

科学激光器

# 一场科学激光器的工业革命

借助于工业激光器领域的成果，相干公司今天的超快激光器终于可以提供用户前所未有的便捷性和可靠性，从而大大改善“数据成本”和提高“数据产能”。

Allan Ashmead, Steve Butcher, Marco Arrigoni; 相干公司

回顾过去几十年激光科技的发展，科学超快激光器和工业激光器领域有着截然不同的设计理念。科学超快激光器公司几乎只注重达到最先进的指标（如更高的峰值功率或更短的脉冲），这使得许多具有创新，然而未经过充分验证的设计被广泛的应用于产品中。与此相反，由于工业激光器用户十分重视节约成本，因此激光器的可操作性及可靠性变得至关重要；产能、零件成本、正常/停机时间比，以及购置成本都成为关键指标。其实，对于科学激光器用户来说，关注性能参数的同时，数据成本也非常重要。因此，工业激光器领域的一些关键概念现今也正渗入科学激光器的设计生产中，以期在提供用户最先进性能指标的同时，也保证工业级的可靠性。

## 鱼与熊掌不可兼得——要简单可靠还是要性能指标？

在超快激光器领域，所有的创新应用都沿着一个方向流动：即从科学产品转化为工业产品。不再像 15 - 20 年前那样，现在的科学激光器使用者中，很少有人为试验需要而费力设计并建造自己的激光器。因此，市面上销售的科学激光器必须在日益增长的指标要求和设计可靠性上做出艰难的



图 1. “超快激光器工业革命”范例：相干公司全新 Fidelity 超快光纤激光器振荡器，完全密封式设计、免维护操作。

选择。长期以来，科研人员也不得不勉强接受这一事实。为应对这一矛盾，科学激光业只有通过更好的客户服务来解决问题，比如提供长期维护合同、快速现场维修、在当地或客户地备存元器件，甚至整机更换服务。然而，仅凭激光器厂商提供的限定维修费用的维护和他们能做到的最快速维修，从成本和时间内，还远远不能满足科研人员的需求。近年来，随着日益增加的科研成本及项目复杂度，研究人员正在摒弃允许快速维修的激光设计，转而倾向于拥有一款永无故障的激光器！

面对这一挑战，科学激光器制造商汲取了工业激光器领域的知识和经验，将之应用于开发新一代的科学激光器的过程中。源于这种知识的双向流动，一场“科学激光器的工业革命”已经来临。新一代科学激光器将兼备

最先进的性能指标和极佳的工业可靠性。相干公司的 Vitara 超快振荡器和 Astrella 超快放大器便是当前的最佳范例。

就振荡器而言，飞秒试验中要求更好的时间分辨率，拉动了对更短脉冲的需求，因此最主要的权衡莫过于在最短脉冲宽度和简单操作性之间的取舍。正如一条不成文的说法所述：“脉冲越短，激光器需要的手动操作越多。”如今，这一说法正在被颠覆，如相干公司最近推出的免维护 Vitara 振荡器采用了全密封设计，输出脉冲小于 8 fs。而在放大器方面，过去通常要在峰值功率和可操作性上有所取舍。实现更短脉冲或更高的脉冲能量，往往需要操作人员的频繁调校激光器。在最新的放大器产品中，突出的例子莫过于相干公司的 Astrella，该放大器综合了密封设计的振荡器和完全封闭式的脉冲延伸器/压缩器，输出脉冲宽度小于 35 fs，脉冲能量大于 6 mJ。（注：脉冲延伸器/压缩器是超快放大器系统中最敏感的部份，气流、轻微的温度变化和光路校准均可严重影响放大器的性能。）

对于研究人员而言，这一免维护，高可靠性的革新，意味着更高的数据产能和极低的停机时间。这将大

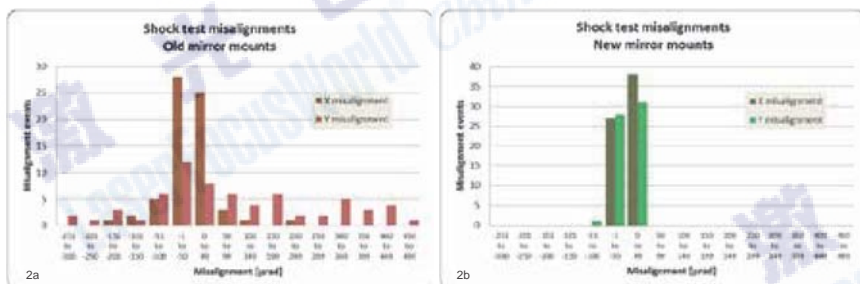


图 2. 相干公司飞秒激光器所使用的光学镜架HALT测试对比结果：原设计（图2a）与最终设计（图2b）。最终设计更抗外界振动和温度变化。

大减少花在“调整”激光器上的时间，从而显著节约了隐藏的操作成本。其结果是更高的数据产能和更低的数据成本。在共享用户的实验室中，工业级可靠性尤为重要。这种可靠性能够确保不论何种实验，或实验者激光技术水平如何，在每一个分配的时间窗口，研究人员均能获取最大限度的数据量。

### 量产统计数据——设计卓越激光器的关键

改善可靠性和实现免维护操作的关键，在于要彻底地了解所有可能使激光器偏离最佳性能状态的因素、突发性能故障的根由，以及部件过快老化的原因等。所有这些都需要在研发和原型机阶段，对组件和整体激光器进行大量分析和检测，同时还需要完整的客户应用性能分析，因为任何模拟都无法取代实际应用的结果。

高端科学激光器制造商所面临的一大挑战在于低产量。工业设备制造商可能使用成百上千台的某个特定型号的工业激光器，但是一般的研究机构/实验室若干年才会订购一次科学激光系统，且每次仅订购一种。由于应用中的型号、数量都较少，因而对于科学激光器来说，很难得到具有统计意义的故障和性能数据。

问题本身看似无解，但答案其实

就在于分析来自于千万台已安装运行的工业激光器的历史数据。这虽不能解决某个特定科学激光器的特定问题，但是，其所提供的信息，已成为实现科学激光器客户要求的基石。例如，我们已有几千台皮秒、纳秒、连续波紫外激光器被用于电子工业领域，这为我们的工程师提供了大量数据，让他们知道如何把光学镀膜做得更好，如何消除腔内污染，从而杜绝可能的元器件损坏。

更幸运的是，已有几项应用使得超快激光实现了部分量产，从而允许我们对超快激光器特定的、在非恒定环境条件下长期使用中、可能影响激光性能的光学机械失调、材料性能退化等问题，进行较全面的分析。这些量产应用包括飞秒激光用于多光子激光谱显微技术和半导体芯片检测技术。

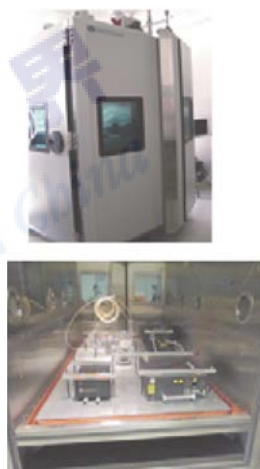
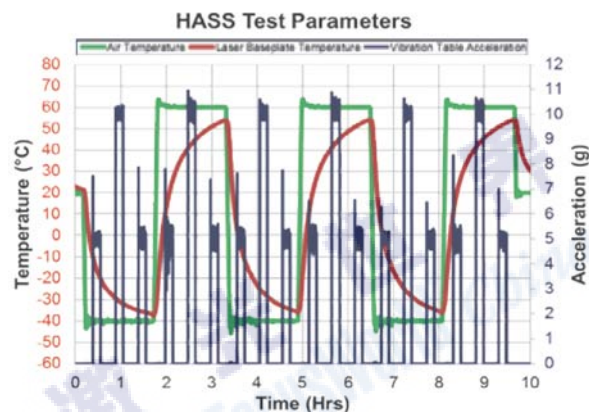


图 3. HASS 测试实例（Coherent Vitara 振荡器）。



### 通过HALT（高加速寿命测试）完全明了设计余量

HALT 的基本思想是测试产品故障点，以确定设计指标和使用参数之间的差异，以确保尽量高的可行性余量。HALT 的其他主要目标在于确定并了解“故障之物理学”（PoF），为设计改善指明方向，并且验证这些改善能够达到的效果。这一测试的另一重点在于通过加速数年或数月才会发生的实际故障，使之在若干小时内出现，同时避免因严重超限和不切实际的因素导致的“人为”故障。HALT 的结果可以帮助制定出一套有效的产品筛选方法（即 HASS - 高加速应力筛选），从而消除产品制造缺陷，同时不影响运往客户的设备的使用寿命。

作为一个很好的例子，我们成功利用 HALT 测试优化设计了我们超快振荡器使用的一种光学镜架。结果如图 2 所示。我们可以看到光学镜架失调程度的变化。对于原始设计（图 2a）而言，经过 HALT 之后多数镜架仅在 x 轴和 y 轴中出现了轻微移动，但是明显可以看到，还是有相当数量的镜架发生了较大的失调。这些试验结果引发了我们对于镜架的重新设计。在每一个设计周期后都重复进行同样的测试，以量化设计的稳定性（如



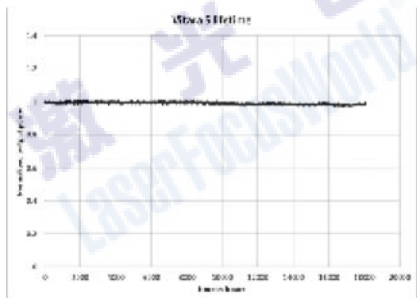


图 4. 寿命测试数据: 相干公司Vitaras-S, 18,000 小时免维护操作。

图 2b 所示): 现在, 在同样的测试条件下, 所有新的镜架全部仅出现轻微的失调。

相比于测试零部件, 作为一种研发手段 HALT 测试整装激光器, 在指导设计过程中可能有着更重要更内在的意义。对于一个全新激光器设计, 比如超快振荡器, HALT 涉及将振荡器放到设定的温度循环周期和随机振动应力环境中, 首先两种测试分别进行, 然后混合同步测试。一旦发生故障, 立即进行故障物理分析, 查明问题的根由, 然后反馈设计团队。故障通常涉及设计理解, 方案选择, 材料 / 组件选择或生产过程的设计问题。

### 高加速应力筛选 (HASS) —— 在生产过程中测试制造每台激光器

设计一经试生产而锁定, 标准生产过程随即展开, 为此我们设计了一个高加速应力筛选过程, 并使之成为常规制造流程的一部分 (见图 3)。HASS 帮助测量和控制故障原因, 以减少可靠性方面的问题。筛选过程的设计旨在找到激光器中可能因人因素或供应链变化造成的“薄弱”器件, 从而完成闭环式质量控制流程, 并在故障发生后快速反馈给供应链。例如, 在 Vitaras 高加速应力筛选过程

中, 超快振荡器主体承受数小时的强热力学循环和振动应力测试。在每一台 Vitaras 完成装配、调试并满足所有性能参数之后, 其超快振荡器将经受一套设计的温度和振动循环; 然后对每一个光学镜架进行校准的冲击测试 (10 g 以上冲击力), 继而测量振荡器的输出功率。完成以上步骤之后, 超快振荡器将再次经历变温循环 (这次在  $-10 \sim +60^{\circ}\text{C}$  之间), 最后的超快振荡器必须在不进行任何再调整的情况下, 完全满足所有设计指标。

### 全新的可靠性水平

在相干公司内部和客户现场对新一代超快激光器寿命的测试中, 这场“工业革命”的成果得到了充分的见证。仅举一例, 图 4 是一台 Vitaras-S 振荡器常规 (非加速测试) 寿命测试的结果, 该振荡器已运行了超过 18,000 小时, 运行期间从未打开激光器封装对内部部件进行清洁或调整。值得注意的是, 整个测试中, 该激光器在恒定泵浦功率模式下运作 (即未使用光反馈功率控制)。这一运作模式能够充分暴露激光器的光学机械稳定性问题。与此相反, 若在光反馈功率控制模式下, 泵浦功率会随时间推移而增加, 以弥补腔内污染或光路失调造成的输出功率下降。这往往会掩盖激光器在光学机械稳定性上的缺陷。

诚然, 对从事超快激光研究的人员而言, 仅仅有稳定的输出功率是远远不够的。大多数实验中, 他们还需要稳定的光束指向和稳定的光谱带宽。对于后者如图 5 所示, Vitaras UBB (超宽谱) 展现了它在 9,000 小

时的运作过程中卓越的光谱稳定性: 中心波长 800 nm, 谱宽  $\sim 160$  nm (FWHM)。图 5 充分表明 Vitaras UBB 在 9,000 小时的运作过程中, 无论带宽或是谱形均无变化。仍需指出, 为完全揭示任何可能由于光反馈功率控制模式而被掩盖的光谱变化, 此次长时间寿命测试同样在恒定泵浦功率模式下进行, 期间也未对激光器进行任何手动调校。

### 结语

激光工业发展历史中, 过去基本完全遵循着一个模式, 即最前沿的科学实验和应用产生新的激光技术, 然后这些新的知识单向流动, 被用于制

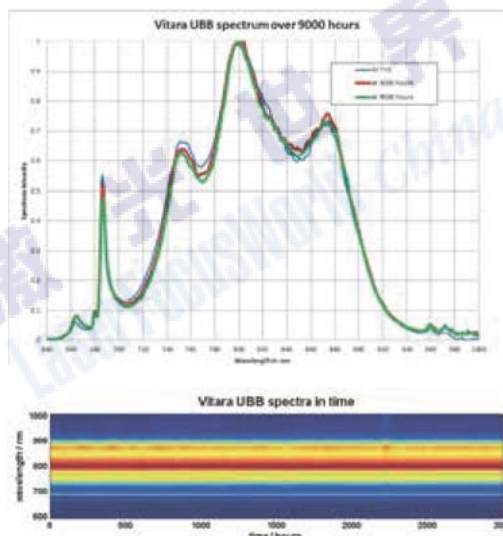


图 5. Vitaras-UBB 9,000 小时连续运行谱特征: 输出光谱基本无任何改变。激光器在恒定泵浦功率模式工作, 期间完全未经任何手动调校。底部的光谱取自测试的前 3000 小时。

造适合于工业应用的激光器。今天, 得益于 HALT/HASS 的测试结果, 以及来自于苛刻条件下全天候运行的大量工业激光器的数据, 新一代科学激光器必集尖端的性能指标、卓越的工业可靠性和超强的产能于一身。巨变来临, 一场科学激光器的工业革命正在进行。□