

多维度可控高性能飞秒激光

范锦涛, 刘博文, 宋有建, 胡明列

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 超快激光研究室&光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 飞秒脉冲因其高峰值功率和窄脉冲宽度的独特优势在基础科学研究和诸多应用领域扮演重要角色。产生时域、频域、模场等多参数可控的高性能飞秒激光脉冲是当前超快光学领域的重要前沿。超快激光研究室针对更高性能飞秒激光技术的需求, 深入研究飞秒激光非线性传输动力学, 对非线性传输过程实现更加准确的调控, 实现窄脉冲宽度、高峰值功率、波长和模式可控高性能飞秒脉冲输出, 并展示了多维度可控高性能飞秒激光在微纳加工领域的应用。

关键词: 飞秒激光; 窄脉冲宽度; 可控; 高峰值功率

Towards multi-dimensional controllable high-performance femtosecond laser

Fan Jintao, Liu Bowen, Song Youjian, Hu Minglie

(Ultrafast Laser Laboratory & Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract: Femtosecond pulses are of virtual importance in both scientific research and practical applications due to their unique advantages of high peak power and ultrashort pulse duration. The generation of high-performance femtosecond laser pulses with controllable multi-dimensional parameters, including temporal and frequency domains and transverse beam profile, is one of the most important frontiers in the field of ultrafast optics. To satisfy the needs of higher performance femtosecond laser technology, researchers in Ultrafast Laser Lab focus on understanding the complex nonlinear dynamics, leading to more accurate control of nonlinear transmission processes of femtosecond laser. In this context, recent progresses in short pulse duration, high peak power, widely tunable and mode controllable femtosecond lasers are illustrated. Furthermore, one typical application of multi-dimensional controllable high-performance femtosecond laser in the field of micro-nano processing is demonstrated.

Keywords: Femtosecond laser; Short pulse duration; Controllable, High peak power

1 引言

飞秒激光从 1980 年出现到现在已经有四十余年的历史,经历了第一代染料飞秒激光、第二代钛宝石飞秒激光,目前蓬勃发展着新一代光纤飞秒激光技术。飞秒激光已经克服了之前结构复杂、工作不稳定、输出功率低、成本高等缺点。在物理、化学、生物、医学等领域中扮演着重要的角色,成为了这些科研领域的有力工具。受益于飞秒激光高峰值功率,其在玻璃焊接、精细加工、柔性显示屏加工等高端制造显示出独到的优点[1]。为了克服热效应的影响,生物材料等热敏材料加工需要飞秒激光脉宽小于 100 fs 甚至更窄,而材料光学特性本身也提出了脉冲中心波长可调的要求。光电场在空间上的结构分布称为结构光场,包括贝塞尔光场、艾里光场、自加速光束等。在结构光场的应用方面,飞秒激光与结构光场的结合首先在微纳加工与非线性表征方面显示出了巨大的应用价值,尤其在透明电介质材料和二维材料加工方面展示出独一无二的优势[2]。可以看出,时域、谱域及光场模式等多参数可控的高性能飞秒激光源具有非常重要的科学研究价值与经济价值。

然而,由于目前增益光纤的增益带宽限制、非线性啁啾积累等不利因素的限制,很难实现少周期量级脉冲宽度输出;现有光学频率变换技术也难以在很宽范围实现光场可调控飞秒激光脉冲中心波长的调谐。鉴于此,超快激光研究室在 2010 年以后开展了高性能、多参数可控光纤飞秒激光技术的前沿研究,实现了窄脉冲宽度、近变换极限光纤飞秒放大输出; Mamyshev 高峰值功率光纤飞秒振荡器; 宽带可调谐多模式输出光学参量振荡器。并构建了基于动态相位调制双光子聚合(TPP)微纳加工系统,实现了飞秒激光快速直写。

2 多维度可控高性能飞秒激光

2.1 窄脉宽、近变换极限光纤放大技术

掺铒光纤的有限增益带宽和脉冲放大过程中产生非线性啁啾,造成输出脉宽较宽、时域质量劣化,限制了光纤飞秒激光放大技术实现少周期、近变换极限脉冲输出。针对这一问题,超快激光研究室研究人员提出了基于自相似展宽的混合型飞秒激光放大系统,有效利用自相似放大特有的线性啁啾特点,控制了飞秒激光产生、展宽和放大,实现了窄脉宽、近变换极限的飞秒脉冲输出。

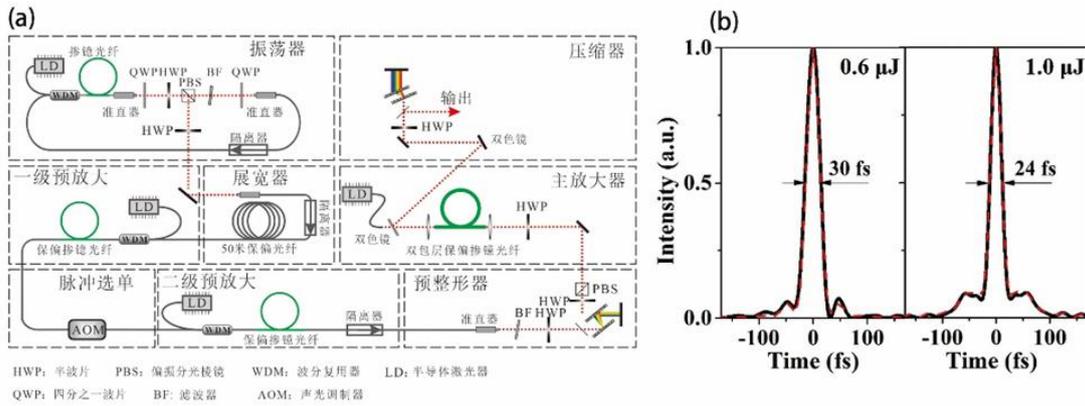


图 1 (a)为装置结构图, (b)为脉冲时域强度曲线, 其中红色虚线为对应的变换极限脉冲

基于该思路, 提出了将脉冲预整形与啁啾脉冲放大相结合的光纤飞秒激光放大系统, 系统如图 1(a)所示。利用展宽器展宽振荡器输出的激光脉冲, 减小预放大阶段的非线性相移。利用脉冲预整形技术控制进入主放大的信号光脉冲的能量、啁啾、光谱等参量, 优化主放大中的非线性放大过程, 减小非线性啁啾。使得压缩后脉冲不但具有很窄的脉冲宽度而且时域形状接近变换极限。还原之后脉冲形状及变换极限脉冲如图 1(b)所示, 输出的脉冲宽度为 24 fs, 不到 7 个光学周期, 为少周期量级, 具有很好的时域质量, 接近变换极限, 脉冲能量高达 1 μJ [3]。迄今为止, 这仍然是光纤飞秒激光器直接放大输出得到的最窄脉冲宽度。

2.2 高功率 Mamyshev 锁模振荡器

相比于光纤放大器, 光纤锁模激光器可以输出噪声更低的飞秒激光脉冲, 在精密测量等领域有着重要的应用。但是由于锁模机理的限制和光纤器件的限制, 目前常用的光纤锁模激光器输出能量较低在 nJ 量级, 脉冲宽度一般很难小于 50 fs。针对这一问题, 提出了 Mamyshev 结构与掺镱单偏振大模场面积光子晶体光纤相结合的光纤锁模激光器。

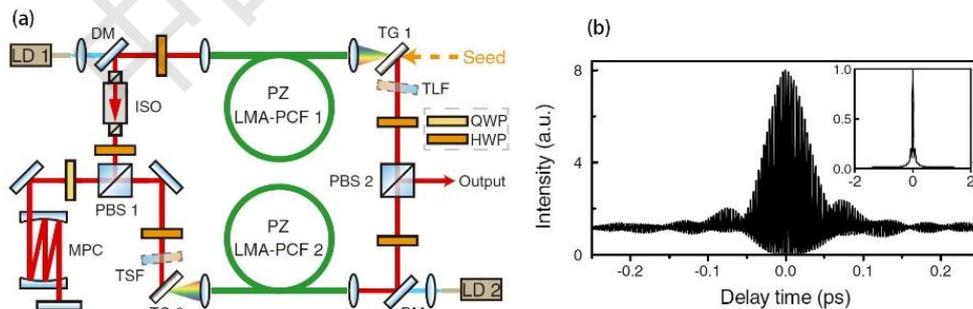


图 2 (a)为装置结构图, (b)图为输出脉冲压缩后的干涉自相关曲线

Mamyshev 结构与掺镱单偏振大模场面积光子晶体光纤相结合的光纤锁模激光器, 搭建了如图 2(a)所示的激光振荡器。利用增益光纤的大纤芯直径、单偏振特性和单模特性, 不但能够提供足够大的模场面积支持高单脉冲能量运转, 同时保证良好的输出时域质量。

该激光器在 8 MHz 的重复频率下直接输出 9 W 的激光，对应的单脉冲能量达到了 1.1 μJ ，压缩后可以获得 41 fs 的脉冲宽度（脉冲干涉自相关如图 2(b)所示），对应的峰值功率约为 13 MW [4]。该研究极大地提升了光纤锁模振荡器的运转性能，同时实现了高单脉冲能量（微焦耳量级）、窄脉冲宽度（亚 50 飞秒）以及良好的环境稳定性。凭借着简单的结构，可靠的启动机制以及优异的性能参数，该光纤飞秒振荡器将对诸多超快科学应用研究产生广泛的吸引力。

2.3 多维可控双通道飞秒光学参量振荡器

近年来，光学涡旋光束因具备独有的螺旋型波前相位以及环形光强分布在量子光学、光学显微镜、光通信等领域均得到了广泛的应用。然而，涡旋光束波长调谐功能的欠缺限制了其在更宽波段范围内的应用研究。另一方面，与单通道可调谐涡旋光束产生器相比，双通道涡旋光束产生器能够极大的提升信息传输容量，同时在可调谐太赫兹产生、粒子操控等领域有着巨大的潜在应用前景。此外，可同时输出高斯光束与涡旋光束的光源在超分辨成像领域有着广泛的应用价值。因此，一种低成本、模式可控、波长可调谐的多通道光束产生器在光学领域具有重要的意义。

通过激发不同周期的单一准相位匹配周期极化铌酸锂晶体，构建单晶体双通道飞秒光学参量振荡器，实现不同波长的独立输出；在腔内引入不同 q 波片实现不同阶数的涡旋光束输出。得益于双通道的腔结构，调节每个通道的腔长度，可以获得独立的双通道宽光谱调谐输出。在这种情况下，输出的信号光脉冲可分别在 1520-1613 nm 和 1490-1549 nm 范围内进行调谐。由于所使用 q 波片很薄，具有较小的色散，保证了在改变输出涡旋阶数过程中，输出信号光脉冲的光谱、脉冲宽度基本相当[5]。

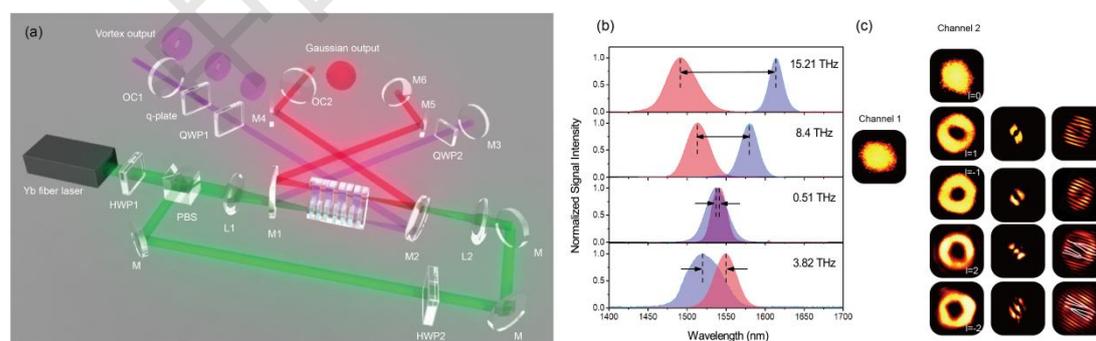


图 3 (a)双通道，双模式 OPOs 实验装置；(b)不同通道输出光谱调谐；(c)输出光斑模式调控示意图

3 多维度可控高性能飞秒激光直写示范

飞秒结构光场是一种研究微纳尺度下光与物质相互作用的强大工具，为多种材料的微纳尺度加工与表征以及新型非线性现象的研究提供了新思路与新方法，甚至有可能在大尺度范围下实现微纳结构材料的快速加工。微纳尺度光与物质相互作用的研究对结构光场的调控提出了更精细的要求，因此进一步研究微纳尺度结构光场的精细调控技术十分必要。

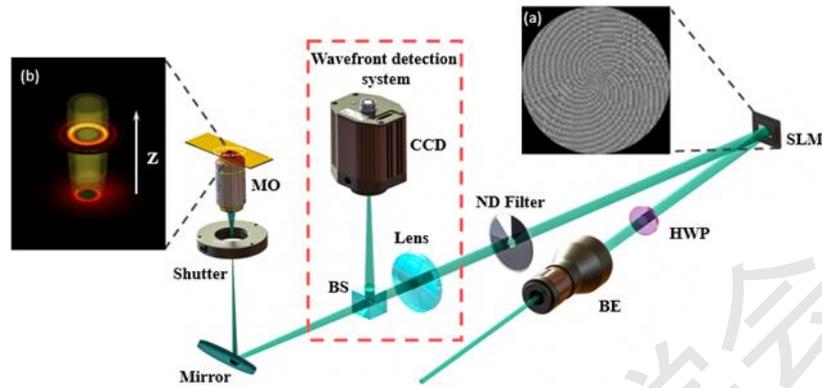


图 4 TPP 实验装置示意图

从这点出发，研究室开发了如图 4 所示的基于动态相位调制双光子聚合（TPP）微纳加工系统，所采用的光源为 2.1 中介绍的窄脉冲宽度近变换极限高性能飞秒放大系统，将其倍频之后导入 TPP 系统中，并利用系统中纯相位调制器件空间光调制器（SLM）在原位上实现了 SLM-TPP 实验系统的光学像差校正。通过于负性光刻胶内部产生的高阶 Bessel 光束完成了管状微结构阵列的快速制备，并通过比较像差校正前后管状微结构的形貌分布证明了光学像差校正方法的有效性。SEM 电镜结果表明，如图 5 所示，移除像差的 SLM-TPP 系统所制备管状微结构具有更好的壁厚均匀性和圆度，这也提高了 SLM-TPP 系统在复杂环境中的适用性。

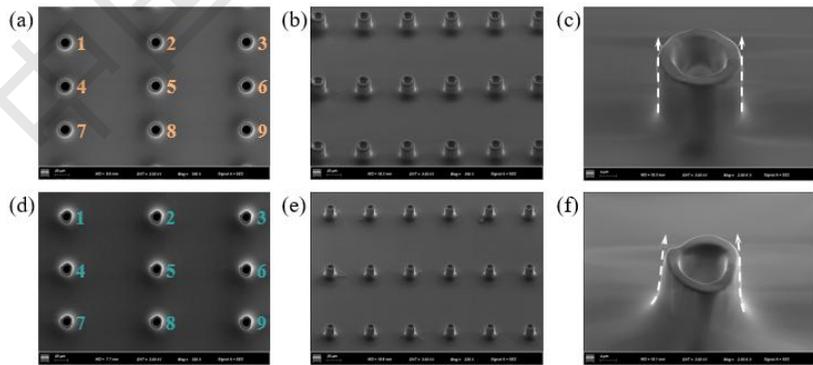


图 5 利用高阶 Bessel 光束快速制备的管状微结构阵列的 SEM 电镜结果。(a)-(c)像差校正后，(d)-(f)像差校正前

4 总结

超快激光研究室聚焦于多维可控高性能飞秒激光，可以实现窄脉冲宽度、高峰值功率、波长可调谐、模场可控的特点，提升了飞秒激光输出的整体性能，为基础科学和应用研究领

域提供了优质光源。从科学性上讲,对光电场进行多维度精细调控是高性能飞秒激光技术的终极目标;从应用研究角度看,时频空多维度精细调控飞秒超快激光可以为光与物质相互作用机理研究和飞秒结构光场微纳加工两大重要领域提供强有力的工具。总而言之,多维可控高性能飞秒激光的研究具备重要的科学意义和应用价值。

参考文献:

- [1] Wetzel B, Xie C, Lacourt P A, et al. Femtosecond laser fabrication of micro and nano-disks in single layer graphene using vortex Bessel beams[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(24): 241111..
- [2] Bhuyan M K , Courvoisier F , Lacourt P A , et al. High aspect ratio nanochannel machining using single shot femtosecond Bessel beams[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(8):081102.
- [3] Song H, Liu B, Li Y, et al. Practical 24-fs, 1- μ J, 1-MHz Yb-fiber laser amplification system[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7559-7566.
- [4] Liu W, Liao R, Zhao J, et al. Femtosecond Mamyshev oscillator with 10-MW-level peak power[J]. Optica, 2019, 6(2): 194-197.
- [5] Fan J, Zhao J, Shi L, et al. Two-channel, dual-beam-mode, wavelength-tunable femtosecond optical parametric oscillator[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(4): 045001.