

基于光纤中超短脉冲非线性传输机理与特定光谱选择技术的多波长飞秒激光的产生

吕志国 杨直 李峰 李强龙 王屹山 杨小君

Generation of multi-wavelength femtosecond laser pulse based on nonlinear propagation of high peak power ultrashort laser pulse in single-mode fiber and spectral selectivity technology

Lü Zhi-Guo Yang Zhi Li Feng Li Qiang-Long Wang Yi-Shan Yang Xiao-Jun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 184205 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181026

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181026>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于II类周期极化铌酸锂波导的通信波段小型化频率纠缠源产生及其量子特性测量](#)

Generation and quantum characterization of miniaturized frequency entangled source in telecommunication band based on type-II periodically poled lithium niobate waveguide

物理学报.2018, 67(14): 144204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180329>

[基于第一性原理的新型非线性光学晶体探索](#)

First principle study of nonlinear optical crystals

物理学报.2018, 67(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180189>

[四波混频光相位运算器原理及其噪声性能研究](#)

Principle and noise performance of optical phase arithmetic devices using four wave mixing

物理学报.2018, 67(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172638>

[低分析频率压缩光的实验制备](#)

Generation of squeezed states at low analysis frequencies

物理学报.2018, 67(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171767>

[新型偶氮苯衍生物的三阶非线性光学特性](#)

Third-order nonlinear optical properties of an azobenzene derivate

物理学报.2016, 65(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024207>

基于光纤中超短脉冲非线性传输机理与特定光谱选择技术的多波长飞秒激光的产生*

吕志国[†] 杨直[‡] 李峰 李强龙 王屹山 杨小君

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2018年5月27日收到; 2018年6月21日收到修改稿)

高集成、高可靠性宽调谐飞秒激光源在超快光谱学、量子光学及生物成像等研究领域具有重要价值。如在生物多光子显微成像中, 具有适中能量的宽调谐飞秒激光源不仅可满足多种生物组织荧光激发所需的峰值功率与激发波长, 而且也可以显著提升非线性荧光产生效率、成像分辨率以及增大成像穿透深度。采用自主研发的高可靠性全保偏光纤飞秒激光器作为抽运源, 基于低色散光纤中高功率飞秒激光脉冲非线性传输引起的光谱加宽机制, 本文开展了多波长全光纤飞秒激光产生技术研究。通过采用中心波长在 980, 1000, 1050, 1070 与 1100 nm 的带通滤波片选择性地对单模光纤输出光谱中最左边与最右边光谱旁瓣进行滤波, 在上述中心波长处分别可获得 203, 195, 196, 187 与 194 fs 的激光输出。本文提出的基于全光纤飞秒激光脉冲在单模光纤中非线性传输引起的光谱加宽机制与特定光谱选择技术的实验方案为高集成、高可靠性宽调谐飞秒激光源的实现提供了新的研究途径。

关键词: 单模光纤, 非线性, 宽调谐, 飞秒激光

PACS: 42.55.-f, 42.55.Wd, 42.65.-k, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.67.20181026

1 引言

随着激光技术的发展, 超短脉冲激光源在众多基础科学研究与应用领域具有广阔的应用前景, 现已成为科研^[1]、计量^[2]、激光精密加工^[3]等诸多领域不可或缺的基本工具。直到现在, 科研工作者仍朝着短至阿秒脉冲宽度^[4]与高达百拍瓦峰值功率^[5]的超短超强激光方向发展, 不断地追求着超快激光的极限以满足特定的应用需求。除了在脉冲宽度与峰值功率的探索外, 鉴于宽调谐飞秒激光在大气遥感、燃烧诊断、生物医学等领域的重要应用价值, 超短脉冲激光的输出波长调谐特性也成了一个重要的研究课题^[6]。如在生物多光子显微成像中, 具有适中脉冲能量的飞秒激光在与神经细胞相互作用过程中由于对组织结构的无热损伤、高分辨与

大的穿透深度等特性被广泛应用于以神经生物学为代表的生命科学研究中^[7]。为了进一步揭示不同神经元间特殊细胞与分子的生物学特性, 宽调谐飞秒激光产生技术成为了研究重点。在多光子显微成像中, 现阶段广泛使用的飞秒激光是基于钛宝石晶体的克尔透镜锁模激光器与基于非线性频率变换技术的光学参量振荡器。然而, 可调谐钛宝石激光器与光学参量振荡器由于振荡腔镜严苛的对齐性与差的抗环境干扰性, 使其应用环境范围受到了限制。因此, 宽调谐飞秒激光源的激光性能(输出波长调谐范围与可靠性)提升是现阶段亟待解决的关键科学问题。

相比于固态块状晶体激光器, 光纤激光器经过半个多世纪的发展无论在输出功率^[8]、脉冲宽度^[9]、还是在单脉冲能量^[10]等方面均获得了显著

* 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(批准号: XAB2016B21)和国家自然科学基金(批准号: 61690222)资助的课题。

[†] 通信作者. E-mail: lvzhiguo@opt.ac.cn

[‡] 通信作者. E-mail: yangzhi@opt.ac.cn

发展. 更为重要的是, 光纤的易弯曲与可柔性熔融拼接特性为高集成、高可靠性全光纤激光光源的发展提供了充分条件^[11-15]. 固体与光纤飞秒激光技术的迅速发展, 同时也促进了非线性光纤光学的发展. 如2010年, 麻省理工学院的研究人员基于光纤负色散区的色散波产生机制, 通过采用重复频率85 MHz, 脉冲宽度10 fs的钛宝石激光器抽运非线性光子晶体光纤(NL-1.8-710 PCF), 实现了中心波长在450—550 nm范围内可调谐的飞秒激光输出^[16]. 2015年, 德国耶拿大学Gottschall等^[17]基于四波混频参量转换过程, 采用光子晶体光纤实现了重复频率0.78 MHz, 波长调谐范围867—918 nm的信号激光输出. 在国内, 清华大学Zhang等^[18,19]也基于光子晶体光纤中的非线性效应开展了宽带可调谐激光产生研究, 在色散波产生与光参量振荡方面取得了重要研究成果. 如采用双零色散光子晶体光纤, 其分别在425—498 nm与1986—2279 nm实现了可调谐皮秒激光输出. 理论研究表明, 当飞秒激光脉冲在低色散光纤中的正色散区非线性传输时, 自相位调制与自陡峭等非线性光学效应会导致入射脉冲光谱加宽并使其呈多峰状分布, 且峰内光谱具有高相干性. 光谱的多峰分布与高的相干性, 使每一波峰处光谱成分经过具有相同中心波长与光谱带宽的带通滤波器过滤后, 可直接获得近傅里叶转换极限脉宽的飞秒激光输出. 基于自相位调制与自陡峭等非线性光谱加宽机理与带通滤波选择技术, 2015年德国自由电子激光科学中心的研究人员采用光子晶体光纤(NL-1050-ZERO-2)获得了825—1210 nm的宽调谐飞秒激光输出^[20].

综上所述, 非线性光子晶体光纤由于色散可调与非线性可控等特性, 使其成为宽调谐飞秒激光产生常用的非线性介质. 然而, 基于光子晶体光纤的宽调谐飞秒激光产生也存在着一定的不足. 首先, 由于非线性光子晶体光纤芯径较小(约2 μm), 且入射飞秒激光脉冲的峰值功率密度较高, 使得光纤抽运入射端极易受到损伤, 因此限制了可调谐激光的功率输出. 其次, 由于非线性光子晶体光纤的使用涉及光子晶体结构对水蒸气、灰尘的毛细孔吸附与小芯径光纤的高效激光耦合等问题, 因此对于基于非线性光子晶体光纤的宽调谐飞秒激光光源而言, 其激光长期工作性能将会下降, 且输出功率对机械振动、环境温度与湿度变化异常敏感. 最后, 由于

光子晶体光纤特殊的设计与制造技术, 使其价格昂贵. 相比于非线性光子晶体光纤, 单模光纤尽管具有大的色散系数, 但是其极低的成本与持久的激光性能, 不仅降低了宽调谐飞秒激光器的研究成本, 而且也显著提升了激光器的工作性能(不会由于毛细孔吸收而导致光纤性能下降). 同时, 大的纤芯直径(6 μm)在提升宽调谐飞秒激光光源输出功率与可靠性方面也具有重要优势.

因此, 为了进一步探究高性能飞秒激光脉冲在单模光纤中的非线性传输及输出光谱的相干性, 采用中心波长约为1035 nm、脉冲宽度为264 fs、重复频率为34 MHz的高功率全保偏光纤飞秒激光器作为抽运源, 本文开展了基于单模光纤(非线性系数约为 $5.5 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 色散系数约为 $20 \text{ fs}^2/\text{mm}$)作为非线性介质的多波长飞秒激光产生研究, 以期为生物多光子显微成像提供高集成、高可靠性宽调谐飞秒激光光源. 实验中为了尽可能地降低光纤色散对自相位调制与自陡峭非线性光谱加宽机制的影响, 长度为80 mm的单模光纤被用于高相干性非线性光谱产生研究. 通过调节耦合进单模光纤中的激光功率, 并采用不同中心波长的带通滤波片对输出宽光谱中相应激光波长进行滤波, 实验获得了输出波长在980—1100 nm的宽调谐飞秒激光输出. 实验选择性地对中心波长在980, 1000, 1050, 1070与1100 nm的激光脉冲脉宽进行了测量, 其对应的脉冲宽度分别为203, 195, 196, 187与194 fs. 本文报道的多波长飞秒激光产生技术方案为低成本、高集成、高可靠性宽调谐飞秒激光光源发展提供了新的研究思路, 具有重要研究意义.

2 实验装置

用于宽调谐飞秒激光产生研究的光路示意图如图1所示, 其主要是由高可靠性飞秒激光抽运源、功率调节器、非线性光谱展宽光纤(spectral broadening fiber, SBF)与不同中心波长的带通滤波片组成. 所提到的高可靠性飞秒激光抽运源是自制的输出功率为5.8 W、脉冲宽度为264 fs、中心波长为1035 nm、重复频率为34 MHz全保偏光纤飞秒激光放大器, 其主要包括自主研发的全保偏光纤SESAM锁模激光振荡器(SESAM mode-locked oscillator)、单模保偏光纤展宽器、单模光纤放大器(single-mode amplifier)、双包层光纤放大器(dual-

cladding amplifier)与透射光栅压缩器. 所提到的功率调节器是由二分之一波片($\lambda/2$)与格兰激光棱镜(Glan laser prism, GLP)构成. 在宽调谐飞秒激光产生实验研究中, 可以通过旋转二分之一波片($\lambda/2$)的旋向实现非线性SBF中激光耦合功率的实

时调控. 非线性光纤输出的宽光谱激光脉冲首先经过焦距为10 mm的透镜准直, 后经特定中心波长的带通滤波片(BP filter)过滤, 最终可采用光谱仪(OSA)和强度自相关仪(AC)对滤波后的激光光谱和脉宽进行测量.

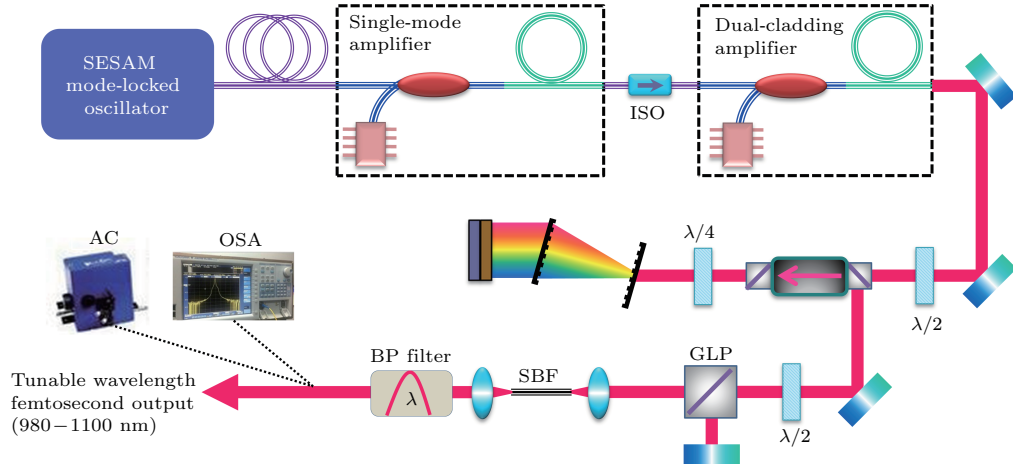


图1 高功率全偏光纤飞秒激光器抽运单模光纤产生多波长飞秒激光研究方案 (AC, 强度自相关仪; OSA, 光谱仪; BP filter, 带通滤波片; SBF, 非线性光谱展宽光纤; GLP, 格兰激光棱镜; ISO, 隔离器; $\lambda/4$, 四分之一波片; $\lambda/2$, 二分之一波片)
 Fig. 1. Schematic of the multi-wavelength femtosecond laser generation based on single-mode fiber as nonlinear medium and high power all-polarization-maintaining femtosecond fiber laser as pump source (AC, autocorrelator; OSA, optical spectrum analyzer; BP filter, bandpass filter; SBF, single-mode spectral broadening fiber; GLP, Glan laser polarizer; ISO, isolator; $\lambda/4$, quarter-wave plate; $\lambda/2$, half-wave plate).

3 实验结果与分析

由于锁模光纤激光振荡器作为光纤激光放大器尤其是飞秒光纤激光放大器的前端核心模块, 其激光性能对整个激光系统的输出与可靠运行有决定性作用, 是实现高可靠性飞秒光纤激光源的前提

和保证. 因此, 为了提升多波长飞秒激光源的整体工作可靠性, 本文首先基于SESAM自启动锁模技术与宽带啁啾光纤光栅色散补偿技术开展了锁模光纤激光振荡器的可靠性提升研究, 最终获得了10—40 °C范围内稳定锁模运转和常温23 °C下功率稳定性达0.6% RMS @168 h的激光输出. 图2给出了其实验测试结果.

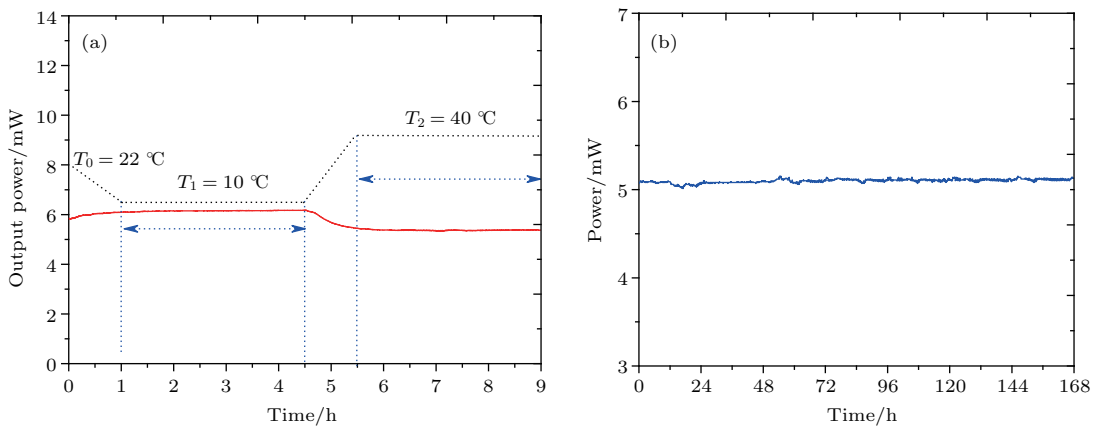


图2 实验测试结果 (a) 锁模激光器在10—40 °C 温度变化范围内锁模性能测试; (b) 在常温23 °C 锁模激光器7 × 24 h 功率稳定性测试
 Fig. 2. Experimental test results: (a) Reliability test of the SESAM mode-locked all-polarization-maintaining fiber laser oscillator with temperature variations from 10 °C to 40 °C; (b) power stability measurement over 168 h at 23 °C.

在放大之前, 锁模激光器输出的带宽为 14 nm 的激光脉冲首先经过一段单模保偏光纤展宽至 50 ps, 后经过芯径为 6 μm 与 25 μm 的两级 Yb 增益光纤放大器放大, 可获得大于 11 W 的激光功率输出. 为了消除 25 μm 双包层 Yb 光纤放大器 (dual-cladding amplifier) 后向荧光散射对于芯径 6 μm 单模光纤放大器 (single-mode amplifier) 放大效率的影响, 实验中采用了高隔离度与高偏振消光比的光纤隔离器以确保光束的单向传输. 25 μm 双包层 Yb 光纤放大器输出的高功率线偏振激光脉冲经过两个 45° 高反镜后注入透射光栅压缩器进行脉冲时间域的压缩, 最终可获得小于 300 fs 的超短脉冲激光输出. 如图 1 所示, 透射光栅压缩器主要包括 1 μm 0° 高反镜、1000 lines/mm 透射光栅对、四分之一波片 ($\lambda/4$)、空间光隔离器及二分之一波片 ($\lambda/2$). 其中, 四分之一波片 ($\lambda/4$)、空间光隔离器和二分之一波片 ($\lambda/2$) 的组合不仅可以提高压缩效率, 有效消除压缩后激光脉冲对于前向双包层 Yb 光纤放大器的影响, 而且还可以实现压缩脉冲与入射啁啾脉冲的分离. 图 3 显示了压缩后与不同输出功率对应的强度自相关曲线.

从图 3 (d) 可以看出, 经过透射光栅压缩后在 5.83 W 的输出功率下, 可以获得 264 fs 的高质量激光输出. 对于偏离最佳输出功率 5.83 W 的激光脉冲而言, 由于非线性相位与系统三阶色散的失配, 使得压缩后在主脉冲两边分别出现了预脉冲

(图 3 (a)—(c) 与图 3 (e)、图 3 (f)), 进而降低了输出激光脉冲的峰值功率. 激光脉冲三阶色散的引入主要来源于整个光纤链路 (约 110 m 的总光纤长度), 而非线性相位主要来源于第二级 25 μm 双包层 Yb 光纤放大器. 通过调节双包层 Yb 光纤放大器的抽运激光功率, 可以实现三阶色散与非线性相位的匹配, 获得高功率高质量的飞秒激光输出 (图 3 (d)).

在经过上述优化设计后, 基于 5.83 W, 264 fs 的高可靠性全保偏光纤飞秒激光源, 采用长度为 80 mm 的单模光纤, 开展了宽调谐飞秒激光产生技术研究. 实验中, 通过调整二分之一波片 ($\lambda/2$) 与 GLP 可以对耦合进非线性光纤的激光功率进行控制, 进而获得中心波长在 980—1100 nm 的连续可调谐飞秒激光输出. 本文中所报道的宽调谐飞秒激光产生的基本原理是当高功率飞秒激光脉冲在低色散光纤中的正色散区非线性传输时, 自相位调制与自陡峭等非线性光学效应会使入射脉冲光谱加宽, 并呈多峰状分布. 由于在非线性光谱加宽过程中, 最小化了色散效应的影响, 因此产生的多峰状光谱具有高的相干性. 通过采用具有一定带宽且与光谱最左边和最右边光谱旁瓣峰值处中心波长相同的带通滤波片, 可以将相应光谱旁瓣进行有效选择, 进而实现多波长宽调谐飞秒激光输出. 图 4 给出了非线性光纤在 50, 100, 200, 300, 400, 500, 618, 720, 830, 910 和 1020 mW 耦合抽运激光功率下的输出光谱.

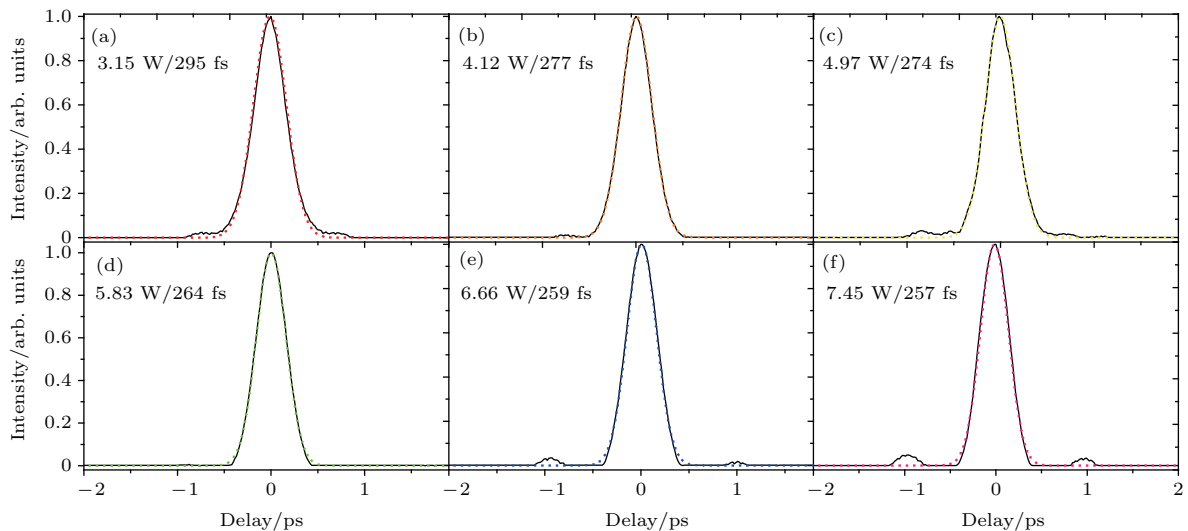


图 3 经过透射光栅压缩后, 测量的与不同输出功率相对应的强度自相关曲线 (a) 3.15 W/295 fs; (b) 4.12 W/277 fs; (c) 4.97 W/274 fs; (d) 5.83 W/264 fs; (e) 6.66 W/259 fs; (f) 7.45 W/257 fs

Fig. 3. Autocorrelation trace of the output pulse corresponding to the different amplified compressed output power assuming a Gauss fitting: (a) 3.15 W/295 fs; (b) 4.12 W/277 fs; (c) 4.97 W/274 fs; (d) 5.83 W/264 fs; (e) 6.66 W/259 fs; (f) 7.45 W/257 fs.

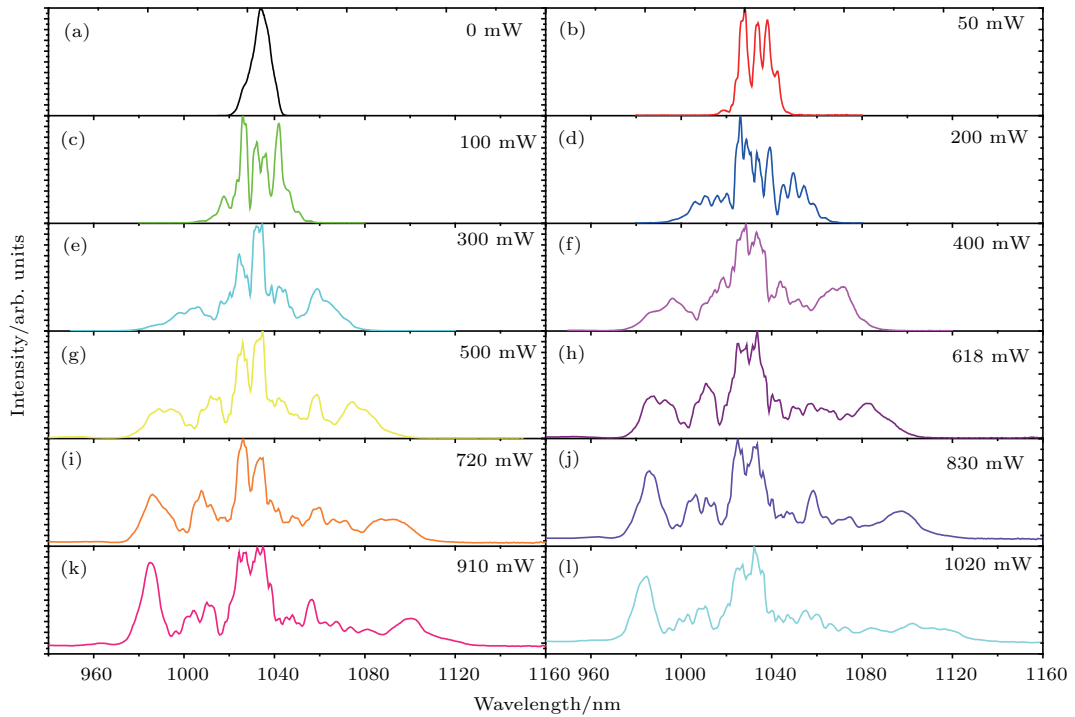


图4 与不同耦合抽运功率对应的单模光纤输出光谱

Fig. 4. Broadened output spectra corresponding to the different coupled pump laser power in nonlinear fiber.

由图4(a)—(l)可以看出,对于光谱中最左边的光谱旁瓣而言,随着非线性光纤中耦合抽运功率的增加其输出中心波长由初始的约1035 nm (图4(a))逐渐变化至980 nm (图4(l)).反之,对于光谱中最右边的光谱旁瓣而言,其输出中心波长由初始的约1035 nm (图4(a))逐渐变化至1100 nm (图4(j)).图5给出了单模光纤输出的非线性加宽光谱中短波与长波随着耦合抽运功率的变化趋势.

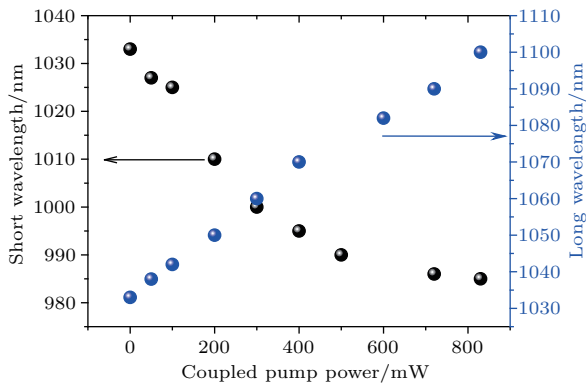


图5 自相位调制与自陡峭加宽光谱中最左边与最右边光谱旁瓣随着光纤中耦合抽运功率的变化趋势

Fig. 5. Variations of the short wavelength and long wavelength with the coupled pump laser power in nonlinear fiber.

实验中,通过采用中心波长在980,1000,1050,1070和1100 nm且带宽为10 nm的带通滤波片,选择性地对图4(a)—(l)中光谱的最左边与最右边光

谱旁瓣进行滤波,并采用光谱仪和强度自相关仪分别对滤波后激光光谱和脉冲宽度进行了测量.图6和图7分别显示了滤波后的光谱分布与脉冲强度自相关曲线.

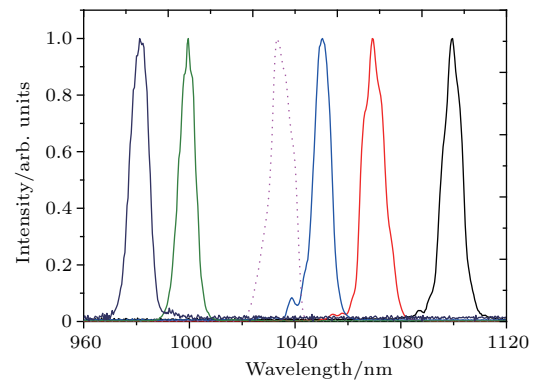


图6 输出中心波长在980—1100 nm的光谱调谐曲线(图中短虚线显示了抽运波长)

Fig. 6. Tunable output spectra with center wavelengths between 980 nm and 1100 nm. The short dashed line shows the pump wavelength.

由图7可知,带通滤波后中心波长在980,1000,1050,1070和1100 nm处的激光脉冲时间宽度分别为203,195,196,187与194 fs.虽然经过带通滤波后可以直接获得约200 fs的超短脉冲激光,但其仍大于相应光谱对应的傅里叶转换极限脉冲宽度.这主要归因于以下两方面:首先,尽管在

实验中采用了80 mm的单模光纤以尽可能减少色散的影响,但在自相位调制与自陡峭等非线性效应产生新的光谱成分过程中,由于宽的光谱跨越仍不可避免地引入了色散,进而加宽了滤波后的激光脉冲宽度;其次,本实验中使用的滤波片较窄的滤波带宽(10 nm)是导致输出脉冲较宽的另外一个重要原因.

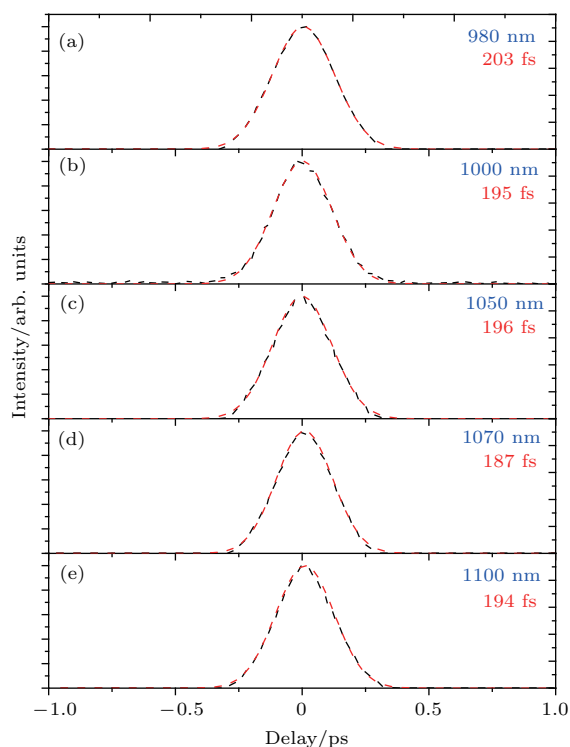


图7 与不同中心波长相对应的强度自相关曲线
Fig. 7. Intensity autocorrelation traces at different center wavelengths.

4 结 论

基于高功率的飞秒激光脉冲在低色散光纤中传输时自相位调制与自陡峭非线性光学效应引起的光谱加宽机制,结合相应的带通滤波技术,本文报道了一种产生宽调谐飞秒激光的研究方案.通过采用自主研发的5.83 W, 264 fs的高可靠性全保偏光纤飞秒激光器作为抽运源,以单模光纤作为非线性介质,实验获得了中心波长在980—1100 nm的多波长可调谐飞秒激光输出.进一步优化单模光纤长度以及滤波带宽,有望获得脉冲宽度更短的可调谐飞秒激光输出.同时,通过采用色散可控的光纤光栅来合理优化整个抽运激光系统中的二阶色散、三阶色散与非线性相位,以进一步缩短脉冲宽度(100 fs)与提高放大激光的输出功率(10 W),有望获得调谐范围更宽的飞秒激光输出.

该研究结果表明基于高可靠性全保偏光纤飞秒激光脉冲在单模光纤中的非线性传输机理与特定光谱选择技术实现宽调谐飞秒激光输出的技术方案不仅可以有效降低研发成本,而且为结构紧凑且性能稳定可靠的宽调谐飞秒激光源的发展提供了新的研究途径,并对于提升这类激光源在基础科学和应用领域中的应用性能具有重要意义.

参考文献

- [1] Torrisi L 2018 *Opt. Laser. Technol.* **99** 7
- [2] Li C, Benedick A J, Fendel P, Glenday A G, Kärtner F X, Phillips D F, Walsworth R L 2008 *Nature* **452** 610
- [3] Feuer A, Kunz C, Kraus M, Onuseit V, Weber R, Graf T, Ingildeev D, Hermanutz F 2014 *Proc. SPIE* **8967** 89670H
- [4] Zhan M J, Ye P, Teng H, He X K, Zhang W, Zhong S Y, Wang L F, Yun C X, Wei Z Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 093201
- [5] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, Yu L H, Lu X M, Wang C, Wang X L, Xu L, Lu H H, Yin D J, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2015 *Opt. Lett.* **40** 5011
- [6] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, Wei Z Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 014207
- [7] Thomas H 2008 *Optik Photonik* **3** 35
- [8] Otto H J, Stutzki F, Modsching N, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2014 *Opt. Lett.* **39** 6446
- [9] Zhao J, Li W X, Wang C, Liu Y, Zeng H P 2014 *Opt. Express* **22** 32214
- [10] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, Schmidt O, Schimpf D N, Limpert J, Tünnermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 3495
- [11] Kalaycioglu H, Oktem B, Şenel Ç, Paltani P P, Ilday F Ö 2010 *Opt. Lett.* **35** 959
- [12] Lv Z G, Teng H, Wang L N, Wang J L, Wei Z Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 094208
- [13] Lv Z G, Yang Z, Li F, Yang X J, Li Q L, Zhang X, Wang Y S, Zhao W 2018 *Opt. Laser Technol.* **100** 282
- [14] Wang X J, Xiao Q R, Yan P, Chen X, Li D, Du C, Mo Q, Yi Y Q, Pan R, Gong M L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164204 (in Chinese) [王雪娇, 肖起榕, 闫平, 陈霄, 李丹, 杜成, 莫琦, 衣永青, 潘蓉, 巩马理 2015 物理学报 **64** 164204]
- [15] Zhang L M, Zhou S H, Zhao H, Zhang K, Hao J P, Zhang D Y, Zhu C, Li Y, Wang X F, Zhang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134205 (in Chinese) [张利明, 周寿桓, 赵鸿, 张昆, 郝金坪, 张大勇, 朱辰, 李尧, 王雄飞, 张浩彬 2014 物理学报 **63** 134205]
- [16] Chang G Q, Chen L J, Kärtner F X 2010 *Opt. Lett.* **35** 2361
- [17] Gottschall T, Meyer T, Schmitt M, Popp J, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Opt. Express* **23** 23968
- [18] Zhang L, Yang S G, Han Y, Chen H W, Chen M H, Xie S Z 2013 *J. Opt.* **15** 075201
- [19] Zhang L, Yang S G, Wang X J, Gou D D, Li X L, Chen H W, Chen M H, Xie S Z 2013 *Opt. Lett.* **38** 4534
- [20] Liu W, Li C, Zhang Z G, Kärtner F X, Chang G Q 2016 *Opt. Express* **24** 15328

Generation of multi-wavelength femtosecond laser pulse based on nonlinear propagation of high peak power ultrashort laser pulse in single-mode fiber and spectral selectivity technology*

Lü Zhi-Guo[†] Yang Zhi[‡] Li Feng Li Qiang-Long Wang Yi-Shan Yang Xiao-Jun

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 27 May 2018; revised manuscript received 21 June 2018)

Abstract

Highly-integrated high-reliability widely-tunable femtosecond laser sources have important application values in various research and application fields, such as ultrafast spectroscopy, quantum optics, remote sensing and bio-imaging. In multi-photon excited fluorescence microscopy, femtosecond laser sources with moderate pulse energy and wide wavelength tunable range can not only meet the application requirements of the different tissue structures for the peak power and excitation wavelength, but also improve the nonlinear fluorescence efficiency and imaging resolution of the sample, and thus enhancing the penetration depth. Considering the extensive application prospect and important scientific research significance of the widely tunable femtosecond laser, in this paper we conduct an experimental research of the high repetition rate multi-wavelength femtosecond laser generation in compact sized and low-cost configuration based on the nonlinear propagation scheme of the high peak power femtosecond laser pulses in single-mode fiber.

In experiment, we first construct a highly-integrated reliable all-polarization-maintaining fiber femtosecond laser amplifier, which mainly consists of an environmentally stable all-polarization-maintaining fiber mode-locked laser oscillator, single-mode fiber stretcher, a single-mode power pre-amplifier, a dual-cladding Yb-fiber amplifier, and transmission grating-pair compressor. Self-starting mode-locked operation is assured with a semiconductor saturable absorber mirror, and intra-cavity dispersion compensation is realized by a chirped fiber Bragg grating in the mode-locked oscillator. The mode-locked oscillator, which delivers laser pulses with center wavelength peaked at 1035 nm, is robust operation as temperature changes from 10 °C to 40 °C and the measured power fluctuation is less than 1% RMS over 168 hours at 23 °C. The amplified high repetition rate laser pulses are compressed in a double-pass 1000 lines/mm transmission grating-pair compressor. After compression, laser pulses with 5.83 W average power and 264 fs pulse duration at 34 MHz repetition rate can be obtained. Simultaneously, we also study the dependence of the compressed pulse duration on the amplified output power.

Employing a home-made high reliable compact sized all-polarization-maintaining fiber femtosecond laser as a pump source and low-cost single-mode fiber as a nonlinear medium, the generation technology of the widely tunable femtosecond laser in only fiber format is also studied based on the self-phase modulation nonlinear spectral broadening mechanism. Simultaneously, in order to reduce the effect of the dispersion on the spectral broadening as much as possible, an

* Project supported by the Chinese Academy of Sciences "Light of West China" Program (Grant No. XAB2016B21) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61690222).

† Corresponding author. E-mail: lvzhiguo@opt.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yangzhi@opt.ac.cn

80-mm-long fiber is used in experiment. The used single-mode spectral broadening fiber has a 6- μm -diameter core and 20 fs^2/mm dispersion coefficient. By coupling the femtosecond pump laser pulses into the 6- μm -diameter fiber core, the output spectrum presents a significant nonlinear broadening. The coupled pump power can be continuously adjusted by a combination of a half-wave plate and a Glan laser polarizer. After bandpass filtering the leftmost and rightmost spectral lobes in self-phase modulation and self-steeping induced broadened spectrum with bandpass filters centered at 980, 1000, 1050, 1070 and 1100 nm, the laser pulses with 203, 195, 196, 187, and 194 fs pulse duration can be obtained at the corresponding center wavelengths.

The experimental scheme presented in this paper, which is based on the nonlinear spectral broadening of the high-reliability femtosecond laser pulse in single-mode fiber and the spectral selectivity technology, provides a new research approach to the realization of the highly-compact reliable widely-tunable femtosecond laser sources and has important research significance.

Keywords: single-mode fiber, nonlinearity, widely tunable, femtosecond laser

PACS: 42.55.-f, 42.55.Wd, 42.65.-k, 42.65.Jx

DOI: [10.7498/aps.67.20181026](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181026)