

# 用于驱动阿秒脉冲产生的 飞秒激光技术

刘 辉 唐瑞鑫 白晋涛

(省部共建西部能源光子技术国家重点实验室,  
西北大学光子学与光子技术研究所/物理学院,西安市激光红外学会, 710127)

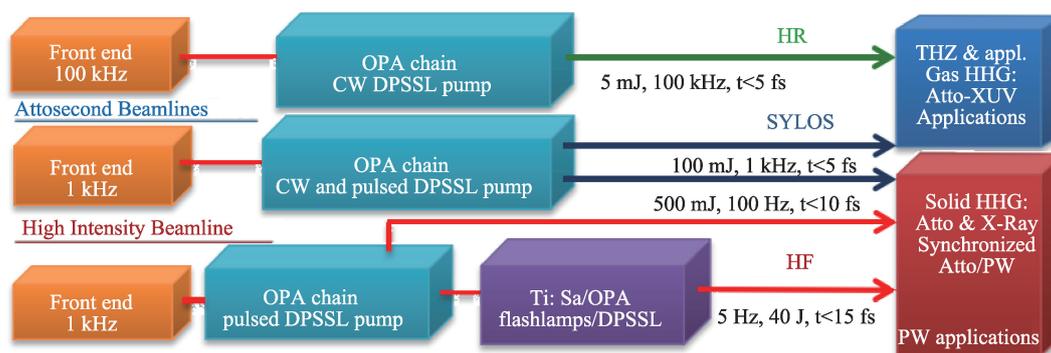
## 1. 引言

阿秒(attosecond,  $10^{-18}$  s)科学是当前最引人注目的前沿领域之一,通过探测前所未有的超快电子动力学过程,有望发现新的基本物理定律<sup>[1]</sup>。阿秒脉冲的产生通常是利用高强度的飞秒光脉冲与惰性气体相互作用,从而使核外电子在少周期(单个脉冲内光场振荡只有几个周期)强场激光的作用下产生极端非线性效应获得。可见,驱动光场是阿秒脉冲光产生的基础,用于驱动阿秒产生的飞秒激光源(以下简称“阿秒驱动光源”)技术也应运而生。驱动光源主要从以下几个方面影响阿秒脉冲的产生,包括:1)由于驱动光场需要克服电子与原子核的库仑相互作用,氢原子第一波尔轨道的电场强度为  $5.14 \times 10^9$  V/cm,相应的光场强度为  $3.5 \times 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>,这就需要驱动光场具有相匹配的高电场强度;2)在一个脉冲内电场的振荡次数越少越好,从而使得只有单脉冲的中心主峰才能产生能量足够高的光子贡献于阿秒脉冲,因此利用少周期产生孤立阿秒脉冲是目前的主流发展方向之一;3)产生的阿秒脉冲中最大光子能量与驱动光场中心波长和电场强度的平方成正比,因此中红外的驱动光源相比近红外光源更有利于获得脉宽较短的阿秒脉冲,但同时因为电子在长波光场中所经历的复合轨道更长,量子扩散效应导致高次谐波的产生效率通常随驱动激光波长的增长,而以 $\lambda^{-(5-7)}$ 的规律急剧下降;4)驱动光场

的脉冲重复频率越高,所能获得的高次谐波的光子通量也会越高,有利于提高探测信号的信噪比;5)在少周期的情况下,载波包络相位(Carrier Envelope Phase, CEP)会对脉冲的振荡波形产生显著影响,因此稳定的CEP对阿秒脉冲的稳定性极为关键;6)高能量的脉冲需要经过高增益的放大,必然会引入相应的噪声,因此脉冲的对比度也是影响驱动光场的重要因素。可见,阿秒脉冲的产生对飞秒激光技术在平均功率、脉宽、波长、CEP稳定性等方面提出了极高的要求。一般来说,单一的驱动光源难以满足各种不同的应用要求,因此其驱动光源需要根据不同的性能需求采用不同的飞秒激光技术,并突出某一方面的性能指标。以目前最引人注目的欧洲极端光学装置-阿秒光源(ELI-ALPS)为例,总共规划了三套阿秒束线,如图1所示,分别侧重于高重复频率、单周期、高场强三个方面。阿秒光源的驱动光场主要包括前端、主放大、非线性后压缩三个部分,下面对这几方面的技术做简要介绍。

## 2. 前端

驱动光源前端的主要任务是产生CEP稳定的种子光脉冲,用于在主放大器中进行高功率高能量的啁啾脉冲放大。前端包括CEP稳定的振荡器、脉冲选择与降频、脉冲展宽和预放大四个部分。阿秒驱动光源一般使用高功率的振荡器,目前主要使用钛宝石锁模激光器和掺镱增益介质锁模激光器。

图1 欧洲极端光学装置-阿秒光源(ELI-ALPS)规划示意图<sup>[2]</sup>

钛宝石具有非常宽的增益带宽,增益范围为 600 nm ~ 1100 nm,并且具有很好的热传导效率,约为 33 W/(m·K),目前已有研究获得了脉宽约为 5 fs 的振荡器<sup>[3]</sup>;但是其缺点在于需要绿光进行泵浦,无法用高功率半导体激光进行直接泵浦,导致结构相对复杂,但近年来发展的蓝光半导体直接泵浦钛宝石锁模激光器取得了很好的效果<sup>[4]</sup>。掺镱介质增益带宽相对较小,受不同的基质材料影响,其增益带宽约在 10 nm ~ 80 nm 之间变化,但可以利用高功率的半导体激光器直接泵浦,量子亏损导致的热效应很小,并且利用光纤、薄片等几何设计可以获得很高散热效率。因此,掺镱块状晶体(Bulk crystal)、掺镱薄片和掺镱光纤的锁模激光器都可以作为高功率振荡器。在平均功率一定的情况下,重复频率越低单脉冲可获得的能量就越高。对于阿秒驱动光源,使用的脉冲重复频率一般为  $10^3$  Hz 到  $10^5$  Hz 量级,而振荡器直接输出重复频率一般为 10 MHz ~ 100 MHz,因此需要通过脉冲的选择进行降频处理。由于振荡器直接输出的单脉冲能量一般在 nJ 量级,若直接输入到主放大器则不能有效提取主放大器的能量,放大效率较低,因此需要进行预放大,将脉冲能量提高至大约  $\mu$ J 量级。通常在预放大之前对脉冲进行时域展宽,若主放大为啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA),脉冲一般展宽至 ns 量级;若主放大为光参量啁啾脉冲放大(Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA),一般展宽至 ps 量级。对于 CEP 的稳定,可以通过锁定

振荡器的载波包络偏置频率( $f_{\text{ceo}}$ )来主动实现,而在中红外的 OPCPA 中,还可以利用差频产生(DFG)来实现 CEP 的被动稳定。

### 3. 主放大

主放大基本原理是啁啾脉冲放大,即先将脉冲经过一定程度的时间展宽,再通过主放大器进行高能量放大,最后再经过线性压缩和非线性压缩将脉宽压窄。按照信号光获取能量方式的不同,主放大可大致分为基于增益介质的啁啾脉冲放大和基于光参量放大(Optical Parametric Amplification, OPA)的啁啾脉冲放大。

#### 3.1 基于增益介质的啁啾脉冲放大

增益介质放大一般是通过光泵浦产生粒子数反转实现受激辐射放大,因此需要足够长的增益长度才能实现高倍增益,这可以通过多次穿过固体增益介质或者长的波导增益介质来实现。另外,泵浦光的能量一部分会通过热积累的形式转移到增益介质当中,高功率下增益介质容易热损伤,因此高功率的增益关键在于高效的散热设计。基于以上两方面的影响,基于增益介质的高能量脉冲放大主要形式为再生放大器、板条放大器、薄片放大器、光纤放大器等。

##### 3.1.1 再生放大器

再生放大器(Regenerative amplifier)是通过将增益介质与光开关一起放置在光学谐振器中,当光

开关处于一种状态时,种子光被注入进谐振腔,并使注入的光束多次通过(以下简称“多通”)激光增益介质实现光放大,而当光开关切换成另一种状态后,放大后的光则输出谐振腔。光开关通常由电光调制器结合激光偏振片实现,光脉冲在谐振腔内的往返次数可以通过光开关控制。一般来说,光脉冲在腔内的往返次数可以达到上百次。最早的再生放大器是利用钛宝石作为增益介质,其优点是增益带宽很宽且晶体导热性好,容易实现高功率短脉冲的放大,但是由于泵浦需要高功率的绿光激光器,成本较高,系统也较为复杂。近年来,利用掺镱晶体作为增益的再生放大器成为一种新的趋势,其主

要原因在于掺镱晶体在具有高增益和优良的导热性能的同时,还可以利用高功率半导体激光器进行直接泵浦,能大大降低成本和系统复杂度。图2是一个基于Yb:CALGO晶体的再生放大器。该再生放大器可以实现3 kHz~180 kHz可变重复频率,脉宽为120 fs,最大输出平均功率为36 W,单脉冲能量达4.3 mJ,相应的峰值功率大于20 GW。

### 3.1.2 板条放大器

与再生放大器利用谐振腔实现多通不同,板条放大器是通过非谐振腔实现多通,因此不需要光开关的控制,结构相对简单,且可以实现较高的重复频率。如图3所示,板条状的增益介质可以实现高

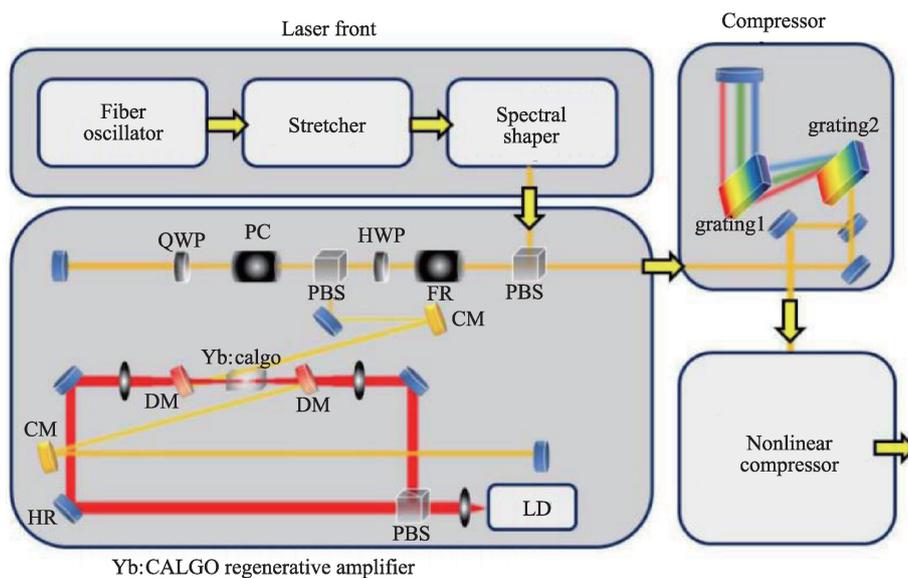


图2 利用基于Yb:CALGO晶体可再生放大器实现啁啾脉冲放大<sup>[5]</sup>

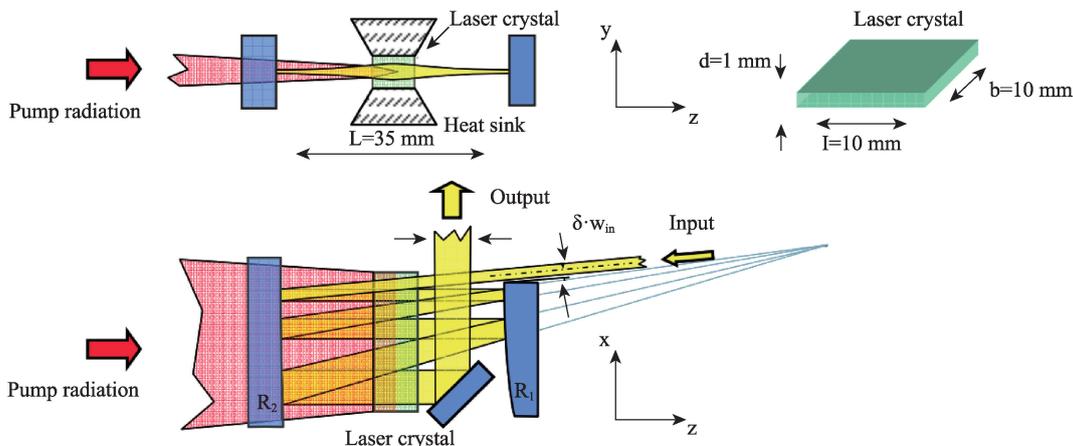


图3 板条激光放大器<sup>[7]</sup>

效率的散热,扁平化的泵浦光通过二向色镜直接进行大面积的泵浦,注入的种子光则在板条内以一定角度来回穿过增益介质实现多通放大。板条放大器的增益介质一般为掺镱晶体,以Yb:YAG最为典型。2017年B E. Schmidt等人报道了一台基于Yb:YAG晶体的高稳定板条放大器。该板条放大器在10 kHz重复频率和1.5 ps脉冲持续时间下,将平均功率提升到540 W,脉冲能量提升到54 mJ,与以往的研究相比,这是一个显著的提升<sup>[6]</sup>。

### 3.1.3 薄片放大器

与板条放大器原理类似,薄片放大器仍然采用非谐振式的多通放大。薄片放大器采用更薄的增益介质,散热效率比板条放大器更高,因此更容易获得高的平均功率。但是,由于光束需要多次在同一个点反射,结构复杂且精密,制造难度较大,成本较高。图4是一个基于Yb:YAG晶体的薄片放大器。该薄片放大器可以实现100 kHz重复频率,脉宽为820 fs,最大输出平均功率为35.6 W,单脉冲能量达44.5 mJ。通快公司在薄片放大器方面具有突出的表现,已经实现了平均功率达kW量级的输出,单脉冲能量mJ量级,脉冲宽度约为1 ps<sup>[8]</sup>。进一步了解,可参考薄片放大器的综述文章<sup>[9]</sup>。

3.1.4 基于掺镱光纤啁啾脉冲放大和相干合束  
采用光纤光波导结构可以直接使脉冲获得长距离的增益,无需复杂的空间多通结构,并且光纤

的细长几何形状也能获得优良的散热性能。利用单路光纤进行啁啾脉冲放大,可以获得脉冲能量为mJ级,平均功率为100 W级的激光输出。但是,在高峰值功率的情况下,容易引起模式不稳定。利用多光束相干合束可以突破单路光纤放大的峰值功率限制,获得kW量级的平均功率输出。因此,基于掺镱光纤啁啾脉冲放大的相干合束有利于获得高重复频率高平均功率驱动源。ELI-ALPS中的100 kHz高重复频率阿秒束线驱动源所采用的便是8通道相干合束的掺镱光纤啁啾脉冲放大,如图5所示。利用该激光放大系统,P. Ye等人目前已实现了100 kHz, 80 W, 1030 nm, 40 fs的驱动源输出,并获得395 as的阿秒脉冲串<sup>[11]</sup>。

## 3.2 光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)及光波合成

OPCPA是利用光参量过程将高能量的泵浦光能量转移至低能量的信号光(Signal),而多余的能量则以闲置光(Idler)的形式发射出去,因此其泵浦产生的热量相对于基于增益介质的CPA较少。尽管OPCPA的能量转换效率较低(约为10%),但是利用多级OPCPA可以得到mJ量级的单脉冲能量。利用双啁啾OPCPA(DC-OPCPA),能使能量转换效率提高至30%~40%,使单脉冲能量达数10 mJ。更重要的是,利用OPCPA可以实现中红外波长光的放大,而基

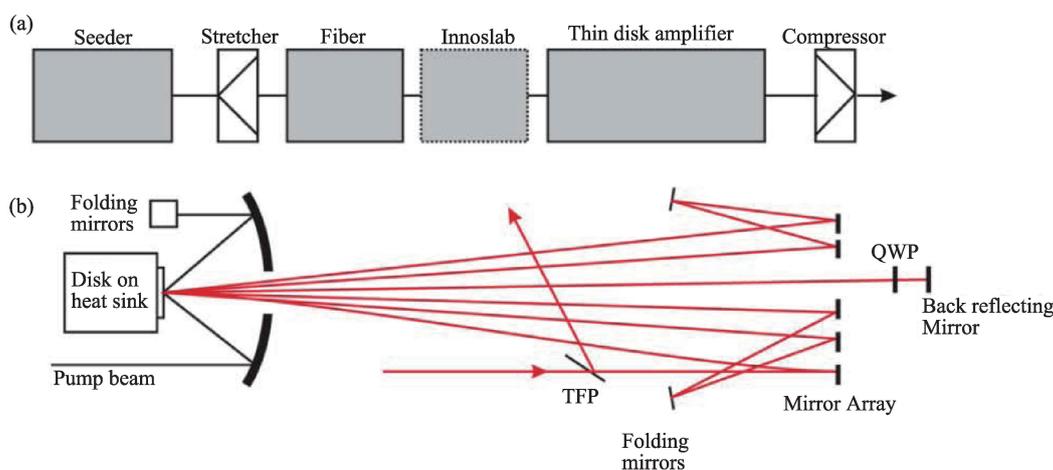


图4 基于薄片激光放大器的啁啾脉冲放大<sup>[10]</sup>

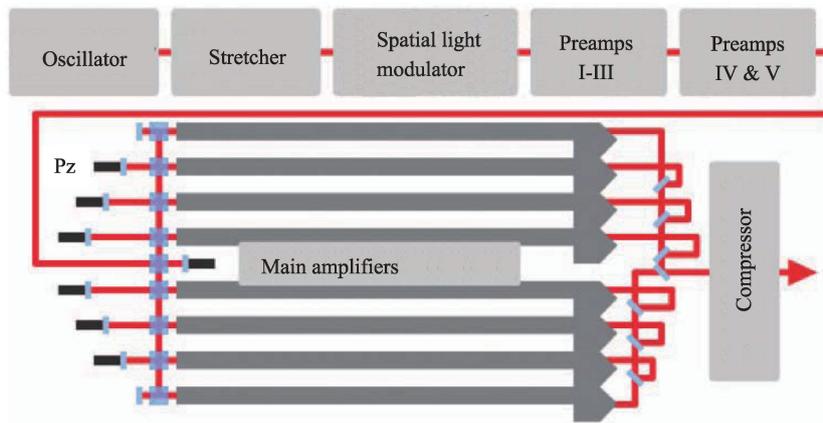


图5 八通道相干合成光纤放大器<sup>[12]</sup>

于钛宝石或者掺镱增益介质的CPA产生的是中心波长为800 nm和1 μm的近红外光,因此利用OPCPA技术有利于实现高能量少周期长波长的驱动源,从而使阿秒脉冲的光子能量到达软X射线,并覆盖“水窗”波段(2.34 nm ~ 4.4 nm),对于活体细胞的研究具有非常重要的意义。对于高能量脉冲的OPCPA,非常重要的一点是需要脉宽约为1 ps高能量泵浦光,

随着近年来平均功率达到kW级的掺镱光纤、板条、薄片放大器的出现,OPCPA正在使飞秒激光向同时具有太瓦级峰值功率和千瓦级平均功率的“第三代”迈进<sup>[13]</sup>。另外,由于OPCPA可以在不同的波长同时实现,因此可以利用同源且不同波长的多个并行OPCPA实现光波的合成,如图7所示,这不仅增加了脉冲的功率,还能实现亚周期的光波合成,该

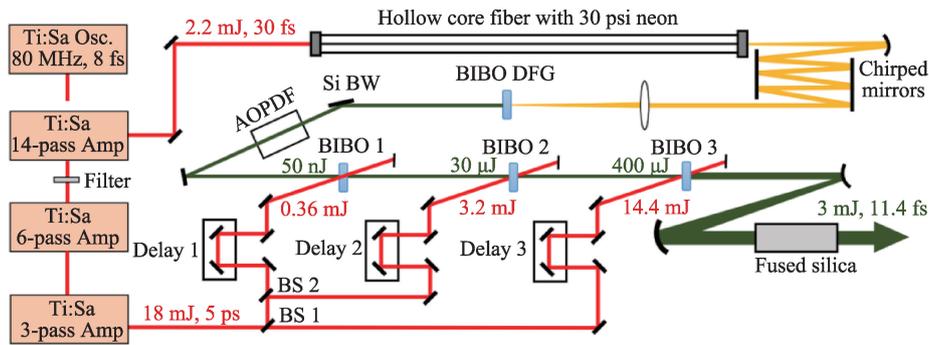


图6 光参量啁啾脉冲放大<sup>[14]</sup>

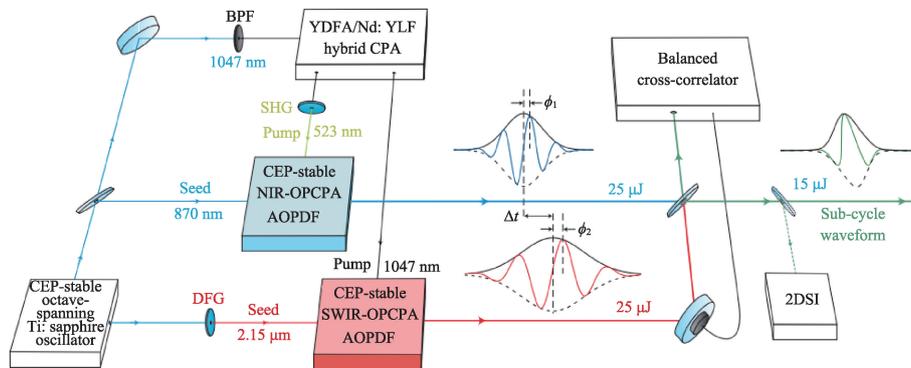


图7 基于双路OPCPA光波合成<sup>[15]</sup>



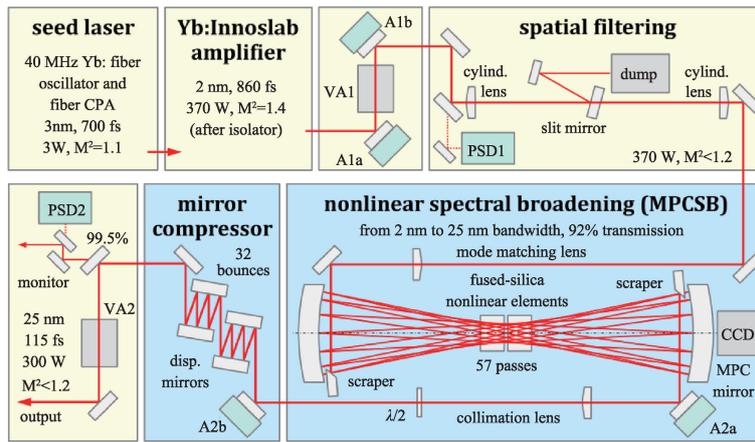


图9 固体非线性介质多通腔脉冲非线性压缩<sup>[19]</sup>

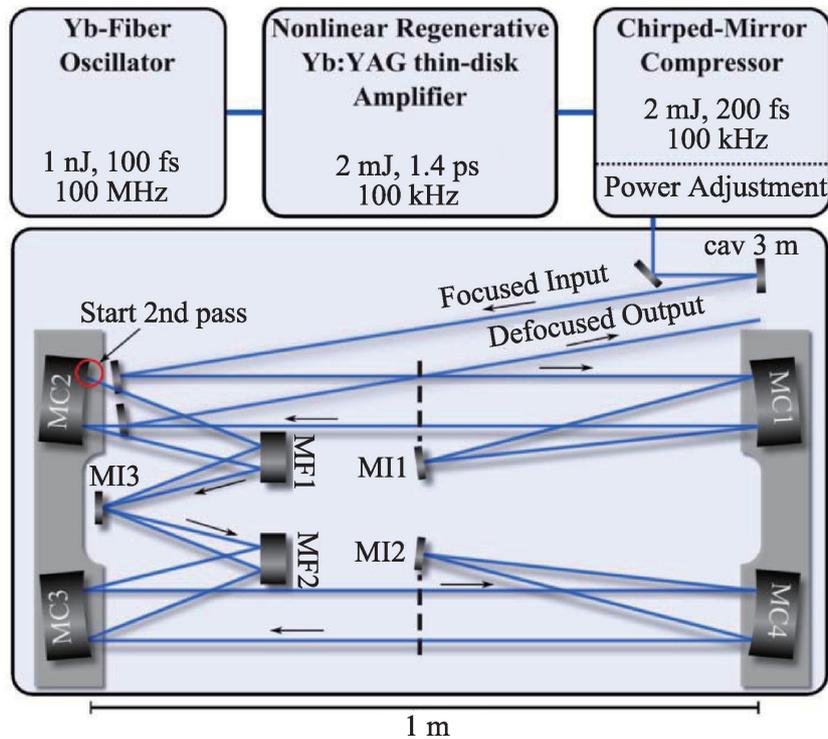


图10 基于充气多通腔的脉冲非线性压缩<sup>[20]</sup>

## 5. 总结与展望

阿秒脉冲的产生需要 CEP 稳定的高脉冲能量、高重复频率、少周期飞秒脉冲作为驱动,其技术主要分为两大类,即基于增益介质的 CPA 和结合了 CPA 与 OPA 的 OPCPA。传统的驱动源采用钛宝石激光系统,这得益于钛宝石具有极宽的增益带宽和良好的导热性能,因此可以直接利用钛宝石振荡器

产生少周期的飞秒脉冲,进而利用再生放大器进行啁啾脉冲放大,只需通过简单的线性压缩便可获得少周期飞秒脉冲,但是其平均功率上限大约在 50 W,对于 mJ 量级的脉冲能量,其重复频率一般在 kHz 量级。随着 kW 量级平均功率掺镱激光系统的问世,飞秒激光在峰值功率和平均功率上同时达到新的高度。目前,阿秒驱动光源向着两方面发展,一是以掺镱激光系统为基础的 CPA 技术与非线性

压缩技术结合产生高重复频率高平均功率少周期脉冲;二是以掺镱激光作为泵浦的OPCPA技术。前者在高重复频率高平均功率更有优势,后者在长波长、CEP稳定、少周期以及脉冲对比度上更有优势。随着这些飞秒技术的发展,适用于不同需求的桌面级阿秒光源正在成为现实,从而推动阿秒科学更为广泛的研究。

## 参考文献

- [1] P. B. Corkum and F. Krausz, "Attosecond science," *Nature Physics* 3, 381 (2007).
- [2] D. Charalambidis, Z. Diveki, P. Dombi, J. A. Fulop, M. Kalashnikov, R. Lopez-Martens, K. Osvay, and E. Racz, "ELI-ALPS, the attosecond facility of the extreme light infrastructure," 1 (2013).
- [3] R. Ell, U. Morgner, F. X. Kaartner, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, M. J. Lederer, A. Boiko, and B. Luther-Davies, "Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser," *Opt Lett* 26, 373 (2001).
- [4] H. Liu, G. Wang, K. Yang, R. Kang, W. Tian, D. Zhang, J. Zhu, H. Han, and Z. Wei, "Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser with broad wavelength tunability\*," *Chinese Physics B* 28, 094213 (2019).
- [5] W. Wang, T. Pu, H. Wu, Y. Li, R. Wang, B. Sun, and H. Liang, "High-power Yb:CALGO regenerative amplifier and 30 fs output via multi-plate compression," *Opt Express* 30, 22153 (2022).
- [6] B. E. Schmidt, A. Hage, T. Mans, F. Legare, and H. J. Worner, "Highly stable, 54 mJ Yb-InnoSlab laser platform at 0.5 kW average power," *Opt Express* 25, 17549 (2017).
- [7] P. Russbueldt, T. Mans, G. Rotarius, J. Weitenberg, H. D. Hoffmann, and R. Poprawe, "400W Yb:YAG Innoslab fs-Amplifier," *Opt Express* 17, 12230 (2009).
- [8] T. Dietz, M. Jenne, D. Bauer, M. Scharun, D. Sutter, and A. Killi, "Ultrafast thin-disk multi-pass amplifier system providing 1.9 kW of average output power and pulse energies in the 10 mJ range at 1 ps of pulse duration for glass-cleaving applications," *Opt Express* 28, 11415 (2020).
- [9] Wang Hailin 王海林, Dong Jing 董静, Liu Heyan 刘贺言, Hao Jingjie 郝婧婕, Zhu Xiao 朱晓, and Zhang Jinwei 张金伟, "高功率超快碟片激光技术研究进展(特邀)," *Acta Photonica Sinica* 50, 0850208 (2021).
- [10] M. Schulz, R. Riedel, A. Willner, S. Dusterer, M. J. Prandolini, J. Feldhaus, B. Faatz, J. Rossbach, M. Drescher, and F. Tavella, "Pulsed operation of a high average power Yb:YAG thin-disk multipass amplifier," *Opt Express* 20, 5038 (2012).
- [11] P. Ye, T. Csizmadia, L. G. Oldal, H. N. Gopalakrishna, M. Füle, Z. Filus, B. Nagyillés, Z. Divéki, T. Grósz, M. Dumergue, P. Jójárt, I. Seres, Z. Bengery, V. Zuba, Z. Várallyay, B. Major, F. Frassetto, M. Devetta, G. D. Lucarelli, M. Lucchini, B. Moio, S. Stagira, C. Vozzi, L. Poletto, M. Nisoli, D. Charalambidis, S. Kahaly, A. Zaïr, and K. Varjú, "Attosecond pulse generation at ELI-ALPS 100 kHz repetition rate beamline," *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 53, 154004 (2020).
- [12] M. Muller, M. Kienel, A. Klenke, T. Gottschall, E. ShestaeV, M. Plotner, J. Limpert, and A. Tunnermann, "1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser," *Opt Lett* 41, 3439 (2016).
- [13] H. Fattahi, H. G. Barros, M. Gorjan, T. Nubbemeyer, B. Alsaif, C. Y. Teisset, M. Schultze, S. Prinz, M. Haefner, M. Ueffing, A. Alismail, L. Vámos, A. Schwarz, O. Pronin, J. Brons, X. T. Geng, G. Arisholm, M. Ciappina, V. S. Yakovlev, D.-E. Kim, A. M. Azzeer, N. Karpowicz, D. Sutter, Z. Major, T. Metzger, and F. Krausz, "Third-generation femtosecond technology," *Optica* 1, 45 (2014).
- [14] Y. Yin, J. Li, X. Ren, K. Zhao, Y. Wu, E. Cunningham, and Z. Chang, "High-efficiency optical parametric chirped-pulse amplifier in BiB(3)O(6) for generation of 3 mJ, two-cycle, carrier-envelope-phase-stable pulses at 1.7  $\mu\text{m}$ ," *Opt Lett* 41, 1142 (2016).
- [15] S.-W. Huang, G. Cirmi, J. Moses, K.-H. Hong, S. Bhardwaj, J. R. Birge, L.-J. Chen, E. Li, B. J. Eggleton, G. Cerullo, and F. X. Kärtner, "High-energy pulse synthesis with sub-cycle waveform control for strong-field physics," *Nature Photonics* 5, 475 (2011).
- [16] A. L. Viotti, C. Li, G. Arisholm, L. Winkelmann, I. Hartl, C. M. Heyl, and M. Seidel, "Few-cycle pulse generation by double-stage hybrid multi-pass multi-plate nonlinear pulse compression," *Opt Lett* 48, 984 (2023).
- [17] C. Grebing, M. Muller, J. Buldt, H. Stark, and J. Limpert, "Kilowatt-average-power compression of millijoule pulses in a gas-filled multi-pass cell," *Opt Lett* 45, 6250 (2020).
- [18] V. Cardin, N. Thiré, S. Beaulieu, V. Wanie, F. Légaré, and B. E. Schmidt, "0.42 TW 2-cycle pulses at 1.8  $\mu\text{m}$  via hollow-core fiber compression," *Applied Physics Letters* 107, 181101 (2015).
- [19] J. Weitenberg, A. Vernaleken, J. Schulte, A. Ozawa, T. Sartorius, V. Pervak, H. D. Hoffmann, T. Udem, P. Russbueldt, and T. W. Hansch, "Multi-pass-cell-based nonlinear pulse compression to 115 fs at 7.5 microJ pulse energy and 300 W average power," *Opt Express* 25, 20502 (2017).
- [20] M. Ueffing, S. Reiger, M. Kaumanns, V. Pervak, M. Trubetskov, T. Nubbemeyer, and F. Krausz, "Nonlinear pulse compression in a gas-filled multipass cell," *Opt Lett* 43, 2070 (2018).