

可调谐激光器

碳纳米管实现 2 μm 超快激光器 创记录的波长调谐

南京大学的研究人员使用碳基纳米材料，利用紧凑和低成本的 2 μm 激光振荡器，实现了创记录的波长调谐范围。

文/Gail Overton

该 锁模激光器是许多科学和工程领域的关键工具，如光纤通信、计量、生物成像和固态物理研究。在超快光纤激光器的众多优点中（峰值功率、脉冲能量和脉冲持续时间），波长可调谐性非常具有吸引力，因为它可以为频率梳产生、分子吸收线探测和时间分辨光谱的最终用户提供很大程度的应用灵活性。

然而，由于常见增益材料和可饱和吸收体的有限带宽，锁模激光器通常只有相当窄的调谐范围。但是钛蓝宝石激光器是个例外，它是目前超快科学中的主力，尽管这些激光器通常工作于 1 μm 或 1 μm 以下的波长。为了获得超过 1 μm 的波长调谐能力，非线性波长转换器件如光参量振荡器 (OPO) 或光参量放大器 (OPA)，用于商业钛蓝宝石激光器的标准扩展，但其相对较大的体积及其维护所需的繁琐要求，已经明显限制了其在现场部署应用中的适用性。

碳基调谐

在过去十年间，2 μm 左右宽发射带宽的增益材料已经快速成熟。最近，南京大学的研究人员使用非线性狄拉克半金属展示了中波红外 (3~6 μm)

下运行的激光器；目前他们正在使用碳基纳米材料，利用紧凑和低成本的 2 μm 激光振荡器，实现创记录的调谐范围。^[1] 具体来说，研究人员开发的基于碳纳米管 (CNT) 的铥/钬 (Tm/Ho) 光纤激光器，可以在 1860~2060nm 的 200nm 范围内连续可调谐。根据他们的了解，这是被动锁模光纤激光振荡器所实现的最宽的调谐范围。

南京大学教授王枫秋介绍说：“目

前，对于在长波长范围内寻找波长调谐解决方案的人们来说，根本没有太多的选择。碳材料似乎与这些 2 μm 宽带增益材料很好的匹配。它们可能能够发挥克尔透镜几十年前在钛宝石激光器中所发挥的关键作用。”

通过将 CNT 可饱和吸收体与自制的光栅镜组合，在皮秒铥光纤激光器中实现了 200nm 的调谐范围。首先，使用溶液处理和拉曼光谱法制造厚度为 20 μm 的 CNT 薄膜。碳纳米管的直径分布为 1.3~1.6nm，该尺寸在掺 Tm³⁺ 光纤的增益区域中呈现较高的吸收，有助于保持良好的调制深度。

在实验装置中，通过掺铒光纤放大器 (EDFA) 将 1560nm、10mW 激光二极管的输出放大到 1W，然后通过波分复用器 (WDM) 输入到 2m 长、数值孔径 (NA) 0.16、9 μm 芯径的 Tm/Ho 共掺光纤中，使用光纤准直器和 600 线/mm 的自由空间衍射光栅实现波长调谐。在 WDM 第二个臂的 CNT 可饱和吸收体，实现锁模过程和 200nm 的调谐范围，并且对于所得到的脉冲具有令人印象深刻的 60dB 边带抑制比，以及在 36 小时连续波调谐中 1% 的功率波动。

在另外的实验中，使用石墨烯来演示掺铬硫化锌 (Cr : ZnS) 固态激

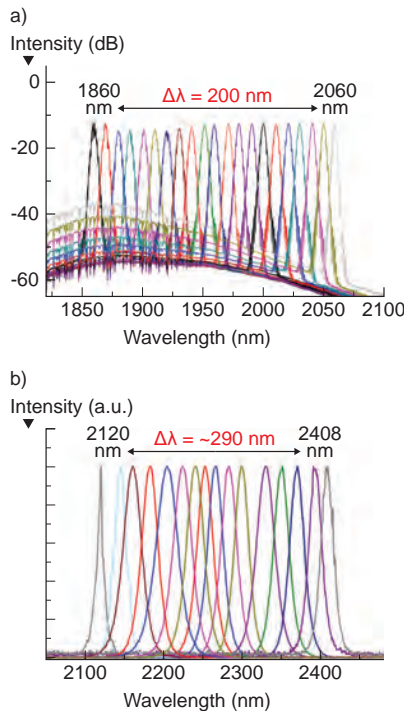


图1: 图中显示了可调谐碳纳米管锁模铥光纤激光器的光谱 (a) 和可调谐石墨烯可饱和吸收体锁模 Cr : ZnS 激光器的光谱 (b)。

下转第32页

快也有丰富的现金。这些现金可以用于并购，也可以作为周期性业务的保险单。

我们自己制定我们的发展策略，而不需要分析师来做。我认为这是一个巨大的优势。看看这些上市公司的估值，都是 20-30 倍于收益，这只是未来的估值，而不是现实。

LFW：通快为科研激光器的提供做出了很大的努力。相比于通快的工业核心市场，科学应用是一个小市场。那么通快从科学应用市场中收获了什么？

Schmitz：坦白说，这是一个实验。将工业化产品应用到科学领域可能是一件有趣的事，我们找到一个科研应用小组，将这项技术推向极限，以便了解更多。通过科研应用，我们更多地了解我们的产品，了解它们在极限条件下的性能，然后将其应用到工业领域，以将我们的超快激光器提升到更高水平。这是我们从慕尼黑科研激光项目中获得的一些收获。

Leibinger：科研激光还能使我们涉猎很多意想不到的应用领域，例如相干 X 射线或桌面同步加速器，这是我们正在与科学研究领域客户所谈论的主题。这是逆向技术转移，我们受益于我们的各种产品系列。

LFW：科研激光项目是互惠互利吗？

Leibinger：是的，双方都受益。但是慕尼黑项目与通快的其他项目不同，它就像一个研究机构。慕尼黑项目是一个由 15 人组成的小团队，他们在做着非常有趣的事。如果有来生，这就是我想做的。

LFW：在全球市场中，您认为哪个区域拥有进一步增长的最佳机会，为什么？

Leibinger：这是我最难确定的一个问题，我想最终还是亚洲吧。在这个地区，目前我们增长强劲的市场依次是：韩国、中国和日本，随后是台湾。亚洲市场会保持强劲增长，但是我也看到了东南亚地区的巨大潜力。

LFW：您是否关注过中国的一些官方计划？您认为这些计划是否会对中国未来的激光发展有促进作用，比如“中国制造 2025”？

Leibinger：非常非常关注。如果你看看打标行业，这是一个值得关注的案例。激光打标机的市场数据取决于信息来源。我们假设中国的激光打标机市场约为 5 万至 6

万台。我觉得 IPG 和通快在标准 20W 光纤激光打标机市场远远落后于中国的竞争对手。我们每年出货 1 万台打标用激光器，其中绝大多数都去了中国市场，但中国的竞争对手做得更多。

对于 500~1000W 的中低功率连续 (CW) 激光器，我们正看到了同样的发展趋势。而高功率 CW 激光器领域发生同样的情况，也只是时间问题。我也很担心，因为我们不明白这些激光器的低价格是怎么做到的。假如我们把这些机器拆开来看，会发现中国竞争对手的组件有不少来自于我们相同的供应商。如果算上我们支付的费用，再扣除批量采购所获得的折扣，我们仍然做不到他们销售的价格。我不知道他们是怎么做到的，但激光器确实在以低价出售。这是我们目前需要面对的事实。

LFW：有政府政策的支持。

Leibinger：这让我有些担心。

LFW：政府还创建了中国大防火墙，这是一个数字防火墙来规范互联网。它是否干扰到你们的工业 4.0 计划？

Leibinger：当然。我们在中国进行工业 4.0 的唯一办法是通过合作。中国所产生的数据是不能离开中国的，这是法律。如果我们在中国建立云，我们必须向中国政府提交密码来应对紧急情况。这意味着我们将完全透明。我们会被问及，你们为什么要很费劲地设置自己的云呢？你们完全可以和中国合作伙伴一起做。

但我认为这也是一个机遇，我们带来了很多东西。当我们处理中国商业事务时，是的，可能会有政府的影响，但最终他们还是会遵循商业利益。这是我们必须做的。□

上接第 21 页

激光器甚至更宽、约为 300nm 的调谐范围，其中输出短至 200fs，波长选择通过棱镜对实现（见图 1）。

王枫秋介绍说：“我们的初步结果是非常喜人。结果表明碳纳米材料，包括碳纳米管和石墨烯，可能是关键的光学开关材料，能够在技术上重要的 2 μm 区域实现新一代的宽可调谐锁模光纤激光器。考虑到在体积和成本降低方面的巨大优势，这些碳基系统将很有可能实现商业化。” □

参考文献

1. Y. Meng et al., Nat. Sci. Rep., 7, 45109 (Mar. 21, 2017).