

Technology of High Repetition Frequency High Order Harmonic Driver

王阁阳¹, 吕仁冲¹, 许思源¹, 刘寒¹, 田文龙¹, 张大成¹, 赵昆², 朱江峰² and 魏志义²

Citation: [科学通报 66](#), 924 (2021); doi: 10.1360/TB-2020-0514

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2020-0514>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/66/8>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[Phase-matched high-order harmonics by inter-action of Ar atoms with high-repetition-rate low-energy femtosecond laser pulses](#)
Science in China Series G-Physics, Mechanics & Astronomy **47**, 492 (2004);

[High-order harmonic generation in Ar and Ne with a 45fs intense laser field *](#)
Science in China Series A-Mathematics **42**, 778 (1999);

[Key technologies implementation of high-repetition-rate satellite laser ranging](#)
Geodesy and Geodynamics **4**, 51 (2013);

[High repetition rate passively mode-locked erbium-doped fiber laser](#)
Chinese Science Bulletin **53**, 706 (2008);

[Illumination stability for high-repetition-rate laser facilities in direct-drive inertial confinement fusion](#)
EPL **94**, 35002 (2011);



高重复频率高次谐波驱动源技术

王阁阳¹, 吕仁冲^{1,2}, 许思源^{1,2}, 刘寒¹, 田文龙¹, 张大成¹, 赵昆², 朱江峰^{1*}, 魏志义²

1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071;
2. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

*联系人, E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

2020-04-30 收稿, 2020-06-18 修回, 2020-06-18 接受, 2020-06-22 网络版发表

国家自然科学基金(11774277)、国家重点研发计划(2017YFB0405202)、陕西省自然科学基础研究计划基础研究定向委托项目(2019JCW-03)和中央高校基本科研业务费(JB190501, ZD2006)资助

摘要 超快驱动光源技术的不断进步激发了极紫外阿秒脉冲在原子分子的精密光谱学及超快动力学研究中的巨大潜力。本文回顾了高重复频率飞秒激光驱动高次谐波产生的发展历程, 并以高重复频率极紫外光源的应用为切入点梳理了钛宝石激光系统、掺镱光纤激光系统以及掺镱全固态激光系统等驱动光源的参数特点、适用范围以及发展趋势等。最后, 提出了用以驱动兆赫兹量级重复频率高次谐波产生的紧凑型全固态放大方案。

关键词 高重复频率, 高次谐波产生, 阿秒脉冲, 飞秒激光

超强超快激光是研究光与物质相互作用的利器, 是人们探索微观物质结构及其运动规律的“慧眼”。啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)、光学参量啁啾脉冲放大(optical parametric chirped pulse amplification, OPCPA)和相干合成(coherent beam combining, CBC)等技术的出现使科研人员不断突破激光亮度的极限, 实现了远大于原子内电场的激光强场条件^[1], 并以此点亮了阿秒科学的殿堂。由超强超快激光驱动原子分子产生高次谐波(high-order harmonic generation, HHG)获得的极紫外(extreme ultraviolet, XUV)阿秒脉冲光源实现了阿秒量级($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$)的超高时间分辨和原子尺度(10^{-10} m)的超高空间分辨^[2-5], 使科学家对微观物质结构及其运动规律的研究进入了电子动力学阶段(氢原子中的电子在基态玻尔轨道绕核运动一周的时间为152 as), 是探测和调控原子、分子及凝聚态物质中电子运动超快动力学过程的重要桌面级工具^[6-9]。

超强超快激光与气体原子分子相互作用发生极端

非线性过程产生高次谐波时, 驱动光源的聚焦功率密度需大于 10^{13} W/cm^2 ^[10,11], 因此此类驱动激光往往同时具备高峰值功率(>100 MW)和短脉冲宽度(<100 fs)。研究伊始, 为满足上述发生极端非线性过程的强场条件, 科研人员主要依赖可以产生少周期量级飞秒脉冲的钛宝石激光系统作为HHG的驱动光源, 目前已获得小于100 as的孤立脉冲^[12-15]。但是钛宝石激光系统受到热管理问题和泵浦源功率的限制^[16], 其平均功率的提升十分困难且造价较为昂贵, 因此由钛宝石放大器驱动产生HHG的典型工作重复频率被限制在20 kHz以下^[17], 严重制约了应用研究的发展。原子分子精密光谱学及超快动力学研究的不断深入, 对XUV光源的重复频率提出了更高的要求。例如, 利用直接光梳光谱学技术对原子和分子的绝对跃迁频率进行测量时, 驱动XUV光学频率梳的激光光源的重复频率是决定最终测量精度的关键因素之一, 因此此类激光驱动光源的重复频率一般超过100 MHz^[18-20]。此外, 在使用角分辨光

引用格式: 王阁阳, 吕仁冲, 许思源, 等. 高重复频率高次谐波驱动源技术. 科学通报, 2021, 66: 924~939

Wang G Y, Lü R C, Xu S Y, et al. High repetition rate ultrafast laser technology for driving high-order harmonic generation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 924~939, doi: [10.1360/TB-2020-0514](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0514)

电子谱仪(angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES)^[21]及冷靶反冲离子动量谱仪(cold target recoil ion momentum spectroscopy, COLTRIMS)^[22]等光电子能谱手段对原子分子内部电子超快动力学过程进行测量时, 将激光驱动光源的重复频率提升至MHz量级有助于缓解XUV光源单脉冲光子密度过高造成的空间电荷效应^[23,24], 并能缩短数据采集时间避免较长时间跨度内的扰动因素对实验结果的干扰^[25]。因此, 不断拓展的阿秒科学应用研究催生了高重复频率XUV光源的快速发展^[26~28]。

基于以上前沿应用对高重复频率(典型值为MHz量级)XUV光源的需求, 科研人员在初期驱动激光平均功率受限的情况下, 提出了使用飞秒激光共振增强腔(femtosecond enhancement cavity, fsEC)技术将钛宝石振荡器和光纤放大器输出的超短脉冲激光注入高精细度的谐振腔中, 通过共振增强效应在腔内焦点处产生HHG^[29], 以及通过驱动激光与金属纳米结构相互作用实现表面等离激元(surface plasmon polaritons, SPPs)共振以增强局域光场进而产生高次谐波^[30]的两种间接方法。其中, 亚波长结构的SPPs共振可将局域光场强度提升3~5个数量级, 由此飞秒激光振荡器输出的超短脉冲通过局域光场增强也可获得非常高的峰值功率密度, 是驱动高次谐波产生的新思路。但是, 迄今为止利用金属纳米结构实现局域光场增强产生高次谐波仍存在以下问题: 一是实现光场增强的热点体积的局域性限制导致气体高次谐波的产额偏低, 并且等离子体的原子谱线覆盖了谐波, 存在大量非相干辐射^[31]; 二是入射飞秒脉冲造成的热损伤会导致局部结构变形, 使纳米结构的寿命及可靠性降低^[32]。针对上述问题, 研究者对实现SPPs共振所采用金属纳米结构的设计与改善仍在不断深入。使用半导体激光器直接泵浦的掺镱(ytterbium, Yb)激光技术的快速发展为高重复频率HHG的产生提供了新途径。科研人员采用板条^[33]、薄片^[34]、光纤^[35]等激光系统设计均获得了kW级平均功率的超短脉冲输出, 通过光学聚焦可直接用以驱动高重复频率的HHG。

综上, 本文将以XUV光源的应用研究为导向, 重点对以上用以间接和直接驱动气体HHG的高重复频率飞秒激光驱动源的方法原理、技术路线及主要参数指标进行综述。第一部分主要介绍应用于腔内HHG的无源激光放大技术, 重点是基于钛宝石振荡器和Yb光纤放大器的fsEC研究。第二部分介绍应用于腔外直接驱动

HHG的增益放大技术, 重点对钛宝石激光系统、Yb光纤激光系统和Yb全固态激光系统等光源的研究情况进行梳理, 并结合课题组的研究基础提出用于驱动HHG的兆赫兹重复频率高功率亚百飞秒放大器的技术路线。最后对高重复频率高次谐波驱动源技术的发展趋势进行总结和展望。

1 基于无源放大技术的腔内高次谐波驱动光源研究

研究伊始, 在满足HHG阈值功率密度的情况下, 想要提升XUV光源的重复频率, 无疑对驱动激光的平均功率提出了更高的要求, 这对钛宝石激光系统来说是巨大的挑战。使用如图1所示的fsEC技术对超短脉冲激光进行被动增强是一种可行的解决方案。通过该技术在共振增强腔内能获得数百瓦的平均功率, 增强倍数可高达1000倍^[36], 以此达到高重复频率HHG对驱动激光平均功率以及光学聚焦强度的严苛要求。基于钛宝石振荡器和Yb光纤放大器的fsEC技术可实现10~250 MHz重复频率的高次谐波^[37~41], 由此获得的高重复频率XUV频率梳已成为原子分子精密光谱学研究中的革命性工具。

1.1 飞秒激光共振增强腔技术

fsEC是一种无增益介质提供损耗补偿的无源激光放大技术, 通过激光脉冲的相长干涉在增强腔内实现对注入激光的放大^[42], 且在高重复频率、高功率放大的同时有效规避了增益介质带来的热效应问题, 是利用钛宝石振荡器和光纤激光器等高重复频率飞秒激光光源驱动产生高次谐波的重要技术手段^[43]。

相比单频激光的共振增强, 将飞秒激光注入高精细度的谐振腔中实现增强需满足更加严格的共振条件。fsEC原理如图2所示。在时域下, 首先, 要保证注入共振

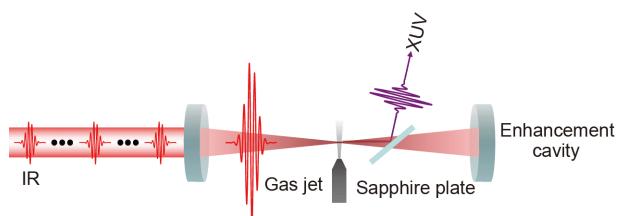


图1 (网络版彩色)基于飞秒激光共振增强腔技术的腔内高次谐波产生原理

Figure 1 (Color online) Schematic setup of intra-cavity high-harmonic generation based on femtosecond enhancement cavity

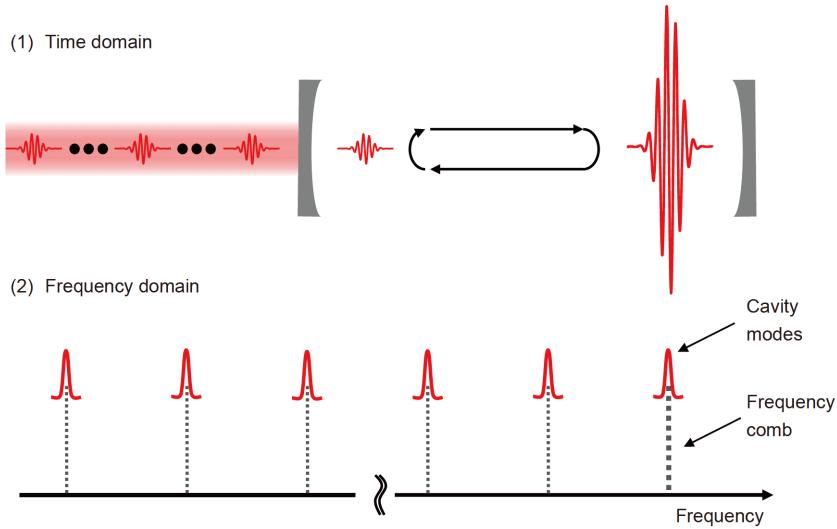


图2 (网络版彩色)飞秒共振增强腔原理
Figure 2 (Color online) Principle of femtosecond enhancement cavity

增强腔的飞秒脉冲在腔中每往返一周都能与飞秒激光输出的后续脉冲精确同步，即实现共振增强腔与飞秒激光的同步锁定^[43,44]，其次，需要锁定飞秒激光与共振增强腔中脉冲的载波包络相移^[45~47]，即满足相位共振条件：

$$\phi(\omega) = L\omega / c + \delta\phi(\omega) = 2n\pi, \quad (1)$$

式中第一项 $L\omega/c$ 表示增强腔光程引入的传输相移，第二项 $\delta\phi(\omega)$ 为增强腔内色散等因素引入的附加相移。当增强腔内往返脉冲与注入脉冲相位差为 2π 的整数倍时，光场实现最强的相干叠加，功率增强倍数最大。上述条件对应到频域中，即实现对注入脉冲激光的初始频移及重复频率与共振增强腔的初始频移及重复频率的完全锁定^[48]。此外，在满足共振条件的基础上，想要获得预期的功率增强倍数，共振增强腔的精细度设计和色散控制尤为关键。

精细度是表征共振增强腔功率增强倍数的重要参数。精细度的提升意味着注入激光在增强腔内的往返次数增加，因此相长干涉后形成的腔内稳态激光的能量得到进一步增强。其表达式可简写为

$$F \approx \pi\sqrt{ar} / (1-ar), \quad (2)$$

式中 a 为增强腔输入耦合镜的反射率， r 为腔内镜片的有效反射率。理论上，通过提升镜片反射率、减小腔内损耗即可提升共振增强腔的功率增强倍数。但是，另一个关键因素——色散的控制决定了共振增强腔内能够共振的飞秒脉冲的纵模个数，即共振增强带宽 $\Delta\omega$ ，进

而影响最终的脉冲宽度和强度。共振增强腔内二阶色散与精细度以及共振增强带宽的关系如下：

$$\phi''(\omega_c) = 8\pi / (F(\Delta\omega)^2). \quad (3)$$

式(3)表明，在保证共振增强带宽 $\Delta\omega$ 的前提下，提升精细度会给色散控制带来极其严苛的要求。因此，想要通过共振增强腔实现符合预期的功率增强从而在腔内获得驱动HHG的峰值功率密度，必须从增强腔的精细度设计和色散控制两方面综合考虑，设计最优化的技术路线。下面我们将重点介绍使用fsEC技术对钛宝石振荡器和光纤激光器输出的超短脉冲激光进行增强，并在腔内驱动气体HHG的研究工作。

1.2 基于钛宝石振荡器的增强腔研究

1991年，自锁模技术^[49]的出现使此后飞秒激光的脉冲宽度记录不断被刷新，腔内自相位调制的提高以及色散补偿方式的改善使研究者可以从钛宝石振荡器直接获得周期量级的超短脉冲激光。2000年，自参考锁相方法的引入使科研人员实现了对飞秒激光脉冲载波包络相移的稳定控制^[45,46]。至此，人们看到了使用飞秒激光点亮相干XUV和软X射线光源的曙光^[50]，进而拉开了fsEC技术发展的帷幕。

2002年，美国国家标准与技术局(National Institute of Standards and Technology, NIST)和科罗拉多大学(University of Colorado)联合实验室(Joint Institute for Laboratory Astrophysics, JILA)的Jones和Ye^[42]通过模拟

计算证明，共振增强腔技术可在保持亚百飞秒脉冲宽度的情况下将脉冲能量由纳焦耳(nJ)量级增强2~3个数量级至微焦耳(μJ)量级，使fsEC技术得到了理论验证，并预言基于色散控制的共振增强腔设计将有望获得脉冲宽度在20 fs以内的增强飞秒激光脉冲。2005年，JILA叶军课题组^[37]和德国马普量子光学研究所(Max Planck Institute of Quantum Optics, MPQ)Hänsch课题组^[29]相继使用飞秒激光共振增强腔技术将钛宝石振荡器输出的高重复频率、低能量的飞秒激光脉冲注入高精细度的共振增强腔中进行增强，在腔内焦点处与惰性气体相互作用，实现了重复频率高达100 MHz的高次谐波输出，分别获得了最短波长为114和55 nm的紫外光梳。上述实验成功验证了fsEC技术的可行性，但为获得波长更短、转换效率更高的HHG，仍需进一步提升驱动激光的单脉冲能量和平均功率以获得更强的激光峰值功率密度。

基于上述提升驱动光源峰值功率密度的需求，Fernandez等人^[51]使用Herriott型多通腔结构将钛宝石振荡器的重复频率降低至11 MHz，单脉冲能量提升至130 nJ，脉冲宽度为26 fs。2008年，Ozawa等人^[38]使用上述低重复频率钛宝石振荡器^[51]作为种子光源，注入精细度 $F=100\pi$ 、共振增强带宽 $\Delta\omega=20$ THz的共振增强腔内，获得了100倍的功率增强，腔内焦点处的峰值功率密度超过 5×10^{13} W/cm²。驱动激光与氩气相互作用，获得了最高19次谐波的频率辐射，最短波长为43 nm。但是，通过将精细度和共振增强带宽参数带入式(3)计算可得，上述实验中共振增强腔内的二阶色散 $\sigma''(\omega_0)$ 必须控制在5 fs²以内，这对实验设计来说要求极为苛刻。其后，Paul等人^[52]提出通过飞秒注入锁定技术提升钛宝石振荡器的平均功率，为fsEC技术的发展注入了新的动力。2011年，亚利桑那大学(University of Arizona, UA)Lee等人^[39]使用上述飞秒注入锁定技术，将从钛宝石光学频率梳输出的重复频率50 MHz、平均功率

0.6 W的飞秒脉冲展宽至4 ps后注入到钛宝石环形腔中，在18.5 W的泵浦功率下获得了超过6 W的输出，压缩后的脉冲宽度为80 fs。最终注入共振增强腔放大，在腔内焦点处也实现了接近 5×10^{13} W/cm²的峰值功率密度。

表1梳理了基于钛宝石振荡器的fsEC研究的典型结果。结合上述腔内产生高次谐波的实验研究可以发现，高功率的种子光源一方面可以降低fsEC实验对共振增强腔精细度及色散控制的严苛要求，另一方面可以改善紧聚焦情况下HHG的相位匹配问题^[53,54]，是fsEC技术广泛应用于科学的研究的必经之路。高功率光纤激光技术的快速发展无疑给这个领域带来了更耀眼的光芒。

1.3 基于Yb光纤放大器的增强腔研究

2013年，东京大学(The University of Tokyo)Kobayashi课题组^[55]使用CPA技术从Yb光纤放大器中获得了重复频率10 MHz、平均功率23 W、脉冲宽度200 fs的超短脉冲输出。2015年，该课题组使用上述Yb光纤放大器作为种子光源，以10 W的注入功率在共振增强腔内实现了高达1 kW的放大功率，焦点处的峰值功率密度超过 3.6×10^{13} W/cm²，获得了最高35次谐波的频率辐射，最短波长为30 nm，在发射波长为149 nm处的平均功率高达0.5 mW，显著提升了VUV光源的功率产额^[40]。随着光子晶体光纤模场面积的进一步增大，Yb光纤CPA系统的平均功率得到了大幅提升^[56]。2016年，MPQ的Krausz课题组^[41]使用重复频率250 MHz、平均功率420 W、脉冲宽度250 fs的Yb光纤放大器^[57]通过非线性压缩获得了平均功率170 W、脉冲宽度30 fs的种子光源，以此注入共振增强腔实现了最高20 kW的放大功率，焦点处的峰值功率密度超过 3×10^{14} W/cm²，最终获得了高达100 eV的光子能量，对应的最短波长为12.4 nm。2019年，Saule等人^[25]将钛宝石振荡器输出的

表1 基于钛宝石振荡器的飞秒激光共振增强腔研究的典型结果^{a)}

Table 1 Representative results of femtosecond enhancement cavity based on Ti:sapphire oscillators

年份	研究机构	注入激光参数	增强倍数	放大结果	重复频率 f_{rep} (MHz)
2005	JILA, USA	$E=8$ nJ; $\tau=48$ fs	600	$E=4.8$ μJ; $\tau=60$ fs	100 ^[37]
2005	MPQ, Germany	$E=5$ nJ; $\tau=20$ fs	54	$E=0.3$ μJ; $\tau=28$ fs	100 ^[29]
2008	MPQ, Germany	$E=100$ nJ; $\tau=38$ fs	100	$E=10$ μJ; $\tau=57$ fs	10.8 ^[38]
2011	UA, USA	$E=120$ nJ; $\tau=80$ fs	125	$E=15$ μJ; $\tau=80$ fs	50 ^[39]

a) E: 单脉冲能量; τ: 脉冲宽度; f_{rep} : 重复频率

重复频率73.6 MHz、平均功率300 μ W、中心波长1030 nm的种子激光经过预放选单至18.4 MHz注入Yb光纤主放大器，平均功率被提升至100 W，脉冲宽度为250 fs；后经非线性展宽及压缩，输出的激光脉冲宽度为40 fs，单脉冲能量超过4 μ J；注入精细度 $F=140$ 的共振增强腔，最终腔内焦点处的激光峰值功率密度超过 1×10^{14} W/cm²；在驱动HHG的实验中，光子能量接近40 eV处的光子通量为 1×10^{13} photons/s。基于Yb光纤放大器的fsEC研究典型结果如表2所示，此类注入功率较高的驱动光源在高重复频率下有效提升了高次谐波的光子通量，并成功实现了小于20 nm的波长输出。

fsEC技术作为产生高重复频率XUV光源的重要技术手段，所提供的重复频率扩展范围已超过百兆赫兹，为直接光梳光谱学的研究提供了诸多可能。例如，这些高重复频率的XUV光源将有助于提升XUV光学频率梳的频率分辨精度^[37]，未来在里德堡常数、电子质子质量比等基本物理学常量的验证^[58]及超精密光学原子钟的研究中^[59,60]将发挥重要作用。但是，要获得更高性能、可稳定使用的高重复频率XUV光源，仍面临两个挑战：(1) 高精细度共振增强腔内超低损耗光学元件的性能退化问题^[43]；(2) 重复频率百兆赫兹的共振增强腔内焦点处等离子体的非线性相位响应问题^[61~63]。Yb激光技术在给这一领域带来光芒的同时，也让科研人员们看到了进一步提升XUV光源光子能量、光子通量及脉冲宽度的潜力。

2 基于增益放大技术的腔外HHG驱动光源研究

fsEC技术是高重复频率XUV光源发展史上一座重要的里程碑，但其由于技术难度大、系统复杂程度高，提高了应用研究的准入门槛，较难覆盖日益拓展的XUV光源的应用需求。基于半导体激光器直接泵浦的高功率Yb激光技术的快速发展，无疑用更耀眼的光再一次点亮了这一研究领域，为高光子能量、高光子通量以及少周期、大能量XUV光源的发展奠定了基础。

基于CPA和CBC等关键技术，科研人员在高重复频率(MHz量级)Yb板条、薄片和光纤激光系统中都获得了平均功率kW量级的超短脉冲输出，通过非线性压缩可将脉冲宽度压缩至50 fs以内。这样高亮度的种子光源通过光学聚焦即可产生峰值功率密度大于 10^{13} W/cm²的强场条件，可直接用于驱动气体HHG(图3)。本小节将重点对用于腔外驱动高重复频率HHG的钛宝石激光系统、Yb光纤激光系统和Yb全固态激光系统等驱动光源的发展历程进行梳理。

2.1 钛宝石激光系统

峰值功率密度是影响高次谐波截止区光子能量和产额的关键因素。1985年CPA技术的问世^[64]使钛宝石激光放大系统输出的飞秒激光脉冲亮度有了极大的提升，具有极高的峰值功率密度^[65]。目前，脉冲宽度小于30 fs、单脉冲能量大于1 mJ、重复频率1~10 kHz量级的钛宝石放大器仍是产生高次谐波及单个阿秒脉冲的主力光源，结合OPCPA技术在获得高光子能量及更短阿秒脉冲方向优势明显^[66]。针对高重复频率XUV光源的应用，科研人员使用钛宝石激光系统也进行了诸多研究。

2012年，马克斯普朗克微结构物理研究所(Max Planck Institute for Iron Research, MPIE)Chiang等人^[67]使用重复频率4 MHz、平均功率2.6 W、脉冲宽度50 fs的Herriott型结构的长腔钛宝石激光器，通过紧聚焦(聚焦光斑半径仅为2.5 μ m)获得了最高19次谐波的频率辐射，最短波长为42 nm，但获得的光子通量最高仅为 6×10^3 photons/s。同年，马尔堡大学(University of Marburg)Heyl等人^[68]为改善HHG相位匹配提升效率，使用重复频率100 kHz、单脉冲能量7 μ J、脉冲宽度45 fs的钛宝石啁啾脉冲放大系统，通过非线性压缩，在焦点处产生了 1.5×10^{14} W/cm²的峰值功率密度，获得了 3×10^9 photons/s的光子通量。上述研究结果表明，平均功率有限的钛宝石激光系统在兆赫兹重复频率下很难获得高光子通量或高光子能量的高次谐波辐射。2015年，劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National La-

表2 基于掺镱光纤放大器的飞秒共振增强腔研究的典型结果

Table 2 Representative results of femtosecond enhancement cavity based on Yb-doped fiber amplifiers

年份	研究机构	注入激光参数	增强倍数	放大结果	重复频率 f_{rep} (MHz)
2013	The University of Tokyo, Japan	$E=2.3 \mu\text{J}; \tau=200 \text{ fs}$	100	$E=100 \mu\text{J}; \tau=60 \text{ fs}$	$10^{[40]}$
2016	MPQ, Germany	$E=0.6 \mu\text{J}; \tau=30 \text{ fs}$	117	$E=80 \mu\text{J}; \tau=30 \text{ fs}$	$250^{[41]}$
2019	MPQ, Germany	$E=4 \mu\text{J}; \tau=40 \text{ fs}$	35	$E=150 \mu\text{J}; \tau=40 \text{ fs}$	$18.4^{[25]}$

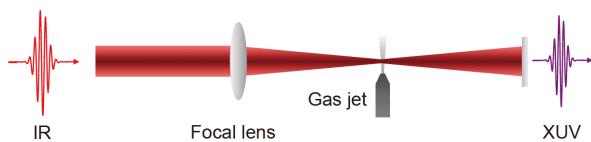


图3 (网络版彩色)高亮度的飞秒激光光源直接驱动腔外高次谐波产生

Figure 3 (Color online) Extra-cavity high-harmonic generation driven directly by high-brightness femtosecond laser source

batory, LBL) Wang等人^[69]使用重复频率50 kHz、单脉冲能量120 μJ、脉冲宽度50 fs的钛宝石啁啾脉冲放大系统, 通过双色场驱动, 在光子能量22.3 eV处获得了高达 3×10^{13} photons/s的光子通量。2017年, 慕尼黑大学(Ludwig Maximilian University of Munich, LMU) Schmidt等人^[66]将钛宝石放大器输出的重复频率10 kHz、单脉冲能量400 μJ、脉冲宽度25 fs的激光脉冲通过非线性压缩获得了脉冲宽度5.3 fs、单脉冲能量80 μJ的驱动激光, 与稀有气体相互作用, 在焦点处的峰值功率密度高达 1×10^{15} W/cm², 最终获得的光子能量高达140 eV, 光子能量在90 eV处的光子通量达到 5×10^9 photons/s。

表3梳理了高重复频率钛宝石激光系统的典型参数。结合腔外直接驱动HHG的研究情况, 可以发现, 钛宝石激光系统在保持高峰值功率密度的情况下可以获得较高的光子能量和转换效率, 但受平均功率短板的影响, 很难将XUV光源的重复频率提升至兆赫兹。因此, 高平均功率的飞秒驱动光源研究是提升XUV光源重复频率的关键。

2.2 Yb光纤激光系统

光纤激光系统具有转换效率高、散热优良、集成拓展方便等优点, 是产生高平均功率超快激光的利器^[70~75]。基于大模场面积光纤^[76]的CPA系统输出的超短脉冲平均功率高达数百瓦^[35,77,78], 但放大过程中的非

线性相移积累及自聚焦引起的损伤问题仍是限制飞秒光纤激光器输出脉冲峰值功率进一步提升的瓶颈和难题^[71,72]。为了突破光纤放大器输出能量的限制, 超短脉冲CBC技术应运而生。CBC技术原理如图4所示。通过相位控制, 使分离激光束单独放大后在远场实现相干叠加增强, 与非线性压缩技术相结合可使高重复频率Yb光纤激光系统的峰值功率突破10 GW^[73,74]。至此, Yb光纤激光系统接过钛宝石激光系统的接力棒, 成为驱动重复频率兆赫兹量级HHG的理想光源。

耶拿大学(University of Jena)Tünnermann课题组在超短脉冲光纤激光相干合成领域开展了一系列的实验研究。2014年, Rothhardt等人^[79]和Klenke等人^[80]采用相干合成技术, 将振荡器输出的激光脉冲经过展宽、预放大后, 分束为两路激光脉冲分别注入棒状光纤进行放大, 在相位锁定的前提下实现空间合束。之后, 通过非线性压缩技术压缩短冲宽度, 获得了重复频率150 kHz、单脉冲能量353 μJ、脉冲宽度7.8 fs、峰值功率25 GW的驱动激光, 聚焦后的峰值功率密度高达 2×10^{15} W/cm²; 用于驱动HHG, 最终获得的光子能量高达350 eV, 进入了水窗波段(280~530 eV), 光子能量120 eV处的光子通量达到 3×10^9 photons/s。考虑到相干衍射成像^[27]等应用研究对高重复频率以及高通量XUV光源的需求, 同年, Hädrich等人^[74,81]在光纤激光相干合成研究上更进一步, 使用重复频率600 kHz、单脉冲能量130 μJ、脉冲宽度30 fs、聚焦功率密度 9.7×10^{13} W/cm²的飞秒激光驱动HHG, 在光子能量30 eV处获得了平均功率143 μW, 光子通量高达 3×10^{13} photons/s。超短脉冲光纤激光相干合成技术的不断进步释放了高重复频率XUV光源研究的潜力。在实现HHG阈值功率密度的情况下, 驱动光源的重复频率已经提升至10 MHz量级。2015年, Hädrich等人^[82]使用基于相干合成技术的光纤啁啾脉冲放大器, 通过由Kagome光子晶体光纤和啁啾镜组成的非线性压缩系统, 在重复频率10.7 MHz

表3 基于钛宝石激光系统的腔外高次谐波驱动光源研究的典型结果^{a)}

Table 3 Representative results of driving extra-cavity high-harmonic generation with Ti:sapphire laser systems

年份	研究机构	技术方案	实验结果	重复频率 f_{rep}
2012	MPIE, Germany	Ti:sapphire oscillator, Herriott cell	$E=0.65 \mu\text{J}; \tau=50 \text{ fs}$	4 MHz ^[67]
2012	University of Marburg, Germany	Ti:sapphire CPA	$E=7 \mu\text{J}; \tau=45 \text{ fs}$	100 kHz ^[68]
2015	LBL, USA	Ti:sapphire CPA	$E=120 \mu\text{J}; \tau=50 \text{ fs}$	50 kHz ^[69]
2017	LMU, Germany	Ti:sapphire CPA, HCF	$E=80 \mu\text{J}; \tau=5.3 \text{ fs}$	10 kHz ^[66]

a) HCF: hollow-core fiber, 空芯光纤

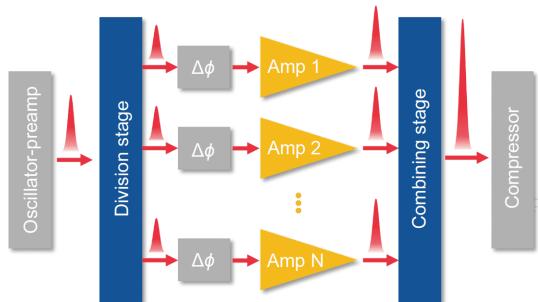


图4 (网络版彩色)超短脉冲光纤激光相干合成技术原理图
Figure 4 (Color online) Schematic setup of coherent beam combining of ultrashort pulsed lasers

的情况下可输出脉冲宽度31 fs、单脉冲能量7.1 μJ、聚焦功率密度 7.4×10^{13} W/cm²的驱动激光，最终在光子能量27.7 eV处获得了平均功率51.1 μW，光子通量高达 1.1×10^{13} photons/s。上述研究显著提升了桌面级XUV光源的重复频率及平均功率。2016年，Müller等人^[83]通过8路相干合成，从Yb光纤激光器输出了平均功率超过1 kW、单脉冲能量高达1 mJ、脉冲宽度小于275 fs的超短脉冲，为后续驱动高重复频率高次谐波的产生提供了更亮的光源，也为极端相对论非线性领域的强激光粒子加速研究带来了曙光。2020年，采用12路相干合成的超短脉冲光纤激光器的平均功率已经突破10 kW，再一次刷新了飞秒激光器平均功率的纪录^[84]。

表4梳理了高重复频率Yb光纤激光系统的典型参数。基于主动控制的CBC(空域、时域和频域)技术是未来提升高重复频率光纤激光系统峰值功率的重要技术手段^[85]。但随着输出功率的提高，相干合成系统的复杂程度也在不断增加，实现各路激光时域、空域上的重合，频域上的匹配以及相位上的锁定，对激光场的精确调控提出了十分严苛的要求^[86]。此外，高功率光纤激光器中的非线性效应(受激拉曼散射、布里渊散射和自

聚焦效应等)^[83]、横模不稳定现象^[87~90]以及自发辐射放大(amplified spontaneous emission, ASE)带来的脉冲对比度下降等问题，也是其走向高峰值功率应用研究亟需解决的难点。

2.3 Yb全固态激光系统

高功率光纤CBC系统复杂程度高、光场调控难度大，受ASE影响产生的脉冲基座不仅使主脉冲峰值功率提升的难度增加，还会影响激光脉冲与物质相互作用的物理过程。以掺镱固体材料作为增益介质的Yb薄片振荡器和全固态放大器能以相对简单的结构在高重复频率下获得满足HHG的峰值功率密度，是继钛宝石激光系统和Yb光纤系统之后理想的高重复频率驱动光源^[91]，在高功率飞秒激光技术和驱动产生高重复频率HHG的研究中都扮演了重要角色。

2.3.1 Yb薄片振荡器

掺镱增益介质的量子效率较钛宝石晶体有了很大的改善，但热管理问题仍然是限制固体激光器输出功率的关键。如图5所示薄片概念^[92]的提出则有效改善了半导体直接泵浦固体激光器中增益介质的热积累问题，让飞秒激光器的输出功率突破百瓦达到了一个新的高峰^[93~98]，也使得兆赫兹重复频率激光振荡器直接驱动XUV光源变为现实^[99]。

2012年，苏黎世联邦理工学院(Swiss Federal Institute of Technology Zurich, ETH Zurich)Keller课题组的Saraceno等人^[100]使用Yb:YAG薄片作为增益介质，从振荡器直接输出了平均功率高达275 W、脉冲宽度583 fs、重复频率16.3 MHz、单脉冲能量16.9 μJ、峰值功率25.6 MW的飞秒激光脉冲。为了进一步提升薄片激光器的峰值功率，2015年，Emaury等人^[17]将薄片振荡器的重复频率降至2.4 MHz，获得了高达29 μJ的单脉冲

表4 掺镱光纤激光系统的典型研究结果^{a)}

Table 4 Representative results of Yb-doped fiber laser systems

年份	技术方案	实验结果	重复频率 f_{rep}
2014	FCPA, CBC(Channel=2), HCF	$E=353$ μJ; $\tau=7.8$ fs	150 kHz ^[79]
2014	FCPA, CBC(Channel=4), HCF	$E=130$ μJ; $\tau=30$ fs	600 kHz ^[81]
2015	FCPA, CBC(Channel=4), Kagome HC-PCF	$E=7.1$ μJ; $\tau=31$ fs	10.7 MHz ^[82]
2016	FCPA, CBC(Channel=8)	$E=1$ mJ; $\tau=275$ fs	1 MHz ^[83]
2020	FCPA, CBC(Channel=12)	$E=130$ μJ; $\tau=254$ fs	80 MHz ^[84]

a) FCPA: fiber chirped pulse amplification, 光纤啁啾脉冲放大系统; Kagome HC-PCF: Kagome hollow-core photonic crystal fiber, Kagome空芯光子晶体光纤。研究机构均为University of Jena, Germany

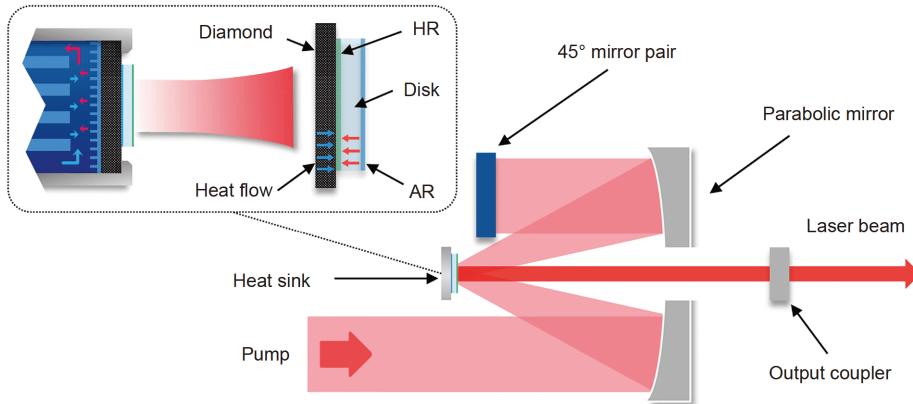


图 5 (网络版彩色)薄片激光技术原理图

Figure 5 (Color online) Schematics of thin-disk laser technology

能量, 脉冲宽度为870 fs; 通过非线性压缩, 脉冲宽度缩短为108 fs, 聚焦后的峰值功率密度高达 5.5×10^{13} W/cm², 以此驱动气体HHG, 在光子能量23 eV处的光子通量为 5×10^7 photons/s, 开创了使用飞秒振荡器直接驱动HHG的先河。2019年, Saltarelli等人^[101]再次刷新了薄片振荡器的输出纪录, 获得了平均功率高达350 W、单脉冲能量39 μJ、重复频率8.88 MHz、脉冲宽度940 fs、峰值功率37 MW的飞秒激光脉冲输出。通过非线性压缩手段^[102,103], 缩短脉冲宽度可进一步提升脉冲激光的峰值功率, 用以驱动HHG。

表5梳理了Yb薄片振荡器的典型参数。未来飞秒薄片振荡器的输出功率将进一步迈向千瓦级, 但是增益介质的带宽以及腔内空气等介质带来的非线性积累限制了高功率薄片振荡器的输出脉冲宽度, 而额外的非线性压缩装置势必会增加驱动激光系统的复杂程度。直接从激光器输出峰值功率大于100 MW而脉冲宽度小于100 fs的激光脉冲用以驱动HHG成为科研人员继续努力的方向。

表 5 摊靶薄片振荡器的典型研究结果^{a)}

Table 5 Representative results of Yb-doped thin-disk laser oscillators

年份	研究机构	技术方案	实验结果	重复频率 f_{rep} (MHz)
2012	ETH Zurich, Switzerland	TDL Oscillator SESAM	$E=16.9 \mu\text{J}; \tau=583 \text{ fs}$	16.3 ^[100]
2014	MPQ, Germany	TDL Oscillator KLM	$E=14.4 \mu\text{J}; \tau=330 \text{ fs}$	18.8 ^[94]
2015	ETH Zurich, Switzerland	TDL Oscillator SESAM, Kagome HCPCF	$E=21 \mu\text{J}; \tau=108 \text{ fs}$	2.4 ^[17]
2016	MPQ, Germany	TDL Oscillator KLM	$E=10 \mu\text{J}; \tau=140 \text{ fs}$	15.6 ^[104]
2019	ETH Zurich, Switzerland	TDL Oscillator SESAM	$E=39 \mu\text{J}; \tau=940 \text{ fs}$	8.88 ^[101]

a) TDL: thin-disk laser, 薄片激光; SESAM: semiconductor saturable absorber mirror, 半导体可饱和吸收镜; KLM: Kerr-lens mode locking, 克尔透镜锁模

2.3.2 Yb全固态放大器

飞秒薄片振荡器具有极高的平均功率, 但受脉冲宽度的影响, 峰值功率普遍偏低, 因此通常采用紧聚焦的方案获得大于 10^{13} W/cm²的峰值功率密度, 这在一定程度影响了高次谐波的相位匹配, 因此转换效率较低。采用CPA和多通放大技术的Yb全固态放大系统是获得高峰值功率激光脉冲的重要手段。随着板条、薄片等晶体热管理方式的不断进步, Yb全固态放大系统的平均功率也有了极大提升, 成为驱动兆赫兹重复频率HHG的新一代光源。板条激光技术原理如图6所示。

2010年, 德国弗劳恩霍夫激光技术研究所(Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, ILT)Russbueldt等人^[33]使用Yb:YAG板条放大器, 获得了重复频率20 MHz、平均功率1.1 kW、脉冲宽度615 fs、峰值功率80 MW的飞秒激光输出, 首次使飞秒激光器的平均功率突破千瓦。2013年, 斯图加特大学(University of Stuttgart)Negel等人^[34]使用Yb:YAG薄片放大器, 获得了重复频率800 kHz、平均功率1.1 kW、单脉冲能量

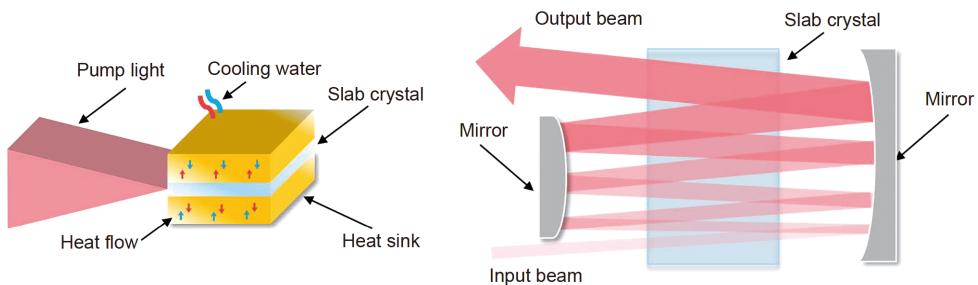


图6 (网络版彩色)板条激光技术原理图
Figure 6 (Color online) Schematics of innoslab laser technology

1.38 mJ、脉冲宽度7.3 ps的超短脉冲输出，进一步提升了高重复频率全固态放大器的峰值功率水平。通过采用上述板条和薄片设计的全固态放大器能输出极高的平均功率和单脉冲能量，可结合OPCPA技术获得长波红外激光光源^[105~109]用于驱动HHG，产生覆盖水窗波段的软X射线辐射^[110]。板条和薄片设计中常采用的Yb:YAG晶体，虽然热导性质优良，但增益发射带宽有限，因此上述两种类型的全固态放大器直接输出的激光脉冲宽度较宽。Yb:CALYO、Yb:CALGO等新型宽带晶体的出现使科研人员有望从全固态放大器得到更短的激光脉冲输出。

2013年，帕维亚大学(University of Pavia)Caracciolo等人^[111]使用CPA技术，将振荡器输出的单脉冲能量10 nJ、脉冲宽度92 fs的种子激光展宽至6 ps，注入使用Yb:CALGO晶体作为增益介质的再生放大器中，获得了平均功率高达36 W的激光输出，经透射光栅压缩，最终得到重复频率500 kHz、单脉冲能量56 μJ、脉冲宽度217 fs、峰值功率258 MW的超短脉冲输出。其后，巴黎萨克雷大学(University of Paris-Saclay)Pouysegur等人^[112]使用非线性放大的方法，将振荡器输出的165 fs的激光脉冲展宽至20 ps(负啁啾)，注入同样使用Yb:CALGO晶体作为增益介质的再生放大器中，经透射光栅压缩获得了脉冲宽度97 fs、单脉冲能量24 μJ、重复频率50 kHz、峰值功率218 MW的激光输出。上述研究工作证明，从Yb全固态放大器可直接输出峰值功率大于200 MW而短脉冲宽度小于100 fs的激光脉冲，在满足HHG阈值功率密度的同时，极大地简化了驱动光源的结构，并保证了重复频率等参数的可调谐性。

使用新型宽带Yb晶体的全固态放大器具备窄脉宽、高功率以及结构紧凑的特性，使Light Conversion、Amplitude Laser、Avesta等超快激光器公司也趋

之若鹜，纷纷推出了相关产品。2014年，隆德大学(Lund University)Lorek等人^[91]使用Light Conversion公司研制的平均功率20 W、脉冲宽度170 fs、重复频率1~600 kHz可调的PHAROS全固态激光系统，通过光学聚焦与氩气相互作用，最终获得的光子能量高达92.7 eV。在重复频率为20 kHz时，在光子能量25.3 eV处获得的光子通量高达 4.2×10^{11} photons/s；重复频率为100 kHz时，光子能量30.1 eV处的光子通量为 4.4×10^{10} photons/s。2020年，Liu等人^[113]也使用平均功率20 W、脉冲宽度280 fs、重复频率50~200 kHz可调的PHAROS全固态激光系统，在ARPES(angle resolved photoemission spectroscopy)实验中获得了21.5 meV的能量分辨率，验证了使用新型宽带Yb晶体的再生放大器在应用研究中的潜力。

表6梳理了Yb全固态放大器的典型参数。兼具宽发射光谱和高热导率性质的新型Yb激光晶体的研究，使Yb全固态激光系统有望在高重复频率下直接输出高峰值功率的飞秒脉冲，是提升XUV光源光子通量和重复频率的新途径。此外，激光脉冲的时域质量也是决定驱动光源性能的关键参数。相比受ASE影响严重的高功率Yb光纤激光系统以及需要额外非线性压缩的薄片振荡器，能够直接输出高质量超短脉冲的Yb全固态放大器在高效率驱动HHG方面具有独特优势。

进一步缩短Yb全固态放大器输出飞秒激光的脉冲宽度是提升其峰值功率实现高效率驱动HHG的关键。基于自相位调制效应的腔外非线性压缩手段，在压缩脉冲的同时产生的底部基座会改变脉冲形状，进而影响脉冲压缩质量。目前报道的Yb全固态放大器的种子振荡器脉冲宽度多在100 fs左右，限制了其直接输出窄激光脉冲的可能性。通过增加种子激光的光谱带宽并抑制增益窄化效应，能使Yb全固态放大器直接输出更

表 6 掺镱全固态放大器的典型研究结果^{a)}**Table 6** Representative results of Yb-doped all-solid-state amplifier systems

年份	研究机构	技术方案	实验结果	重复频率 f_{rep}
2010	ILT, Germany	Yb:YAG-Innoslab	$E=55 \mu\text{J}; \tau=615 \text{ fs}$	20 MHz ^[33]
2013	University of Stuttgart, Germany	Yb:YAG-Thin disk	$E=1.38 \text{ mJ}; \tau=7.8 \text{ ps}$	800 kHz ^[34]
2013	University of Pavia, Italy	Yb:CALGO CPA	$E=56 \mu\text{J}; \tau=217 \text{ fs}$	500 kHz ^[111]
2013	University of Paris-Saclay, France	Yb:CALGO CPA	$E=24 \mu\text{J}; \tau=97 \text{ fs}$	50 kHz ^[112]
2014	Lund University, Sweden	Light Conversion PHAROS	$E=200 \mu\text{J}; \tau=170 \text{ fs}$	100 kHz ^[91]
2018	Belarusian National Technical University, Belarusia	Yb:CALYO CPA	$E=15 \mu\text{J}; \tau=120 \text{ fs}$	200 kHz ^[114]

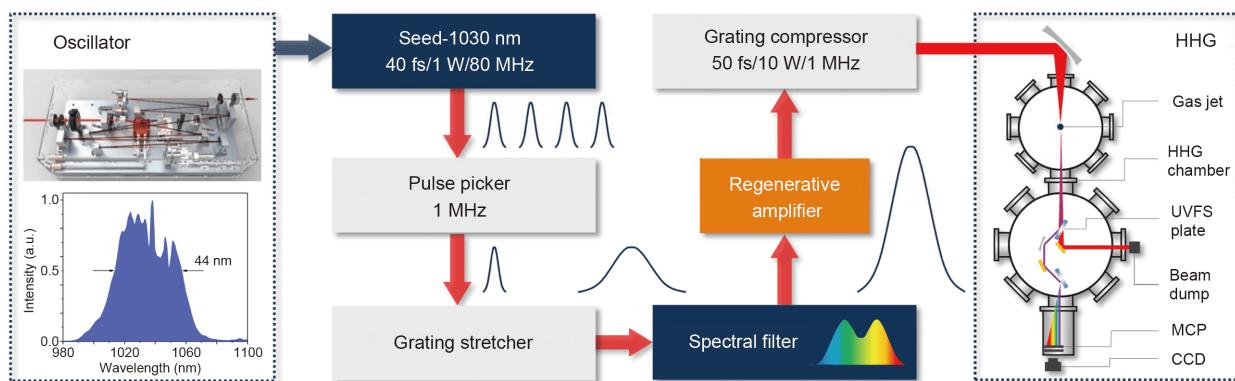
a) Innoslab: 板条; Thin disk: 薄片

短的脉冲宽度。我们课题组近几年深入研究了半导体激光器泵浦的克尔透镜锁模Yb振荡器技术^[115,116]。2015年, 利用半导体激光器泵浦Yb:CALYO晶体, 实现了33 fs的超短脉冲输出^[117], 光谱半高宽接近50 nm, 支持的傅里叶变换极限脉宽仅为24 fs, 平均功率为36 mW。为实现再生放大过程中注入种子激光功率的可调性, 2019年, 使用高亮度976 nm光纤激光器泵浦Yb:CALYO晶体, 实现了平均功率大于2 W、最短脉冲宽度36 fs的超短脉冲输出^[118], 是目前国际上同一功率水平的Yb全固态振荡器获得的最短脉冲宽度。结合上述高重复频率驱动光源的发展趋势和本课题组的研究进展, 我们计划使用平均功率大于1 W、脉冲宽度小于40 fs、重复频率80 MHz的全固态振荡器作为种子激光(光谱半高宽超过40 nm), 经高重频普克尔盒系统选单至1 MHz, 之后通过啁啾体布拉格光栅展宽至百皮秒量级后注入再生腔进行放大, 最后通过透射光栅对放大脉冲进行时域压缩, 技术路线如图7所示。针对高重频高功率再生放大实验的难点, 本方案拟解决以下三个关键问题: 一是高功率连续泵浦下激光晶体处的热

管理, 包括增益介质处的热积聚分析和高效率的换热设计; 二是增益窄化抑制, 计划使用光谱调制和非线性管理两种手段最大限度地克服放大过程中激光脉冲频域成分的缺失; 三是高重频再生放大动力学过程的分析, 主要研究内容是激光脉冲的倍周期分叉现象(增益变化导致的输出脉冲能量混沌状态)。在解决上述问题的基础上, 我们计划从Yb全固态放大器直接输出重复频率1 MHz、单脉冲能量10~50 μJ、脉冲宽度小于50 fs、峰值功率大于200 MW的飞秒激光, 通过光学聚焦用以直接驱动HHG, 最终实现高次谐波驱动光源的紧凑化、便捷化设计, 为不断拓展的极紫外激光的应用研究注入新动力。进一步, 有望通过一级非线性压缩获得少周期量级飞秒脉冲, 结合载波包络相位锁定技术, 为兆赫兹量级孤立阿秒脉冲的产生提供新手段。

3 总结与展望

回顾高重复频率高次谐波驱动光源的发展历程, 基于fsEC技术的钛宝石振荡器和光纤放大器首次将XUV光源的重复频率扩展到了100 MHz量级, 激发了

**图 7** (网络版彩色)高重复频率掺镱全固态飞秒放大器直接驱动高次谐波产生的技术路线图**Figure 7** (Color online) Schematic view of HHG directly driven by high repetition rate Yb all solid-state amplifier

极紫外飞秒光学频率梳在电子跃迁光谱探测和量子电动力学等科学应用中的应用潜力。薄片振荡器和基于相干合成技术的Yb光纤放大器是驱动重复频率10 MHz量级XUV光源的主力,但受脉冲宽度限制,需要额外的非线性压缩装置。能够直接输出峰值功率大于100 MW、脉冲宽度小于100 fs的全固态飞秒放大器将是获得重复频率1 MHz量级XUV光源的耀眼新星,为原子、分子及凝聚态物质中电子运动超快动力学的研究奠定光源基础。

针对上述直接光梳光谱学、光电子能谱和超快动力学等应用研究对高次谐波驱动光源重复频率的不同需求,图8梳理了高重复频率高次谐波驱动光源的发展

趋势,给出了飞秒共振增强腔、钛宝石激光系统、掺镱光纤相干合成系统、掺镱薄片振荡器和掺镱全固态放大系统用以驱动高次谐波产生的工作重频范围。表7汇总了无源放大和增益放大中不同技术手段的参数特点和亟须解决的关键问题等。为满足不断拓展的阿秒科学应用研究的需求,超快驱动光源的研究正在朝着更高、更强的方向不断蓬勃发展。

获得更高平均功率、更短脉冲宽度的驱动激光对实现高重复频率及高光子通量的XUV光源至关重要,是实现阿秒科学应用研究的基础。就目前而言,钛宝石激光系统仍是获得极高峰值功率(PW量级)超强激光的主力光源,而Yb光纤激光系统及Yb全固态激光系统将是

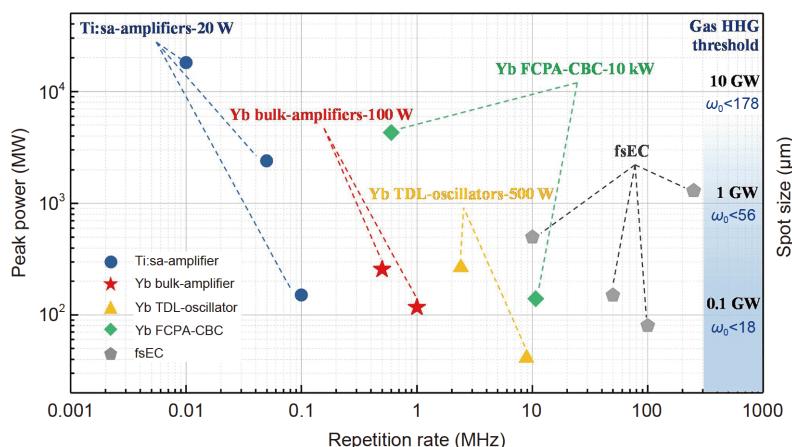


图8 (网络版彩色)高重复频率高次谐波驱动光源发展趋势

Figure 8 (Color online) The development of high repetition rate laser systems for driving high-order harmonic generation

表7 高重复频率高次谐波驱动光源技术的比较

Table 7 Comparison of high repetition rate laser technologies for driving high-order harmonic generation

分类	技术手段	技术优势	技术难点
无源放大	飞秒共振增强腔	可获得重复频率大于100 MHz的相干XUV光源	高精细度共振增强腔的色散控制、增强腔和激光腔的精密锁定以及等离子体的非线性相位响应
	钛宝石激光系统	在低重复频率下($\leq 1 \text{ kHz}$)脉冲峰值功率可超过TW量级	增益介质的热管理和高功率绿光泵浦源的缺失
	掺镱光纤激光系统	通过相干合成手段可实现平均功率万瓦级的飞秒脉冲输出	大模场光子晶体光纤的制备、放大过程的非线性管理和激光光场的精确调控
增益放大	薄片激光振荡器	可从重复频率大于10 MHz的激光振荡器直接输出平均功率数百瓦的飞秒脉冲	薄片的制备及焊接工艺、多通泵浦结构的设计和高损伤阈值SESAM的制备
	板条放大系统	利用板条系统进行功率放大可获得百瓦量级的平均功率输出	光束质量的控制
	基于新型掺镱晶体的CPA系统	在高重复频率下(1 MHz)可直接输出峰值功率大于100 MW的超短脉冲	短脉冲种子光源的研制、增益窄化的抑制和高功率泵浦下的热管理

未来长波红外光源驱动阿秒束线(高光子能量)、高重复频率光源驱动阿秒束线(高光子通量)以及少周期大能量

光源驱动阿秒束线(高脉冲能量)的中坚力量。以基础应用研究为导向的光源科学仍在快速发展,未来可期。

参考文献

- 1 Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond Lasers. *Science*, 1994, 264: 917–924
- 2 Ferray M, L’Huillier A, Li X F, et al. Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 1988, 21: 31–35
- 3 Corkum P B. Plasma perspective on strong-field multiphoton ionization. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 1995–1997
- 4 Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 163–234
- 5 Popmintchev T, Chen M C, Arpin P, et al. The attosecond nonlinear optics of bright coherent X-ray generation. *Nat Photonics*, 2010, 4: 822–832
- 6 Nisoli M, Sansone G. New frontiers in attosecond science. *Prog Quantum Electron*, 2009, 33: 17–59
- 7 Itatani J, Levesque J, Zeidler D, et al. Tomographic imaging of molecular orbitals. *Nature*, 2004, 432: 867–871
- 8 Cavalieri A L, Müller N, Uphues T, et al. Attosecond spectroscopy in condensed matter. *Nature*, 2007, 449: 1029–1032
- 9 Haarmann T, Zacharias H. Application of high harmonic radiation in surface science. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2009, 13: 13–27
- 10 Chang Z H. Fundamentals of Attosecond Optics. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 2011
- 11 Roussignol P, Ricard D, Lukasik J, et al. New results on optical phase conjugation in semiconductor-doped glasses. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 1987, 4: 5–13
- 12 Goulielmakis E, Schultze M, Hofstetter M, et al. Single-cycle nonlinear optics. *Science*, 2008, 320: 1614–1617
- 13 Zhao K, Zhang Q, Chini M, et al. Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch. *Opt Lett*, 2012, 37: 3891–3893
- 14 Li J, Ren X, Yin Y, et al. 53-attosecond X-ray pulses reach the carbon K-edge. *Nat Commun*, 2017, 8: 186
- 15 Gaumnitz T, Jain A, Pertot Y, et al. Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver. *Opt Express*, 2017, 25: 27506
- 16 Fattah H, Barros H G, Gorjan M, et al. Third-generation femtosecond technology. *Optica*, 2014, 1: 45–63
- 17 Emaury F, Diebold A, Saraceno C J, et al. Compact extreme ultraviolet source at megahertz pulse repetition rate with a low-noise ultrafast thin-disk laser oscillator. *Optica*, 2015, 2: 980–984
- 18 Marian A, Stowe M C, Lawall J R, et al. United time-frequency spectroscopy for dynamics and global structure. *Science*, 2004, 306: 2063–2068
- 19 Marian A, Stowe M C, Felinto D, et al. Direct frequency comb measurements of absolute optical frequencies and population transfer dynamics. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 023001
- 20 Wolf A L, van den Berg S A, Ubachs W, et al. Direct frequency comb spectroscopy of trapped ions. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 223901
- 21 Koralek J D, Douglas J F, Plumb N C, et al. Laser based angle-resolved photoemission, the sudden approximation, and quasiparticle-like spectral peaks in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 017005
- 22 Ullrich J, Moshammer R, Dorn A, et al. Recoil-ion and electron momentum spectroscopy: Reaction-microscopes. *Rep Prog Phys*, 2003, 66: 1463–1545
- 23 Ishizaka K, Kiss T, Yamamoto T, et al. Femtosecond core-level photoemission spectroscopy on 1T-TaS₂ using a 60-eV laser source. *Phys Rev B*, 2011, 83: 081104
- 24 Okazaki K, Ota Y, Kotani Y, et al. Octet-line node structure of superconducting order parameter in KFe_2As_2 . *Science*, 2012, 337: 1314–1317
- 25 Saule T, Heinrich S, Schötz J, et al. High-flux ultrafast extreme-ultraviolet photoemission spectroscopy at 18.4 MHz pulse repetition rate. *Nat Commun*, 2019, 10: 458
- 26 Stockman M I, Kling M F, Kleineberg U, et al. Attosecond nanoplasmonic-field microscope. *Nat Photonics*, 2007, 1: 539–544
- 27 Sandberg R L, Paul A, Raymondson D A, et al. Lensless diffractive imaging using tabletop coherent high-harmonic soft-X-ray beams. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 098103
- 28 Cingöz A, Yost D C, Allison T K, et al. Direct frequency comb spectroscopy in the extreme ultraviolet. *Nature*, 2012, 482: 68–71
- 29 Gohle C, Udem T, Herrmann M, et al. A frequency comb in the extreme ultraviolet. *Nature*, 2005, 436: 234–237
- 30 Kim S, Jin J, Kim Y J, et al. High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement. *Nature*, 2008, 453: 757–760
- 31 Sivis M, Duwe M, Abel B, et al. Nanostructure-enhanced atomic line emission. *Nature*, 2012, 485: E1–E2
- 32 Kern C, Zürch M, Spielmann C. Limitations of extreme nonlinear ultrafast nanophotonics. *Nanophotonics*, 2015, 4: 303–323
- 33 Russbueldt P, Mans T, Weitenberg J, et al. Compact diode-pumped 1.1 kW Yb:YAG Innoslab femtosecond amplifier. *Opt Lett*, 2010, 35: 4169–4171
- 34 Negel J P, Voss A, Ahmed M A, et al. 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses. *Opt Lett*, 2013, 38: 5442–5445

- 35 Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power. *Opt Lett*, 2010, 35: 94–96
- 36 Hädrich S, Jan Rothhardt S, Krebs M, et al. Single-pass high harmonic generation at high repetition rate and photon flux. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2016, 49: 172002
- 37 Jones R J, Moll K D, Thorpe M J, et al. Phase-coherent frequency combs in the vacuum ultraviolet via high-harmonic generation inside a femtosecond enhancement cavity. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 193201
- 38 Ozawa A, Rauschenberger J, Gohle C, et al. High harmonic frequency combs for high resolution spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 253901
- 39 Lee J, Carlson D R, Jones R J. Optimizing intracavity high harmonic generation for XUV fs frequency combs. *Opt Express*, 2011, 19: 23315–23326
- 40 Ozawa A, Zhao Z, Kuwata-Gonokami M, et al. High average power coherent VUV generation at 10 MHz repetition frequency by intracavity high harmonic generation. *Opt Express*, 2015, 23: 15107–15118
- 41 Carstens H, Högner M, Saule T, et al. High-harmonic generation at 250 MHz with photon energies exceeding 100 eV. *Optica*, 2016, 3: 366–369
- 42 Jones R J, Ye J. Femtosecond pulse amplification by coherent addition in a passive optical cavity. *Opt Lett*, 2002, 27: 1848–1850
- 43 Mills A K, Hammond T J, Lam M H C, et al. XUV frequency combs via femtosecond enhancement cavities. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2012, 45: 142001
- 44 Jones R J, Ye J. High-repetition-rate coherent femtosecond pulse amplification with an external passive optical cavity. *Opt Lett*, 2004, 29: 2812–2814
- 45 Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis. *Science*, 2000, 288: 635–639
- 46 Apolonski A, Poppe A, Tempea G, et al. Controlling the phase evolution of few-cycle light pulses. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 740–743
- 47 Jones R J, Thomann I, Ye J. Precision stabilization of femtosecond lasers to high-finesse optical cavities. *Phys Rev A*, 2004, 69: 051803
- 48 Han H N, Zhang J W, Zhang Q, et al. Theoretical and experimental study on f emtosecond enhancement resonator (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 164206 [韩海年, 张金伟, 张青, 等. 飞秒激光共振增强腔的理论与实验研究. 物理学报, 2012, 61: 164206]
- 49 Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt Lett*, 1991, 16: 42–44
- 50 Schnürer M, Spielmann C, Wobrauschek P, et al. Coherent 0.5-keV X-ray emission from helium driven by a sub-10-fs Laser. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 3236–3239
- 51 Fernandez A, Fuji T, Poppe A, et al. Chirped-pulse oscillators: A route to high-power femtosecond pulses without external amplification. *Opt Lett*, 2004, 29: 1366–1368
- 52 Paul J, Johnson J, Lee J, et al. Generation of high-power frequency combs from injection-locked femtosecond amplification cavities. *Opt Lett*, 2008, 33: 2482–2484
- 53 Rothhardt J, Krebs M, Hädrich S, et al. Absorption-limited and phase-matched high harmonic generation in the tight focusing regime. *N J Phys*, 2010, 16: 033022
- 54 Paul A, Gibson E A, Zhang X, et al. Phase-matching techniques for coherent soft X-ray generation. *IEEE J Quantum Electron*, 2006, 42: 14–26
- 55 Kobayashi Y, Hirayama N, Ozawa A, et al. 10-MHz, Yb-fiber chirped-pulse amplifier system with large-scale transmission gratings. *Opt Express*, 2013, 21: 12866–12873
- 56 Wan P, Yang L M, Liu J. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers. *Opt Express*, 2013, 21: 29854–29859
- 57 Jocher C, Eidam T, Hädrich S, et al. Sub 25 fs pulses from solid-core nonlinear compression stage at 250 W of average power. *Opt Lett*, 2012, 37: 4407–4409
- 58 Hänsch T W. Nobel lecture: Passion for precision. *Rev Mod Phys*, 2006, 78: 1297–1309
- 59 Diddams S A. Combs grow bigger teeth. *Nat Phys*, 2014, 10: 8–9
- 60 McGrew W F, Zhang X, Leopardi H, et al. Towards the optical second: Verifying optical clocks at the SI limit. *Optica*, 2019, 6: 448–454
- 61 Pupeza I, Holzberger S, Eidam T, et al. Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation. *Nat Photonics*, 2013, 7: 608–612
- 62 Carlson D R, Lee J, Mongelli J, et al. Intracavity ionization and pulse formation in femtosecond enhancement cavities. *Opt Lett*, 2011, 36: 2991–2993
- 63 Allison T K, Cingöz A, Yost D C, et al. Extreme nonlinear optics in a femtosecond enhancement cavity. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 183903
- 64 Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Commun*, 1985, 56: 219–221
- 65 Zhao K. Laser, chirped pulse amplification, ultrafast optics, and Nobel Prize in Physics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1433–1440 [赵昆. 激光、啁啾脉冲放大、超快光学和诺贝尔奖. 科学通报, 2019, 64: 1433–1440]
- 66 Schmidt J, Guggenmos A, Chew S H, et al. Development of a 10 kHz high harmonic source up to 140 eV photon energy for ultrafast time-, angle-, and phase-resolved photoelectron emission spectroscopy on solid targets. *Rev Sci Instrum*, 2017, 88: 083105
- 67 Chiang C T, Blättermann A, Huth M, et al. High-order harmonic generation at 4 MHz as a light source for time-of-flight photoemission spectroscopy. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 071116

- 68 Heyl C M, Gündde J, L'Huillier A, et al. High-order harmonic generation with μ J laser pulses at high repetition rates. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2012, 45: 074020
- 69 Wang H, Xu Y, Ulonska S, et al. Bright high-repetition-rate source of narrowband extreme-ultraviolet harmonics beyond 22 eV. *Nat Commun*, 2015, 6: 7459
- 70 Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, et al. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power. *Opt Express*, 2011, 19: 255–260
- 71 Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators. *Nat Photonics*, 2013, 7: 258–261
- 72 Chang W, Zhou T, Siiman L A, et al. Femtosecond pulse spectral synthesis in coherently-spectrally combined multi-channel fiber chirped pulse amplifiers. *Opt Express*, 2013, 21: 3897–3910
- 73 Hädrich S, Demmler S, Rothhardt J, et al. High-repetition-rate sub-5-fs pulses with 12 GW peak power from fiber-amplifier-pumped optical parametric chirped-pulse amplification. *Opt Lett*, 2011, 36: 313–315
- 74 Hädrich S, Klenke A, Hoffmann A, et al. Nonlinear compression to sub-30-fs, 0.5 mJ pulses at 135 W of average power. *Opt Lett*, 2013, 38: 3866–3869
- 75 Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers. *Nat Photonics*, 2013, 20: 273
- 76 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt Lett*, 1996, 21: 1547–1549
- 77 Limpert J, Schreiber T, Nolte S, et al. All fiber chirped-pulse amplification system based on compression in air-guiding photonic bandgap fiber. *Opt Express*, 2003, 11: 3332–3337
- 78 Röser F, Schimpf D, Schmidt O, et al. 90 W average power 100 μ J energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system. *Opt Lett*, 2007, 32: 2230–2232
- 79 Rothhardt J, Hädrich S, Klenke A, et al. 53 W average power few-cycle fiber laser system generating soft X rays up to the water window. *Opt Lett*, 2014, 39: 5224–5227
- 80 Klenke A, Breitkopf S, Kienel M, et al. 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system. *Opt Lett*, 2013, 38: 2283–2285
- 81 Hädrich S, Klenke A, Rothhardt J, et al. High photon flux table-top coherent extreme-ultraviolet source. *Nat Photonics*, 2014, 8: 779–783
- 82 Hädrich S, Krebs M, Hoffmann A, et al. Exploring new avenues in high repetition rate table-top coherent extreme ultraviolet sources. *Light Sci Appl*, 2015, 4: e320
- 83 Müller M, Kienel M, Klenke A, et al. 1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser. *Opt Lett*, 2016, 41: 3439–3442
- 84 Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser. *Opt Lett*, 2020, 45: 3083–3086
- 85 Su R T, Zhou P, Zhang P F, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2018, 47: 0103001 [栗荣涛, 周朴, 张鹏飞, 等. 超短脉冲光纤激光相干合成. 红外与激光工程, 2018, 47: 0103001]
- 86 Yan D Y, Liu B W, Song H Y, et al. Research status and development trend of high power femtosecond fiber laser amplifiers (in Chinese). *Chin J Laser*, 2019, 46: 0508012 [闫东钰, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率光纤飞秒激光放大器的研究现状与发展趋势. 中国激光, 2019, 46: 0508012]
- 87 Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers. *Opt Express*, 2011, 19: 13218–13224
- 88 Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers. *Opt Express*, 2011, 19: 10180–10192
- 89 Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers. *Opt Express*, 2012, 20: 11407–11422
- 90 Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers. *Nat Photonics*, 2013, 7: 861–867
- 91 Lorek E, Larsen E W, Heyl C M, et al. High-order harmonic generation using a high-repetition-rate turnkey laser. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 123106
- 92 Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers. *Appl Phys B*, 1994, 58: 365–372
- 93 Graumann I J, Saltarelli F, Lang L, et al. Power-scaling of nonlinear-mirror modelocked thin-disk lasers. *Opt Express*, 2019, 27: 37349–37363
- 94 Brons J, Pervak V, Fedulova E, et al. Energy scaling of Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillators. *Opt Lett*, 2014, 39: 6442–6445
- 95 Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13: 598–609
- 96 Kouznetsov D, Bisson J F, Ueda K. Scaling laws of disk lasers. *Opt Mater*, 2009, 31: 754–759
- 97 Labaye F, Gaponenko M, Wittwer V J, et al. Extreme ultraviolet light source at a megahertz repetition rate based on high-harmonic generation inside a mode-locked thin-disk laser oscillator. *Opt Lett*, 2017, 42: 5170–5173
- 98 Saraceno C J, Sutter D, Metzger T, et al. The amazing progress of high-power ultrafast thin-disk lasers. *J Eur Opt Soc-Rapid Publ*, 2019, 15: 15
- 99 Südmeyer T, Marchese S V, Hashimoto S, et al. Femtosecond laser oscillators for high-field science. *Nat Photonics*, 2008, 2: 599–604
- 100 Saraceno C J, Emaury F, Heckl O H, et al. 275 W average output power from a femtosecond thin disk oscillator operated in a vacuum environment. *Opt Express*, 2012, 20: 23535–23541
- 101 Saltarelli F, Graumann I J, Lang L, et al. Power scaling of ultrafast oscillators: 350-W average-power sub-picosecond thin-disk laser. *Opt Express*, 2019, 27: 31465–31474

- 102 Schulte J, Sartorius T, Weitenberg J, et al. Nonlinear pulse compression in a multi-pass cell. *Opt Lett*, 2014, 41: 4511–4514
- 103 Fritsch K, Poetzlberger M, Pervak V, et al. All-solid-state multipass spectral broadening to sub-20 fs. *Opt Lett*, 2018, 43: 4643–4646
- 104 Brons J, Pervak V, Bauer D, et al. Powerful 100-fs-scale Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillator. *Opt Lett*, 2016, 41: 3567–3570
- 105 Shamir Y, Rothhardt J, Hädrich S, et al. High-average-power 2 μm few-cycle optical parametric chirped pulse amplifier at 100 kHz repetition rate. *Opt Lett*, 2015, 40: 5546–5549
- 106 Thiré N, Maksimenka R, Kiss B, et al. 4-W, 100-kHz, few-cycle mid-infrared source with sub-100-mrad carrier-envelope phase noise. *Opt Express*, 2017, 25: 1505–1514
- 107 Elu U, Baudisch M, Pires H, et al. High average power and single-cycle pulses from a mid-IR optical parametric chirped pulse amplifier. *Optica*, 2017, 4: 1024–1029
- 108 Neuhaus M, Fuest H, Seeger M, et al. 10 W CEP-stable few-cycle source at 2 μm with 100 kHz repetition rate. *Opt Express*, 2018, 26: 16074–16085
- 109 Alismail A, Wang H, Barbiero G, et al. Multi-octave, CEP-stable source for high-energy field synthesis. *Sci Adv*, 2020, 6: eaax3408
- 110 Pupeikis J, Chevreuil P A, Bigler N, et al. Water window soft X-ray source enabled by a 25 W few-cycle 2.2 μm OPCPA at 100 kHz. *Optica*, 2020, 7: 168–171
- 111 Caracciolo E, Kemnitzer M, Guandalini A, et al. 28-W, 217 fs solid-state Yb:CaGdO₄ regenerative amplifiers. *Opt Lett*, 2013, 38: 4131–4133
- 112 Pouysegur J, Delaigue M, Zaouter Y, et al. Sub-100-fs Yb:CALGO nonlinear regenerative amplifier. *Opt Lett*, 2013, 38: 5180–5183
- 113 Liu Y, Beetur J E, Hosen M M, et al. Extreme ultraviolet time- and angle-resolved photoemission setup with 21.5 meV resolution using high-order harmonic generation from a turn-key Yb:KGW amplifier. *Rev Sci Instrum*, 2020, 91: 013102
- 114 Rudenkov A S, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Yb:CALYO-based femtosecond chirped pulse regenerative amplifier for temporally resolved pump-probe spectroscopy. *Devices Methods Measurem*, 2018, 9: 205–214
- 115 Zhu J F, Tian W L, Gao Z Y, et al. Diode-pumped all-solid-state femtosecond Yb laser oscillators (in Chinese). *Chin J Laser*, 2017, 44: 0900001 [朱江峰, 田文龙, 高子叶, 等. 二极管抽运全固态飞秒Yb激光振荡器. 中国激光, 2017, 44: 0900001]
- 116 Tian W, Yu C, Zhu J, et al. Diode-pumped high-power sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO₄ laser with 1.85 MW peak power. *Opt Express*, 2019, 27: 21448–21454
- 117 Gao Z, Zhu J, Wang J, et al. Generation of 33 fs pulses directly from a Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO₄ laser. *Photon Res*, 2015, 3: 335–338
- 118 Tian W, Wang G, Zhang D, et al. Sub-40-fs high-power Yb:CALYO laser pumped by single-mode fiber laser. *High Pow Laser Sci Eng*, 2019, 7: e64

Summary for “高重复频率高次谐波驱动源技术”

High repetition rate ultrafast laser technology for driving high-order harmonic generation

Geyang Wang¹, RENCHONG Lü^{1,2}, Siyuan Xu^{1,2}, Han Liu¹, Wenlong Tian¹, Dacheng Zhang¹, Kun Zhao², Jiangfeng Zhu^{1*} & Zhiyi Wei²

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

² Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

* Corresponding author, E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

The interaction of ultra-intense and ultrafast laser pulses with matter has paved the way for generation of ultrashort pulses in the attosecond timescale and coherent radiation in the extreme ultraviolet (XUV) and soft X-ray region at a table-top size. On one hand, it provides attosecond temporal resolution and atomic spatial resolution for ultrafast electron dynamics in atoms, molecules and condensed matters; on the other hand, it inspires the great potential of optical frequency comb (OFC) in precise measurements of transition frequencies and hyperfine splitting, a verification of basic physical constants such as the Rydberg constant, and the research on precise optical atomic clocks. With the expansion of the above-mentioned scientific researches, the repetition rate of the driving source has become the key factor to break through the measurement accuracy obstacles. Therefore, the research on high-repetition rate ultrafast laser technology for driving high-order harmonic generation (HHG) commences.

In this paper, the high repetition rate HHG as the starting point, the method applied, the main parameter indices and the technical difficulties of the driving source are summarized. This paper can be a reference for the future development of high-repetition rate ultrafast laser technology for driving HHG.

First of all, the research involving femtosecond enhancement cavity (fsEC) using passive amplification is introduced. The repetition rate of the high-order harmonics as obtained from this method has exceeded 100 MHz, which serves as the main technical means to obtain OFC in the XUV region. However, key issues, such as dispersion control of the high-precision resonator and stabilization of femtosecond laser frequency, are still the focus for future research and the current application difficulties of fsEC technology.

Secondly, the research on Ti:sapphire laser system, ytterbium (Yb) doped fiber laser system and Yb all-solid-state laser system are reviewed. The few-cycle femtosecond pulse output by the Ti:sapphire laser system has an extremely high peak power, and it is the main driving source for generation of high-order harmonics and isolated attosecond pulses. However, constrained by the average power of the Ti:sapphire laser system, it is difficult to increase the repetition rate of XUV laser pulses to hundreds kilohertz or even megahertz. The thin-disk laser oscillator and the Yb fiber amplifier can produce femtosecond pulses with high average power. By means of nonlinear spectral broadening and pulse compression, an extreme ultraviolet radiation with a repetition rate of 10 MHz has been obtained in the HHG process of gases, yet the system structure remains complex and the technical difficulty is still high. Meanwhile, the Yb all-solid-state femtosecond amplifier, which can directly produce ultrashort pulses with high peak power, serves as an ideal driving source to realize HHG with the repetition rate on the MHz level. In view of the development trends of high-repetition rate driving sources, and based on the research experience on high-power Yb femtosecond lasers of our group, we propose high repetition rate ultrashort all-solid-state Yb amplifier for driving MHz repetition rate HHG with sub-40 fs all-solid-state Yb oscillator as seed and key techniques of gain narrowing suppression, precise dispersion control and efficient thermal management.

Finally, the parameters of various technical means in passive amplification and gain amplification, as well as the key problems that need to be solved, are summarized, and the development trends of high repetition rate ultrafast laser technology for driving HHG are prospected.

high repetition rate, high-order harmonic generation, attosecond pulse, femtosecond laser

doi: [10.1360/TB-2020-0514](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0514)