



超短脉冲激光技术 Ultrashort Pulse Laser

王艺霖

2024年12月3日

目录

1

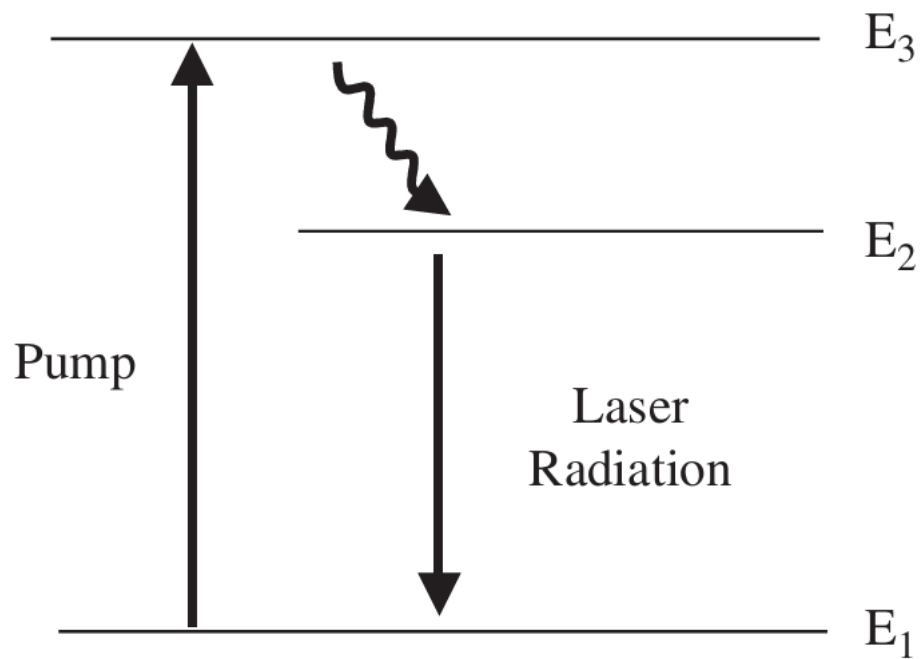
／ 纳秒脉冲激光

2

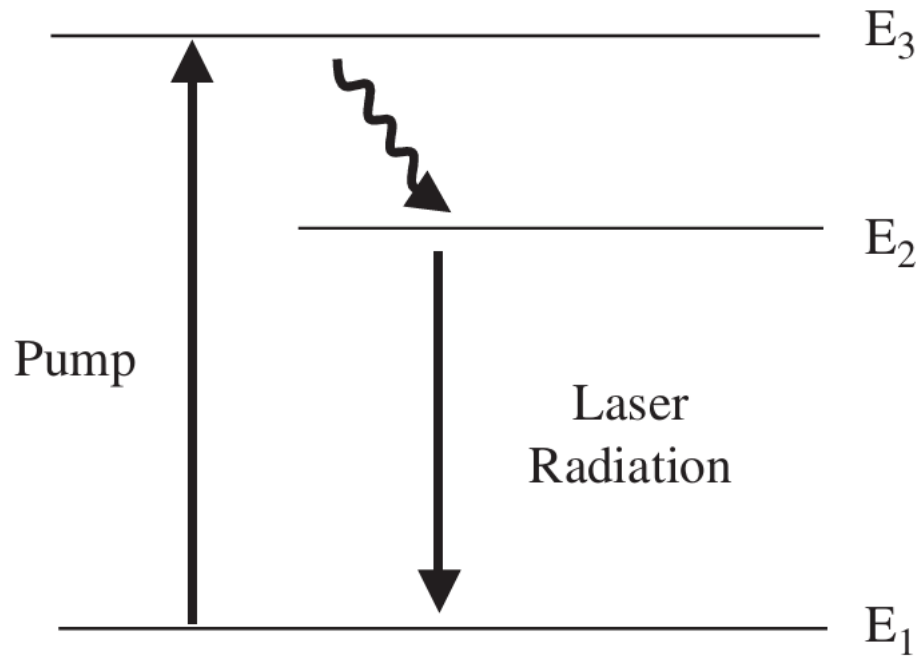
／ 皮秒/飞秒脉冲激光

3

／ 啁啾脉冲放大技术 (CPA)



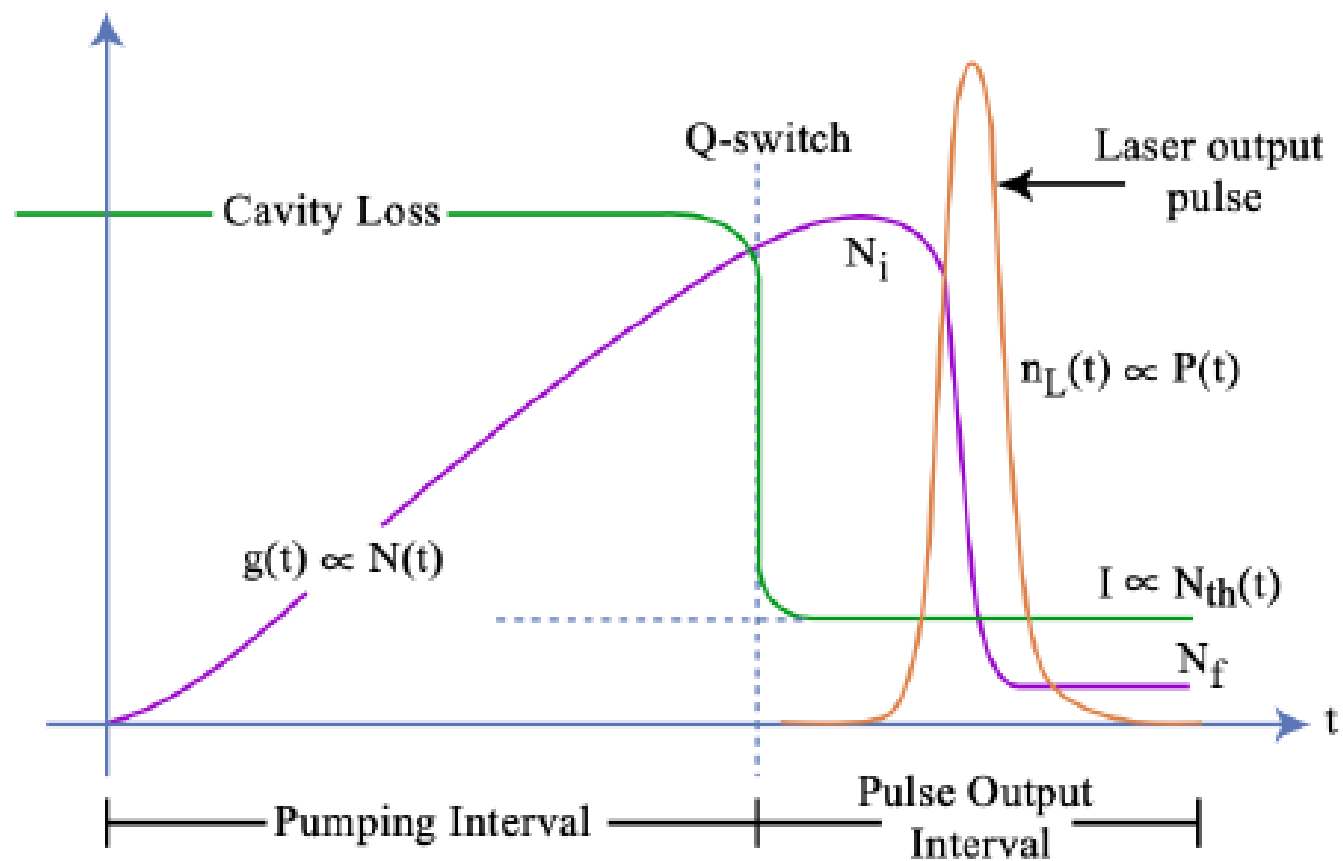
- 激励/泵浦→粒子数反转
- 高能级→自发辐射、受激辐射→低能级
- 光学谐振腔
- 系统工作在稳态, 粒子在各能级间的分布不随时间变化



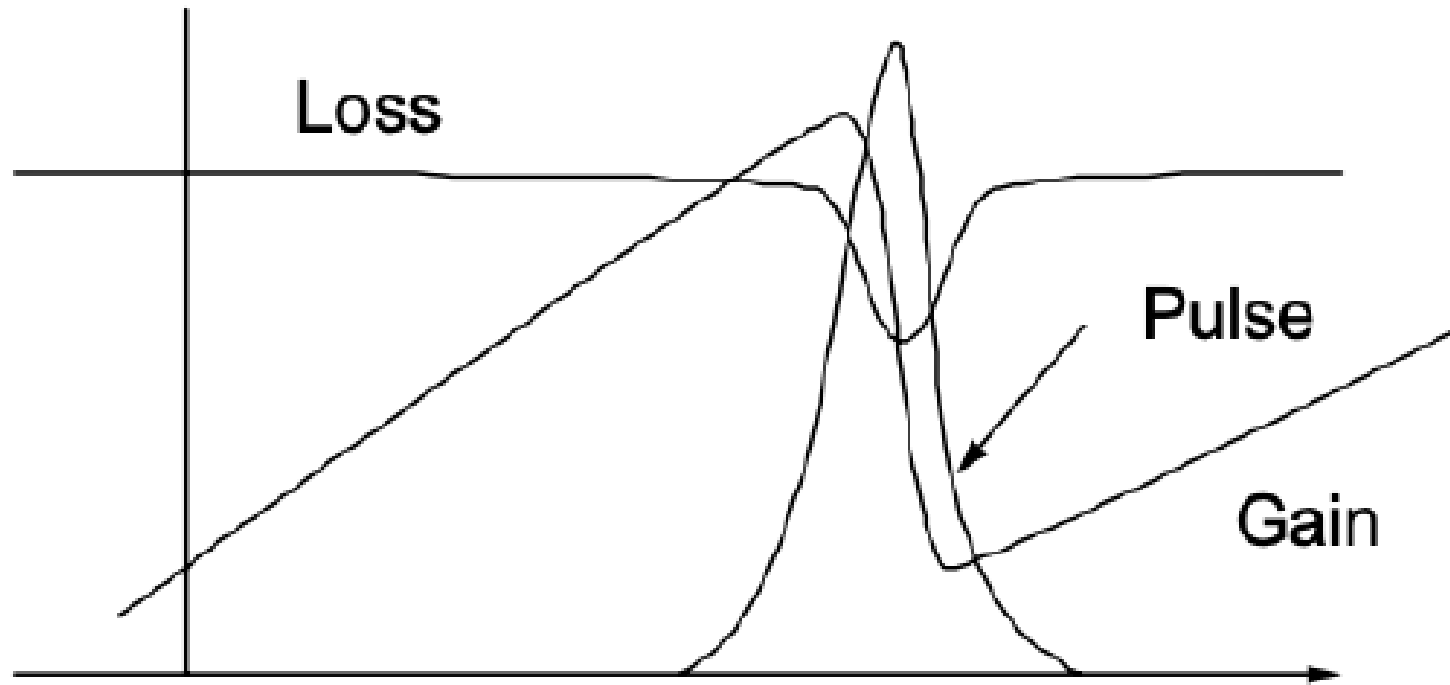
$$\text{Quality factor: } Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Energy Stored}}{\text{Energy dissipated per cycle}}$$

Q开关:

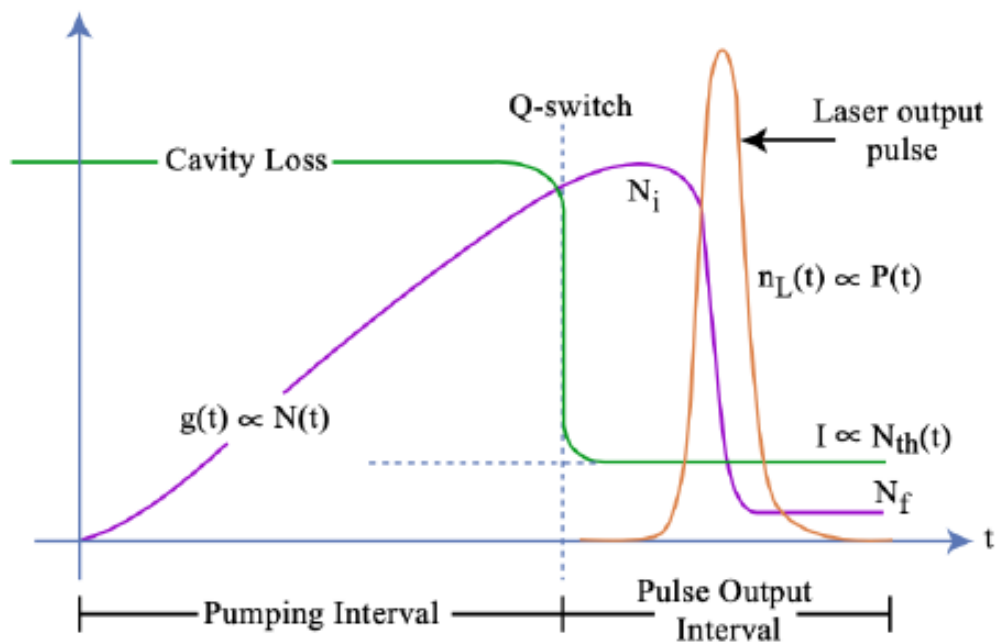
- 低Q值, 高耗散, 粒子积累在高能级上
- 高Q值, 低耗散, 积累在能级上的粒子迅速跃迁, 形成脉冲
- 主动调Q: $T \sim 1ns, f_r \sim 1 - 100kHz$
- 被动调Q: $T < 1ns, f_r \sim 1MHz$



- 主动调Q: $T \sim 1ns, f_r \sim 1 - 100kHz$



- 被动调Q: $T < 1ns, f_r \sim 1MHz$



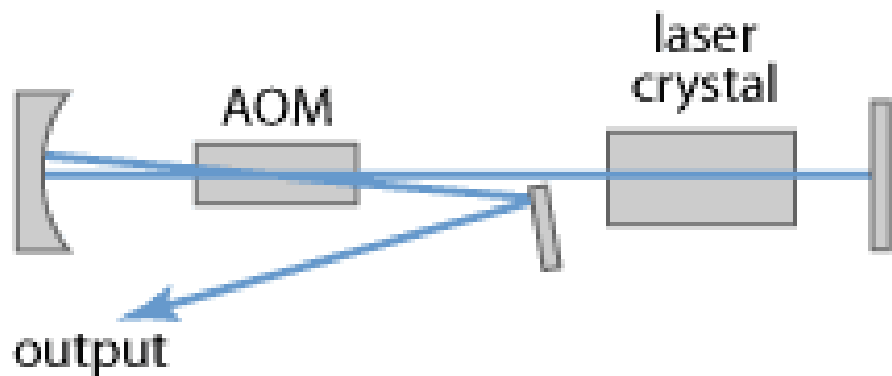
单纯的Q开关方法存在的问题:

高 f_r 时脉冲积累能量较低, 增益较弱, 导致脉冲宽度增加

Cavity dumping: 先将脉冲能量储存起来, 再一起释放

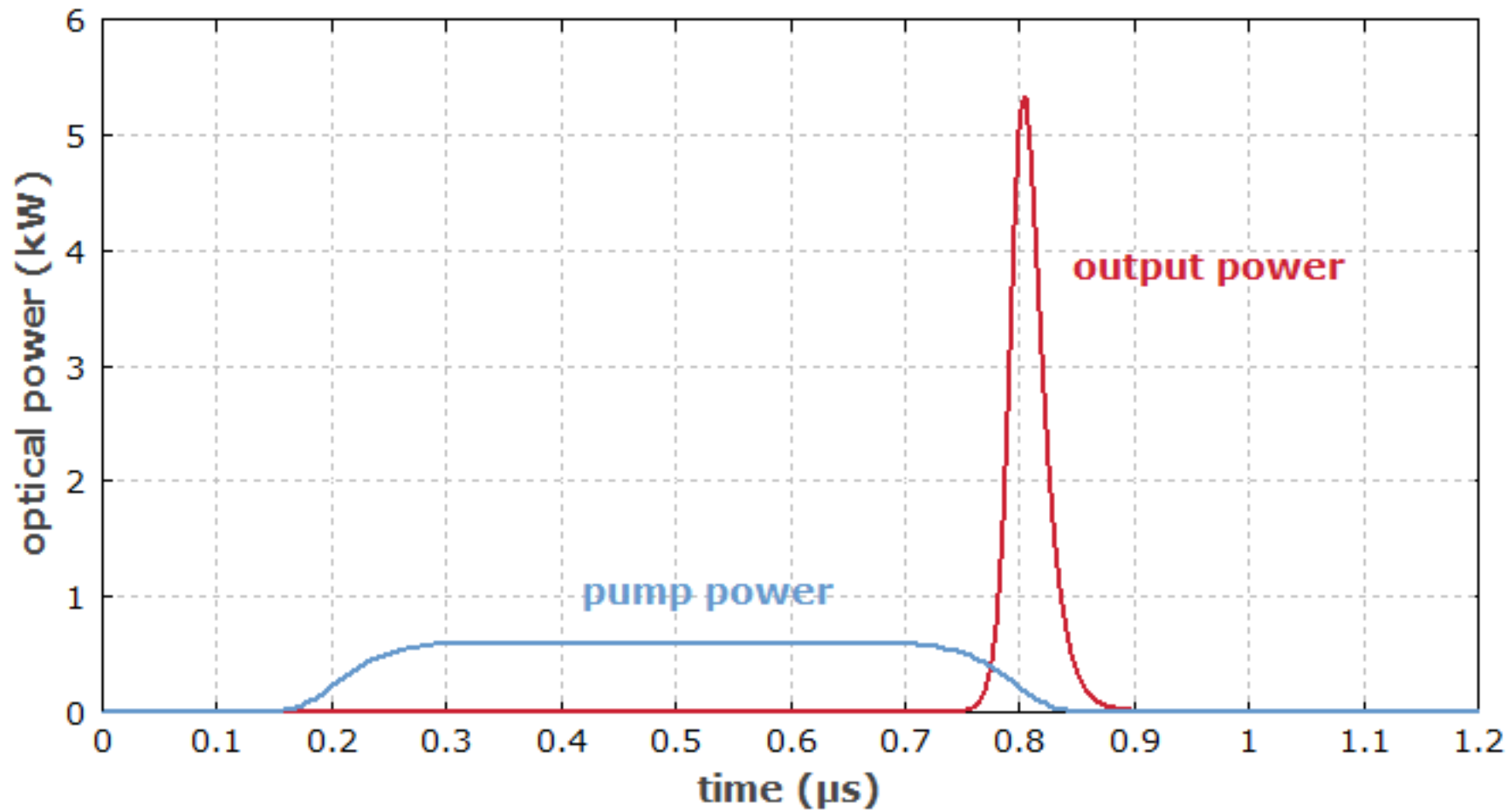
Cavity dumping一般与Q开关或锁模技术联合使用，其基本过程是：

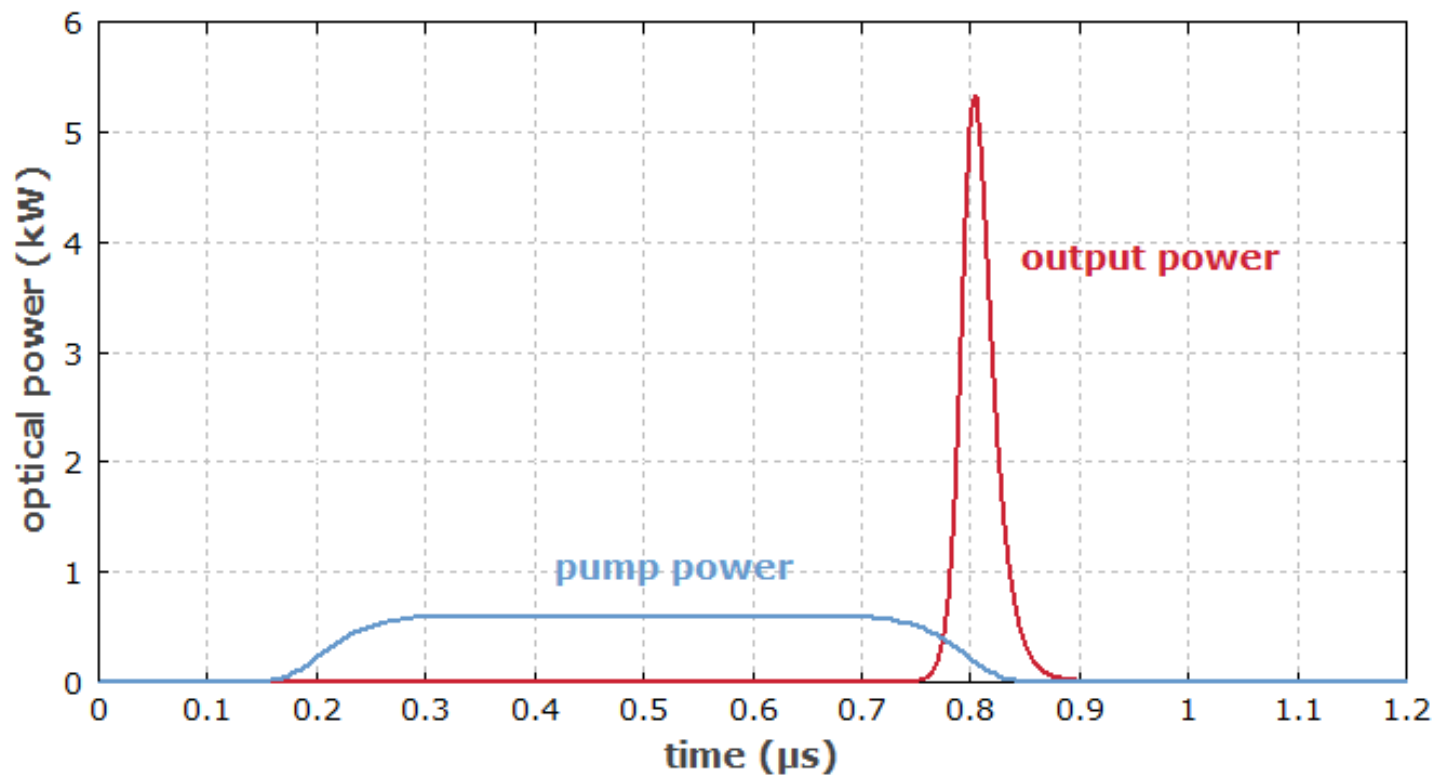
- 开启输出耦合，泵浦能量储存在增益介质中
- 关闭输出耦合，腔内功率迅速增加（通常在几百个round-trip中）
- 开启输出耦合，腔内积累的能量在一个round-trip左右的时间内释放



可以在重复频率高达数MHz时，保持ns量级的脉冲宽度（在这么高的重复频率时，Q开关技术已经开始出现丢失脉冲的现象）

增益开关 (Gain Switching)





优点：很容易调整脉冲重复率

缺点：不够稳定、能量有限

2. 激光加工

- 激光清洗
 - 利用纳秒激光脉冲去除材料表面的污染物，如锈蚀、油污、涂层等
 - 应用：工业清洗、文物修复
- 激光打标
- 激光切割

3. 激光雷达

- 自动驾驶：探测周围环境，例如车辆、行人、障碍物等。
- 地图测绘：获取地形地貌数据。
- 气象监测：测量云层高度、风速等。
- 大气污染监测：探测大气中的污染物浓度。



目录

1

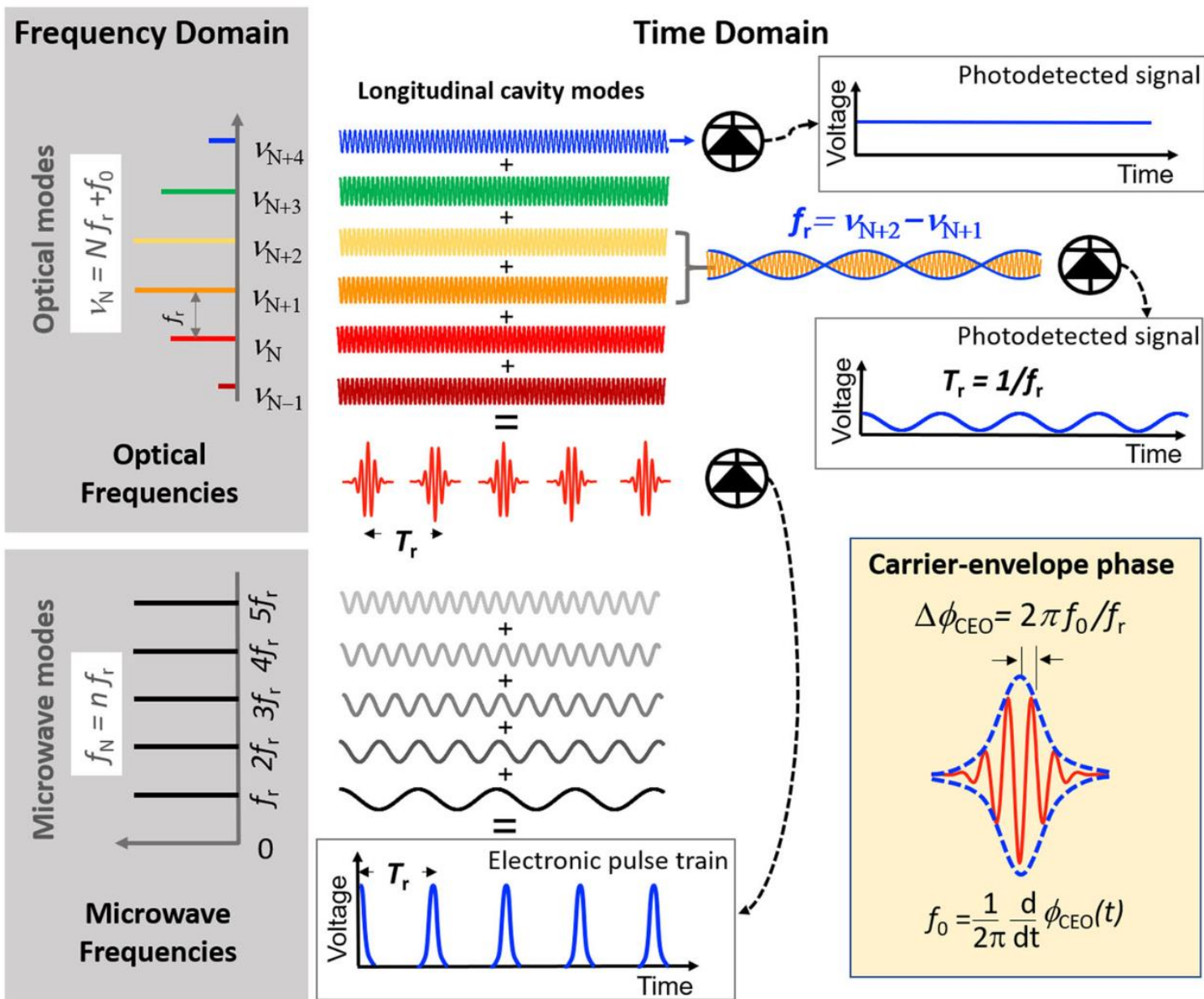
／ 纳秒脉冲激光

2

／ 皮秒/飞秒脉冲激光

3

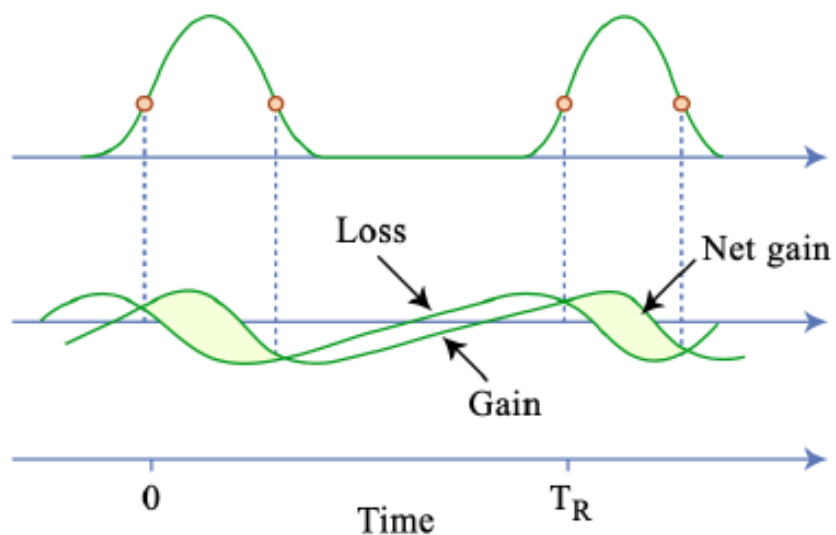
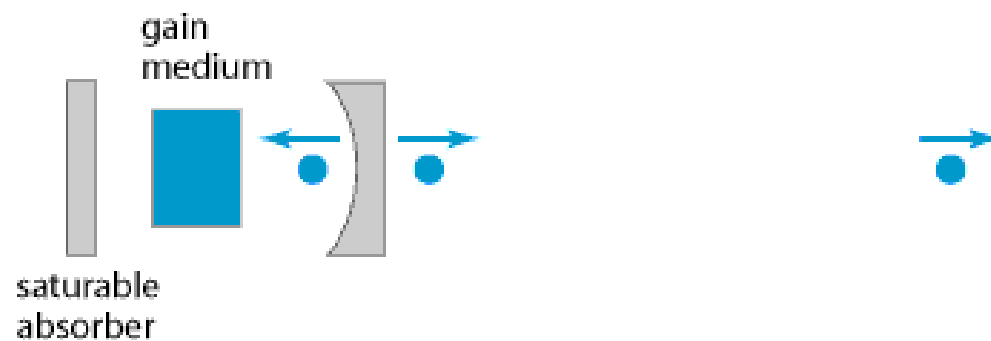
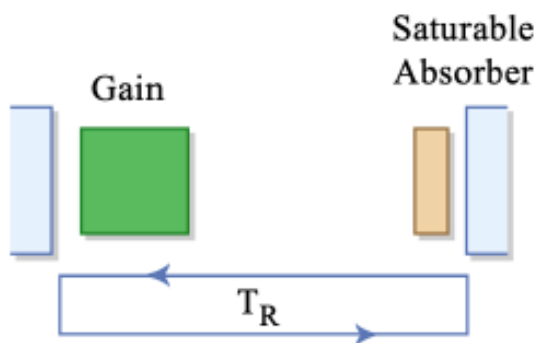
／ 啁啾脉冲放大技术 (CPA)



通过外部调制实现主动锁模

优点：可控性强、适用范围广

缺点：脉冲宽度较大、系统复杂度高

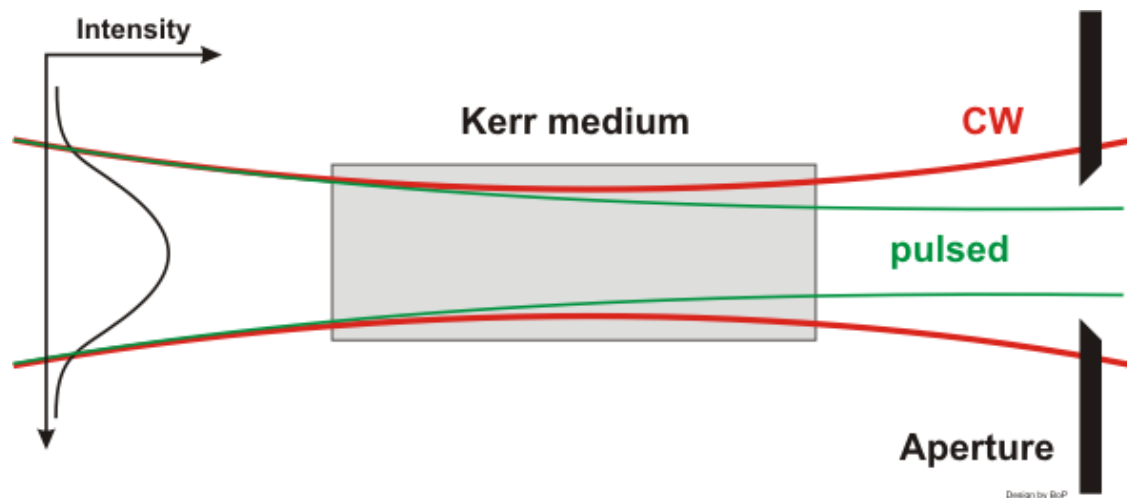


饱和吸收体：吸收弱光，保留强光，实现自锁模

优点：自发锁模、脉冲宽度较短

缺点：能量低、可控性低

Dynamics of a laser mode-locked with a slow saturable absorber.



Kerr-lens modelocking (KLM)

克尔透镜锁模：折射率随光强的增大而增大，从而对于脉冲可以实现自聚焦，施加合适的光阑就可以保留脉冲，而滤掉连续光

优点：自发锁模、脉冲宽度极短

缺点：稳定性较低

目前飞秒脉冲激光器最主流的锁模方案

1. 超快科学

飞秒激光是研究超快现象的理想工具，它能在飞秒时间尺度内捕捉分子振动、化学反应等

- **超快光谱学:** 通过泵浦-探测技术等，研究材料的光学特性、激发态动力学和化学反应中间态。
- **瞬态吸收/时间分辨光致发光光谱:** 测量物质被激发后的吸收/发光光谱变化，揭示激发态弛豫、能量转移等信息。
- **飞秒拉曼光谱:** 获取物质在超快时间尺度内的振动信息。
- **飞秒化学:** “冻结”化学反应过程中的瞬态物种，研究反应机理和控制反应路径。

2. 生物医学

- **生物医学成像:** 用于双光子/三光子显微镜, 实现对生物组织的高分辨率、深层成像, 尤其适用于活体组织。
- **眼科手术:** 用于 LASIK 和白内障手术, 精确切割角膜/晶状体, 提高手术精度, 减少并发症。
- **激光治疗:** 用于治疗皮肤病和肿瘤, 例如通过光动力疗法治疗肿瘤。

3. 材料加工

- **LIFT 技术:** 利用飞秒激光将一层薄膜材料从基底上剥离, 然后转移到另一个基底上。这种技术可以用于制备各种微纳结构和器件, 例如传感器、微流控芯片、柔性电子器件等。

4. 光通讯/精密测量

- **超快光开关:** 飞秒激光可以用于制备全光开关, 用于光通讯网络中的信号处理。
- **光纤通讯:** 飞秒激光可以用于产生超短光脉冲, 用于提高光纤通讯的传输速率。
- **光学频率梳:** 飞秒激光可以产生光学频率梳, 可以用于建立光学频率标准, 实现高精度的频率和时间测量。

目录

1

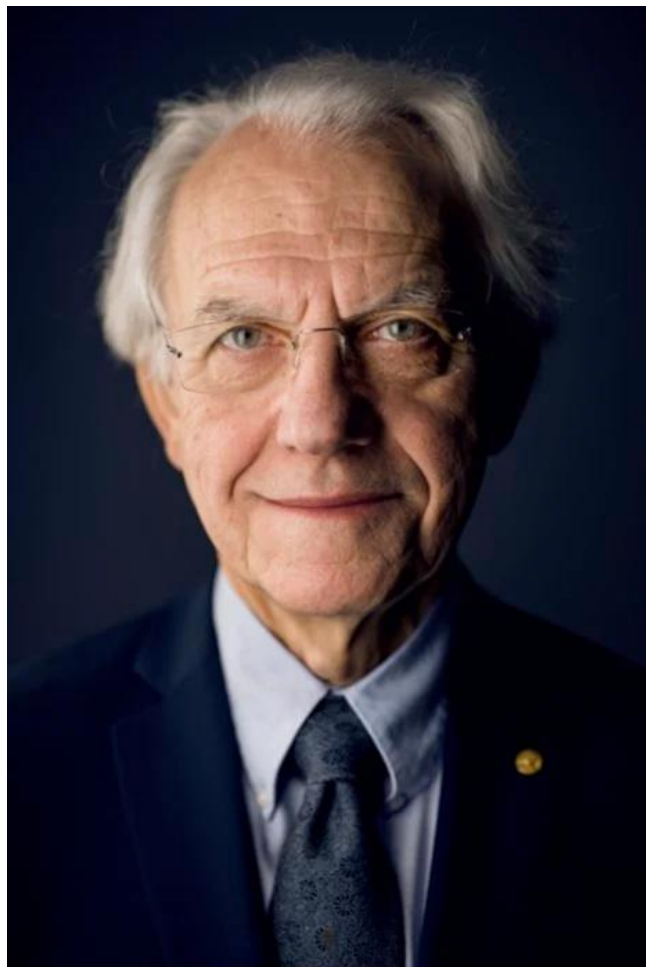
／ 纳秒脉冲激光

2

／ 皮秒/飞秒脉冲激光

3

／ 啁啾脉冲放大技术 (CPA)



Volume 56, number 3

OPTICS COMMUNICATIONS

1 December 1985

COMPRESSION OF AMPLIFIED CHIRPED OPTICAL PULSES [☆]

Donna STRICKLAND and Gerard MOUROU

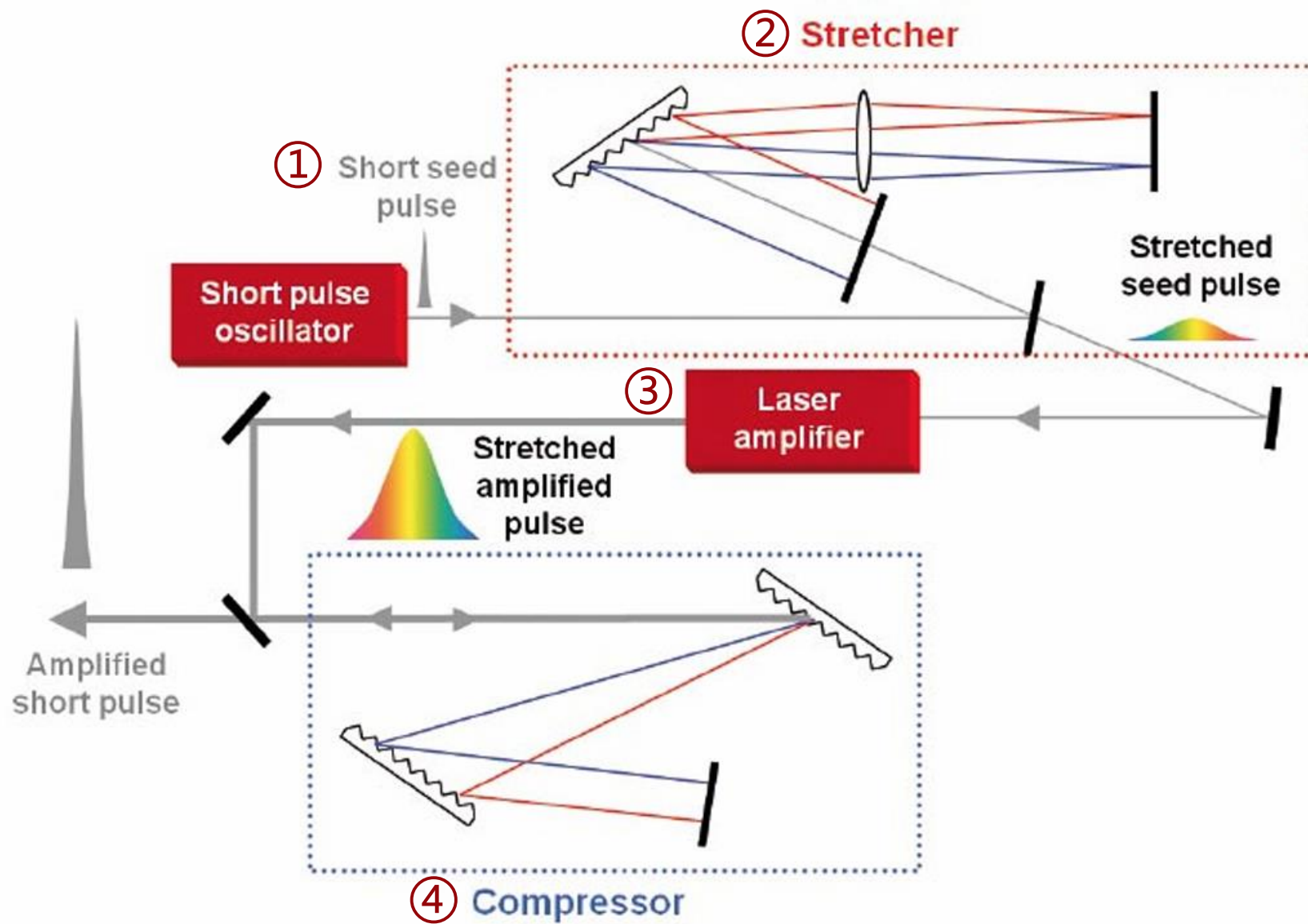
Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 250 East River Road, Rochester, NY 14623-1299, USA

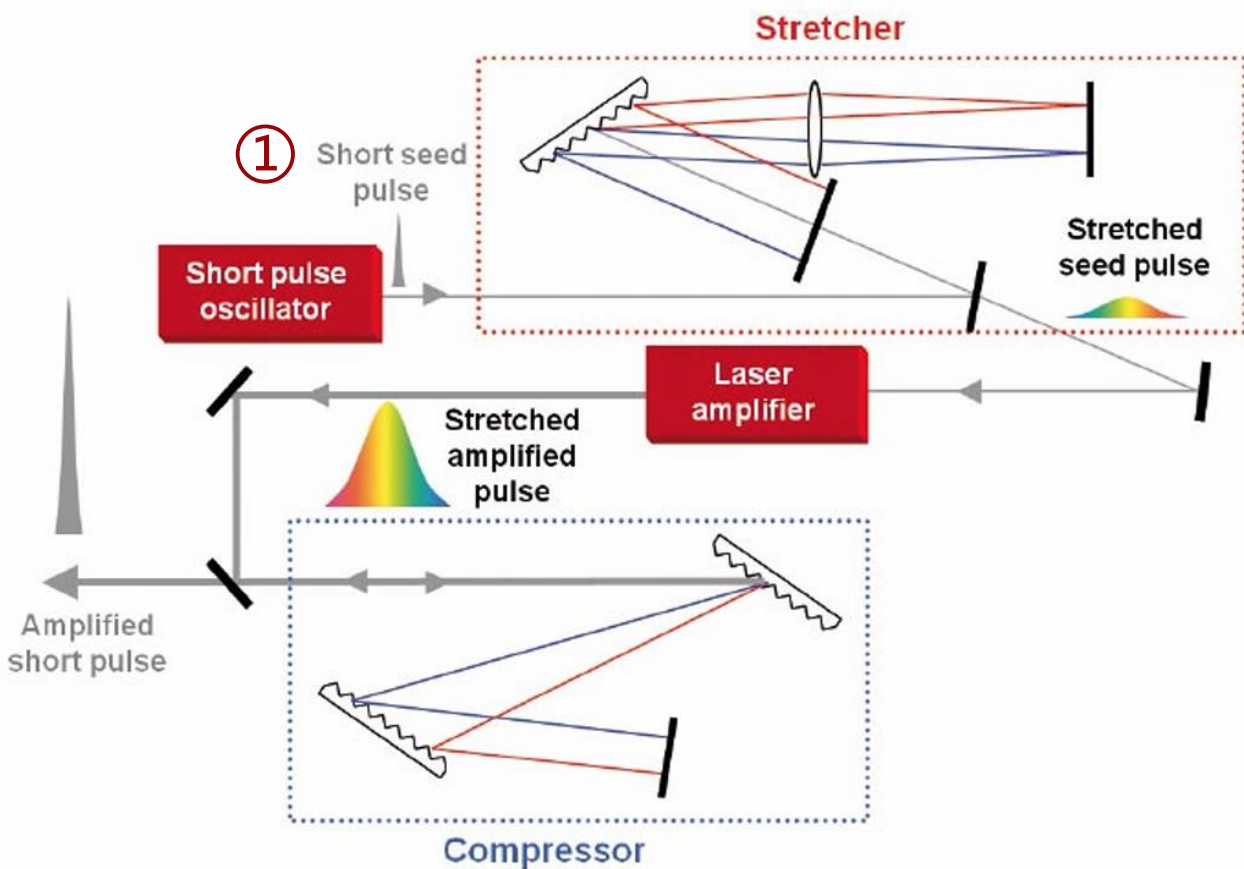
Received 5 July 1985

We have demonstrated the amplification and subsequent recompression of optical chirped pulses. A system which produces 1.06 μm laser pulses with pulse widths of 2 ps and energies at the millijoule level is presented.

2024年10月12日，2018年诺贝尔物理学奖获得者杰哈·阿尔伯特·穆鲁（Gérard Albert Mourou）以北京大学讲席教授的身份正式入职北京大学物理学院。

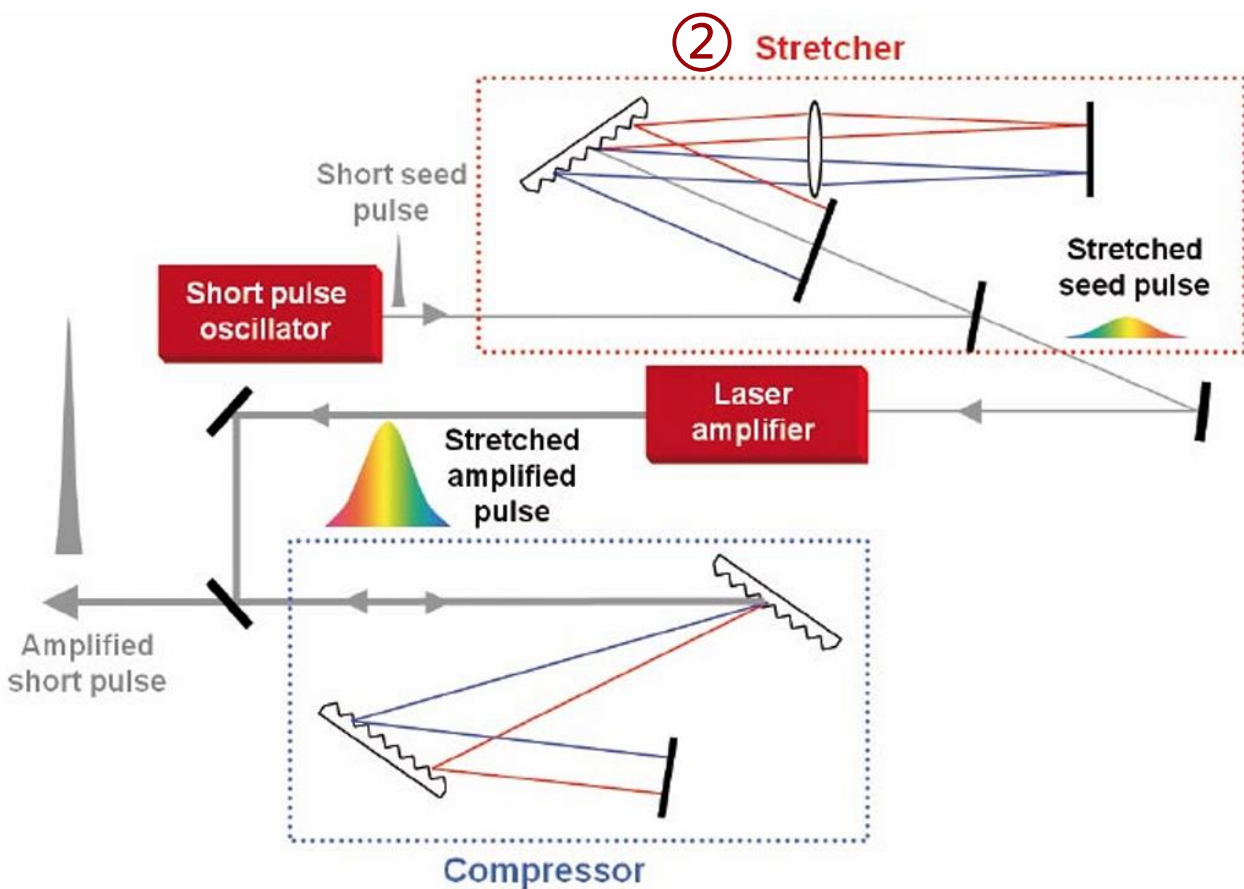
啁啾脉冲放大技术 (Chirped Pulse Amplification)





一个理想的**种子脉冲**应该具备以下特点:

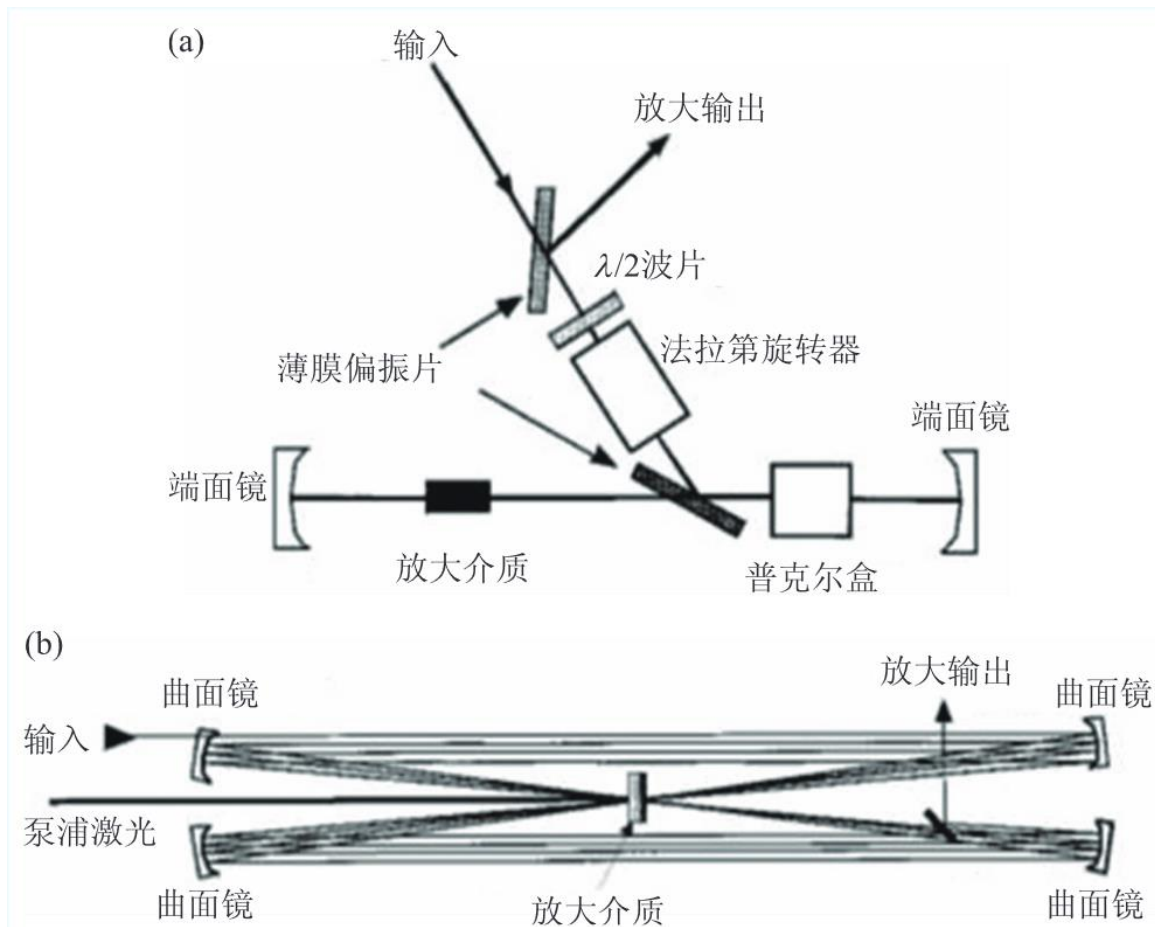
- **脉冲宽度短**
- **光束质量好:** 具有良好的空间模式和光束指向稳定性, 有利于后续的放大和压缩
- **稳定性高:** 脉冲能量和脉冲宽度波动小, 保证输出激光脉冲的稳定性



啁啾脉冲：利用色散，将脉冲在时域上展宽成为啁啾脉冲。前沿频率低称为正啁啾脉冲，前沿频率高称为负啁啾脉冲。

CPA技术的核心就是将无啁啾的种子脉冲转化为展宽的啁啾脉冲，从而实现超快激光脉冲的安全放大

③

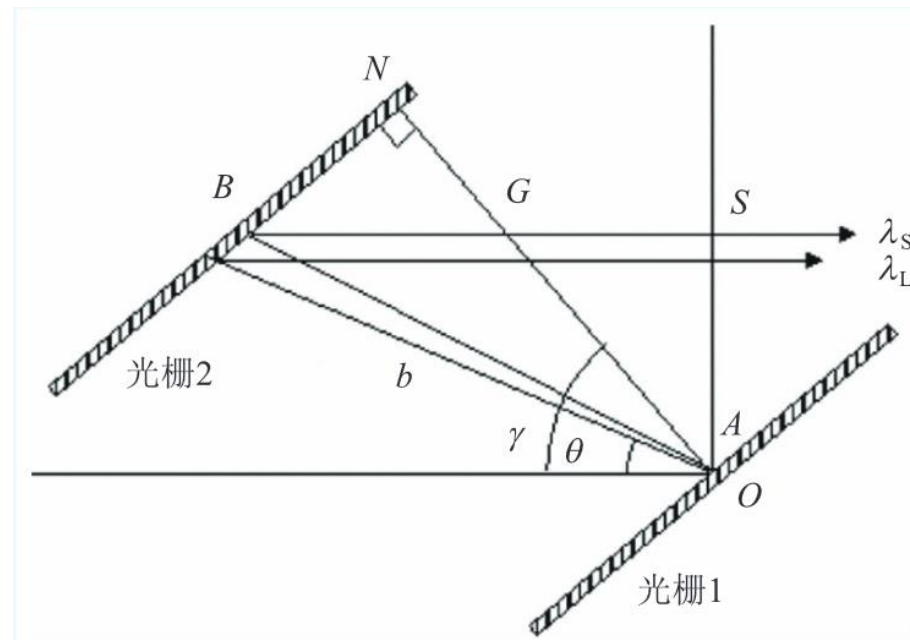
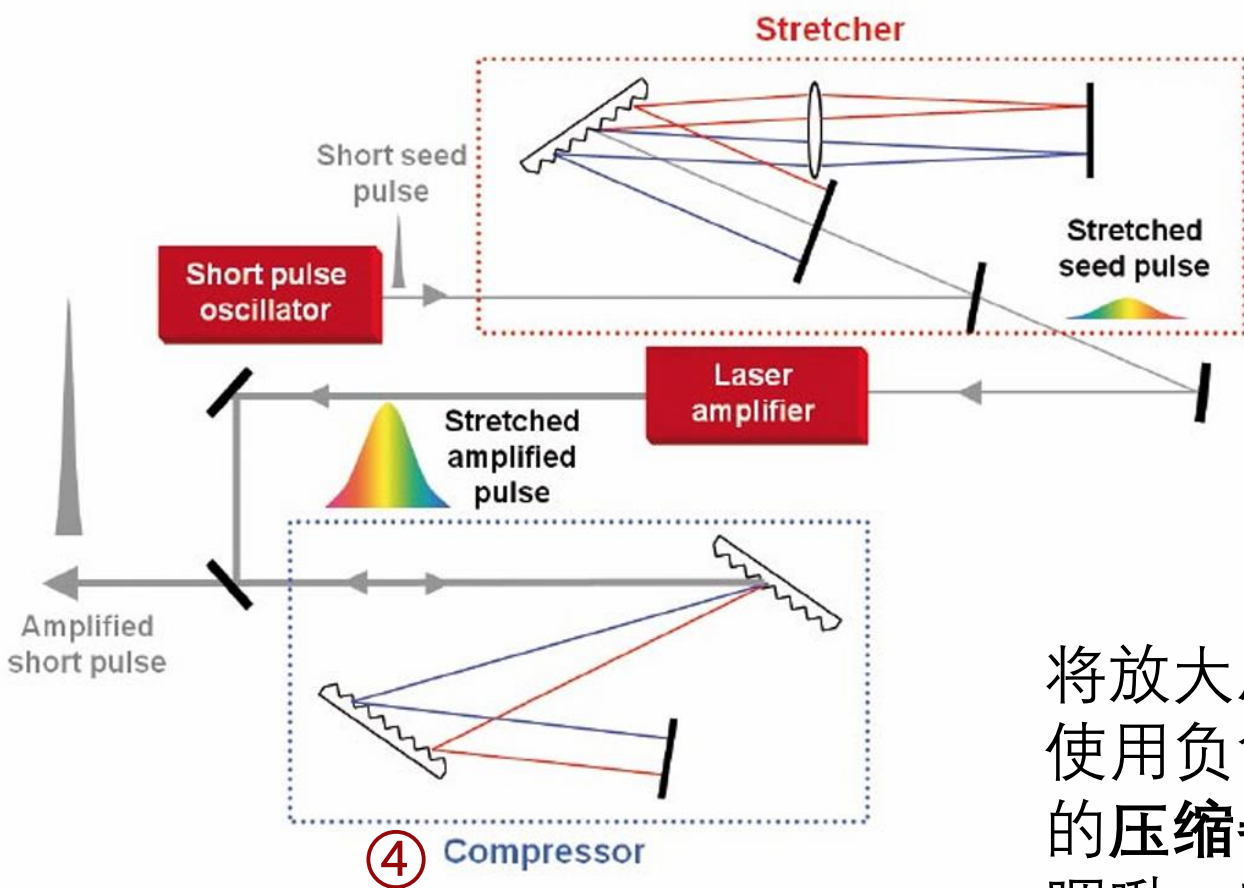


放大：

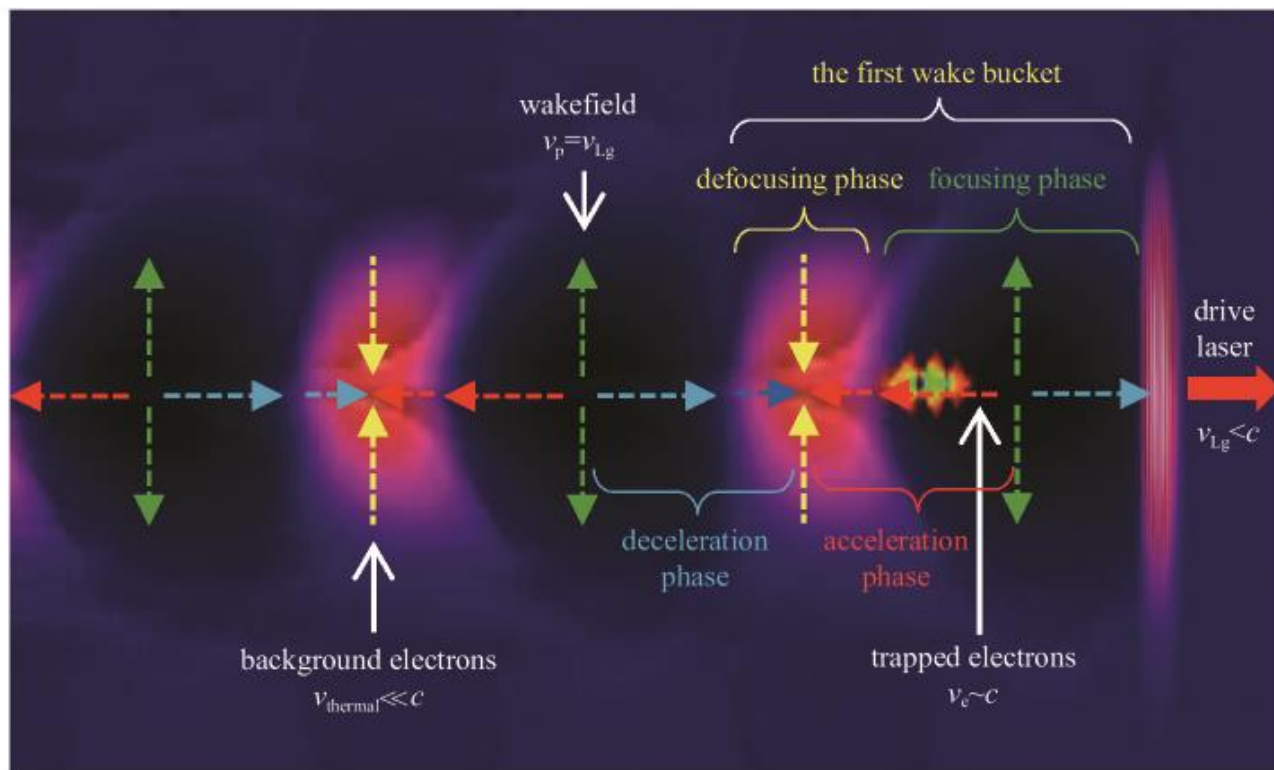
啁啾脉冲放大技术主要使用钛宝石或钕玻璃作为增益介质，并采用再生放大或多通放大方案。

- (a) 再生放大调节方便、增益高、光束质量好，但对比度低、色散大、增益窄化效应严重。
- (b) 多通放大使用两组共焦凹面镜，使光束在增益介质中多次聚焦放大，增益可达 10^6 以上。

不论采用哪种方案，放大后的能量通常都在毫焦量级 (mJ)，称为“增益放大”。为进一步提高能量，还需要进行多级“能量放大”，通常采用多通放大。



将放大后的啁啾脉冲压缩回飞秒脉冲，需要使用负色散系统抵消展宽器的色散量。常用的压缩器是Treacy光栅对，它可以精确补偿啁啾，实现小于20 fs的脉冲。



1. 激光尾波加速：利用激光在等离子体中激发的尾波场，可以高效加速带电粒子。其加速梯度高达 1 GV/cm，有望大幅缩减加速器的规模和造价。

2. 强场物理研究

超强激光脉冲能创造极端物理条件（如高达 $10^{14}V/m$ 的电场强度），为研究强场物理、等离子体物理和原子分子物理提供独特工具。主要研究方向包括：

- 强激光场与物质的非线性相互作用
- 电子速度接近光速时的等离子体行为
- 强电磁场中的量子电动力学效应
- 强激光场对原子分子结构和动力学的影响

3. 高次谐波产生 (High-order harmonic generation, HHG)

将超强激光脉冲聚焦到气体中（例如惰性气体），激光场与原子中的电子相互作用，使电子电离、加速并最终回到原子核附近，辐射出高次谐波。这些谐波的频率是激光频率的整数倍，覆盖极紫外 (XUV) 甚至软 X 射线波段，经色散补偿后可合成阿秒脉冲。

1. Strickland, D., & Mourou, G. (1985). Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Communications*, **55**(6), 447-449.
2. Perry, M. D., & Mourou, G. (1994). Terawatt to petawatt subpicosecond lasers. *Science*, **264**(5161), 917-924.
3. Wang, Y., & Xu, C.-Q. (2007). Actively Q-switched fiber lasers: Switching dynamics and nonlinear processes. *Progress in Quantum Electronics*, 31(3-5), 131-216. Scott A. Diddams et al. ,Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum. *Science* **369**,eaay3676(2020).
4. Aoyama, M., Yamakawa, K., Akahane, Y., Ma, J., Inoue, N., Ueda, H., & Kiriyama, H. (2003). 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser. *Optics Letters*, **28**(17), 1594-1596.
5. Delaporte, P., & Alloncle, A.-P. (2016). [INVITED] Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology. *Optics & Laser Technology*, **78**(Part A), 33-41.
6. T. Tajima, J. M. Dawson “Laser-electron accelerator” *Physical Review Letters*, **43**, 267 (1979).