

飞秒光纤激光器

飞秒光纤激光器实现 100fs 脉宽

脉冲宽度不足一直被认为是高功率飞秒光纤激光器与固体激光器相竞争的一大障碍。然而幸运的是，脉冲和光谱整形技术帮助飞秒激光器突破了这一障碍。

刘健, PolarOny 创始人; 杨丽梅, PolarOny 产品总监

在生物医学应用中，实现 100fs 的脉冲宽度一直被认为是高功率飞秒光纤激光器与固体激光器（如频率 80MHz、功率 1W 的钛蓝宝石激光器）相竞争的一大障碍，因为很多超快激光应用，如非线性成像、组织消融以及相干超连续光谱产生等，都要求脉宽达到 100fs 级的水平。在过去的几年中，高功率飞秒光纤激光器已经在工业和科研领域得到了广泛重视。尽管已经有报道称，很多飞秒光纤激光器的平均功率已经高达 200W，但实现 100fs 的脉宽依然是超快光纤激光器领域的一大技术壁垒。

在 2010 年旧金山召开的 Photonics West 2010 展会上，PolarOnyx 公司推出的飞秒光纤激光器采用创新的技术，打破了高功率飞秒光纤激光器实现 100fs 脉宽的技术瓶颈。PolarOnyx 公司利用其专有的脉冲整形和光谱整形技术，将高功率飞秒光纤激光器的脉宽压缩到了 100fs。显然，如此显著的脉宽提升（从 200fs 压缩到 100fs）为飞秒光纤激光器开辟了更加广泛的应用领域，并将有望在诸多应用中对固体激光器形成巨大冲击。当然，光纤激光器结构紧凑、免维护以及具有较高的成本效益等优势（见表 1），已经众所周知。目前，飞秒光纤激光器已经

成了许多工业和临床应用的最好选择。

脉宽压缩

对飞秒光纤激光器来讲，缩短脉宽所面临的挑战是对色散、非线性和增益窄化的管理。相较于固体激光器，由于光纤和增益介质相对较长，因此光纤激光器中存在着严

重的非线性和增益窄化效应。这些都将影响脉冲形状和光谱带宽，并且对于 1W 运作来讲，很难将脉宽压缩到 200fs。此外，光纤和飞秒光纤激光器中使用的光栅压缩器之间的高阶色散（HOD）的不匹配，致使取消或补偿非线性和增益窄化效应更加困难。

表1: 飞秒光纤激光器与飞秒固体激光器的比较

产品	功率	重复频率	最大能量	脉宽	波长	价格	寿命	服务成本 (3年)	插入效率
fs 固体激光器	1 W	80 MHz	15 nJ	100 fs	700-1000 nm	100 - 150	2-3 years	60	1
fs 光纤激光器	1 W	30-100 MHz	30 nJ	100 fs	1030-1080 nm	30 - 50	5-10 years	无	5

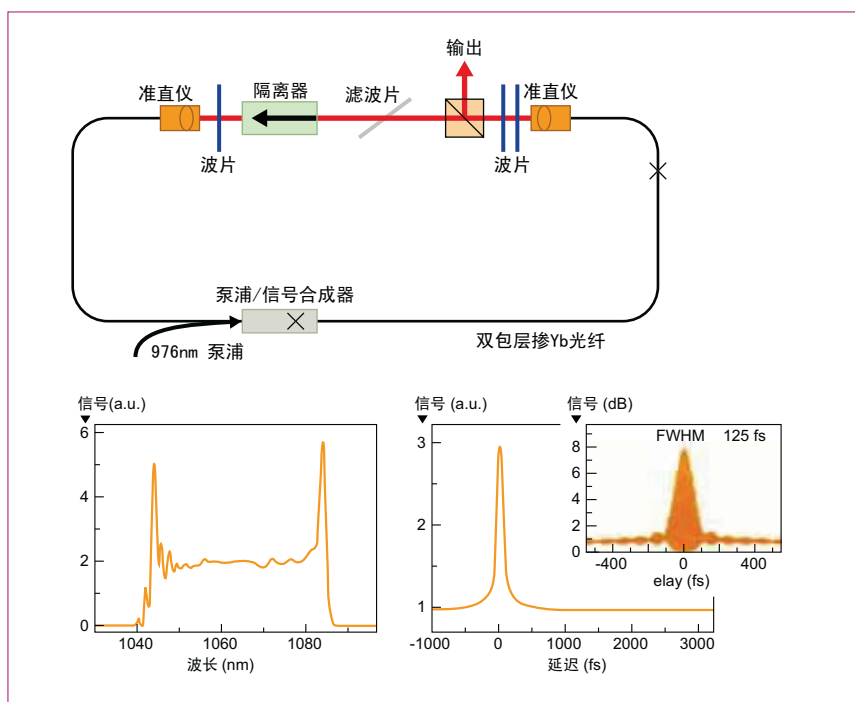
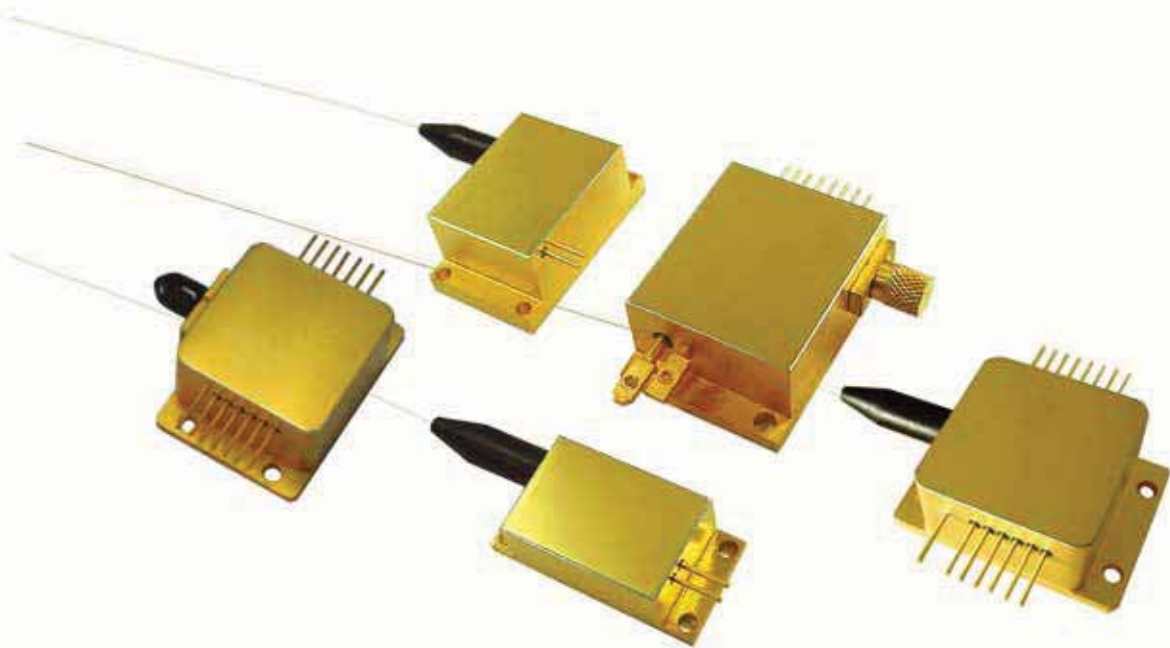


图1: 具有振荡器配置的高功率飞秒光纤激光器，能将脉宽压缩到100fs的水平（上图），并且具有优异的光束质量（下图）。



中国领先的半导体激光器制造商

产品覆盖405nm~1550nm波长，1mW~50W出光功率，多样的封装形式，灵活的应用解决方案和全面、专业的技术服务，满足用户个性化需求。



2010年6月09-11日 OPTO Taiwan国际光电展（台北世界贸易中心）

欢迎光临凯普林光电展位：A019

北京凯普林光电科技有限公司

北京市丰台科技园区航丰路甲4号6层
电话:(010)8368 1053 传真:(010)8368 1077
邮箱: sales@bwt-bj.com



www.bwt-bj.com

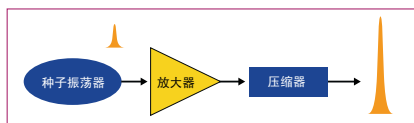


图2: 具有主振荡器功率放大器配置的高功率飞秒光纤激光器的简化图(上图), 下图是可商用的产品。

为了解决这些问题, 康奈尔大学的研究人员研究了一个高功率锁模光纤激光器谐振腔, 该谐振腔沿着包层泵浦采用了耗散孤子脉冲整形, 以实现更高的平均功率。^[1] 通过适当地选择光滤波器带宽, 调节偏振, 可以实现稳定的锁模。该光纤激光器产生 31nJ 的啁啾脉冲, 重复频率为 70MHz, 平均功率为 2.2W。在对外部激光器进行脉冲压缩 (dechirping) 后, 可以获得 15nJ、80fs 的脉宽, 峰值功率高达 200kW (见图 1)。

这种方法是飞秒光纤激光器研究中的一项突破, 其克服了脉宽瓶颈问题。通过适当地控制能量传播 (energy propagation) 和滤波效应 (filtering effect), 能够大大降低高阶色散和增益窄化效应。然而, 由于操作的复杂性和需要自由空间元件, 要开发出一款能实用的产品尚且需要巨大努力。

目前, 一种主振功率放大器 (MOPA) 设计已经被证明是实现飞秒光纤激光器的可靠方法, 目前这种方法已经在 PolarOnyx 公司的产品中采用。PolarOnyx 采用 MOPA 式设计的飞秒光纤激光器可以实现

30 ~ 100MHz 的重复频率、100fs 的脉宽和大于 1W 的压缩输出功率 (见图 2)。通过使用偏振、脉冲和光谱整形技术来设计恰当的光纤激光振荡器和放大器, 脉冲的产生和放大可以对色散、非线性失真和增益窄化有一个良好的平衡。^[2]

一项关键的脉冲整形技术是控制光纤的三阶色散 (TOD)。通常, 光纤中的色散是通过材料色散和波导色散这两方面来控制的。在 1020 ~ 1090nm 的光谱区域中, 材料色散显示了正的色散斜率。传统的光纤, 如康宁公司的 SMF-28, TOD 的值始终是一个约为 0.3ps/nm²-km 的正值, 这与所使用的光栅压缩器的 TOD 不匹配。然而, 通过操控光纤波导结构, 可以引入波导色散来调整材料色散, 这样的整个光纤系统的 TOD 和色散斜率就能实现匹配了, 特别是与光栅压缩器的匹配。

另一个用于脉宽压缩的关键的光谱整形技术是通过充分利用自相位调制 (SPM) 来获得足够的脉冲光谱宽度。SPM 在放大之后进行, 这样展宽的光谱就不会受到放大器增益窄化的限制。在放大阶段使用的光纤长度应该适当, 以产生所需要的光谱带宽。当脉冲的峰值功率达到一定水平时, SPM 效应可引起光谱展宽。根据不同的脉冲能量水平和脉冲宽度 (即定义了峰值功率), 光谱展宽的效果可以通过选择合适的光纤长度和光纤类型来优化。而且, 适当的控制 SPM,

可以平衡光纤和光栅压缩器之间的 TOD 不匹配。

这些技术解决了功率范围和脉宽展宽之间的折中问题, 放大的光谱带宽可以支持无明显剩余 TOD 和增益窄化效应的 100fs 的脉宽。假设变换有限脉冲质量, 100fs 的脉冲是由一个 15nm 的光谱带宽支持的。

PolarOnyx 公司 1W、100fs 的光纤激光器的脉冲性能指标为: 重复频率 33MHz, 压缩脉冲能量 30nJ, 平均功率 1.4W。当工作波长位于 1035nm 附近时, 实际测得的脉冲宽度为 90fs (高斯形状假设) (见图 3)。它有一个紧凑型的集成压缩器, 以确保光纤激光器能方便、可靠地运行。对于 200fs 的脉宽, 已经获得了高达 5W 的压缩输出功率, 进一步优化可以实现 100fs 的脉宽。而且, 通过增加光参量振荡器 (OP) 作为补充, 其波长可以覆盖从可见光到中红外光, 从而使飞秒光纤激光器的能力得以进一步拓展。

应用

飞秒光纤激光器在价格、可靠性和维护方面都具有显著优势, 其正在临床应用中获得越来越广泛的应用。^[3]

最近, 人们将正在将超快激光器的飞秒脉冲耦合到双包层光子晶体光纤 (PCF) 或空心光子带隙光纤 (PBF) 中, 为活体成像和临床应用努力开发紧凑的多光子系统。光纤连接的微型扫描探针, 已经能够

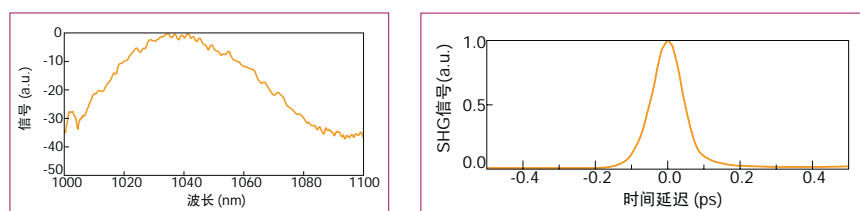


图3: 1W飞秒光纤激光器的光学光谱(左)和脉冲宽度(右)。

半导体激光器

直接半导体激光器取得突破性进展

通快公司

迄今为止，半导体激光器已经在几千瓦级应用中广泛使用，在这些应用中使用的是主动冷却二极管巴条，并通过叠阵的方式组合起来。每个二极管叠阵只能实现略高于 1kW 的激光输出。如果要获得几千瓦的输出，就必须对几个叠阵的发射光束进行合束。只有通过合适的方法，如波长或空间组合，才能获得光束质量适合工业应用的几千瓦级激光器。叠阵耦合后的光束质量取决于单个叠阵的光束质量。如果将这种系统的光束质量提高到所能达到的极限值，那么整个系统的效率就会显著降低。

目前，光束质量约为 $100\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的传统光纤传输的半导体激光器的效率约为 40%，这种半导体激光器只能用于激光焊接或其他表面加工。如果将这种传统半导体激光器的光束质量提高到约为 $40\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，那么其效率将降至约为 32%。为了充分发挥半导体激光器直接应用的所有效率优势，并进一步改善光束质量，通快公司 (TRUMPF) 在其 TruDiode 系列直接半导体激光器产品中采用了一种全新的设计理念。这一理念的基础是使用一个具有前所未有的技术输出特性的光纤耦合二极管模块。而且，这种方法带来的另一个主要优势是二极管为被动冷却。下文将重点介绍这些特性，同时介绍 TruDiode 系列产品的技术细节、极低的运行成本和相关的应用领域。

半导体激光器的概念

TruDiode 激光器中使用的二极管模块，通过一根直径仅为 $100\mu\text{m}$ 、数值孔径小于 0.12 的光纤提供 100W 的激光输出 (如图 1)。^[1]

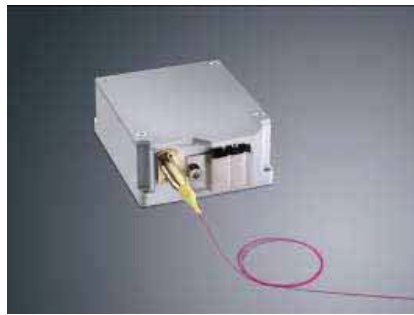


图1: 通快的新一代4kW碟片激光器TruDisk 4002。

二极管模块是通快新型直接半导体激光器 TruDiode 系列的核心。每个激光器单元由多个二极管模块和一个光纤合束器组成。多达 19 个二极管模块的输出光束被耦合进一根输出光纤中，这样一个激光器单元就可以实现高达 1900W 的激光输出。这 19 根光纤被拼接成一个锥形光纤束，其直径是单个二极管模块光纤的 5 倍 (即一根芯径约为 $500\mu\text{m}$ 的光纤)。由于拼接区域的功率强度相对较低，损耗可以忽略不计。这种独特的合束方法非常可靠，能实现工业应用级的坚固程度。

图 2 给出了单个模块的优异光束质量对整个系统至关重要的原因。如前文所述，在对几个独立模块进行合束时，随着所用独立模块数量的增加，总单元的光束质量将会降低。单个模

块的光束质量约为 $5\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，由 19 个合束模块组成的单元的光束质量约为 $30\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。TruDiode 技术配置的一个重要优势在于保持了单个二极管模块的效率，使整个集成系统能够获得高达 40% 的效率。

基于以上介绍的设计理念，可以制造出输出功率为 1900W 的激光器单元。通过多波长耦合还可以获得更高的输出功率。而且，几个具有不同波长的激光器单元也可以进行合束。甚至在总系统中，可以保持单个激光器单元的光束质量，同时根据所使用波长的数量，输出功率可增加 2 倍、3 倍、4 倍，甚至更多。图 3 给出了波长耦合的原理。粗波长组合基本上已经众所周知。每个激光器单元的激光束通过光纤传输，并从光纤尾端输出。光束从纤芯中输出时以一定角度发散，发散角由光束参数乘积 BPP 所决定 (BPP 等于纤芯半径乘以输出半角，即远场发散角)。^[2]

发散的光束随后被准直，并通过一片特制的介质膜镜片与另一激光器单元准直后的光束进行合束。在该过程中，一种波长被镜片反射，另一种波长透射过镜片，从而合束成一束具有两种波长和双倍功率的准直光。其他光束可以采用类似方法合束。通快专有的技术已经大幅降低了这种合束所要求的波长差，因此可以获得波长光谱极窄的合束光束。一旦合束后，可以通过标准

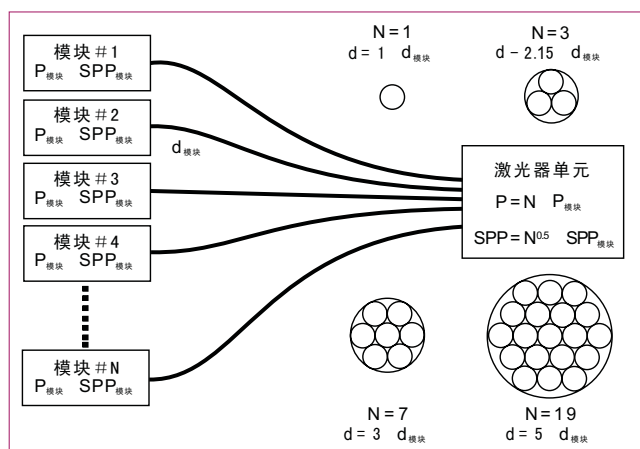


图2：激光器模块的输出合束到激光器单元的示意图。

去耦光学元件将准直光束聚焦进加工光纤中。在这种情况下，考虑到坚固的即插即用操作以及更换需求，采用了芯径为 $600\mu\text{m}$ 的光纤。

2009年，通快推出了基于该设计理念的半导体激光器，输出功率范围为 $1 \sim 3\text{kW}$ ，2010年初将推出功率达 4kW 的产品。所使用的波长紧挨在一起，这样可以避免其他半导体激光器技术所遇到的一些问题。TruDiode 激光器的光束质量与早期的光泵浦系统非常接近，因而可以进行直接替代。这是首次采用直接半导体激光器进行真正的工业深穿透焊接，并可能获得与灯泵固体激光器相同、或者说甚至更好的结果。采用 TruDiode 激光器技术，在工业应用中将不再有此前使用光泵浦激光器的折

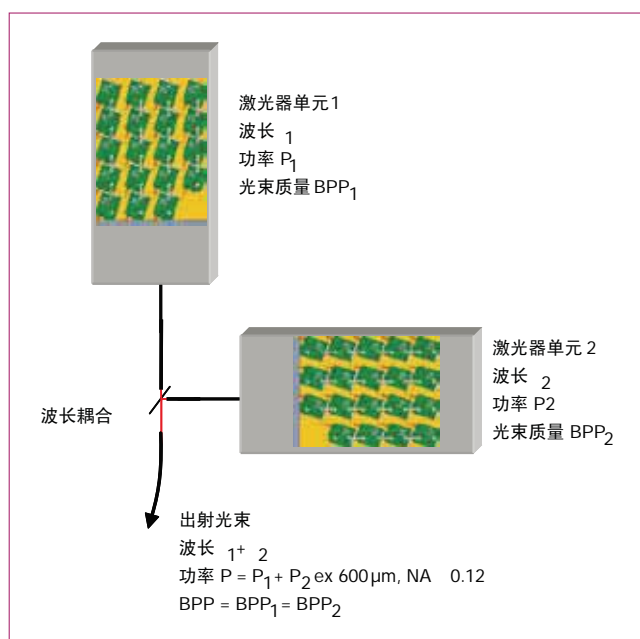


图3：通过波长耦合对激光器单元进行组合。

衷考虑，如被迫接受更小的工作距离、更大的聚焦直径或更大的光学元件。

提高效率降低运行成本

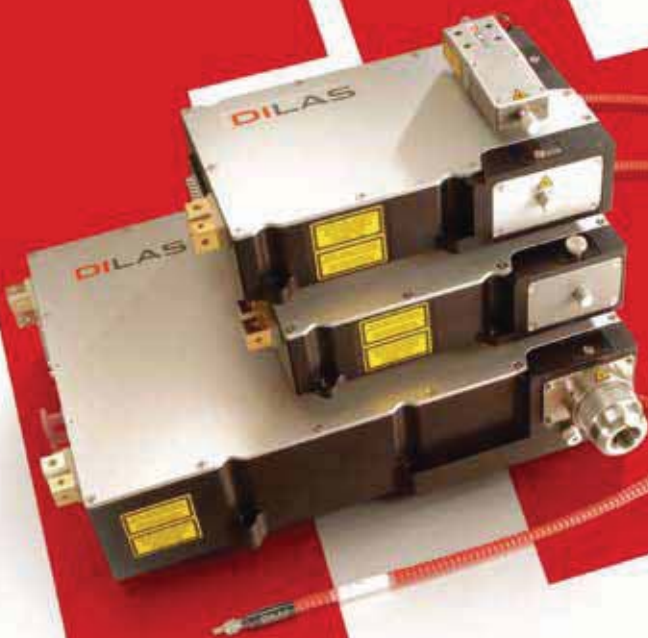
与目前市场上常见的半导体激光器相比，TruDiode 直接半导体激光器具有更高的效率和更低的运行成本，因而极具吸引力（见图4）。对于传统的叠阵半导体激光器，要获得好的光束质量就要对系统效率方面作出相应的牺牲；而 TruDiode 激光器的核心是具备优异的光束质量，并且其采用的设计理念不会产生进一步的明显损耗。因此 TruDiode 激光器可以获得高达 40% 的效率，这个数值是以前从未达到过的。由于用电费用显著降低，这便大大提高了系统的经济可行性。与灯泵系统相比，TruDiode 激光器节约了大量能源——灯泵系统的能耗高达 TruDiode 激光器的 15 倍！除了非常高的效率外，使用被动冷却二极管还能降低 TruDiode 激光器的运行成本。与主动冷却二极管相比，被动冷却二极管的使用寿命显著延长。因此，二极管不再是“易耗品”，不再与其他激光器部件不同，这就避免了更换二极管的昂贵费用。

TruDiode 系列直接半导体激光器能够在几千瓦级功率范围内，提供前所未有的光束质量和效率，超越了先前所有的工业激光器。正因为如此，TruDiode 将成为目前使用光泵浦系统或传统半导体激光器的应用的又一种可选光源。TruDiode 系列高达 40% 的电效率，将实现更高的成本效益和绿色生产。此外，TruDiode 激光器的模块构造保证了非常高的可用性。当 TruDiode 系列需要进行维护工作时，可在现场对部件进行迅速、安全地保养或更换。



图4：功率 3kW 的 TruDiode 3006 系列。

高效率激光器抽运源



德国DILAS半导体激光有限公司提供高效率半导体激光器，具有功率高、寿命长、波长全、式样多等特点。DILAS高效率半导体光纤耦合模块中心波长范围覆盖630nm-2200nm，是固体激光器，碟片激光器和光纤激光器理想的泵浦源。

基于德国先进的工艺技术，传导冷却单阵列光纤耦合和传导冷却多阵列光纤耦合的半导体激光模块，具有紧凑密闭封装设计和稳定可靠的配置，每个DILAS模块都经过100%出厂检验，性能稳定，安装便捷。

DILAS可根据客户要求定制激光解决方案，提高客户满意度是DILAS一贯不变的追求，DILAS绝对是您值得信赖的全球合作伙伴。

2010年6月9-11日在中国台湾台北世界贸易中心1馆举办的台北国际光电周，DILAS展位号D542，敬请光临。

更多DILAS技术问题，敬请联系：

电话：021-68552216-296

邮箱：sales@dilas-china.com.cn

DILAS

The diode laser company.

DILAS.COM

未来展望

激光技术的未来会怎样？还有大量的应用在等待着高光束质量、高功率、光纤输出的直接半导体激光器的问世。直接半导体激光器具有光明的发展前景。目前的前沿技术，如碟片激光器和光纤激光器，都依赖半导体

激光器泵浦介质，将激光辐射转变为更长的波长和更好的光束质量，在该过程中大约会损失高达 40% 的功率和效率。如果直接使用半导体激光器，能很容易获得更高的转换效率、更小的器件尺寸，以及更具成本效率的产品。在 Tru iode 系列出现之前，光束

质量限制了直接半导体激光器的使用。但是随着今年 1 月通快推出高亮度二极管模块，半导体激光器未来的道路已经变得更加明朗。通快的 Tru iode 激光器系列只是这一技术发展历程中的第一步，今后其必将成为激光器领域中的一项主要和关键技术。

尾注

1 此处数值孔径 (NA) 定义为从光纤出射的激光束的半角 (远场)。该参数与光束参数乘积直接相关 (见注 2)。注意 $NA = n \times \sin(\theta_{\text{出射}})$ 但空气的折射率 (n) 等于 1, 因此 $NA = \sin(\theta_{\text{出射}})$ 或 $\theta_{\text{出射}} = \sin^{-1}(NA) \approx NA$ 。

与传统半导体激光器不同, Tru iode 的数值孔径不是 0.22 而仅为约 0.12。通快在其他所有工业激光器中也采用该值。因此对于相同的光纤直径,

在几千瓦级产品中, Tru iode 的光束质量比其他半导体激光器好约两倍。当用于材料加工时, Tru iode 激光器相比其他半导体激光器具有以下优势:

- 相同聚焦直径时更大的工作距离和聚焦深度
- 相同工作距离时更小的聚焦直径
- 达到相同聚焦直径时更紧凑的光学元件

2 在固体激光器中, 光源的光束质量由光束参数乘积决定。光束参数乘积 (BPP)

是一个关于光束质量或可聚焦性的量, 表示为 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。BPP 在二维方向上定义了每束激光、最小 (或“束腰”) 直径 ($w_0/2$) 和远场发散角 ($\theta_{\text{出射}}/2$) 或简写为 $(\theta_0/2)$ 。BPP 是这两个参数的乘积, 可用如下表达式表示:

$$BPP = (\theta_0/2)(w_0/2) = (\theta_0 w_0)/4$$

在光纤传输系统中, 束腰通常相当于传输光纤的芯径 (ϕ_c), 因此还可表示为:

$$BPP = (\theta_0/2)(\phi_c/2) = (\theta_0 \phi_c)/4 \square$$

上转第 21 页

灵活地访问组织, 以获得多光子显微镜 (MPM) 的图像。虽然探针变得越来越小, 但是它们使用的光源通常是传统的固体钛蓝宝石激光器, 而这类激光器通常体积较大、价格昂贵、不便于携带, 并且需要精确的准直。寻找新型的低成本、紧凑、便携式超快激光源, 将有望增强 MPM 在研究领域, 特别是在临床研究中的应用。

亚细胞激光消融 (SCLA) 已经成为细胞内环境的承载骨架分子力学性能测试的有力工具。在亚细胞激光消融中, 脉冲持续时间为 100 ns 的高能量激光脉冲, 通过一个高数值孔径的物镜, 聚焦

到一个细胞内的目标上, 如细胞器或一个骨架元素。实验证明, 使用超短脉冲, 处于激光焦点上的物质, 经过非线性多光子吸收形成光分解和物质破坏, 而对周围结构的热传递或间接损坏程度最低。这些超快系统能够破坏一个活体细胞中的单个线粒体, 而不破坏周围组织。

然而尽管取得了上述进展, 未来飞秒激光器要想在走出研究阶段而在生物设备、医疗诊所、生产环境甚至是在移动设备中获得更广泛的应用, 那么仍然需要结构紧凑、光纤传输、用户友好、价格便宜的产品。未来, 飞秒光纤激光器将在多种科研领域中获得大量应用, 特别是如果其成本能

够下降的话。目前, 价格约为 15 万美元的钛蓝宝石激光器, 已经让许多研究与应用用户感到有些昂贵, 希望未来飞秒光纤激光器能为用户提供一种更加经济的选择。□

参考文献

- 1、Liu et al Opt Lett 34 5 p 593-595 (2009)
- 2、美国专利: 430224, 4401 3, 555022, 4 666, 593434, 5292 8, 526003, 430226。
- 3、S Tang et al Biomedical Opt 14 3 p 1-3 (2009)
- 4、Shen et al Mechanics and Chemistry of Biosystems 2 p 1-25 (2005)