



# 光学频率梳

## Optical Frequency Comb

王艺霖

2024年11月5日

# 目录

1 / 我们如何测量光频？

2 / OFC的基本原理

3 / OFC的实现&分类

4 / OFC的应用



## 光栅光谱仪

**原理：**利用光谱仪将光分解成不同的波长成分，通过测量光谱线的位置来确定光的波长

**精度：**分辨率0.1~0.001nm，精度约 $10^{-6} \sim 10^{-7}$

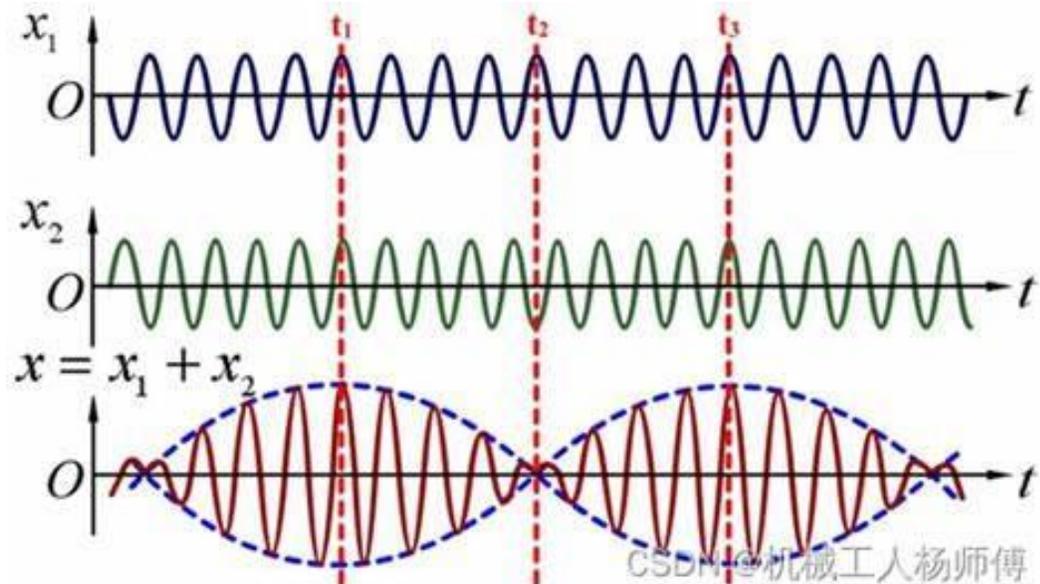


## 干涉法

**原理：**利用光的干涉，通过观察干涉条纹的移动，计算光的波长

**精度：**可达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$

可见光 $f_v \approx 500\text{THz}$ ,  $10^{-9} \cdot f_v \sim 1\text{MHz}$

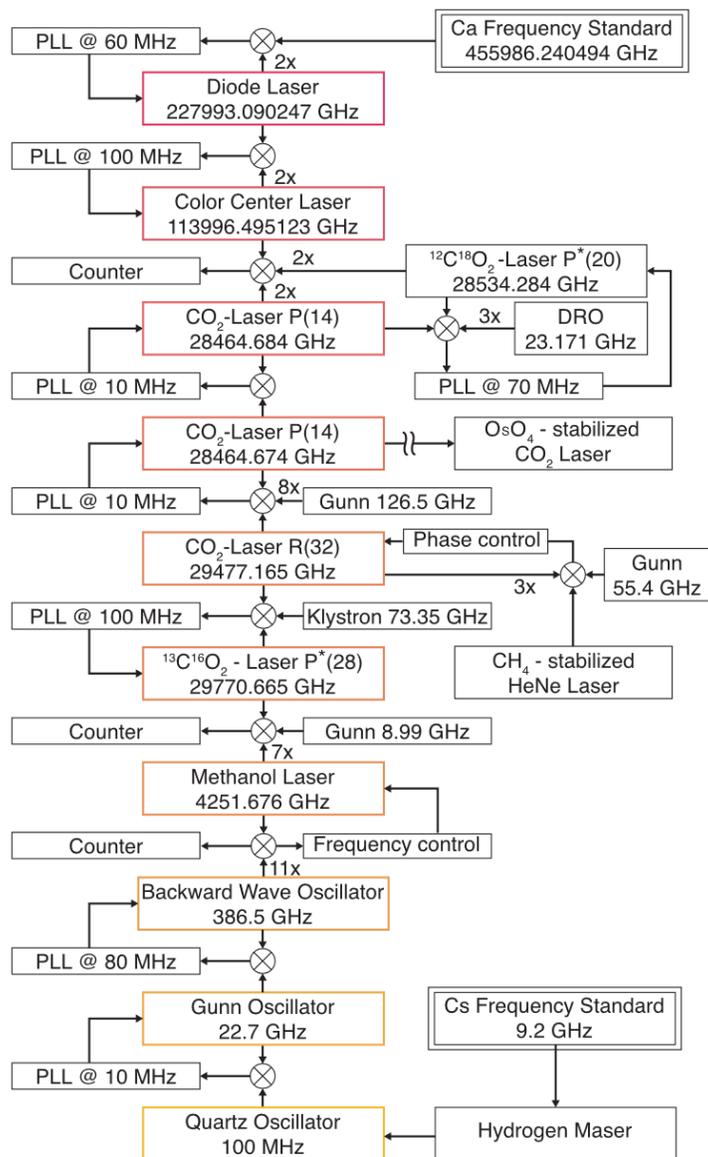


## 拍频法

**原理：**将待测信号与已知频率的参考激光混合产生拍频，通过测量拍频计算出待测信号频率

**精度：** $10^{-12}$

**缺点：**只能用来测量与参考频率相近的频率（差频在微波频段）



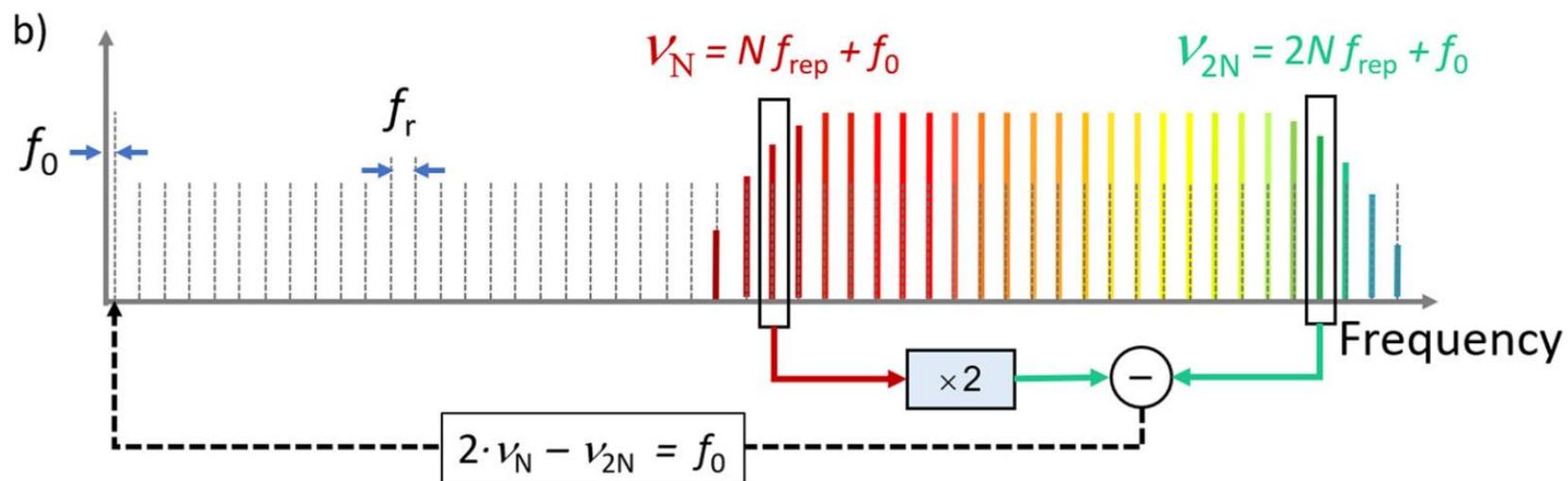
## 谐波频率链法

**原理：**通过一系列的频率合成器和混频器，将已知微波频率逐步提升至光学频率，每一步都进行精确的频率测量和控制，最终实现对光学频率的测量

**精度：** $10^{-12} \sim 10^{-13}$

**缺点：**过于繁琐

# ● 光学频率梳 Optical Frequency Comb (OFC)



精度可以超过 $10^{-18}$ !

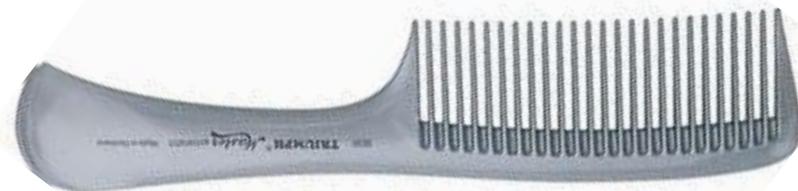
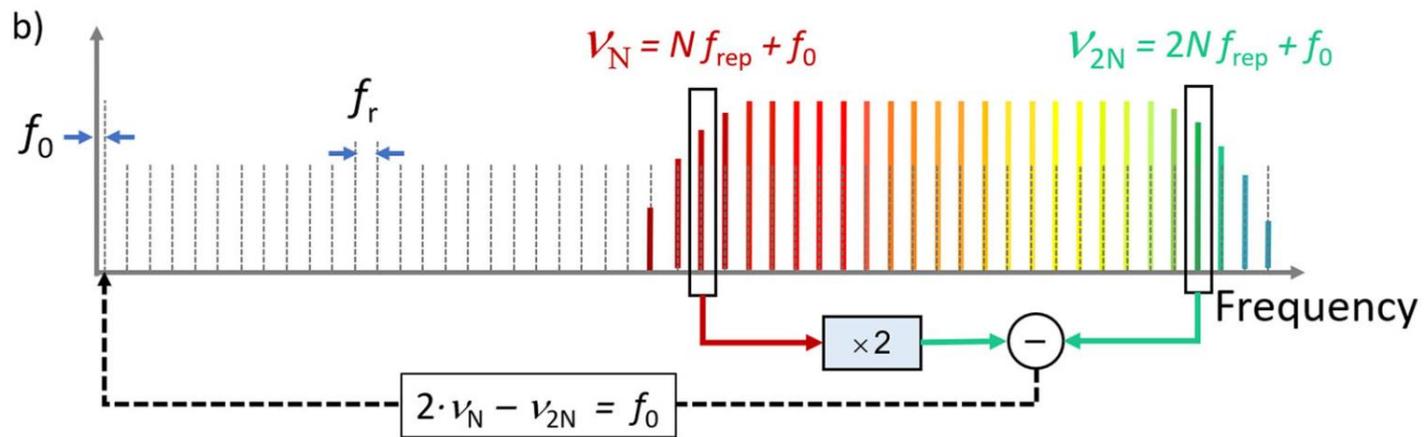
# 目录

1 / 我们如何测量光频？

2 / OFC的基本原理

3 / OFC的实现&分类

4 / OFC的应用

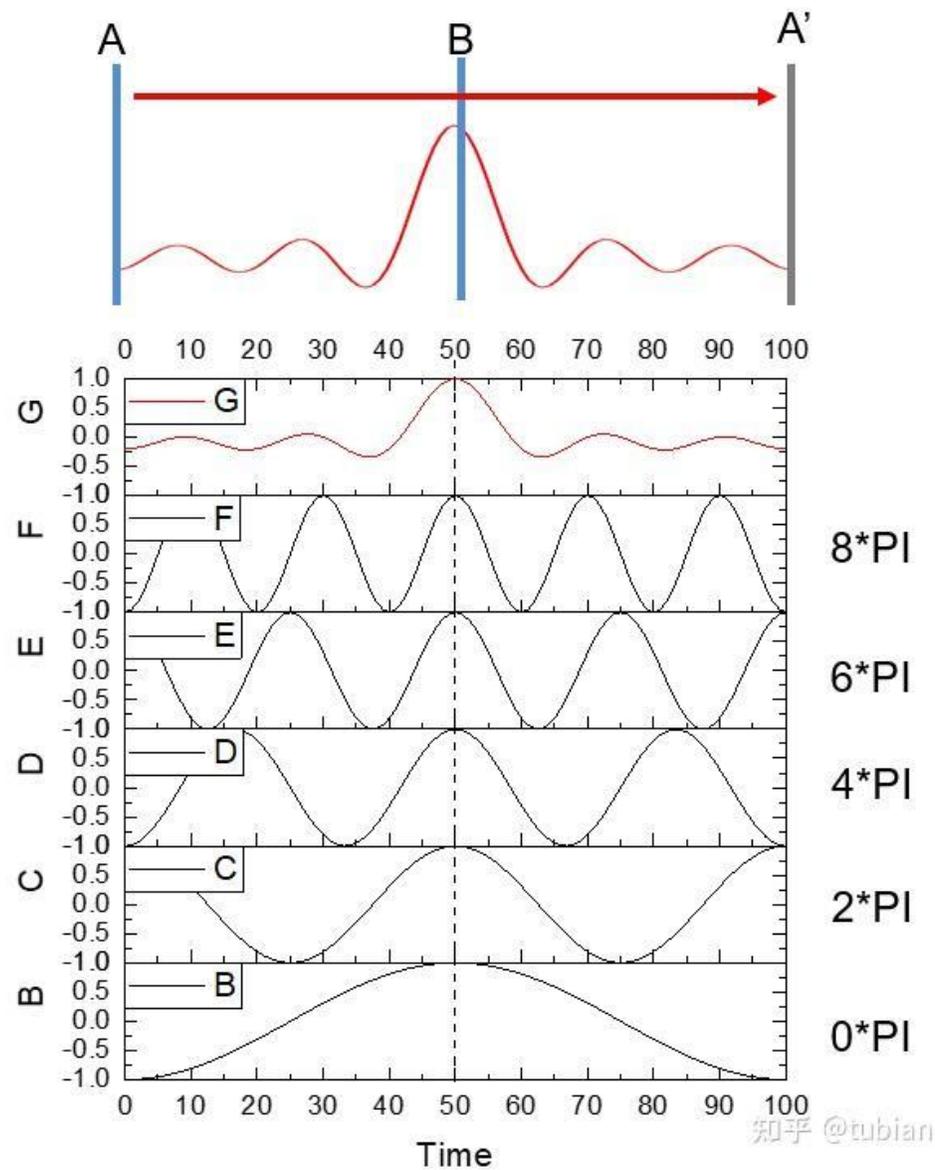
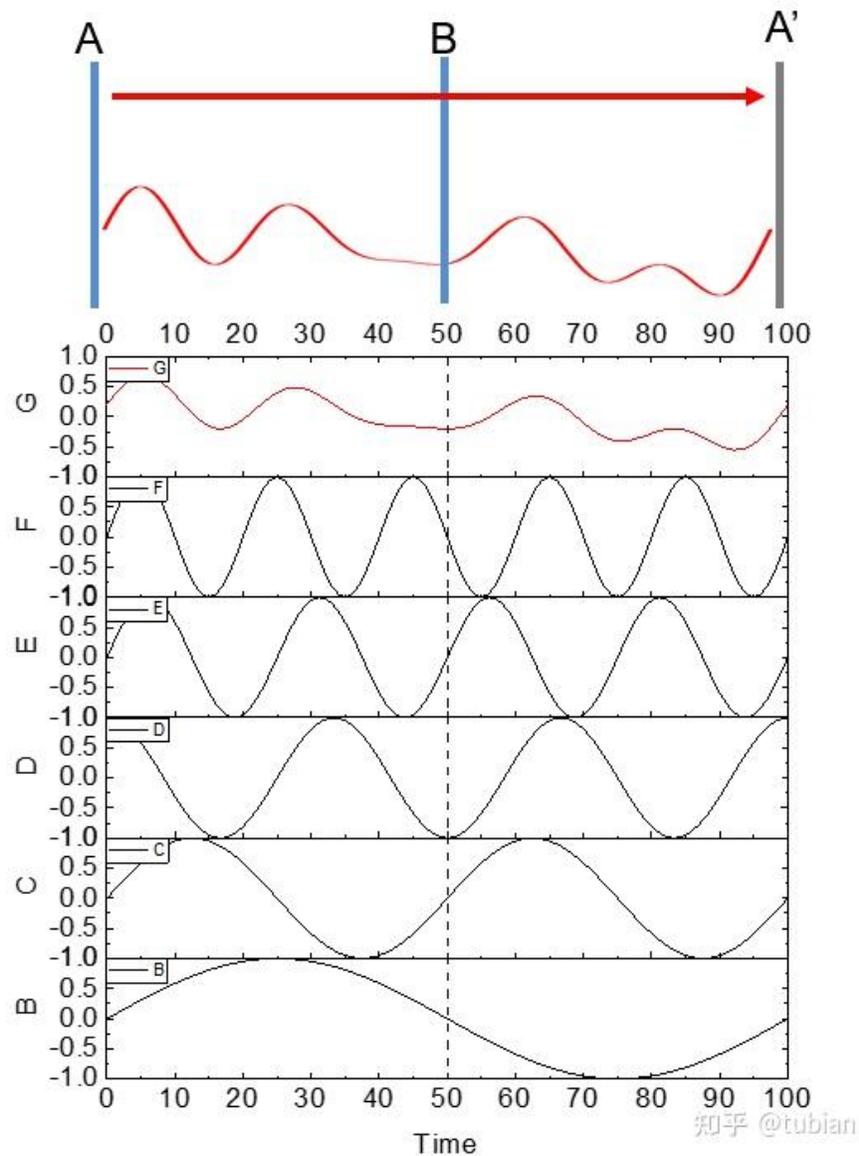


Comb Equation:  $\nu_N = N \cdot f_r + f_0$

$f_r, f_0$ : 微波频段

$N$ :  $10^5 \sim 10^6$

# 锁模激光器 (Mode-Locked Laser, MLL)

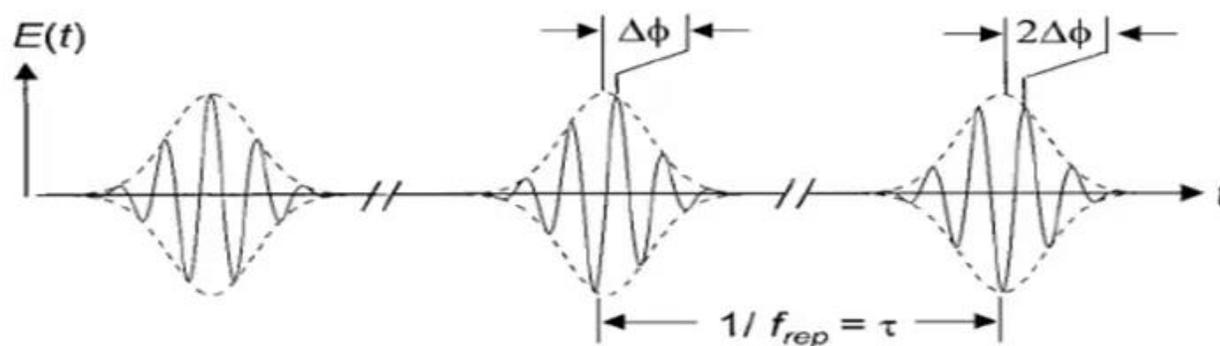


$$E(t) = A(t)e^{i2\pi f_c t}$$

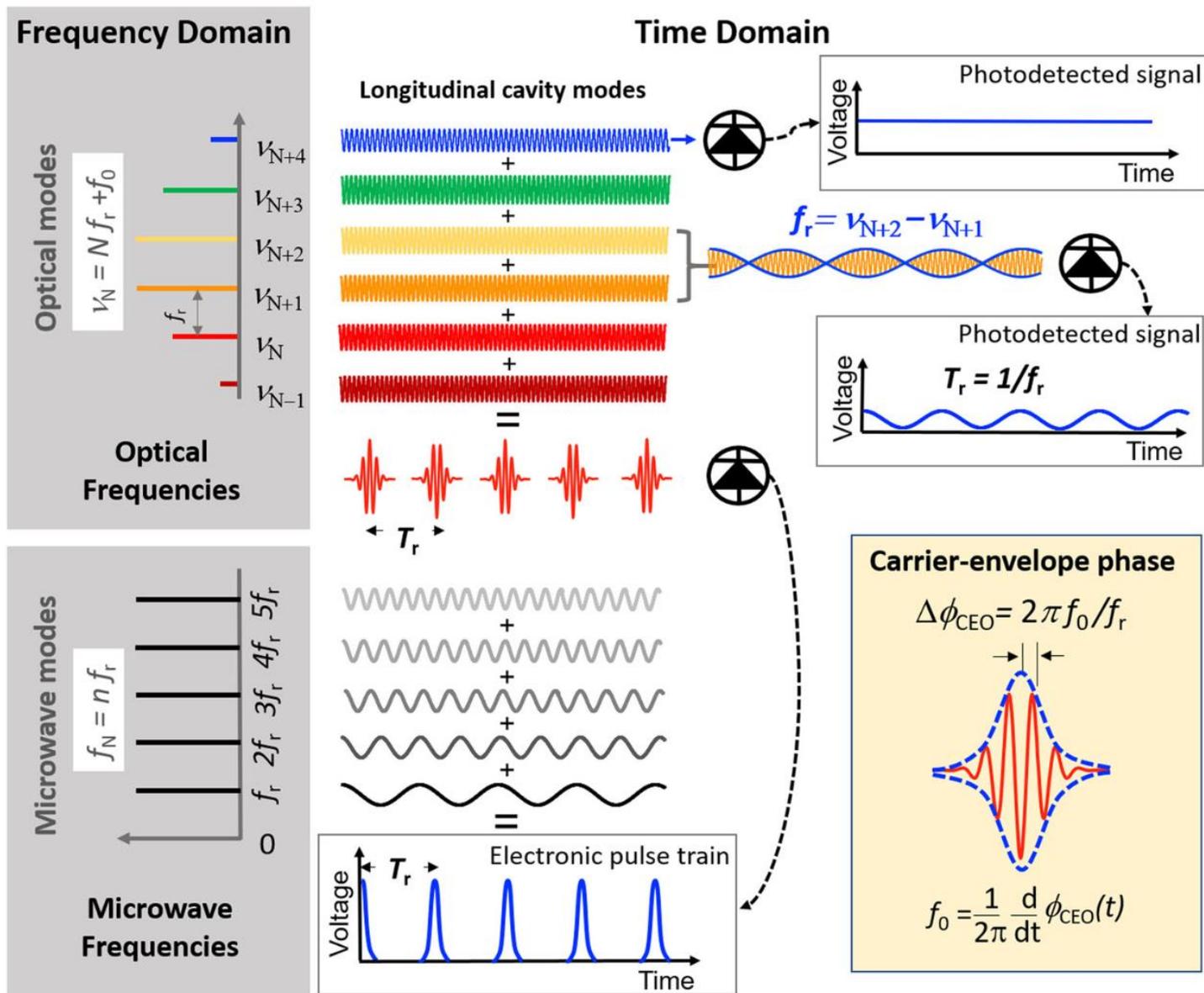
$$A(t + T_r) = A(t) \rightarrow A(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{i2\pi f_r t}$$

$$\begin{aligned} E(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} A(t) e^{i2\pi f_c t} \cdot e^{-i2\pi f t} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n \delta(f - n f_r - f_c) \end{aligned}$$

$$f_N = N f_r + f_0$$



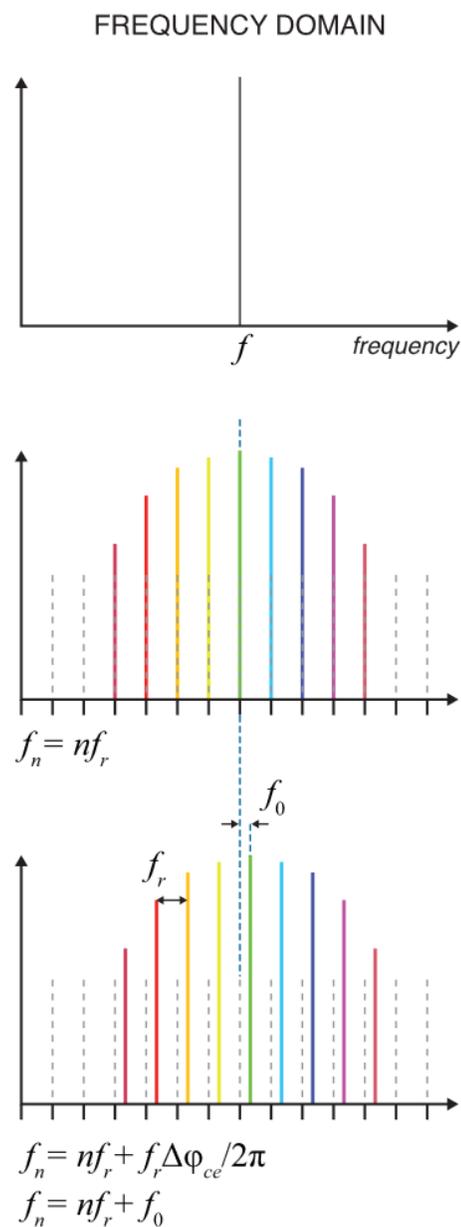
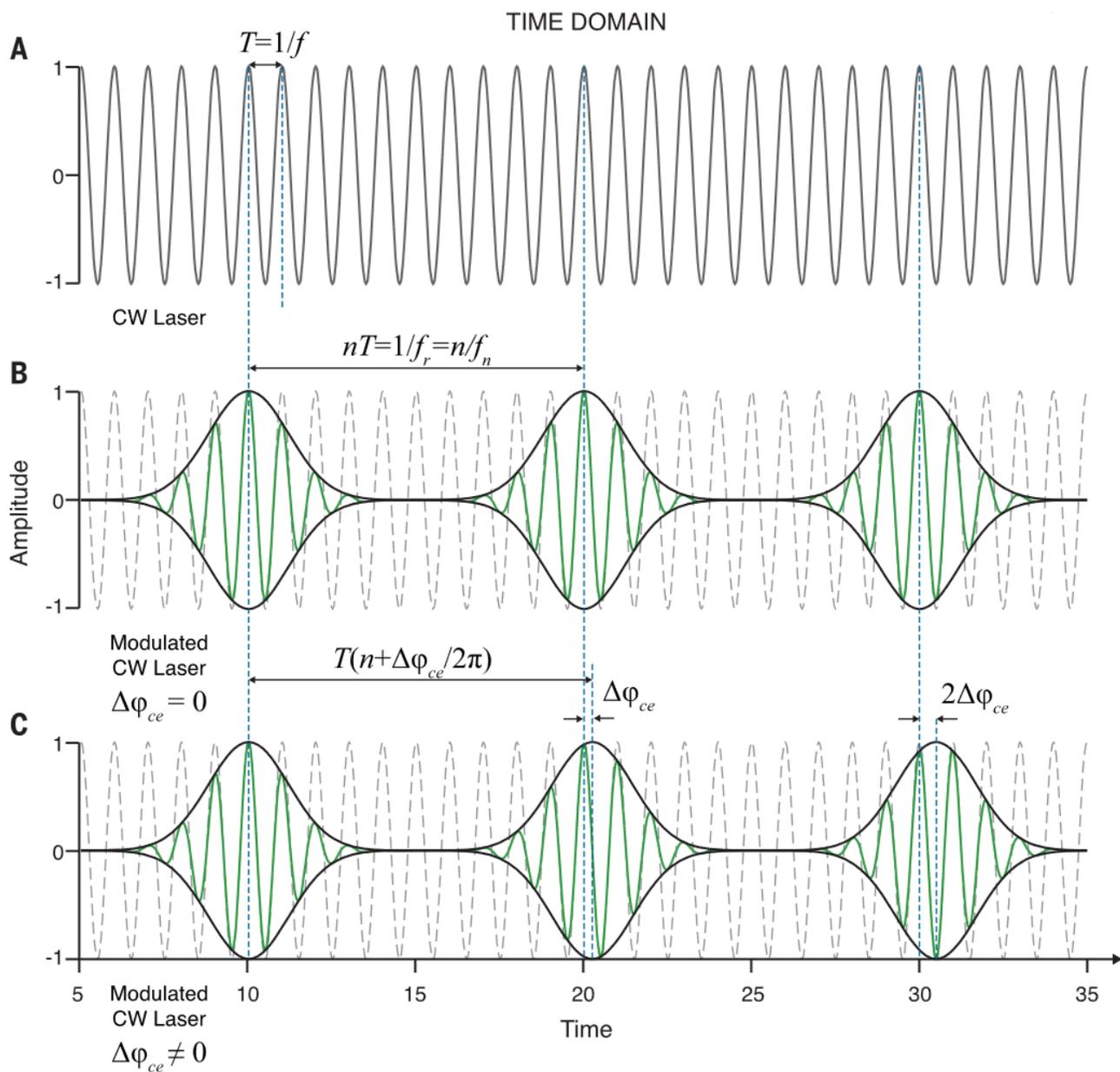
# OFC基本原理 重复频率 $f_r$



脉冲时间间隔:  $T_r = 2L/v_g$

重复频率:  $f_r = 1/T_r$

# OFC基本原理 偏置频率 $f_0$

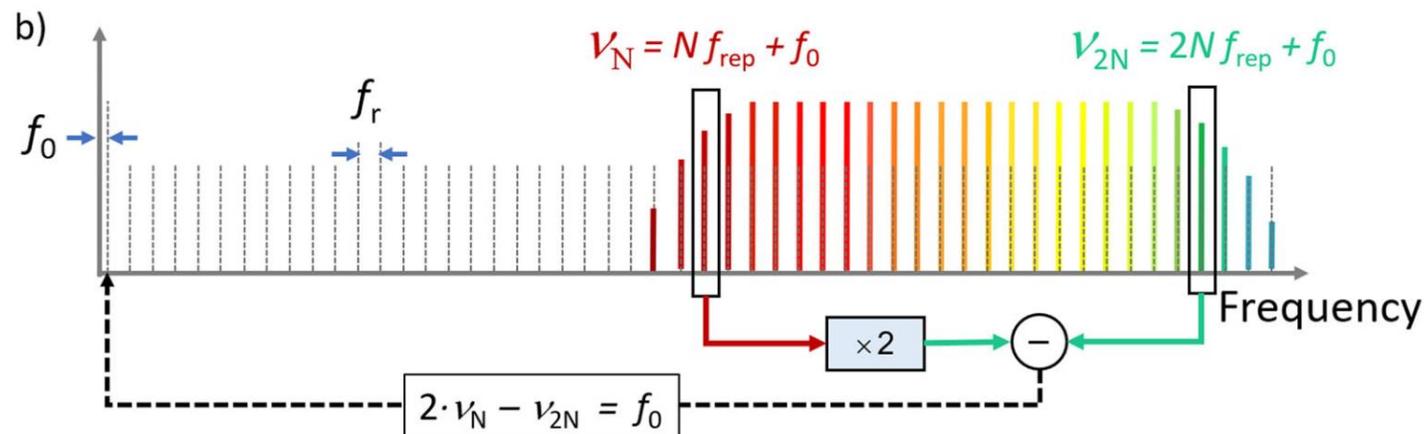


偏置频率（载波  
偏移频率）：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi_{CEO}}{dt}$$

由于色散，相速度和群速度存在差异，所以相邻脉冲峰值处的相位是不同的，相差 $\Delta\phi_{CEO}$

# ● OFC基本原理 $f_r, f_0$ 的测量



MLL腔长: 30cm~3m  $\rightarrow f_r$ : 100MHz~1GHz 属于微波频段, 容易测量

但是通过简单的差频方法无法测量 $f_0$ , 而如果不能测量 $f_0$ , OFC的测量精度将局限于 $\pm f_r/2$ , 也就是大约 $10^{-6}$

$f_0$ 的测量是通过**自参考** (self-referencing) 实现的:

$$f_0 = 2 \cdot \nu_N - \nu_{2N} = 2 \cdot (N f_r + f_0) - (2N \cdot f_r + f_0)$$

虽然这个方法在数学上很简单, 但是在技术上要求OFC的频谱覆盖一个八度 (最大频率超过最小频率的2倍)

早期的MLLs的光谱宽度一般 $< 100\text{nm}$ ，作为对比，中心波长 $800\text{nm}$ 的钛蓝宝石激光器的光学倍频带宽是 $500\text{nm}$ ，而中心波长为 $1550\text{nm}$ 的掺铒光纤激光器的光学倍频带宽是 $1000\text{nm}$ 。

在1990年代，低色散光纤的发展使得利用光纤生成宽带连续谱成为可能，“has the brightness of a laser with the bandwidth of a light bulb.” —— Birks

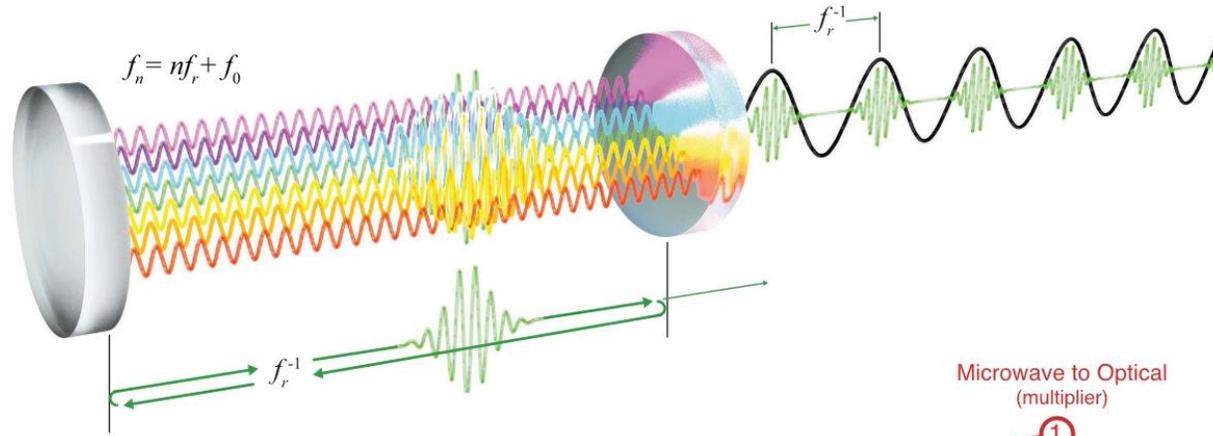
2000年，Theodor W. Hänsch和John L. Hall实现了基于钛蓝宝石激光器的光频梳，并因此获得2005年诺贝尔物理学奖。



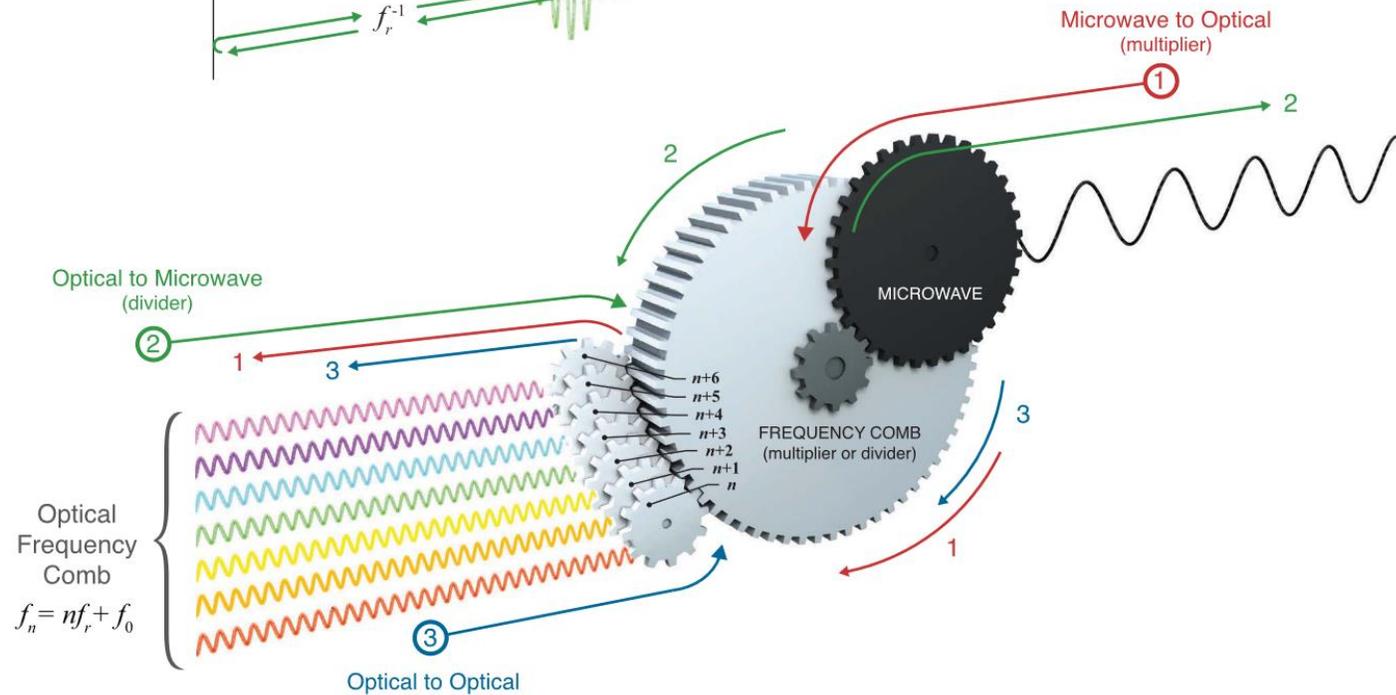
Hänsch (右一) 和 Hall (左一)

# OFC的三种工作模式

A



B



- 微波频率→光频
- 光频→微波频率
- 光频→光频

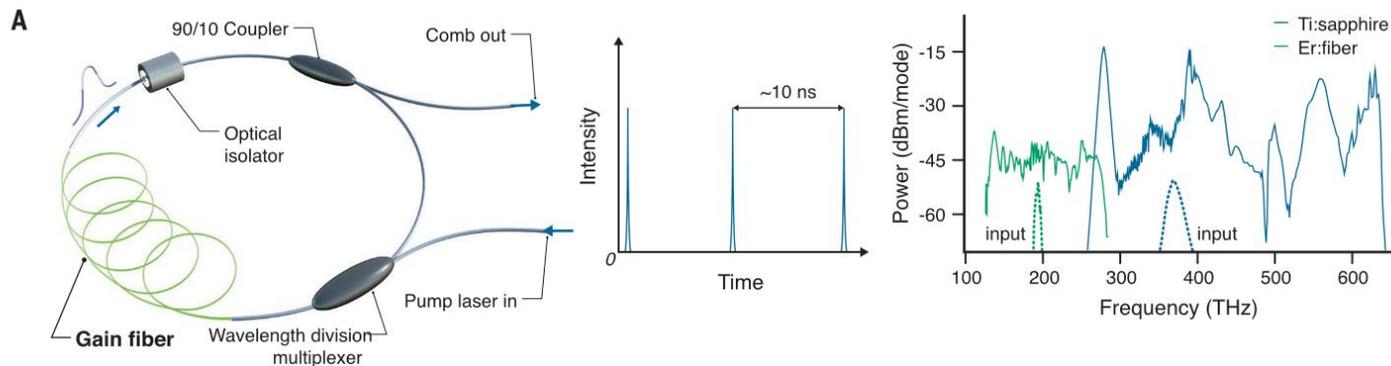
# 目录

1 / 我们如何测量光频？

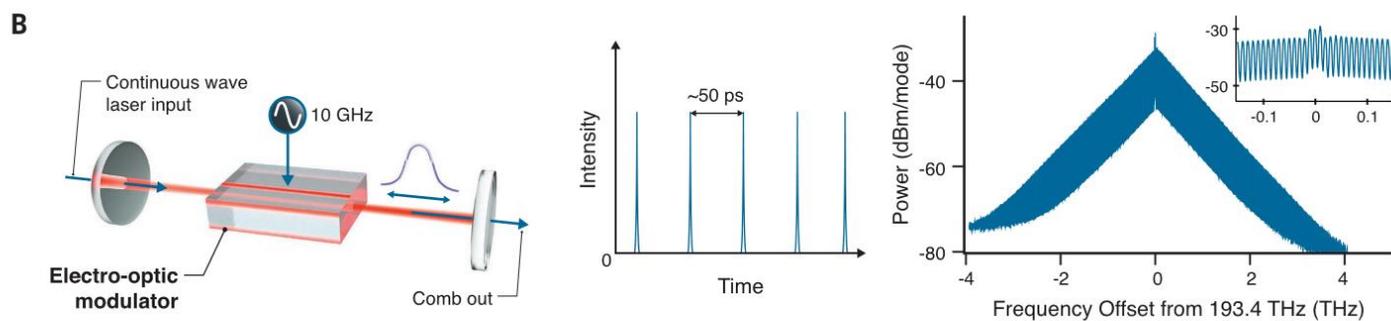
2 / OFC的基本原理

3 / **OFC的实现&分类**

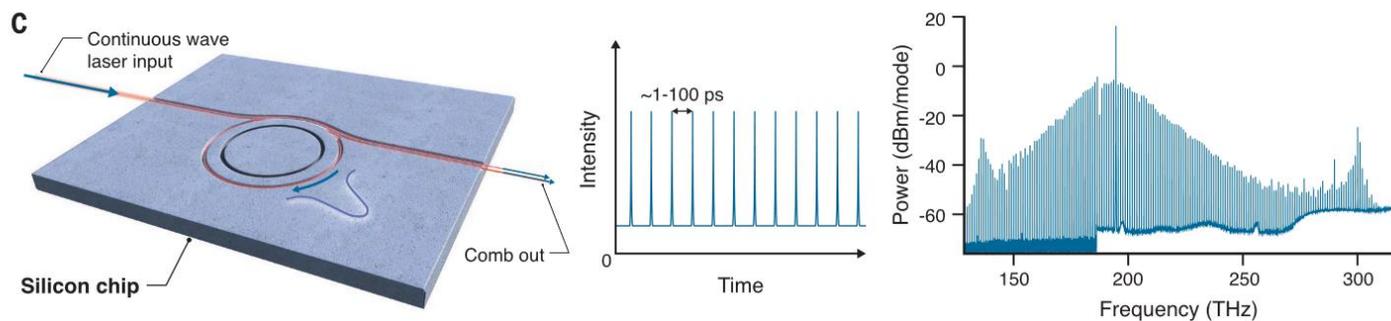
4 / OFC的应用



## 锁模激光器光梳



## 电光调制光梳



## 微腔光梳

**锁模方法：** 主动调制 vs 被动调制

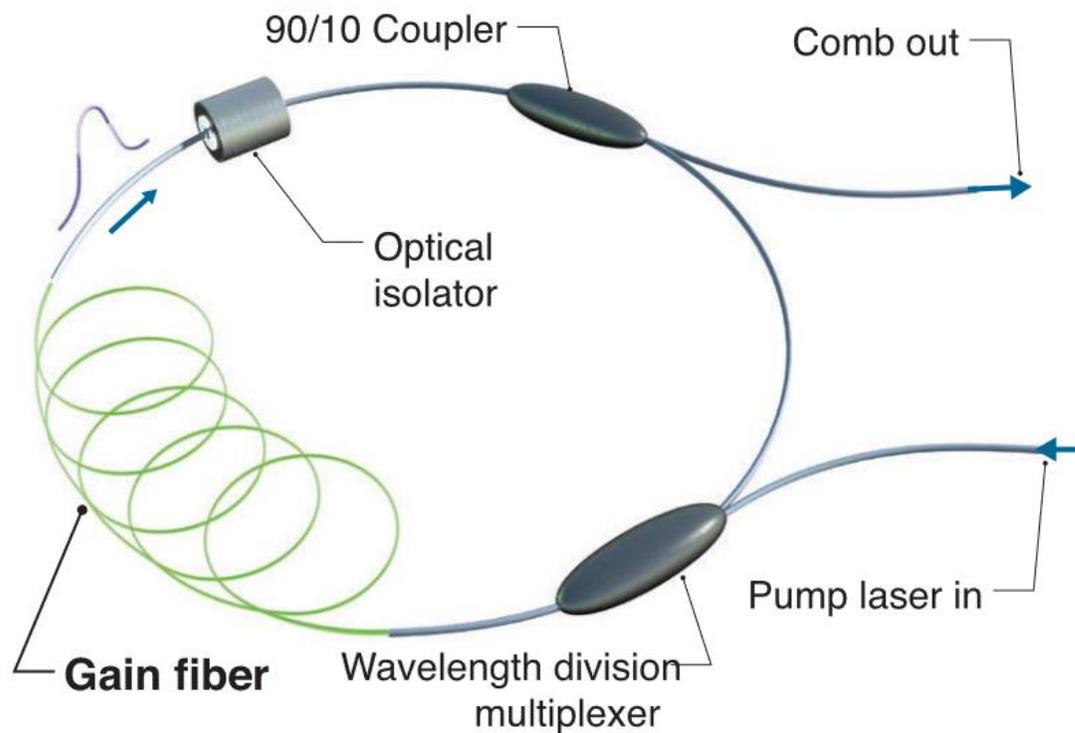
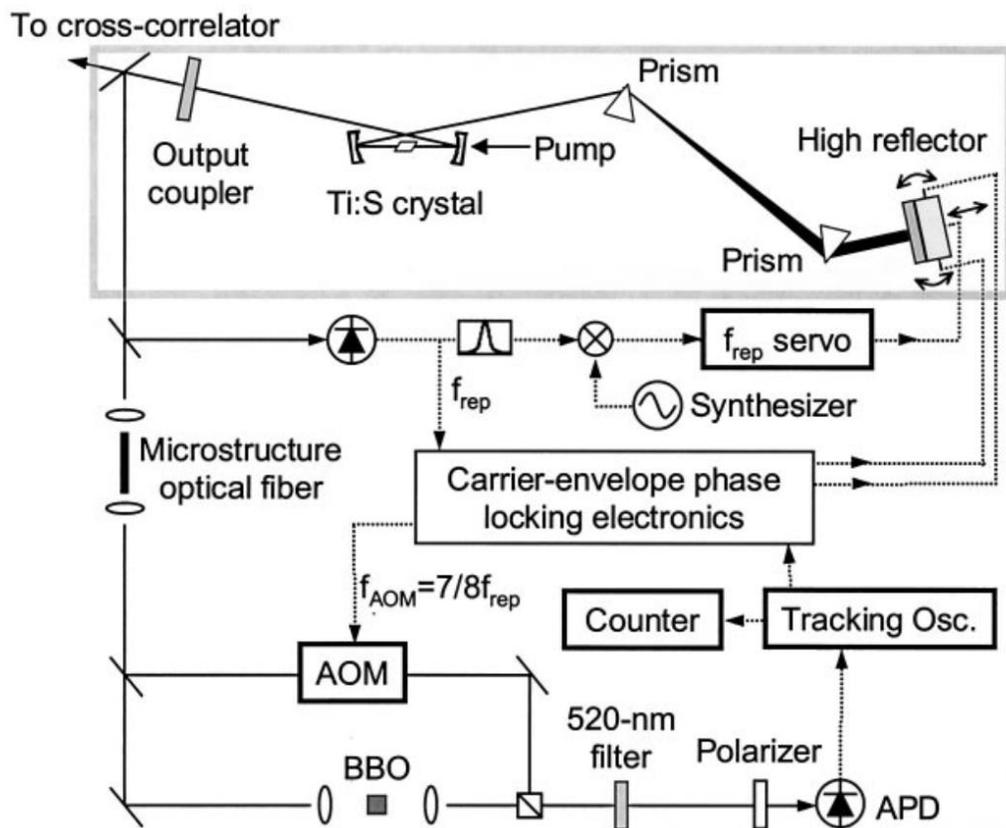
**主动调制：** 通过声光调制器或电光调制器提供外部控制的调制频率

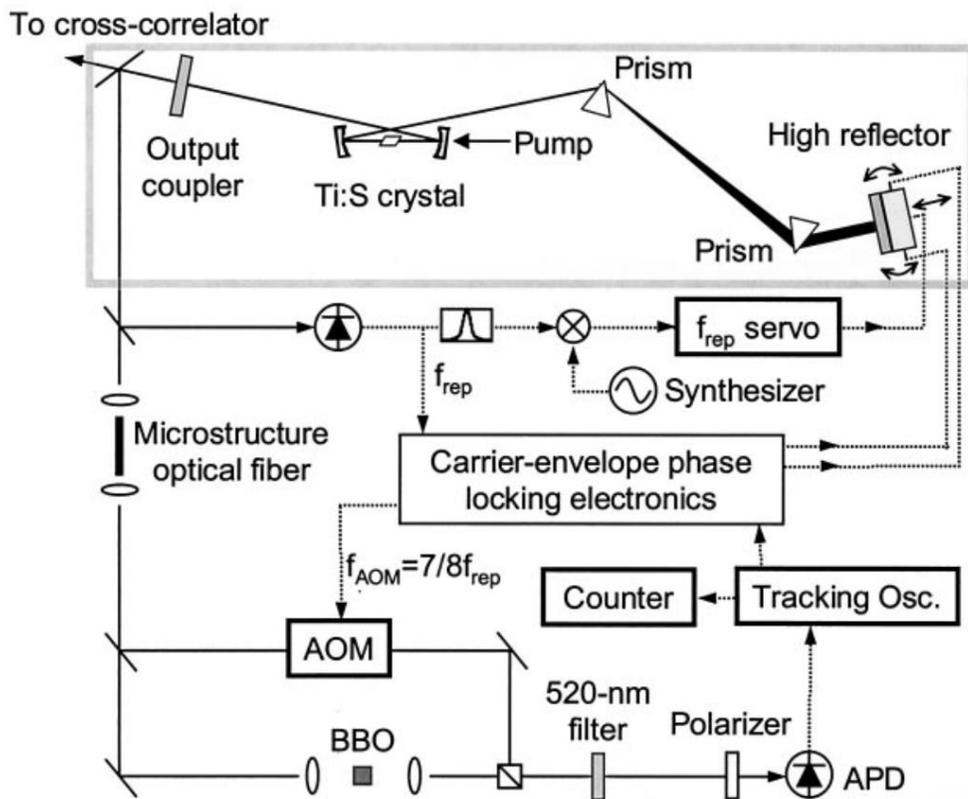
**被动调制：** 通过腔内的饱和吸收体或非线性效应，实现自动锁模

被动调制相比主动调制的优点：

- 脉冲宽度更短
- 结构简单、稳定性高
- 自发锁模
- 成本低、维护简单

实现方式：基于体光学元件的锁模激光器 vs 光纤锁模激光器





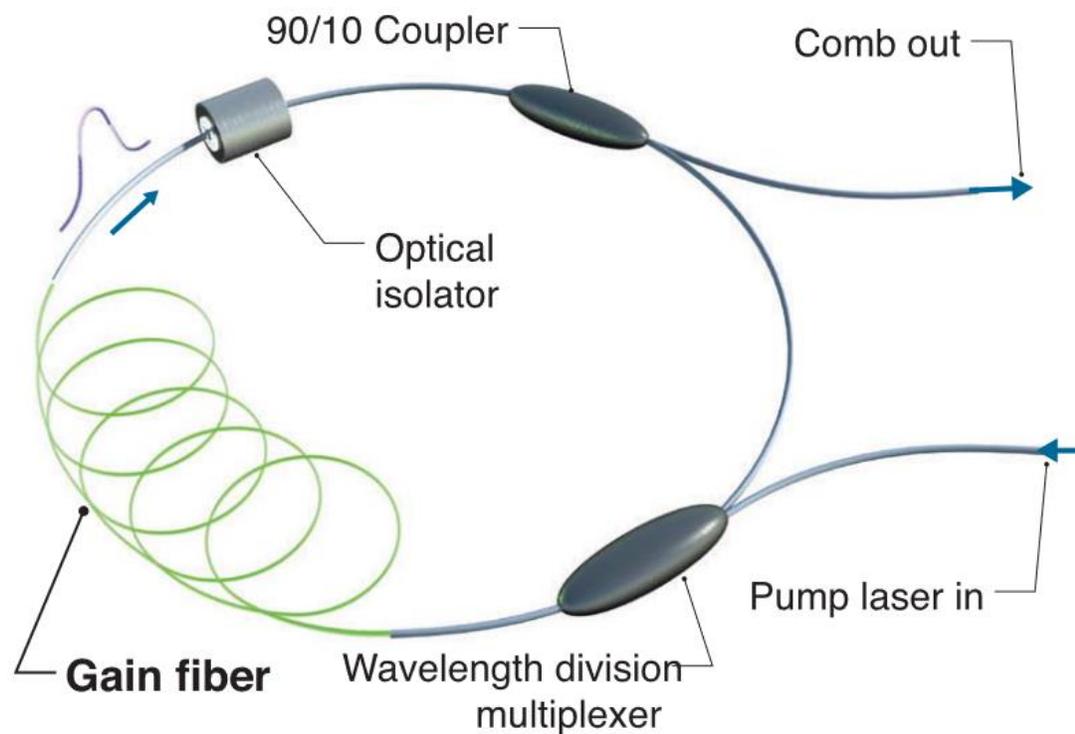
## 优点:

- 高功率输出 (散热好)
- 光梳质量高
- 灵活性强 (材料、腔长, etc.)

## 缺点:

- 结构复杂, 稳定性低
- 调试和维护成本高
- 体积较大, 难以集成应用

**应用场景:** 实验室、高精度材料加工等对光梳质量和功率要求较高的应用的场合



## 优点：

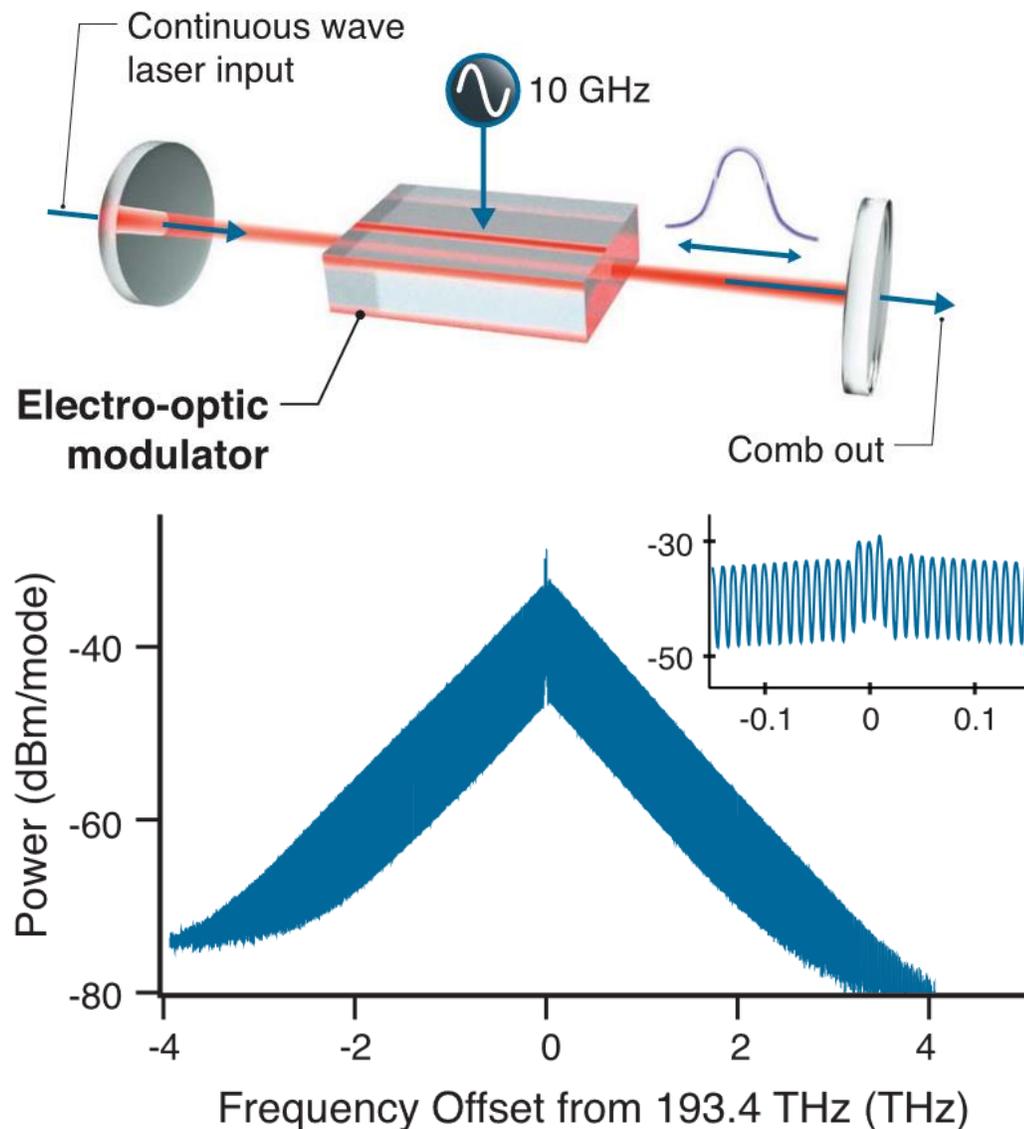
- 结构紧凑、稳定性高
- 易于集成
- 成本较低
- 脉冲宽度较短 (ps~fs)

## 缺点：

- 功率受限
- 模式有限，光束质量和灵活性低

**应用场景：**通信、光纤传感、便捷式激光设备等，对体积和稳定性有较高要求

目前，掺铒光纤锁模激光器已经广泛商用；掺镱（Yb）和掺铥（Tm）光纤，以及其他固态材料的激光器，拓展了频率梳在不同波长范围的选择。



**工作原理：**利用电光调制器的作用，使用微波信号调制连续波激光器，在光谱中生成等间隔的边带频率，这些边带的频率间隔与微波的频率一致

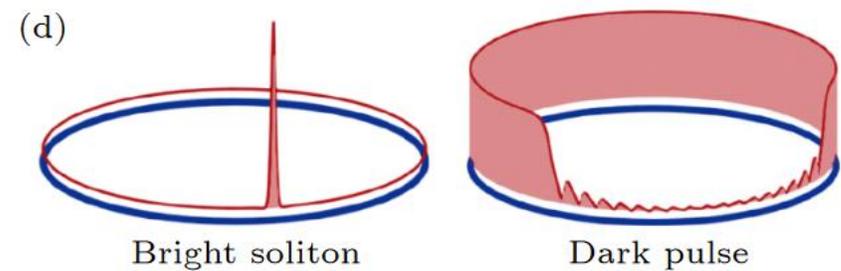
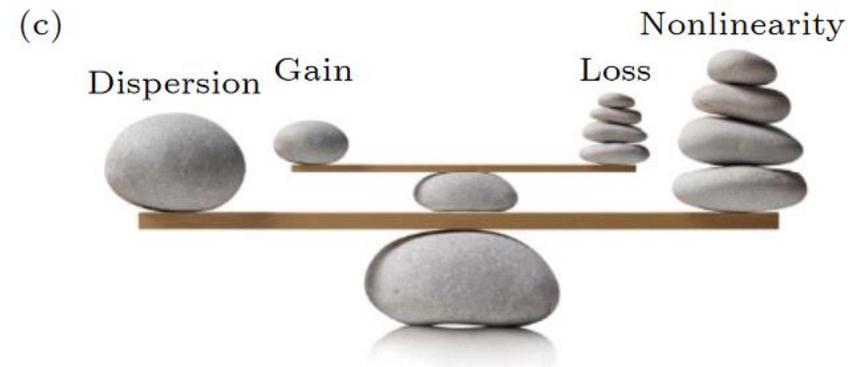
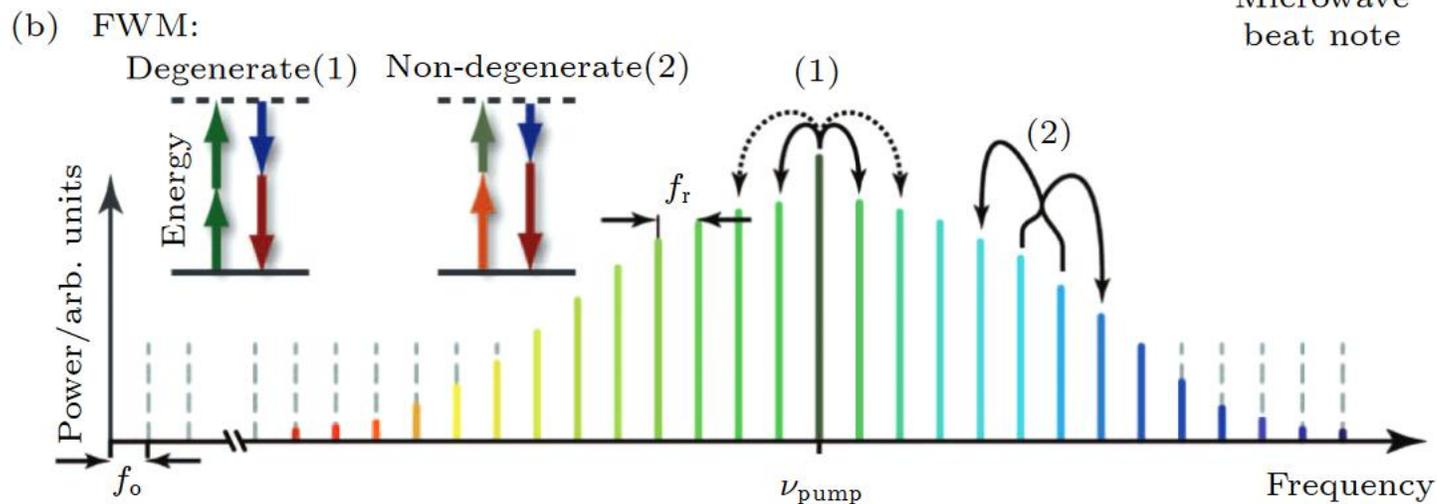
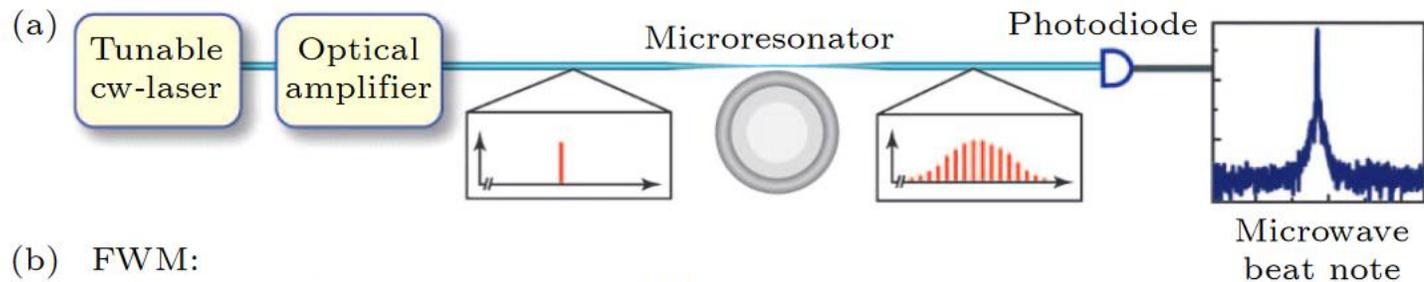
梳齿密度较高，但是频谱范围较窄

## 级联调制器结构

2010年左右，随着电信行业中铌酸锂波导调制器的改进，电光梳系统出现了一种新的结构设计：通过级联多个调制器，并为每个调制器施加适当的相位调整，使得每个调制器进一步增加新的频率线。这种级联方式生成了频谱平坦且宽带的频率梳，可以进一步压缩成短脉冲，用于非线性光谱展宽。然而，由于梳的生成过程是多重倍频的，微波信号的相位噪声可能逐步放大，导致频率梳的“齿”受到噪声影响。

## 噪声控制与自参考

为解决级联系统中的噪声问题，研究人员引入了光学腔滤波器。该滤波器可以有效地将噪声过滤，从而生成一个倍频范围的电光梳，使其可以实现自参考。结合使用纳米光子硅氮化物波导进行高效的光谱展宽，同时优化微波源的噪声水平，现代的电光频率梳的噪声水平接近于模式锁定激光梳，具备更高的稳定性和宽频带。



**微腔光梳：**通过连续激光泵浦高品质因子(Q值)光学微腔产生

微腔光梳的诞生使得产生光梳可以在芯片级的尺度上完成，同时降低了产生光梳所需的功耗；技术与现有的CMOS兼容，适合大规模制备

微腔光梳产生的理论模型:

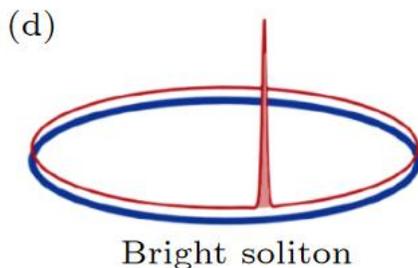
Lugiato-Lefever equation

$$\frac{\partial A(\phi, T)}{\partial T} = \frac{iD_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \phi^2} + ig |A|^2 A - i\delta\omega A - \frac{\kappa}{2} A + f$$

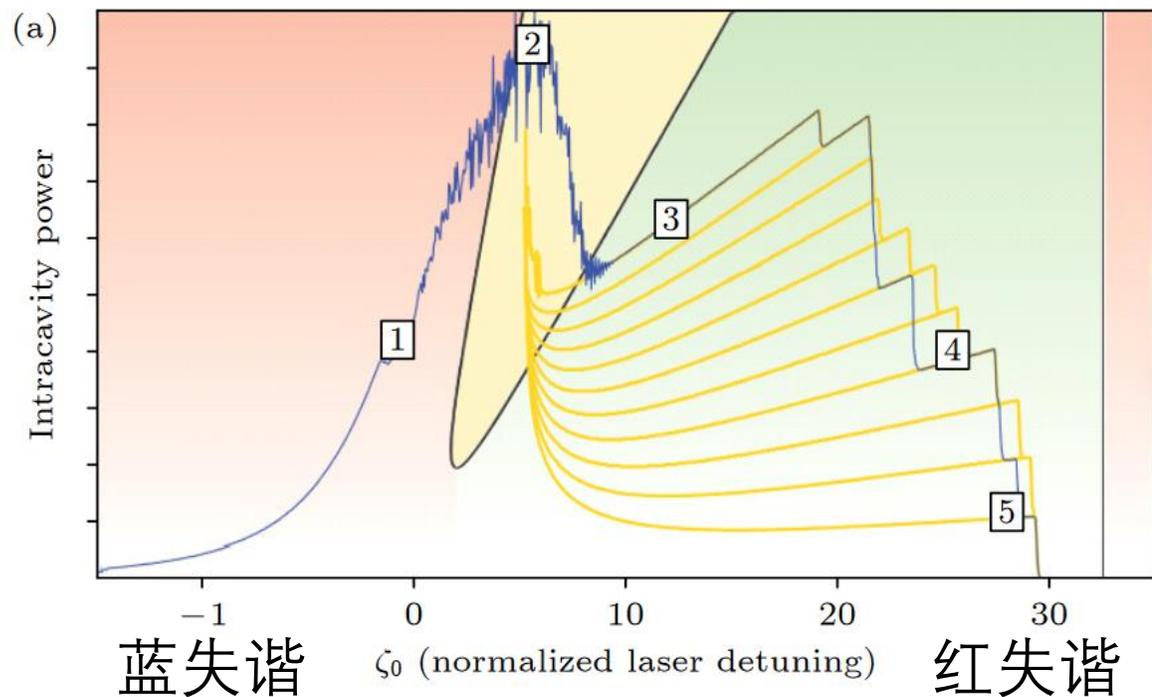
其中 $A$ 为群速度参考系下的腔内脉冲包络,  $D_2$ 和 $\kappa$ 分别表示微腔的二阶色散和耗散,  $g$ 为微腔的克尔非线性系数,  $\delta\omega$ 表示泵浦激光的失谐,  $f$ 是泵浦项

对于亮孤子光梳有理论解, 其中 $\varphi$ 是孤子与泵浦背景场的相位差

$$A = \sqrt{\frac{2\delta\omega}{g}} \operatorname{sech}\left(\phi \sqrt{\frac{2\delta\omega}{D_2}}\right) e^{i\varphi}$$



对于暗脉冲光梳, 目前则缺乏很好的理论解析解, 更多借助数值模拟对其进行研究.



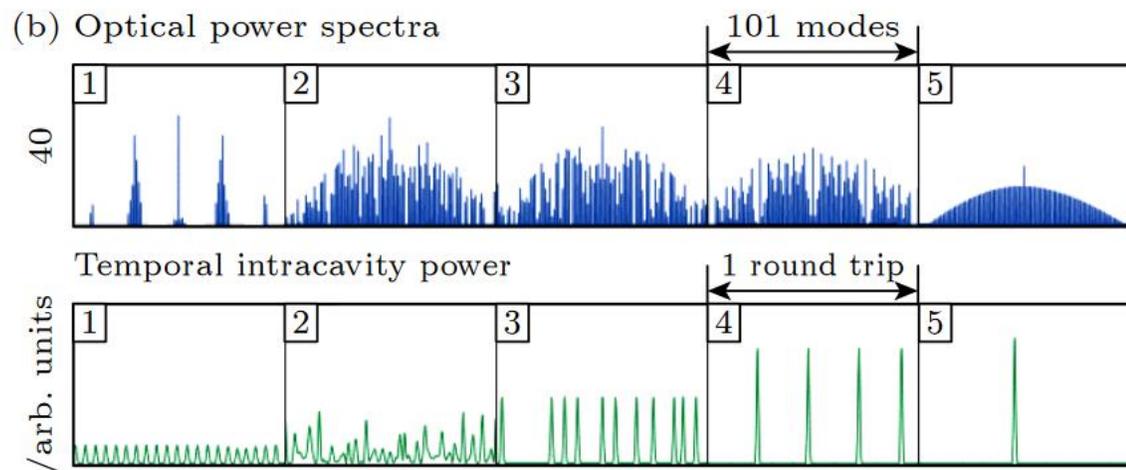
微腔光梳的产生过程

初级梳

→ 调制不稳定 (混沌态)

→ 孤子态

在实验上产生稳定的孤子态并非易事，主要的困难在于热效应的影响。微腔材料一般具有正的热折变系数，从混沌态到孤子态微腔温度瞬间降低，产生巨大失谐

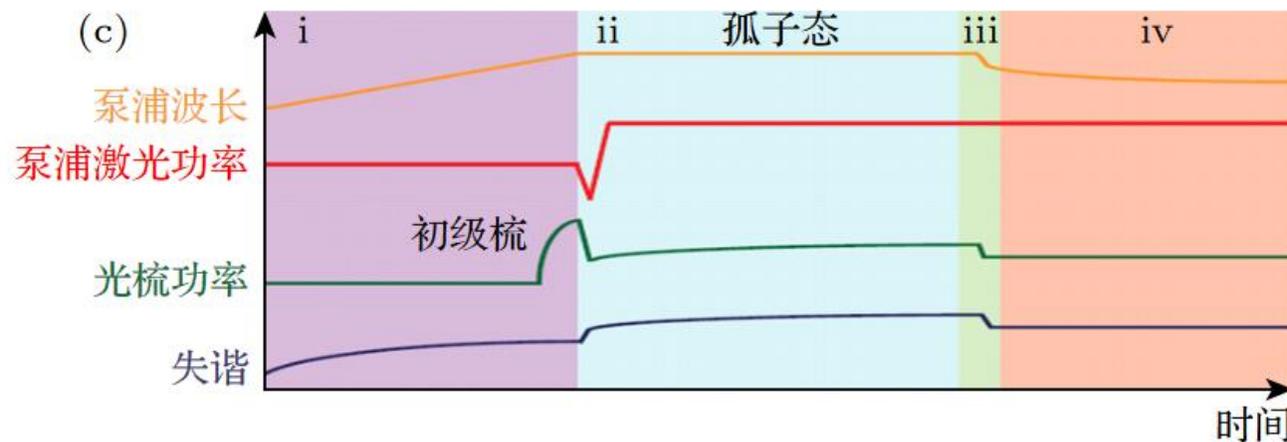
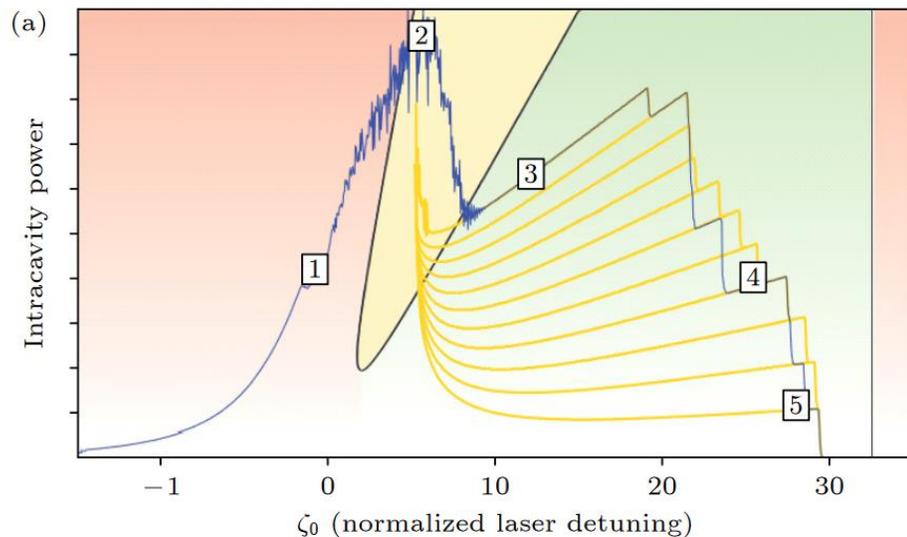


## 1. 快速扫频

对于热效应不太显著的微腔，可以通过快速扫频来实现，由于微腔的热响应一般较慢，当激光扫频速度足够快时，腔内光场可以在微腔被加热之前到达孤子态。

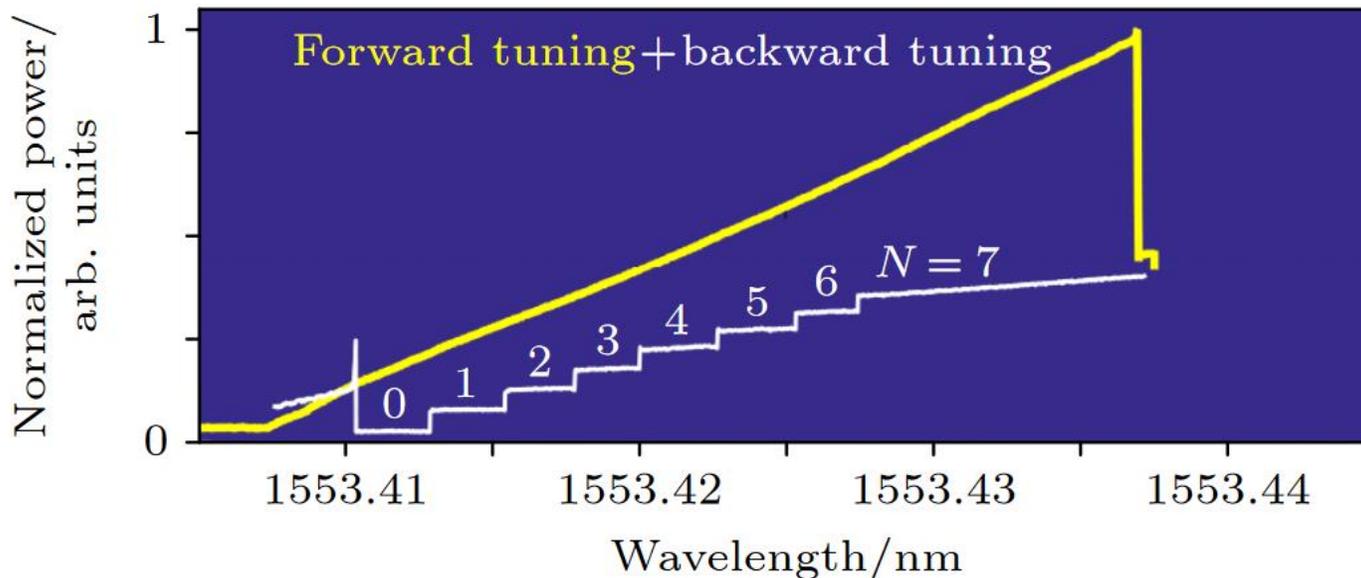
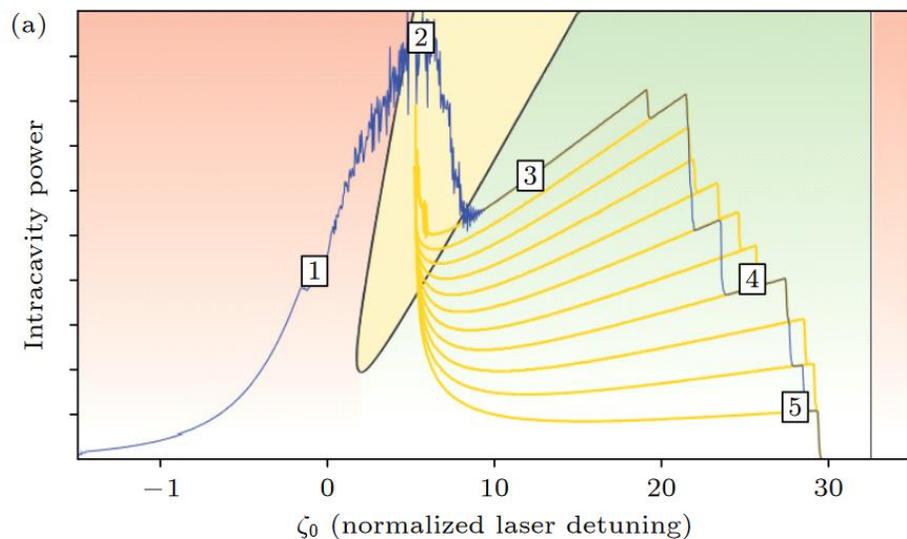
2013年，Herr等就是通过快速扫频的方法在 $\text{MgF}_2$ 微腔中产生了锁模的孤子光梳。

快速扫频法操作简单，实验装置简单，但一般仅适用于本身热效应较小的平台体系，对于热效应较大的材料则较难适用。



## 2. 功率踢

(1) 泵浦激光从蓝失谐扫频进入腔模, 腔内光场功率不断增大; (2) 利用声光调制器调节泵浦激光的功率, 使得泵浦激光功率先降低诱导孤子产生, 随后迅速升高来补偿腔内功率下降稳定住腔内温度使得孤子能够稳定存在; (3) 打开锁定伺服系统, 通过反馈泵浦激光器的频率来锁定孤子的功率; (4) 泵浦激光和腔模的失谐被完全锁定, 孤子能够长期稳定存在. 这一方法对时序的控制较为严格, 且由于声光调制器响应带宽有限, 一般适用于腔内光子寿命较长即高品质因子的微腔中产生光梳.

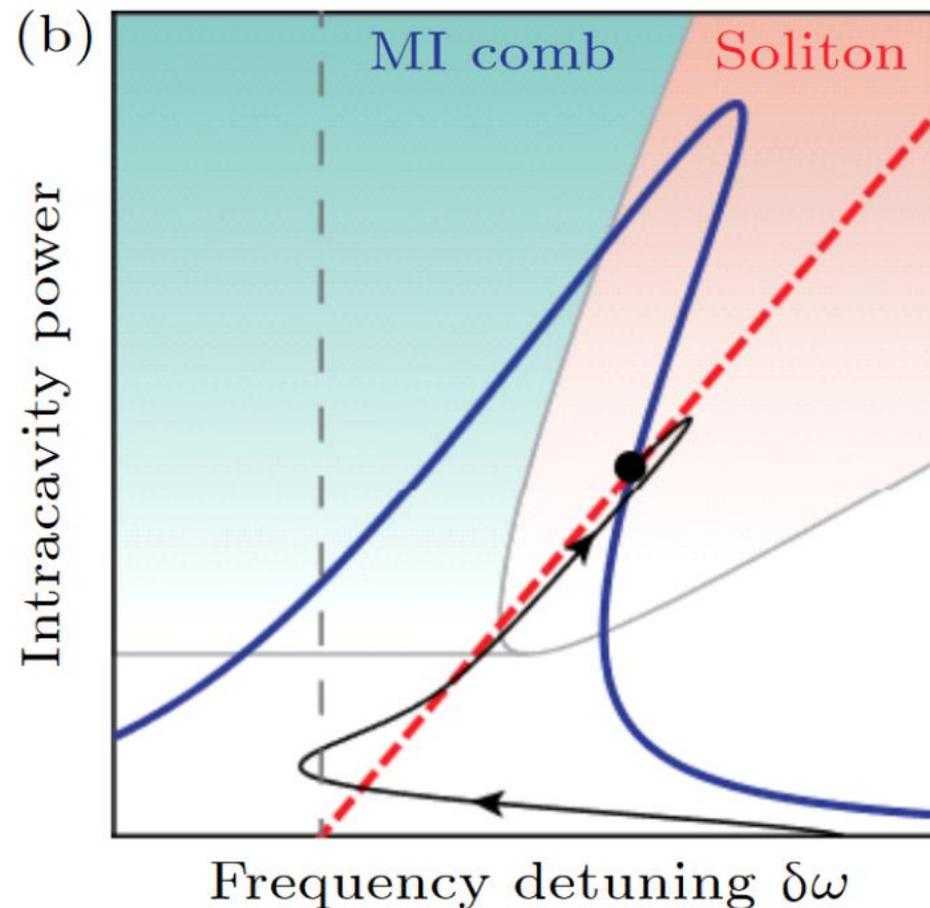


## 反向扫频:

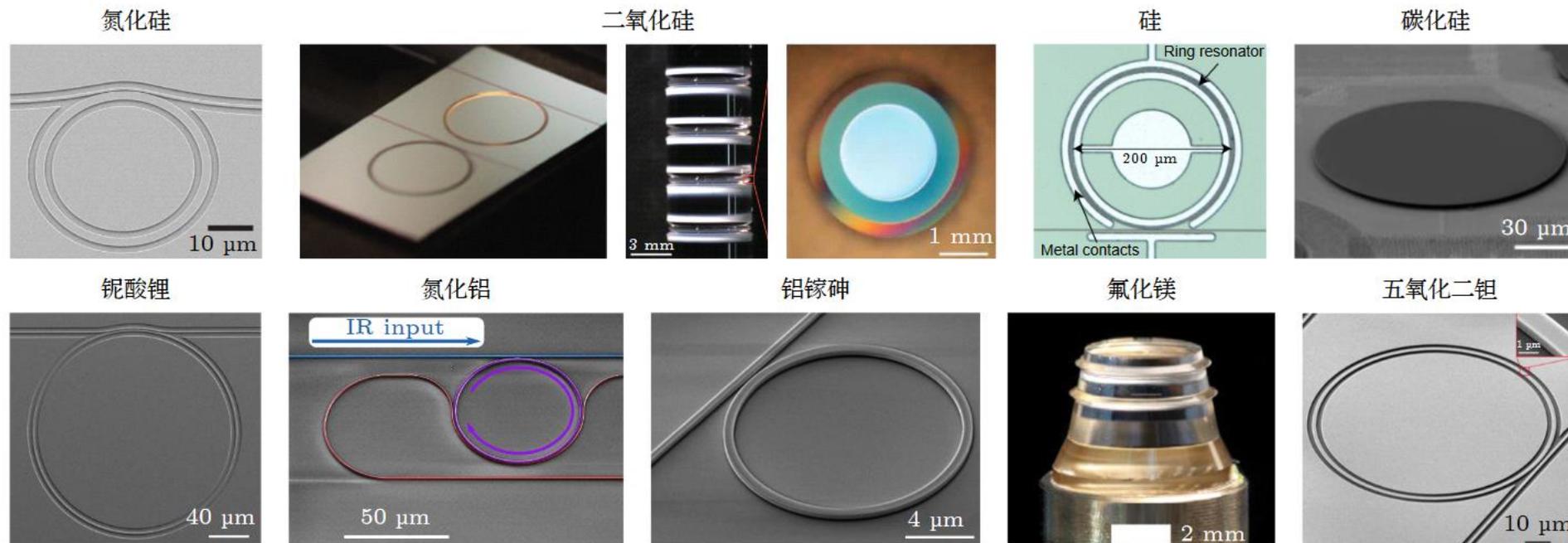
由于单孤子对应的频谱包络较为光滑整齐,且在光电探测器上探测到的拍频信号信噪比较高,因此实验上一般倾向于产生单孤子态,这通常是通过反向扫频来实现.具体操作如图所示,当产生多孤子态后缓慢反向扫频,由于热效应的影响,孤子数量将会逐渐减小最终达到单孤子态.反向扫频是目前实验上使用最为普遍的由多孤子态达到单孤子态的方法.

## 自注入锁定技术

除了上文提到的扫频法之外,微腔光梳还可以通过自注入锁定法产生.自注入锁定法激光器和微腔之间没有光隔离器,入射到微腔的光场与微腔相互作用后返回,反馈激光器腔内光场.当激光器初始失谐在一定范围内且满足相应的反馈相位条件时,系统会沿着图中的黑色动力学曲线自动达到孤子态.目前已经可以通过自注入锁定的方法在集成氮化硅微腔中产生了亮孤子和暗脉冲光梳.相较于扫频法,自注入锁定法不仅简化了产生光梳的过程,还减少了对调控激光扫频等电子器件的需求,但自注入锁定法对于反馈相位条件要求较为严格,这也给芯片的封装增加了难度.



# 各种平台上的微腔光梳



- **氮化硅**可以在近红外光谱中提供宽阔的透明窗口,同时具有较低的色散,有利于孤子的产生,最重要的是氮化硅与集成光子学兼容,允许在单个芯片上集成多个组件,也方便进行色散设计,目前已经成为最主流的微腔光梳材料平台之一。
- **铌酸锂**最大的特点是其具有很强的电光效应,可以外部施加电压对光梳进行调控。
- .....

## 目录

1 / 我们如何测量光频？

2 / OFC的基本原理

3 / OFC的实现&分类

4 / OFC的应用

## 1. 微波/光学信号合成

光梳合成微波的一个优势是可以很容易合成高载波频率的微波信号，同时相比于传统的电学振荡回路及晶振等方法产生的微波噪声低很多，这些高稳定性的微波信号在军事、通信和测量中具有重要应用

光梳应用于光学频率的合成，通过精准调节和锁定微腔光梳的重频和偏置频率，可以实现任意光学信号的精准合成

## 2. 精密时间/频率测量；光学原子钟

光频梳可以将光学频率转换为易于测量的微波频率，从而实现更高精度的频率计量。

光频梳的一个重要应用是高精度的时间/频率传输. TWOTFT (Two-Way Optical Time/Frequency Transfer) 通过发送和接收相对的光频梳脉冲列，实现两个远程时钟或频率源之间的时间和频率同步，在跨洲际的时间/频率传输、高精度科学实验（如粒子加速器、大型天文台）等方面提供飞秒级别的时间传输精度

## nature

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾ [Subscribe](#)

[nature](#) > [articles](#) > article

Article | Published: 05 October 2022

### Free-space dissemination of time and frequency with $10^{-19}$ instability over 113 km

[Qi Shen](#), [Jian-Yu Guan](#), [Ji-Gang Ren](#), [Ting Zeng](#), [Lei Hou](#), [Min Li](#), [Yuan Cao](#), [Jin-Jian Han](#), [Meng-Zhe Lian](#), [Yan-Wei Chen](#), [Xin-Xin Peng](#), [Shao-Mao Wang](#), [Dan-Yang Zhu](#), [Xi-Ping Shi](#), [Zheng-Guo Wang](#), [Ye Li](#), [Wei-Yue Liu](#), [Ge-Sheng Pan](#), [Yong Wang](#), [Zhao-Hui Li](#), [Jin-Cai Wu](#), [Yan-Yan Zhang](#), [Fa-Xi Chen](#), [Chao-Yang Lu](#), ... [Jian-Wei Pan](#)  [+ Show authors](#)

[Nature](#) **610**, 661–666 (2022) | [Cite this article](#)

10k Accesses | 122 Altmetric | [Metrics](#)

### Abstract

Networks of optical clocks find applications in precise navigation<sup>1,2</sup>, in efforts to redefine the fundamental unit of the ‘second’<sup>3,4,5,6</sup> and in gravitational tests<sup>7</sup>. As the frequency instability for state-of-the-art optical clocks has reached the  $10^{-19}$  level<sup>8,9</sup>, the vision of a global-scale optical network that achieves comparable performances requires the dissemination of time and frequency over a long-distance free-space link with a similar instability of  $10^{-19}$ . However, previous attempts at free-space dissemination of time and frequency at high precision did

## 3. 高精度超快距离测量

双梳测距利用两台光频梳以略微不同的重复率工作，通过线性光学采样（Linear Optical Sampling, LOS）实现远距离的高精度距离测量。

在双梳测距中，两个光频梳的微小重复率差产生了一个缓慢的时间序列，从而可以在低速探测器上记录下亚皮秒级的时间信息。这一技术允许光频梳在超长距离（如千米级）的范围内实现毫米甚至纳米级别的距离分辨率。此外，由于双梳技术无需移动部件，光频梳的距离测量可以实现高速度和高重复率，特别适用于要求高速精确测距的场景，如精密制造、空间探测等

## nature photonics

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾ [Subscribe](#)

[nature](#) > [nature photonics](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | Published: 24 May 2009

### Rapid and precise absolute distance measurements at long range

[I. Coddington](#) , [W. C. Swann](#), [L. Nenadovic](#) & [N. R. Newbury](#) 

[Nature Photonics](#) **3**, 351–356 (2009) | [Cite this article](#)

9486 Accesses | 721 Citations | 12 Altmetric | [Metrics](#)

#### Abstract

The ability to determine absolute distance to an object is one of the most basic measurements of remote sensing. High-precision ranging has important applications in both large-scale manufacturing and in future tight formation-flying satellite missions, where rapid and precise measurements of absolute distance are critical for maintaining the relative pointing and position of the individual satellites. Using two coherent broadband fibre-laser frequency comb sources, we demonstrate a coherent laser ranging system that combines the advantages of time-of-flight and interferometric approaches to provide absolute distance measurements, simultaneously from multiple reflectors, and at low power. The pulse time-of-flight yields a precision of 3  $\mu\text{m}$  with an ambiguity range of 1.5 m in 200  $\mu\text{s}$ . Through the optical carrier phase, the precision is improved to better than 5 nm at 60 ms, and through the radio-frequency phase the ambiguity range is extended to 30 km, potentially providing 2 parts in  $10^{13}$  ranging at long distances.

## 4. 精密光谱测量

### 双梳光谱系统 (Double comb spectroscopy, DCS)

这种方法的原理是先将一个光梳通入待测气体, 再与另一个重频略有差别的光梳耦合在一起, 用光电探测器探测两个光梳梳齿之间的拍频, 不同频率拍频的强度就蕴含着光谱吸收信息, 这样就可以把光谱信息从光频映射到电子仪器方便精密探测的微波波段, 从而实现光谱的快速精确测量

### 5. 光通信:

微腔光梳的每一根梳齿都是高相干性的激光, 可以被单独编码传输信息, 而且微腔光梳的重频较大, 能够很好地与ITU通道间隔匹配, 有望取代传统波分复用通信系统中的激光器阵列, 使得光通信系统小型化甚至实现芯片级光通信系统. Marin-Palomo等已完成相关实验演示, 利用微腔光梳进行波分复用通信的最大通信速率已经超过50 Tbit/s.

1. Fortier, T., Baumann, E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications. *Commun Phys* **2**, 153 (2019).
2. Scott A. Diddams et al. ,Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum.*Science* **369**,eaay3676(2020).
3. 金星, 肖莘宇, 龚旗煌, 杨起帆. 微腔光梳的产生、发展及应用[J]. 物理学报, 2023, 72(23): 234203-1-234203-15.
4. 陈豪敬, 肖云峰. 集成微腔光频梳在精密测量中的应用 (特邀) [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210560.
5. 魏志义. 2005年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J]. 物理, 2006, 35(03): 213-217.
6. Birks, T. A., Wadsworth, W. J. & Russell, P. S. J. Supercontinuum generation in tapered fibers. *Opt. Lett.* **25**, 1415–1417 (2000).
7. Marin-Palomo, P., Kemal, J., Karpov, M. et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications. *Nature* **546**, 274–279 (2017).  
<https://doi.org/10.1038/nature22387>