
法里树锁定太赫兹光频梳

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33459.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！

法里树锁定太赫兹光频梳。 导读

光频梳在分子指纹识别、成像、通信等领域具有重要应用。在太赫兹频率范围内，基于半导体的量子级联激光器是实现太赫兹光频梳的理想平台。自由运行的太赫兹量子级联激光器可通过四波混频锁定效应实现自启动光频梳。另外，采用主动锁定技术（如射频注入、锁相环或基于飞秒激光参考等），可以进一步提升太赫兹量子级联激光光频梳稳定性。然而，这些主动锁定方法在显著提升光频梳频率稳定性的同时，也引入了较大的相位噪声，并需要复杂的光/电链路。

近日，中国科学院上海微系统与信息技术研究所黎华研究员团队与华东师范大学曾和平教授团队、日本东京农工大学张亚副教授合作，提出了一种基于法里树锁定的太赫兹量子级联激光光频梳稳频方法。通过法里分数频率与腔往返频率的竞争，实现了太赫兹光频梳重复频率的锁定。根据法里数学运算法则，我们能精准预测可实现光频梳锁定的法里分数频率。该工作提出的法里树锁定方法有效抑制了射频源引入相位噪声，并且由于法里分数频率远低于光频梳重频，该注入锁定可显著降低微波组件的工作带宽需求，为开发紧凑和低相位噪声太赫兹光频梳源开辟了新的途径。

该成果以Farey tree locking of terahertz quantum cascade laser frequency combs为题在线发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》上，中国科学院上海微系统与信息技术研究所刘贵宾博士生为第一作者，中国科学院上海微系统与信息技术研究所黎华研究员和华东师范大学曾和平教授为通讯作者。

研究背景

光频梳是由一系列等间距、高稳定频率线组成，具有宽光谱和高相干性等优势，广泛应用于光谱检测、成像和通信等领域。在太赫兹（THz）频率范围（0.1-10 THz）内，基于电泵浦的半导体量子级联激光器（QCL）具有宽频谱、低阈值、大功率等优势，是实现THz光频梳的理想载体。通过四波混频锁定机制，自由运行THz QCL可实现自启动光频梳，其性能可通过优化增益曲线、波导损耗或引入色散补偿结构来改善。为进一步提高THz QCL光频梳的稳定性，主动锁定技术如射频注入、锁相环或基于飞秒激光参考等被用于锁定光频梳的重频或载波包络偏移频率。尽管这些方法确实增强了光频梳的稳定性，并展现出拓宽光谱范围的能力，但同时也引入了较大的相位噪声，并需要复杂的光/电链路。

在非线性系统中，两个频率之间的竞争会导致它们在频率比为特定有理数处实现锁定，即法里树锁定。在数学上，所有有理数的集合可以用法里树表示，其节点为法里分数，这些分数在层级结

构中无限向下生成，并伴随着魔鬼阶梯分形结构出现。早在17世纪，惠更斯就观察到一对背靠背挂在墙上的时钟之间的频率竞争与锁定关系。最近，类似现象也在非线性光学系统中被观察到，例如外腔半导体激光器、皮秒脉冲驱动的微腔孤子光频梳以及呼吸子激光器等。基于半导体的THz QCL光频梳，由于其强非线性，通过注入法里分数频率，有望实现法里树锁定。

创新研究

研究团队首先搭建了用于研究THz QCL光频梳在射频注入下法里树锁定的实验装置。采用THz QCL激光自探测方法，检测模间拍频信号（光频梳重频）并确认其锁定状态。射频源输出信号经过环行器和偏置器，然后注入到THz QCL芯片。图1为实验观察到的THz QCL中的法里树结构。在法里树锁定条件下，调制频率与重复频率的比值锁定在一个法里分数 m/n 上。并且基于法里数学运算法则

$$\frac{m}{n} \oplus \frac{p}{q} = \frac{m+p}{n+q}$$

，我们可以精准预测可实现锁定的法里分数。对比自由运转状态，法里树锁定状态下的电学模间拍频线宽显著变窄且信噪比提升了约10 dB（见图1b-d）。

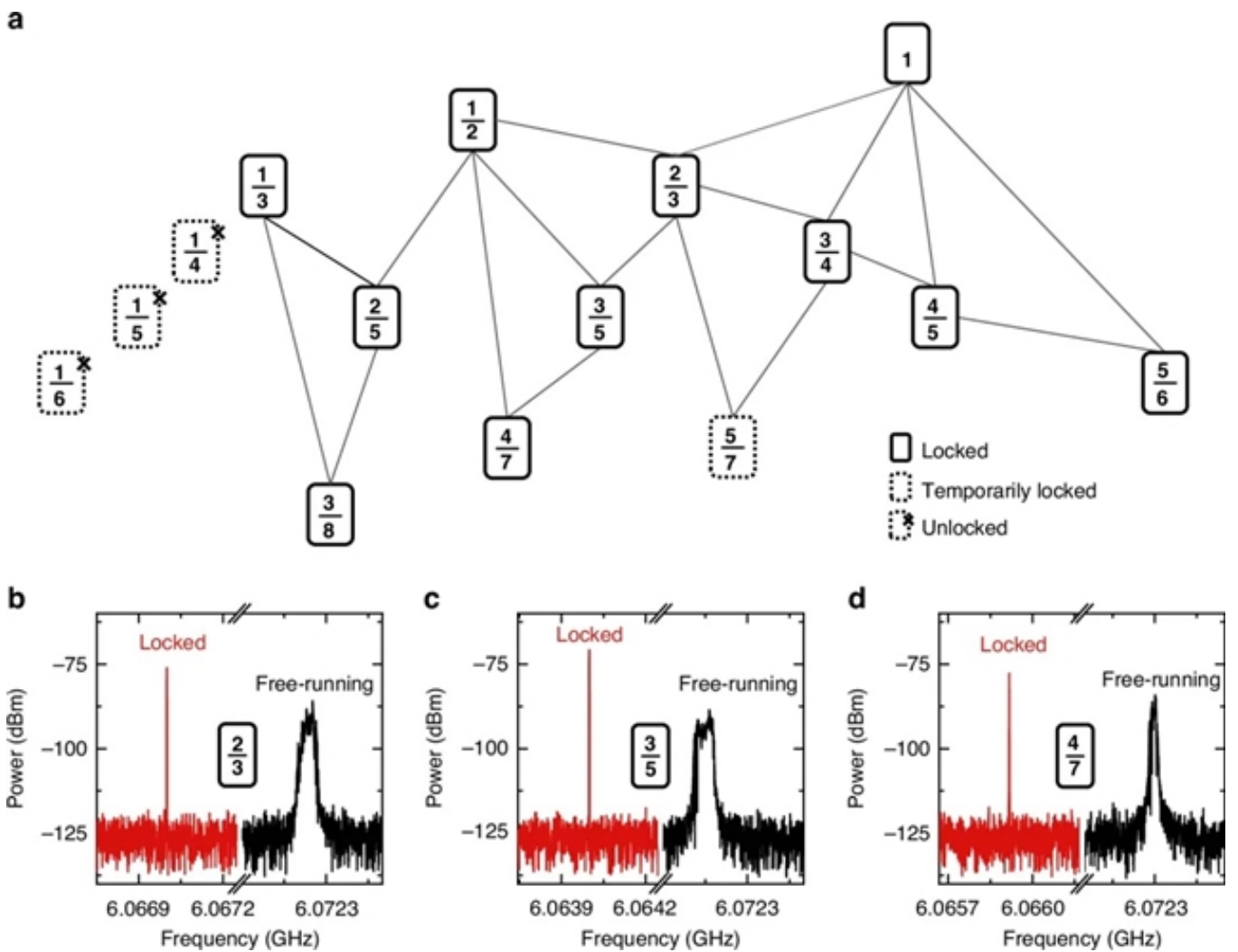


图1. THz QCL光频梳中观察到的法里树结构和典型的模间拍频谱

随后，研究团队对法里树锁定带宽进行了评估。如图2a所示，随着调制功率的逐渐增加，不同法里分数下的锁定带宽也逐渐增大。图2同时绘制了以调制频率为横轴，调制功率为纵轴的锁定区域图，显示了在非线性光学中常见的阿诺德舌结构。阿诺德舌揭示了随着调制深度（调制功率）的减小，锁定带宽逐渐收缩的现象。此外，对比共振注入（法里分数1/1），法里树锁定状态下的模间拍频呈现平稳的噪声基底特征（图2b-d）。

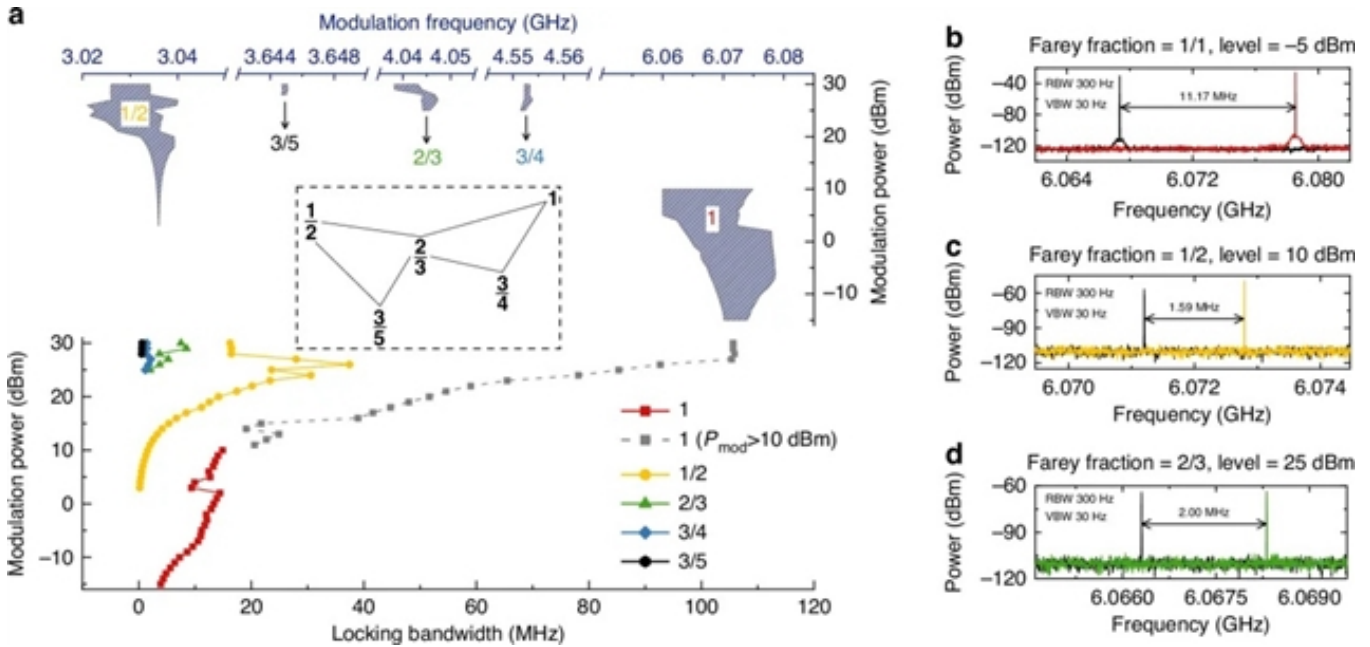


图2. 法里树锁定带宽及阿诺德舌

进一步，研究团队步进改变调制频率，记录了THz QCL光频梳从自由运转状态过渡到法里树锁定状态的动力学过程，并在其中观察到了魔鬼阶梯这一分形现象。图3a为与法里树结构相对应的10级锁定台阶。图3b展示了2/5, 2/3和4/5这三级台阶的锁定动态过程。每个台阶的宽度对应于给定环绕数（或法里分数）的锁定带宽。对于这10个台阶，随着环绕数的分母增加，锁定带宽逐渐缩小。此外，基于魔鬼阶梯的分形现象，随着调谐步长的减小，越来越多的锁定台阶可以被观察到。

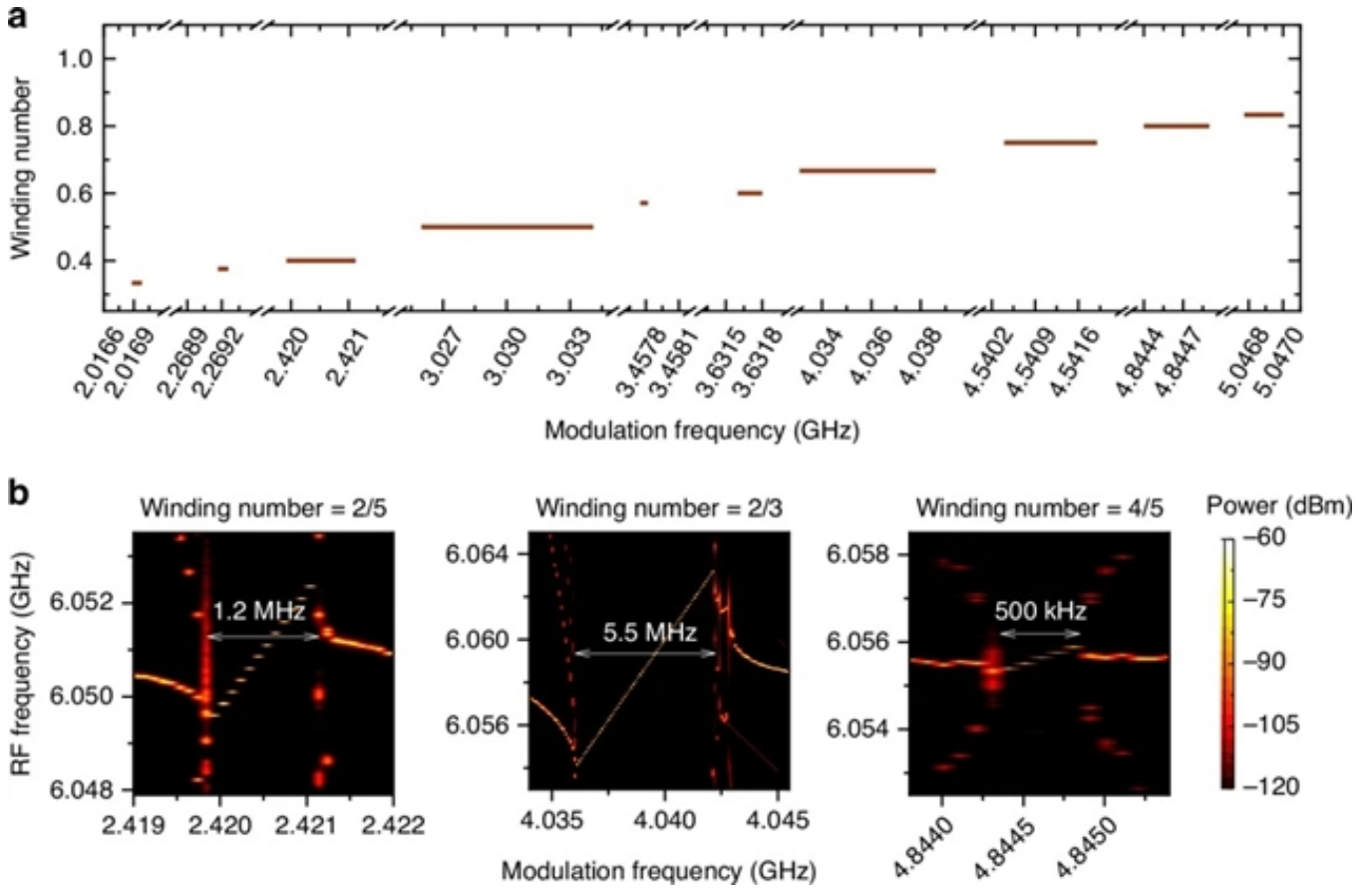


图3. 法里树锁定台阶及部分台阶对应的锁定动态过程

最后，研究团队基于法里树锁定获得了低相位噪声的双光梳光谱。如图4所示，THz QCL光频梳Comb 1和Comb 2分别应用法里分数为 $2/3$ 和 $1/1$ 来锁定。多外差双光梳信号由Comb 2作为快速THz混频器测量得到。对比自由运转状态，法里树锁定状态下双光梳梳齿相位噪声的改善超过 $100 \text{ dBc/Hz} @ 10 \text{ Hz}$ 。基于法里树锁定的低相噪THz双光梳在精密光谱测量、成像等领域具有重要应用潜力。

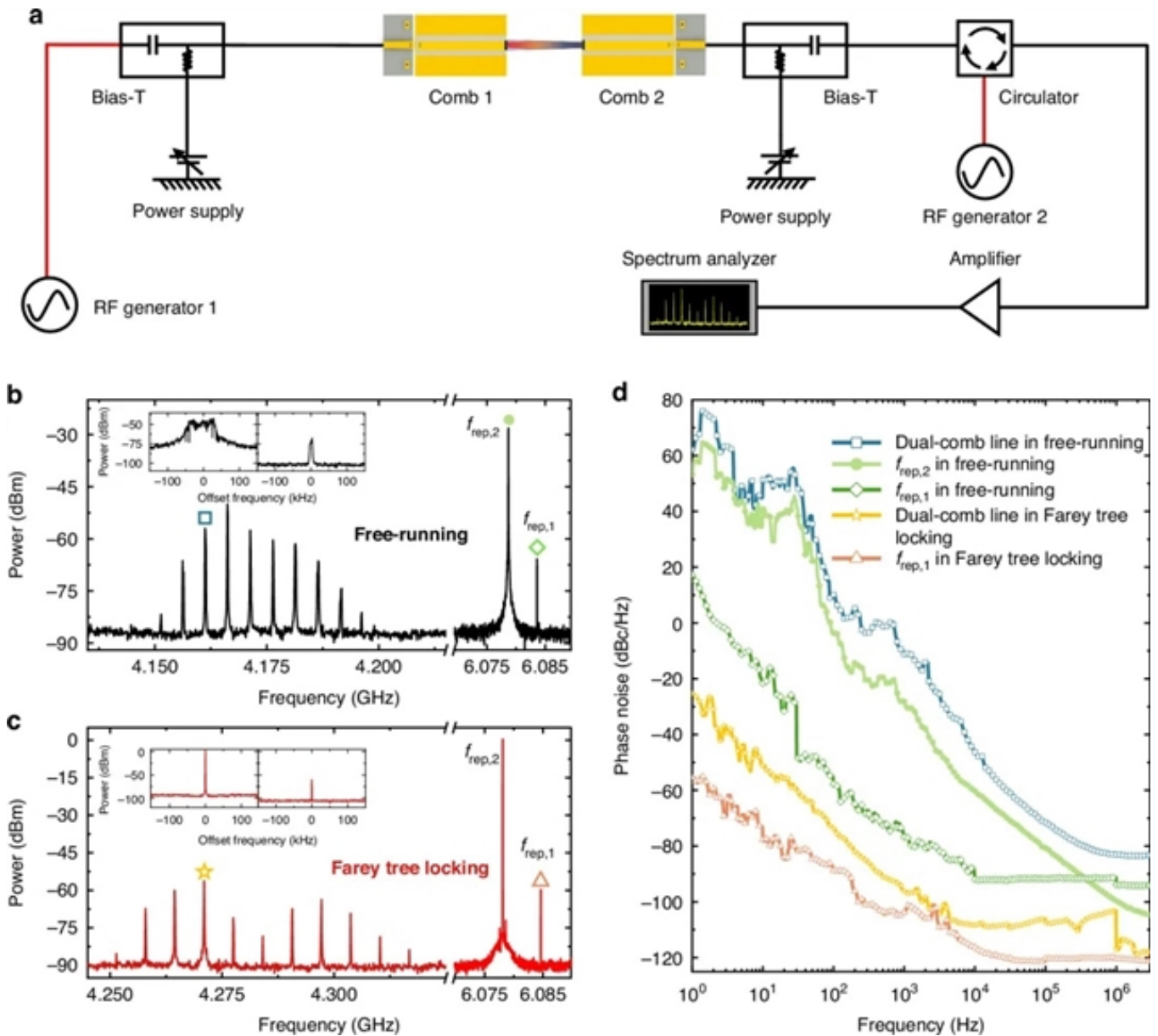


图4. 法里树锁定THz双光梳实验装置与结果

应用与展望

研究团队提出了一种基于法里树锁定太赫兹量子级联激光器（THz QCL）光频梳的新方法。该工作首先构建并揭示了THz QCL光频梳中的法里树结构及其分形特性。通过实施法里树锁定方法，实现了THz QCL光频梳模间拍频（重频）的线宽压缩和信噪比提升，同时重频及双光梳信号相位噪声也得到显著抑制。由于法里分数频率远低于THz光频梳重频，不仅避免了引入射频源较大的相位噪声，还降低了用于锁定和探测过程中所需的微波组件工作带宽需求。该工作提出的法里树锁定方法为开发紧凑和低相位噪声THz光频梳与双光梳源开辟了新的途径，对推动高精度THz光谱计量与成像技术的发展具有重要意义，还有助于深入研究THz半导体激光器中的非线性和分形动力学。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01819-9>

作者：黎华等 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](http://www.iikx.com)转发