

---

# 混合克尔电光梳：兼顾频梳带宽与梳齿间隔

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36378.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！*

混合克尔电光梳：兼顾频梳带宽与梳齿间隔。 导读

哈佛大学研究团队提出一种混合克尔-电光频梳架构，基于薄膜铌酸锂平台，首次在一个芯片上实现了75.9 THz带宽与29.3 GHz微波间距的又宽又密频率梳系统。该工作打破带宽-间距之间的权衡限制，为片上频率合成、THz信号生成、精密计量与高速通信等提供了全新解决方案，具有重要学术与应用价值。该成果以Hybrid Kerr-electro-optic frequency combs on thin-film lithium niobate为题发表在Light: Science Applications。

在现代光学中，光频梳被誉为连接光与电、精密与速度之间的桥梁——它以等间隔排列的梳齿，将高速振荡的光频离散化，实现从原子钟到精密光谱，从超稳微波源到大规模通信系统等诸多关键应用。

实现一把性能优越的光频梳，科研人员追求两个目标：一个是频谱够宽，可以同时覆盖多个原子跃迁线，适合多色激光控制与精密测量；一个是线间距够密，可以被电子系统识别与锁定，适配芯片级探测与反馈。

但问题是，这两个目标往往相互掣肘：带宽越宽，梳齿间距往往越大；而间距越小，频谱往往就变窄。这背后的限制，来自于非线性效应、色散控制和调制机制的物理特性。于是，在主流的两类集成光频梳方案——克尔频梳与电光频梳中，从未有人能同时实现宽带与密齿。在这方面，芯片尺度的宽+密光频梳，长期被视作禁区。

光频梳的带宽-间距悖论

目前主流的片上集成光频梳主要有两种技术路径：

- 克尔频梳 (Kerr frequency comb)

基于强非线性效应与微环共振腔，能够产生倍频程带宽，适合做原子稳频、 $f-2f$ 自参考、双光梳测量等。但其梳齿间距通常在数百GHz至THz级别，无法直接电子读取。

- 电光频梳 (Electro-optic frequency comb)

依赖高速电光调制器构建，具有灵活可调的微波间距 (10–40 GHz)，适合电子系统探测与反馈控制。但其调制深度有限，色散严重限制了频谱扩展，无法实现宽带操作。

---

因此，目前的研究往往只能在宽带与可探测之间二选一，而这对于需要跨光电频域进行锁定、分频、或通信的实际系统来说远远不够。

混合架构：光频梳的兼得之道

近期，哈佛大学Kiyoul Yang和Marko Lončarić课题组，提出并实验证明了一种全新架构的混合克尔-电光频梳（Hybrid Kerr-electro-optic frequency comb），在一个小小的薄膜铌酸锂芯片上，首次实现了：

75.9 THz 的超宽光谱覆盖

29.3 GHz 的微波级梳齿间距

2,589 个清晰可读的光梳齿

这意味着：他们成功打破了带宽-间距之间的硬性权衡，在一个平台上同时实现了大频宽与电子可读的细间距。

其核心机制如下：

利用色散工程优化的薄膜铌酸锂微环谐振腔，产生THz间距的单脉冲克尔频梳（DKS）；

通过高带宽、低V<sub>π</sub>的片上电光调制器，将每个孤子梳齿进一步分裂，实现微波级分频；

通过调控调制频率和反馈机制，实现对THz梳齿间距的电子锁定与控制。

这一方案不仅整合了两种非线性机制的优点，而且完全片上实现，无需额外放大器、色散补偿光纤或外部器件。

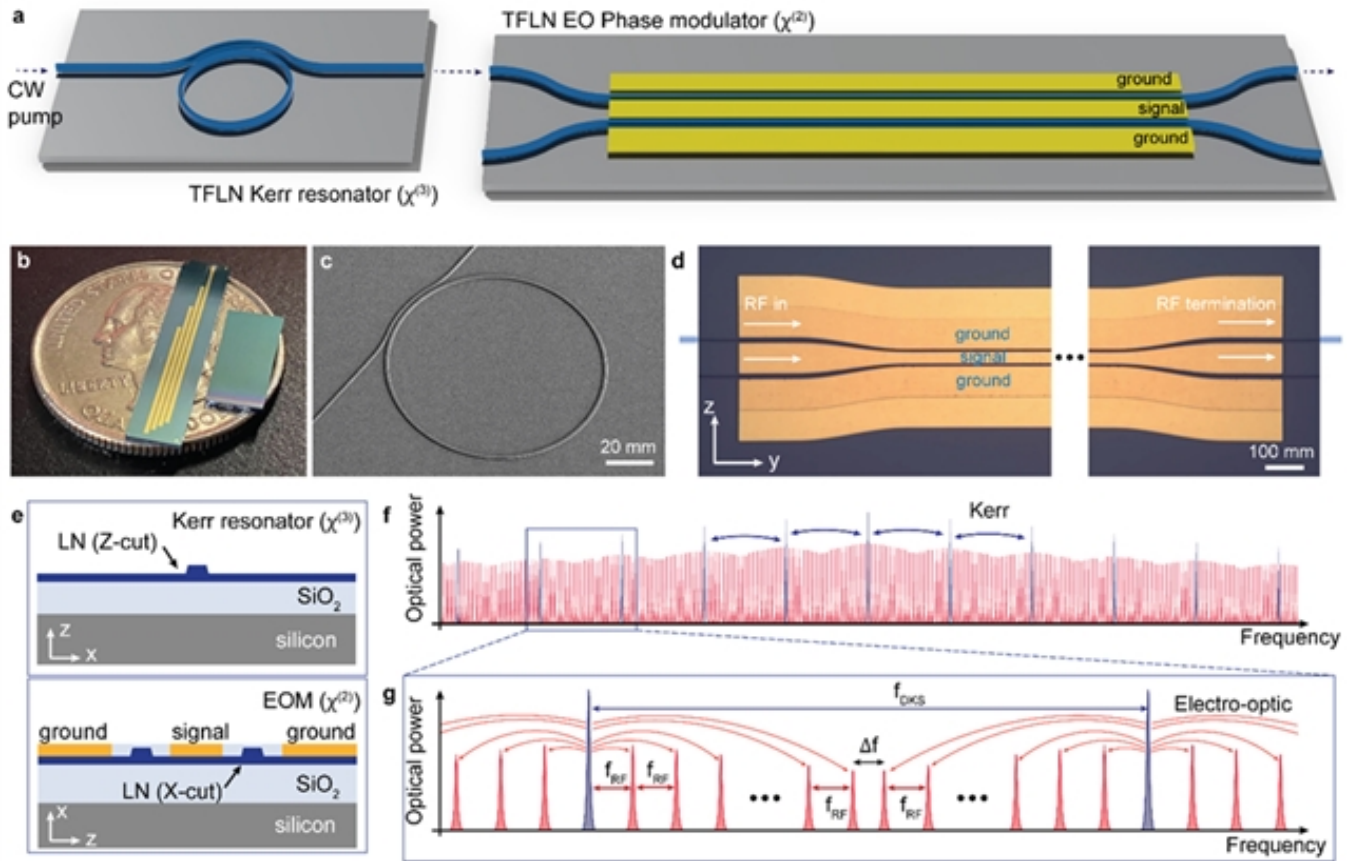


图1：Z-X切薄膜铌酸锂混合克尔电光频率梳概念及其器件。

### 三大技术亮点

#### 1. 克尔孤子：倍频程覆盖

通过对微环谐振腔的色散与几何结构精准设计，研究人员在铌酸锂平台上稳定实现了单个孤子态，产生了从131.3 THz到 263.2 THz的倍频程克尔频梳，支持未来f-2f锁模操作。

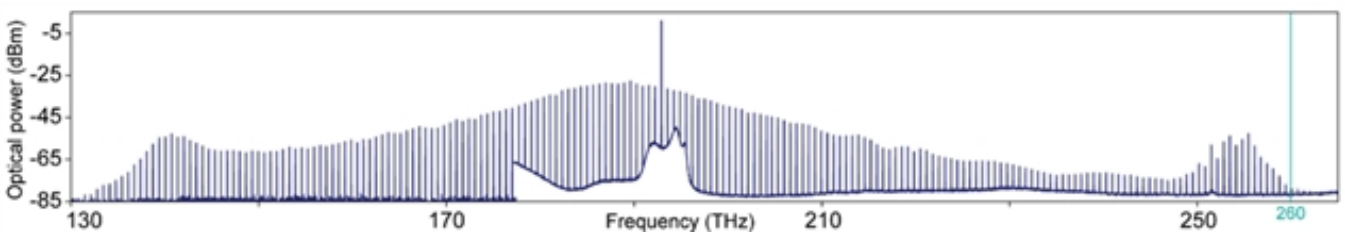


图2：片上倍频程克尔孤子生成。

#### 2. 电光调制：片上分频，宽带调控

电光调制器采用2 cm长的行波电极设计，在29 GHz微波驱动下，可在多个通信频段（L/C/S/E）生成对称侧带，完成对原始克尔频梳的精细分频操作，具备优异的V<sub>π</sub>性能和带宽一致性。

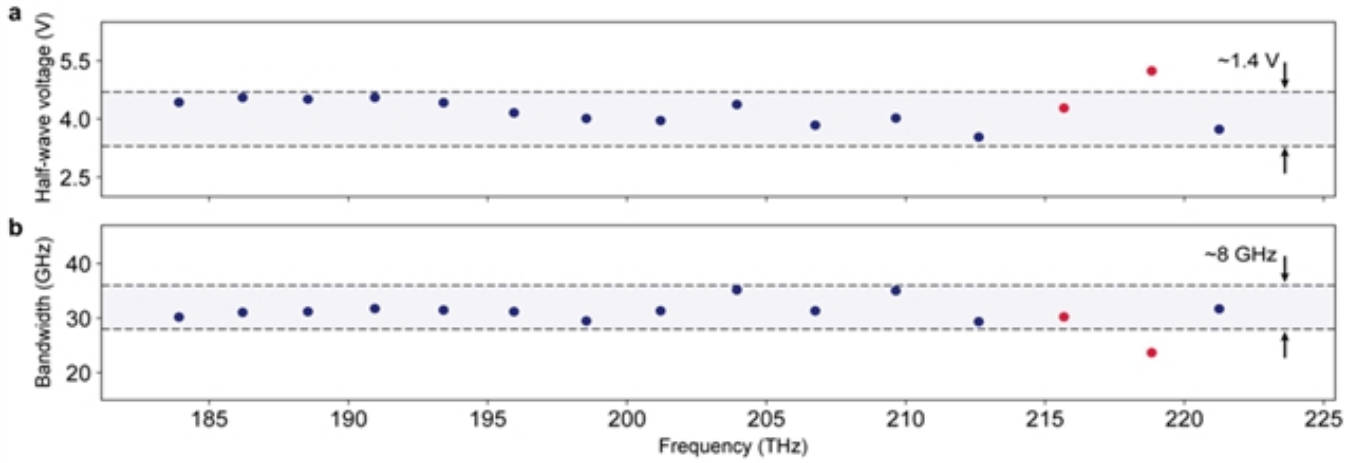


图3: 片上电光调制,  $V_{\pi}$  和带宽

### 3. 实时控制：THz间距的电子锁定

通过检测分频后梳齿之间的微波拍频信号 ( $f_{RF}$ )，并反馈控制克尔频梳泵浦激光频率，实现了对近THz梳齿间距的稳定锁定与动态调制，首次展示了THz尺度梳齿频率的电子闭环调控路径。

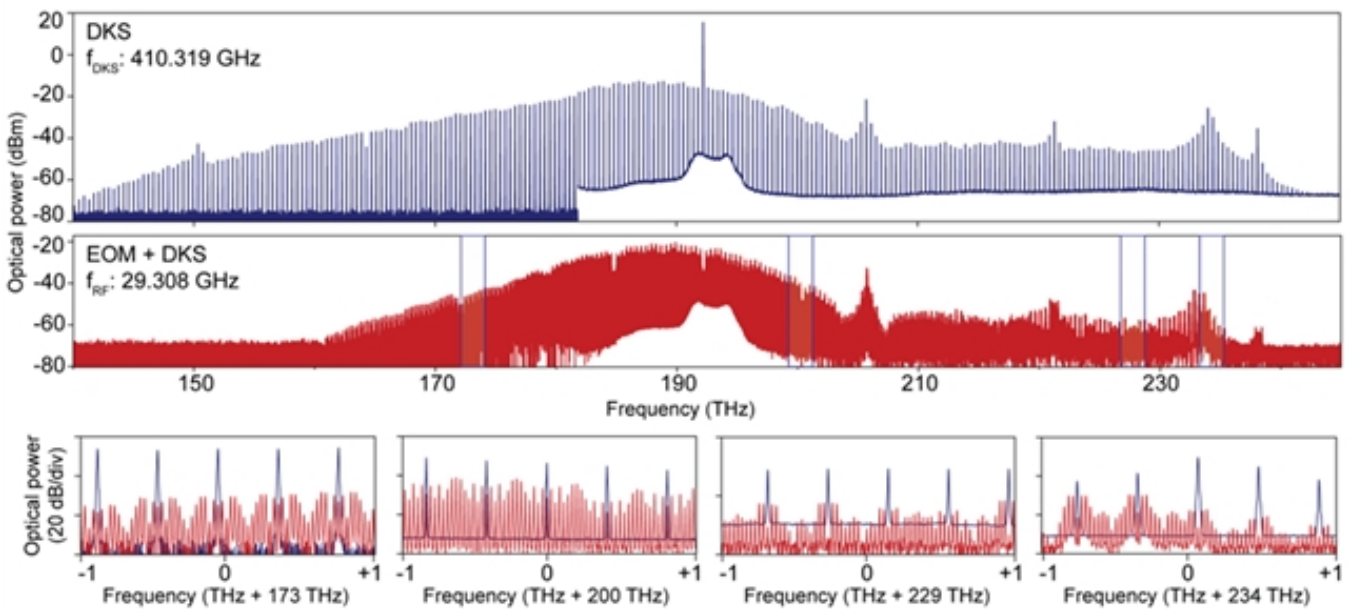
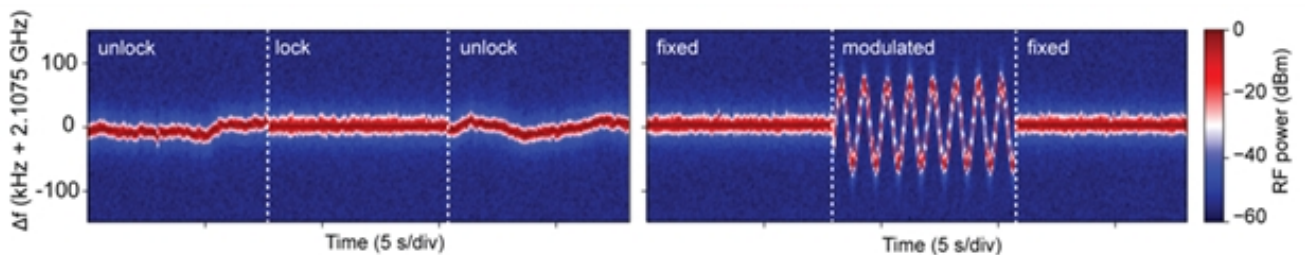


图4: 混合克尔电光梳: 兼顾频梳带宽与梳齿间隔



---

图5: 混合克尔电光梳结构对于THz间距克尔孤子的电子锁定与调制

小芯片、大应用

这个混合频梳系统具备极高的系统集成度、稳定性与拓展性，在多个前沿应用中展现出巨大潜力：

光频合成与精密计量：实现高频率稳定性的THz光源；

高速通信与雷达系统：同时支持多频信道的片上调制；

光-电频率桥接器：作为THz – GHz之间的关键翻译官；

量子光子学平台：为片上原子钟、量子比特光控提供精准参考。

未来，研究人员预计通过改进耦合设计与电驱模块，该系统功耗可进一步降低至亚瓦级别，真正为下一代低功耗、全片集成光子平台奠定基础。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01906-x>

作者：Kiyoul Yang 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