变得复杂和耗时。并行性可以缓解所有这些问题并简化任务。

对于这个示例，我们首先考虑具有单输入和单输出的平面波导器件，两者都可通过衍射耦合器进行探测。通常在大晶圆上制造数千个这样的器件，因此吞吐量非常重要。衍射耦合器通常将波导的输入和输出投射出晶圆，与垂直方向通常成 10-25 度角。通常使用透镜探针光纤，因此沿光轴存在相当明显的最佳间隔。优质的晶圆探针提供的晶圆放置精度远小于 NanoCube 的 100 微米×100 微米×100 微米视场，因此在探测应用中通常不需要在每个器件上寻找第一条光线。

请注意，光学 Z 轴与机械 Z 轴成一定角度，以便正常安装平台叠层：

$$Z_{\text{光学}} \parallel Z_{\text{机械}}$$

通常不希望倾斜运动装配以容纳成角度的光束，因为机械 XY 平面应该与晶圆保持平行以避免碰撞。因此，机械 Z 方向的优化运动必须伴随 X 方向和 Y 方向的补偿运动以保持全部对准。

这是体现并行性的理想情况！从上面编译的对准程序的通用列表中，前四个对准程序适用：

1. 横向优化程序，输入
2. 横向优化程序，输出
3. Z 优化程序，输入（束腰寻找）

#### 4. Z 优化程序，输出（束腰寻找）。

使用传统的非并行对准技术时，传统方法是：

1. 为了容纳 Z\_光学// Z\_机械，执行以下循环：
  - a. 为了容纳偏转效果，执行以下循环：
    - i. 对准一侧以最大限度提高吞吐量
    - ii. 对准另一侧以最大限度提高吞吐量
  - b. 在 Z 方向移动并评估移动方向是否改善了耦合
2. 重复上述循环直到得以优化。

所需的总时间通常是几十秒！

使用 FMPA，该过程更简单，并且可以快两个或更多数量级。从根本上说，一个用于从列表中定义梯度搜索 1-4（同样，这只需要完成一次，但可以自由修改或重新定义任何过程），然后针对每个器件：

- 发出“快速程序启动”命令：FRS 1 2 3 4

执行过程通常在几百毫秒内完成。

单个 E-712 控制器最多可支持四个 P-616 NanoCube，甚至可以将它们部署在不同的工作站上 - 它们并不都需要处理同一个器件。



Fig. 12 E-712 数字式压电控制器。

## 5.1 跟踪和完成标准

梯度搜索的一个标志性优势是它不仅优化，还可以跟踪其最佳状态。如果您在一个器件上运行多个梯度搜索，则所有搜索都可以同时跟踪。或者，针对您的应用，您可能希望在对准后停止并保持最佳位置。

此标准-无论是对准和停止还是保持跟踪-是您可以在流程定义中调整的一个参数示例，该参数可以微调流程的行为以满足您的应用目标；有许多此类选项。由于该流程取决于耦合的瞬时梯度，因此根据梯度定义其停止点是很自然的事情。我们将其称为最低级别，即 ML。将该过程的 ML 参数设置为 0 意味着它永远不会被满足并且应该跟踪到命令停止。这对于容纳漂移流程非常有用，例如在高温测试中。将 ML 设置为较小的非零值会导致梯度搜索在观察到的最佳位置终止。请注意，由于机械机构中可能存在机械磨损，因此仅应使用柔性铰链导向机构执行 ML=0 跟踪。

## 6 示例 2：角度敏感器件或阵列器件的晶圆探测

在示例 1 的基础上，可以通过使用六足位移台而非 XYZ 叠层平台来容纳角度敏感器件和阵列器件，以实现长行程运动。对于许多应用，六足位移台将提供足够的分辨率和速度，否则（或当需要连续跟踪时）可以连接 NanoCube。同样，FMPA 架构的模块化带来了相当大的灵活性。

对准六足位移台比传统的线性平台和角度定位器（例如测角器）叠层具有许多优点。首先，六足位移台是完整的六自由度器件，它们的旋转中心点可以自由设置在空间中的任何地方。这意味着您可以围绕光纤尖端、束腰、波导轴或空间中任何其他光学所需点进行旋转。

PI 六足位移台为用户提供了合理的笛卡尔坐标系（X

、Y、Z、 $\theta_X$ 、 $\theta_Y$ 、 $\theta_Z$  )，并允许您根据需要轻松地转换和旋转该坐标系。除此之外，这意味着您可以在角架上安装六足位移台，最大限度地减少整体占地面积，同时仍然具有与晶圆或其他重要基准面保持平行的 XY 扫描平面。

同样，FMPA 区域和梯度搜索功能（用于线性 $\theta$ 和角度轴）、数据记录器和轮廓拟合功能内置于控制器中，但成本通常低于具有同等分辨率和运动性能的平台叠层。

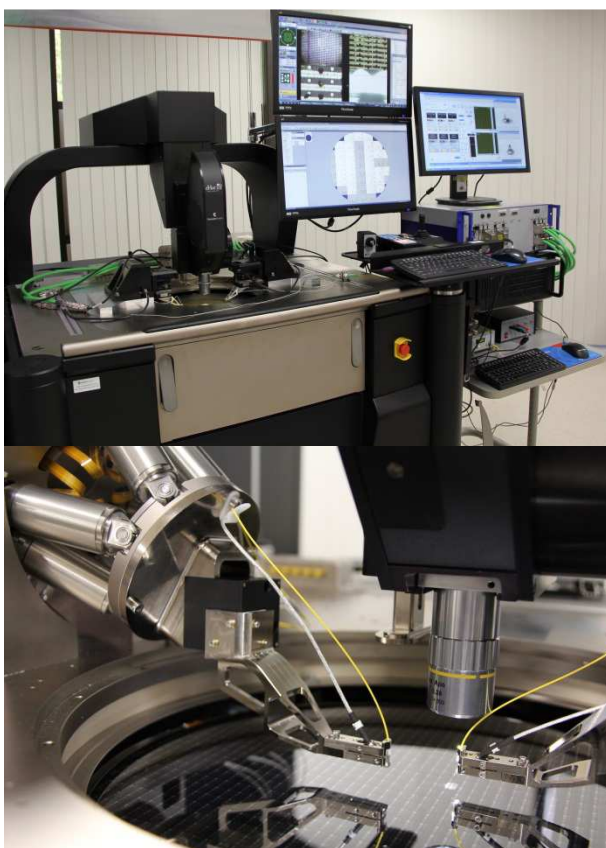


Fig. 13 Cascade Microtech 领先的 CM300 光子学工程晶圆探针仪集成了 PI 的快速多通道光子对准系统，用于晶圆上硅光子器件的高吞吐量、晶圆安全的纳米精密光学探测。顶部：XYZ 探针仪配置。底部：6 自由度六足位移台探针仪配置。由 Cascade Microtech div. of Formfactor, Inc. 提供。

考虑具有阵列输入、输出或两者的晶圆上器件的情况。在具有阵列或其他角度敏感元件的侧面上，安装基于六足位移台的对准引擎。

使用传统的非并行对准技术时，传统的优化方法是使用更复杂的循环序列：

- 对于第一个通道：
  - 为了容纳 Z 光学 // Z 机械，执行以下循环：
    - 为了容纳偏转效果，执行以下循环：
      - 对准一侧以最大限度提高吞吐量
      - 对准另一侧以最大限度提高吞吐量
    - 在 Z 方向移动并评估移动方向是否改善了耦合
    - 重复上述循环直到得以优化。
- $\theta_z$  的增量。这会使横向对准降级，这是不可避免的情况。
- 重复(A)。评估该增量是否改善了第 N 个通道中的耦合。
- 重复(A)-(C)，直到第一个通道和第 N 个通道都得到优化。对于大多数应用，这将意味着整个阵列得到优化。

所需的总时间通常为几分钟。

使用 FMPA，该过程再次变得简单很多，速度也快很多。如示例 1 中，从列表中定义梯度搜索 1-4，然后定义单轴正弦（“区域”）扫描或  $\theta_z$  中的梯度搜索。我们将这个过程称为 5。（梯度搜索需要一些初始耦合，但区域扫描不需要，因此是选择梯度搜索还是区域扫描，取决于具体应用、夹具、器件一致性等。另外，如果削减光功率既谨慎又容易，则可以设置软限制来防止梯度搜索丢失。）

然后针对每个器件：

- 针对第一个通道将 NanoCube 设置为连续跟踪（ $ML=0$ ，用于流程(1)-(4)）。发出快速程序启动命令：  
`FRS 1 2 3 4`
- 使用 NanoCube 跟踪波导两侧的横向耦合和 Z 耦合，针对  $\theta_z$  流程 5 发出快速程序启动命令。

执行过程通常在一秒内完成。

使用 FMPA 与万向节( $\theta_x/\theta_y$ )对准同样简单快速。



## 7 总结

此概述是说明性描述而非详尽描述。可以为封装、芯片测试和其他应用快速设计类似序列。还可以通过其他方式执行我们演示的每个示例，并且应用注意事项可能会推荐不同的方法或修改。在实际应用中应考虑其他选项和参数。PI 应用工程师可以为您提供指导，我们提供有效的现场培训和咨询服务，以加快您的实现过程。但同时，我们希望此概述可以让您有信心在具体的应用中实现并行性，从而提高生产力。

## 8 作者



Scott Jordan 是全球最活跃的 PI 集团光子学细分市场负责人。他住在硅谷并且已经任职于 PI 近 20 年；作为纳米自动化技术总监，他有着极强的工作能力，为公司的持续技术发展做出了决定性的贡献。

作为一名拥有金融/新风险投资 MBA 学位的物理学家，Scott 的热情和敬业闻名于业界。

## 9 关于 PI

PI(Physik Instrumente)是全球精密定位技术市场领先者，多年来以其优质产品而享誉世界。在使用压电或电机驱动器的标准及 OEM 产品的开发和制造方面，PI 拥有 40 年的历史。由于所有核心技术均为内部研发，公司可以控制从设计至发货过程中的每一步：精密机械部件和电控以及位置传感器。

ACS 运动控制是多轴高精度驱动器系统用模块化运动控制器的全球领先开发商和制造商，通过收购其大多数股份，PI 在为要求最高精度和动态的工业应用提供整套系统的方面又向前迈进了重要一步。PI 集团遍布全球，除了在德国设有四个基地之外，在其他国家和地区还设立了十五个销售和服务分部。