
谐波锁模脉冲的重定时动力学

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33485.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

谐波锁模脉冲的重定时动力学。导读

近日，来自中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员将基于光子晶体光纤（PCF）的声光锁模光纤激光器作为动力学研究平台，针对谐波锁模中的脉冲在其捕获势阱内经历阻尼振荡的重定时过程展开了研究，并且通过对腔内脉冲间隔的统计分析发现了捕获势有效抑制时间抖动，该研究结果为未来在谐波锁模激光器中进行自稳定性和噪声抑制的实验和理论研究奠定了基础。

该成果发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》，题为Retiming dynamics of harmonically mode-locked laser solitons in a self-driven optomechanical lattice。汪晓聪博士和王本海博士为论文第一作者，何文彬教授和庞盟教授为论文的共同通讯作者。

研究背景

GHz谐波锁模超快光纤激光器具备高脉冲平均功率和时域密度，在高速测量、精密制造和非线性生物成像等领域具有重要的应用潜力。理解谐波锁模脉冲序列对外部扰动和噪声的响应始终是技术难点，主要原因包括多脉冲状态难以控制、脉冲间隔不均匀、随机扰动引起的时间波动，以及由于孤子量化效应导致腔内谐波阶数稳定性较差。针对这些问题，研究人员设计了一种基于小芯径微结构光子晶体光纤（PCF）的声光锁模系统，利用增强的声光效应，通过长距离的相互作用维持腔内脉冲间距的稳定性，从而实现稳定的谐波锁模。PCF将光场和声场束缚在微米级的纤芯中，重叠面积大幅增加，声光相互作用较传统光纤增强两个数量级。这种技术可实现脉冲数稳定且具有较低定时抖动的谐波锁模。在声光锁模中，脉冲之间没有固定的相位关系，既能提高对环境扰动的鲁棒性，又具备高度的灵活性。因此，声光锁模激光器成为研究谐波锁模稳定性的理想平台。

近日，上海光学精密机械研究所的研究团队在声光锁模光纤激光器产生的声光晶格中首次展示了脉冲在受到扰动后的重定时动力学过程，并且表征了分布在PCF上的自驱动光机械晶格，该晶格对谐波锁模结构提供了重要支持。研究表明，在突然扰动后，晶格中的孤子在捕获势阱内经历阻尼振荡的重定时过程，并与孤子耗散效应强烈耦合。同时，通过色散时间延迟干涉（DTDI）方法对腔内脉冲间隔的统计分析发现了捕获势有效抑制时间抖动。该研究为谐波锁模激光器的一般稳定性和噪声性能奠定了基础，并为锁模激光器中多脉冲动力学研究提供了宝贵的见解。

这一研究成果建立在该团队多年技术积累之上，其核心元件是一段纤芯仅有1~2微米的PCF，通过显著增强的非线性声光效应，在光纤锁模激光器中可以实现高频（~2 GHz）被动调制，使得激光腔内等间距排列的上百个锁模脉冲得以稳定存在，形成声光晶格。

技术难点与挑战

理解谐波锁模脉冲序列如何响应对外部扰动和噪声的响应，始终是一个技术难点，主要原因包括多脉冲状态难以控制和脉冲间隔不均匀等问题，并且作为一个瞬态动力学研究，其表征和分析手段非常困难。在锁模光纤激光器的声光晶格中，每个时域势阱可以同时容纳多个孤子。这是由于孤子间能够通过相互作用形成多种稳定的束缚态，而不同势阱间相互隔离，保证了相邻势阱中的孤子动态过程互不干扰。针对声光晶格中上百个势阱结构如何进行调控是至关重要，研究人员提出了两种不同的控制方法，一种方法为全局控制，是基于对系统参数（例如激光增益，腔损耗等）的调整，从而让所有势阱中的孤子都经历相同的扰动，该方法可以获取大量并行的光分子动态过程从而进行特征分析与统计分析。另一种则是独立控制，通过外部注入光脉冲，与选定势阱内孤子重叠并施加非线性扰动，从而激发选定势阱内的孤子反应。在本工作中通过外部注入的方法，实现了孤子相互作用的精确全光控制。同时，通过DTDI方法对腔内脉冲间隔进行统计分析，揭示了其捕获势有效抑制时间抖动。

创新研究

1、自驱动声光晶格的形成与表征

研究人员采用零差系统对声光锁模光纤激光器的PCF中声光晶格进行了详细地实验表征（如图1所示）。声光晶格呈现振荡，其振荡频率与脉冲序列的重复频率一致，对脉冲的稳定性起到了决定性作用。通过调节脉冲序列的重复频率在PCF谐振带宽内的相对位置，声光晶格的强度可以在一定范围内调谐。

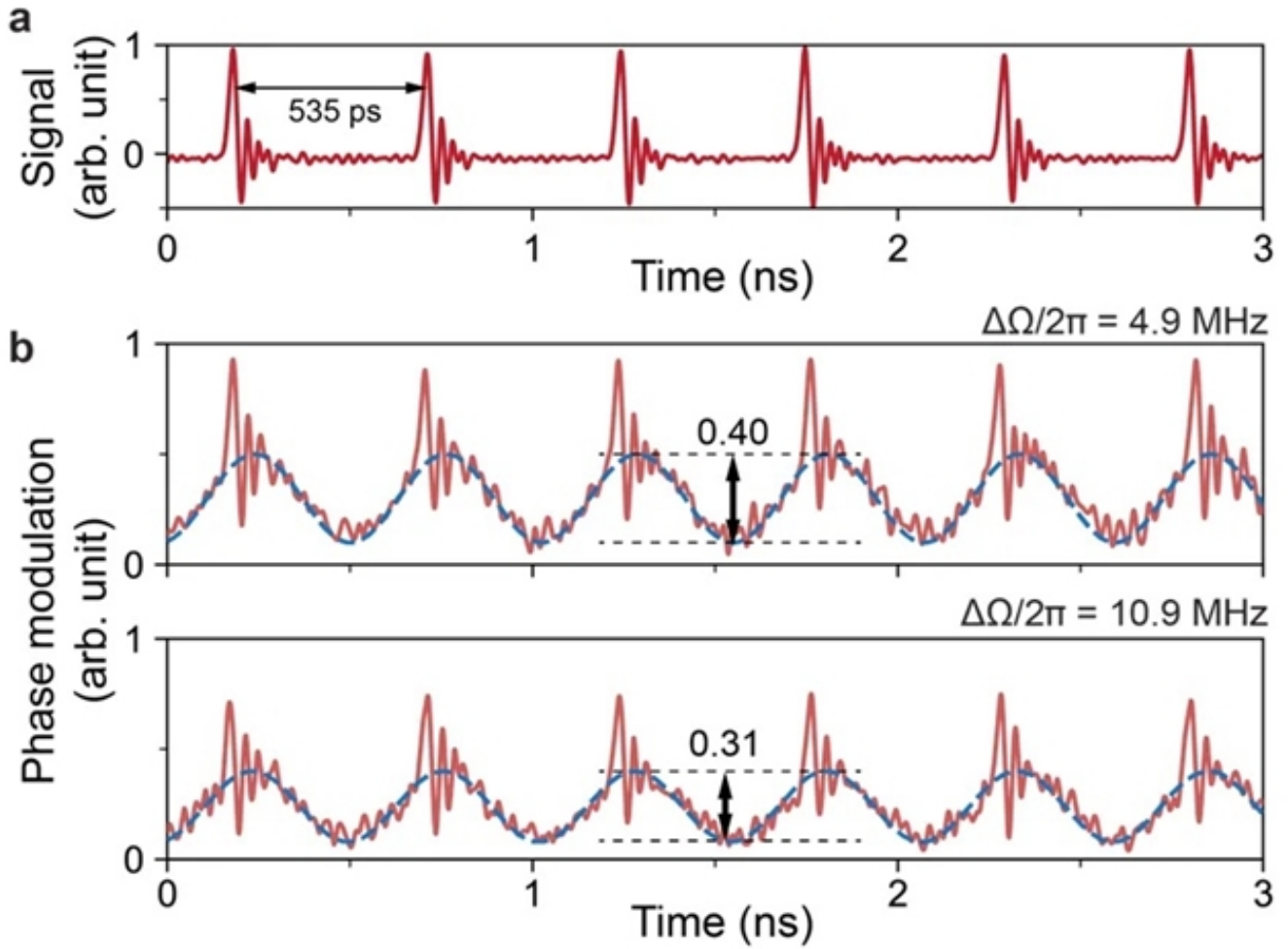


图1. PCF中的声光晶格。(a) 声光锁模激光器的输出脉冲序列。(b) 归一化零差功率信号，其中蓝色虚线为声光晶格振荡曲线。上半部分对应于重复频率失谐量 ($\Delta\Omega/2\pi$) 为4.9 MHz的声场振动；下半部分对应于重复频率失谐量为10.9 MHz的声场振动。

2、脉冲重定时动力学的观测与分析

为了探索脉冲在受到外部扰动后的重定时动力学行为，研究人员利用外部注入脉冲对声光锁模激光器腔内脉冲进行了点对点的控制，通过精细地调节外部注入脉冲的时域相对位置、往返时间、与腔内脉冲的作用时间等，对腔内脉冲受扰动后的初始时域位置、能量以及群速度进行了精确的操控。实验中，研究人员展示了三种典型的重定时动力学过程，如图3 (a)所示，其中外部注入脉冲仅扰动中间的孤子，而两个相邻的孤子保持不被扰动，这证实了声光晶格在测量过程中保持稳定。当外部注入脉冲的强度不断地增大时，受扰动的脉冲重定时过程分别呈现为过阻尼恢复、阻尼振荡恢复以及振荡消失行为。随后，为了更好的理解重定时动力学行为背后的机制，研究人员使用孤子脉冲能量 (E)、孤子脉冲时域位置与平衡点的时间偏差 ($\delta\tau$) 以及瞬时群速度与平均群速度的偏差作为参量在相空间上对三种典型的重定时动力学过程进行了描述 (如图3 (b)所示)。

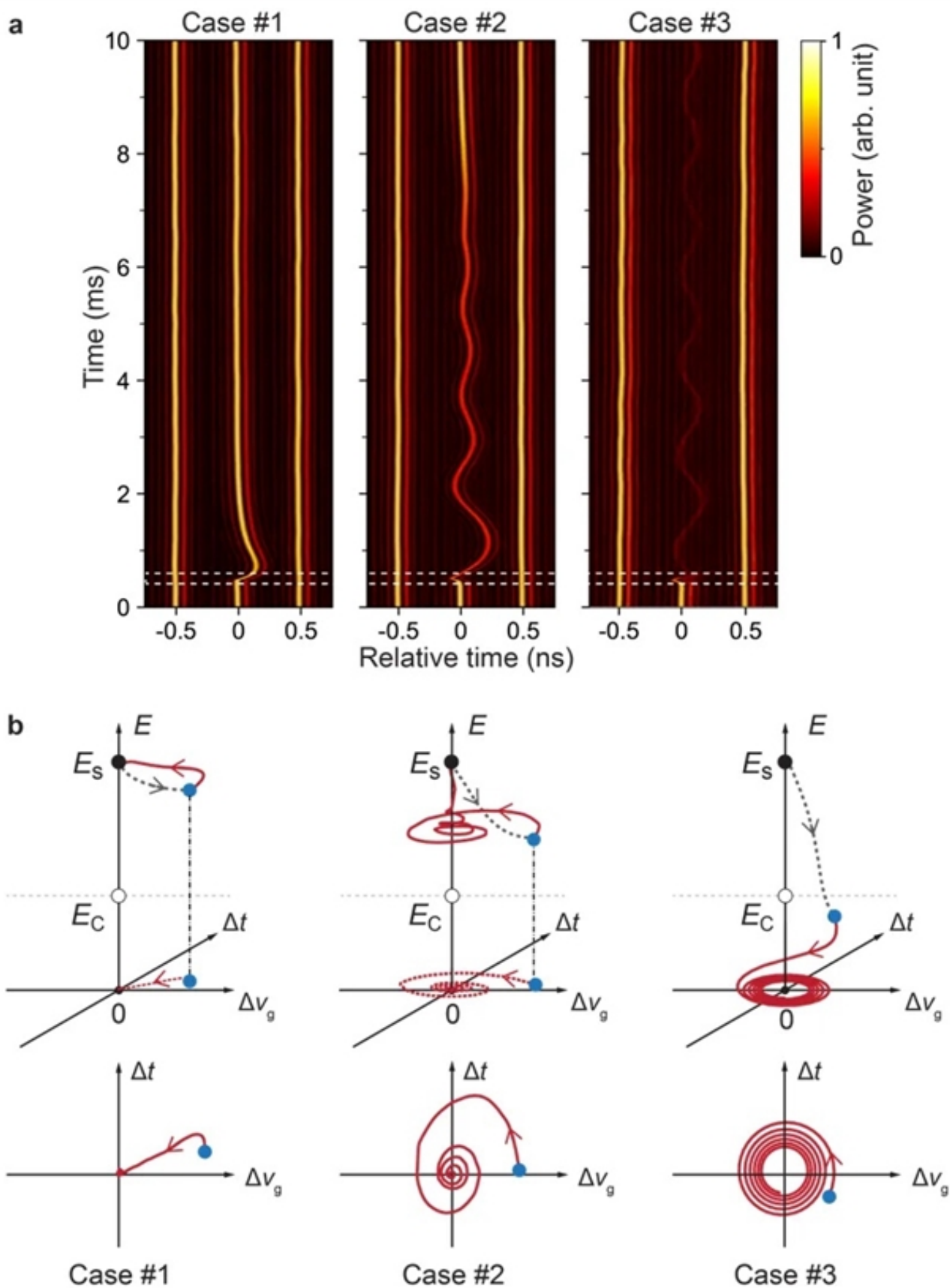


图2. 受扰动的孤子重定时动力学过程。(a) 受扰动的孤子脉冲的重定时动力学过程（扰动强度由#

1到#3逐渐增加)。图中的两条白色虚线表示外部注入脉冲与腔内孤子脉冲相互作用的开始和结束时间。请注意,在每个图中,外部注入脉冲仅扰动中间的孤子,而两个相邻的孤子保持未受干扰。(b)扰动结束后a中三种情况的孤子重定时相空间轨迹(红色曲线)的演变。虚线灰色曲线从黑点开始,到蓝点结束,标志着扰动引起的孤子状态的突然变化。

为了更好的理解孤子脉冲的重定时动力学过程,研究人员开发了一个耗散耦合的动力学分析模型,结合了重定时行为以及由激光增益和非线性偏振旋转引起的耗散变化(如图3所示)。研究人员利用耗散耦合的动力学模型成功重构了过阻尼恢复、阻尼振荡以及振荡消失三种典型的重定时动力学过程。

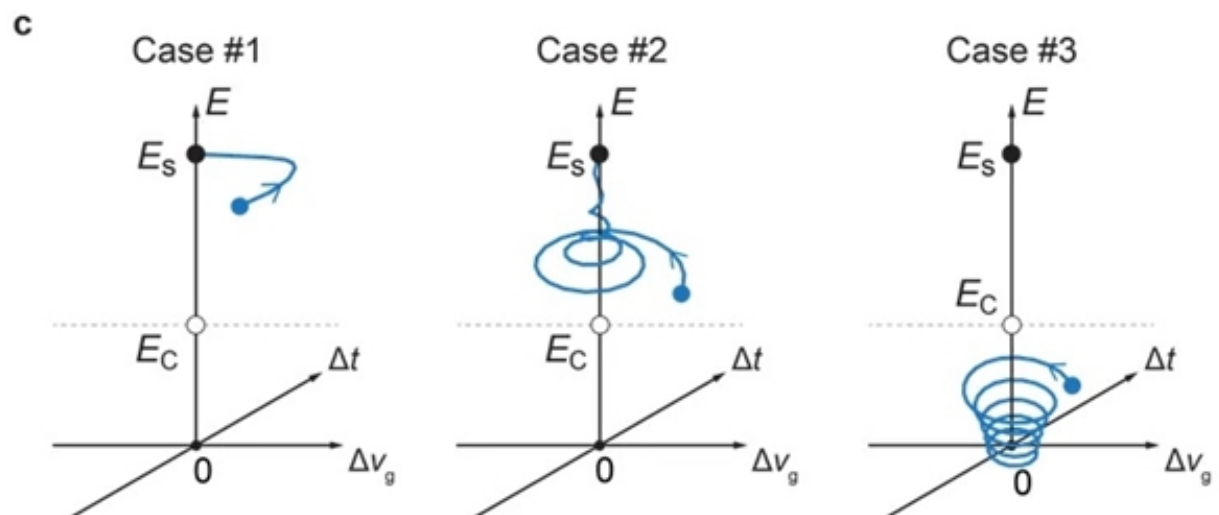
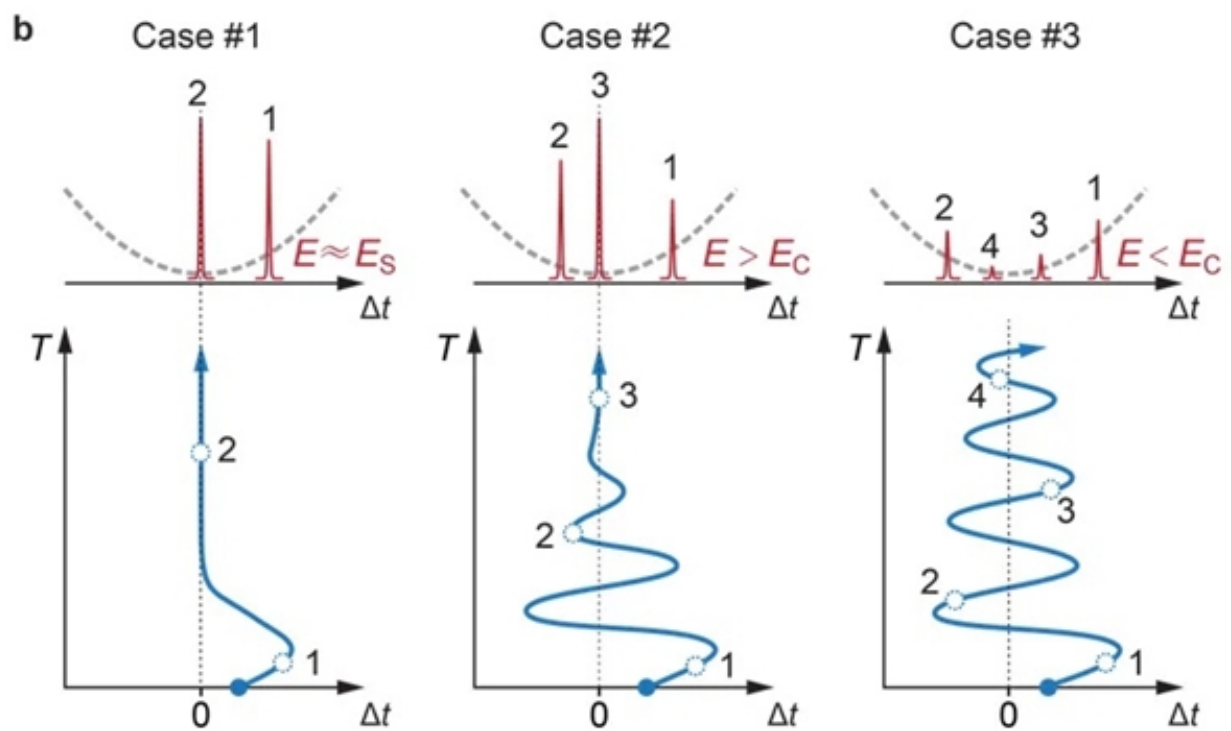
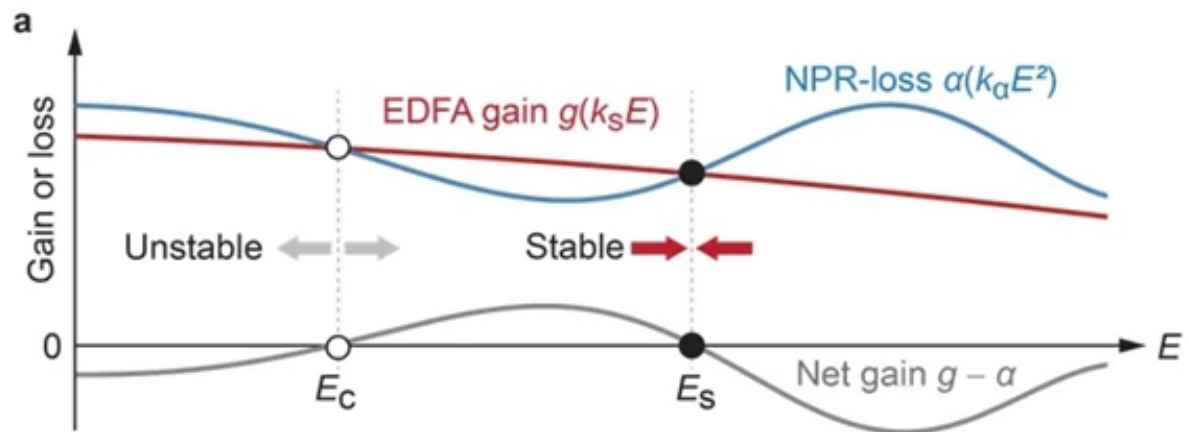


图3. 耗散耦合的动力学模型。(a) 强度相关的NPR引起的损耗和能量饱和的EDFA增益导致稳定的脉冲能量 E_s ，而存在临界脉冲能量 E_c ，低于该能量时脉冲会逐渐消失。(b)

三种不同初始条件下重定时动力学主要特征的说明。(c)

对应于b中三种不同初始条件，耗散耦合的动力学模型模拟的重定时过程相空间轨迹。

3、脉冲时间抖动噪声测量和抑制

在没有外部扰动的情况下，脉冲定时将受到噪声源（例如放大自发辐射ASE）的影响，从而导致不可预测的脉冲间隔抖动。同时，由腔内脉冲序列驱动的PCF中的声光晶格可以通过不断地调整脉冲间隔来抑制定时抖动。

为了探测脉冲间隔抖动，在实验中，研究人员采用了DTDI来跟踪脉冲间隔的实时波动。脉冲间隔抖动的统计分析如图4所示，其中一共包括230个由相邻孤子形成的孤子脉冲对。图4 (a)绘制了连续往返过程中随机选择的脉冲对的时间干涉图。很明显，得到的干涉图在短期内（~50 μs ）通常保持稳定，而在较长时间内（~5 ms）表现出明显的随机漂移。图4 (b)下部绘制了长期脉冲间隔，显示了围绕平均位置的有界随机振荡。相比之下，连续脉冲之间检索到的相对相位表现出无界随机游走（图4 (b)），表明孤子的载波相位不相关。分析5 ms时间尺度上所有230个脉冲对的检索间隔分布概率，得到以平均位置为中心的窄分布高斯分布，如图4 (c)所示。最重要的是，当重复频率失谐量变化时，统计分布会变宽，如图4 (c)所示，其中当频率失谐量从5 MHz变为12.3 MHz时，抖动分布的半高全宽从4.8 ps变宽到9.2 ps。这些结果证实了声光晶格可以有效抑制时间抖动，但当重复频率与声谐振失谐时，其抑制能力有所下降。这是因为较弱的声波驱动（见图4 (b)上部）削弱了捕获电势，从而降低了脉冲间抖动的抑制。

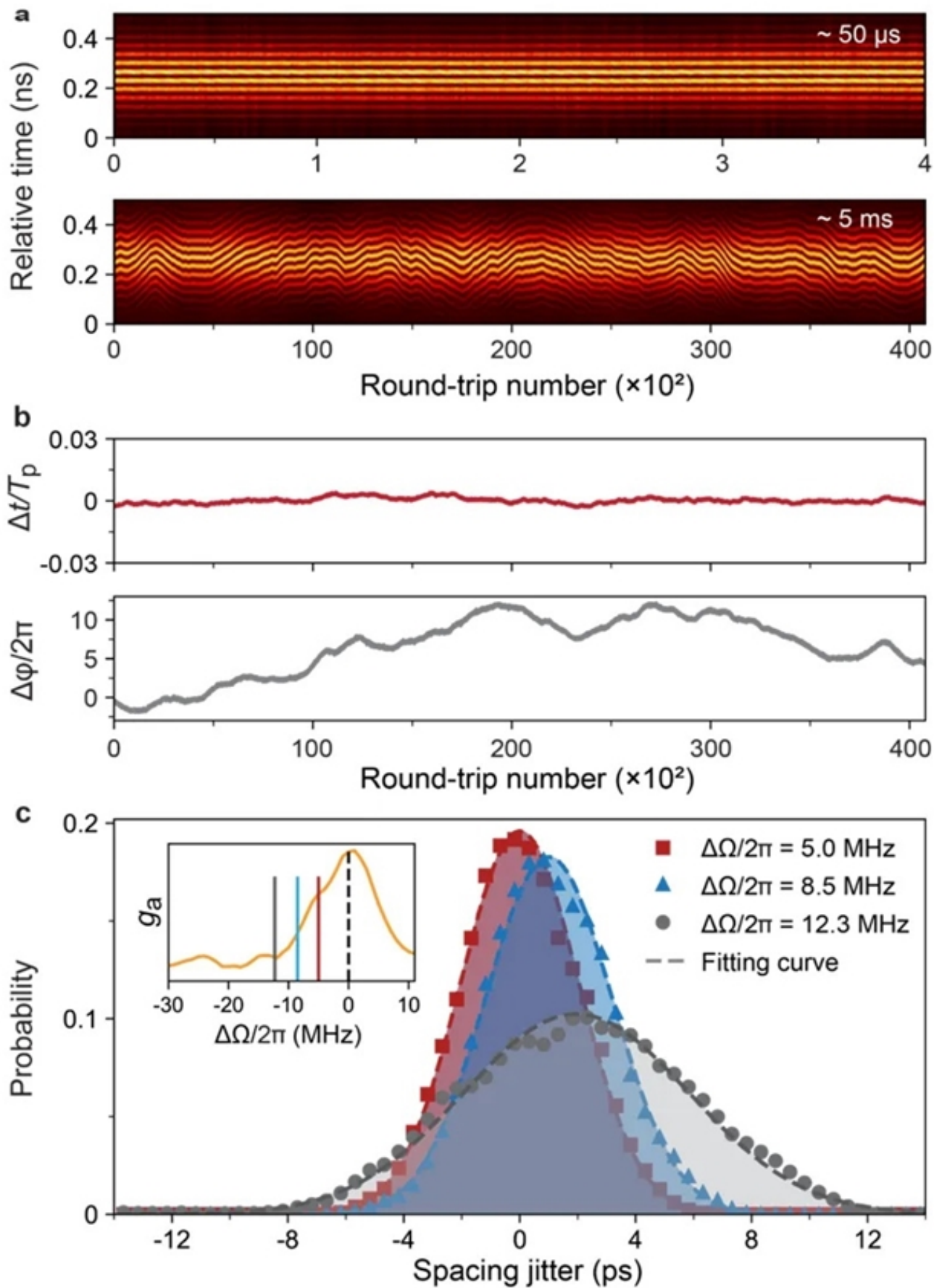


图4. 脉冲间抖动的测量结果。(a) 任意选择的脉冲对在连续往返中5 ms内的 TS-DFT 信号演变。(b) 上图：从 (a) 中检索到的间隔抖动 ($\Delta \tau$)，相对于脉冲序列离开激光器时的平均脉冲间间隔 T_p 。下图：脉冲对之间的相对相位 ($\Delta \phi$)。(c) 三个不同重复率失谐值的脉冲间抖动概率分布。插图：光声增益曲线。

应用与展望

本研究首次实验展示了声光锁模光纤激光器中的声光晶格对谐波锁模脉冲的稳定作用，以及脉冲在受到扰动后的重定时动力学过程。并且，通过干涉测量，进一步分析确认了声光晶格在抑制时间抖动中的关键作用，该工作为理解锁模激光器的稳定性和噪声性能奠定了坚实基础。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01736-3>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：何文彬等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发