

整形飞秒激光脉冲的成丝超连续辐射控制*

常峻巍¹⁾²⁾ 朱瑞晗¹⁾ 张兰芝²⁾ 奚婷婷^{3)†} 郝作强^{1)2)‡}

1) (长春理工大学理学院, 长春 130022)

2) (山东师范大学物理与电子科学学院, 山东省光学与光子器件技术重点实验室,
山东省光场调控及应用工程技术研究中心, 济南 250358)

3) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 101407)

(2019年9月20日收到; 2019年10月24日收到修改稿)

飞秒激光成丝超连续辐射具有高强度和高时空相干性等优点, 作为一种超宽带光源在很多领域都具有广泛的应用前景. 本文提出一种结合微透镜阵列的空间调制和基于液晶空间光调制器的时域整形的飞秒激光脉冲整形方式, 利用基于遗传算法的反馈优化控制, 实现了飞秒激光在熔融石英中成丝产生的超连续辐射强度的调制, 得到了在一定范围内光谱强度可控的超连续辐射光谱; 光谱的能量密度可以从 $0.03 \mu\text{J}/\text{nm}$ 调制到 $0.09 \mu\text{J}/\text{nm}$, 其能量密度变化达到了初始值的 3 倍. 计算了典型迭代代数对应的整形脉冲时域包络, 分析了超连续光谱随迭代代数的演化趋势, 结果表明, 脉冲包络的峰值强度和波形分布是影响超连续光谱展宽和强度的主要物理原因.

关键词: 飞秒激光成丝, 超连续辐射, 激光脉冲整形, 反馈控制

PACS: 42.65.Jx, 42.65.Re, 52.38.Hb

DOI: 10.7498/aps.69.20191438

1 引言

当超强飞秒激光脉冲在光学介质中传输时, 主要受到克尔自聚焦效应和等离子体散焦效应的作用, 会形成长度远远超过其瑞利距离的等离子体通道, 通常被称为激光成丝现象^[1]. 飞秒激光成丝过程中的自相位调制、多光子电离和自陡峭等非线性效应使得激光光谱有很大的展宽, 形成超连续辐射. 自从 Alfano 和 Shapiro^[2,3] 首次观测到皮秒激光在晶体和玻璃中传输时的光谱展宽现象以来, 超连续辐射就成为了基础物理研究和相关应用领域的关注重点, 并被广泛应用于光学相干层析成像^[4]、荧光显微成像^[5,6]、光谱学^[7,8]、遥感和大气污染检测^[9]等领域. 近年来, 利用光子晶体^[10]和微结构光

纤^[11]产生飞秒超连续辐射的研究取得了一系列进展, 并且出现了很多商用的光纤超连续白光光源^[12,13]. 然而, 基于光纤的超连续白光光源仍然受到光纤材料特性例如损伤阈值低、耦合性要求高等的限制, 无法满足一些应用领域对更高强度的超连续辐射的要求, 例如产生少周期脉冲^[14]、遥感探测^[15]等. 众所周知, 利用飞秒激光脉冲成丝产生的超连续辐射除了具有从紫外一直到近红外的宽波段光谱, 还具有非常短的脉宽, 以及很高的强度和很好的时空相干性^[16]. 因此, 进行飞秒激光成丝超连续辐射的优化控制研究, 对获得更高强度更短脉宽的超宽带光源具有重要的基础物理研究意义和应用价值. 经过几十年的研究, 研究人员已经在液体、气体和固体等多种光学介质中实现了超连续辐射输出^[17], 尤其是在熔融石英、YAG、LiF 和蓝宝石

* 国家自然科学基金 (批准号: 11774038, 11874056, 11474039, 11274053) 和山东省泰山学者建设工程资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ttxi@ucas.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zqhao@sdmu.edu.cn

石等多种介质中成丝产生了超宽带的超连续辐射[18,19]. 2014年, Lu等[20]通过在飞秒激光聚焦位置附近放置多个薄石英片的方式实现了在450—980 nm范围的超连续辐射转化效率达到54%,并获得了脉冲能量76 μJ 的超连续辐射输出. He等[21]进一步将超连续辐射的转换效率提高到了90%,并通过啁啾镜压缩获得了脉宽为5.4 fs的少周期脉冲. 在我们的前期工作中,利用微透镜阵列(MLA)将光束横截面的能量重新分布,获得了在可见光波段mW/nm量级的超连续辐射输出[22].最近,我们又利用多光束干涉方法在熔融石英中形成了分布模式可调的成丝阵列,同时产生的超连续辐射能量密度在可见光波段也达到了0.1 $\mu\text{J}/\text{nm}$ [23,24].

液晶空间光调制器(LC-SLM)作为一种可编程光学元件,已经被广泛应用于光学操控[25]、脉冲整形[26]等研究和应用领域.在飞秒激光脉冲成丝及超连续辐射的优化控制研究中,基于LC-SLM的激光脉冲整形技术也越来越受到研究者的关注[27–35].例如,利用LC-SLM可以实现熔融石英中激光多丝分布模式的优化控制,可以独立调节细丝的位置、数目和能量分配等[27–29],另外,成丝长度和强度也可以实现反馈控制[30–32].此外,在对成丝超连续辐射的控制方面,Zhdanova等[33]利用LC-SLM对激光光束进行了空间调制,实现了对蓝宝石晶体中成丝超连续辐射光谱峰位置的反馈控制.Ackermann等[34]利用整形脉冲反馈控制实现了空气中成丝超连续辐射的优化增强.最近,Thompson等[35]通过在LC-SLM时域脉冲整形装置中施加 π 相位偏移实现了成丝超连续辐射中窄带光谱振幅的调制,获得了位置、间距和宽度等可控的窄带光谱振幅增强.由此可见,对飞秒脉冲进行空间调制或时域整形,都可以实现对超连续辐射一定程度上的控制.然而,目前为止还未见同时对飞秒激光进行时空调制以控制成丝及超连续辐射的报道.

本文利用结合MLA的空间调制和基于LC-SLM的时间调制的整形飞秒激光脉冲进行了熔融石英中成丝超连续辐射反馈优化控制的实验研究.实验利用了MLA能够实现固体介质中产生高功率超连续辐射的优势,又利用LC-SLM可实时反馈的特性,实现了强度连续可控的超连续辐射输出.

2 实验装置

图1为实验装置示意图,使用了800 nm, 45 fs, 1 kHz的商用Ti:Sapphire飞秒激光放大器(Spitfire, Spectra Physics)以及整形装置(虚线框中所示).该整形装置由一套4f无色散光学系统(包括一个1200 lines/mm的衍射光栅和一个焦距为300 mm的柱面镜)与位于柱面镜傅里叶平面的LC-SLM组成,其中LC-SLM的液晶像素尺寸为792 pixels \times 600 pixels (Hamamatsu X11840).初始激光脉冲经反射镜准直后入射到光栅G上,经过光栅衍射和柱面镜CL准直,不同波长的光投射到LC-SLM中不同列的液晶像素上,通过电脑将补偿相位板添加到LC-SLM中以实现脉冲频域的相位调制.调制后的反射光再次经过柱面镜和光栅合束,从而获得整形的飞秒激光脉冲,并从反射镜M2上方出射.再通过MLA将整形脉冲聚焦到熔融石英中产生等离子体丝阵列以及超连续辐射.为了减少超连续辐射中基频成分对光谱采集的影响,实验使用了二向色镜($R > 98\%$ @约350—670 nm)作为超连续辐射的反射镜.之后,超连续辐射经聚焦镜L会聚到积分球中,并通过连接积分球的光谱仪(USB 4000, Ocean Optics Inc.)进行光谱采集.实验中入射激光脉冲能量为300 μJ , MLA的焦距为218.3 mm (尺寸10 mm \times 10 mm, 阵列间距1.015 mm), MLA与熔融石英前表面间距为167 mm.

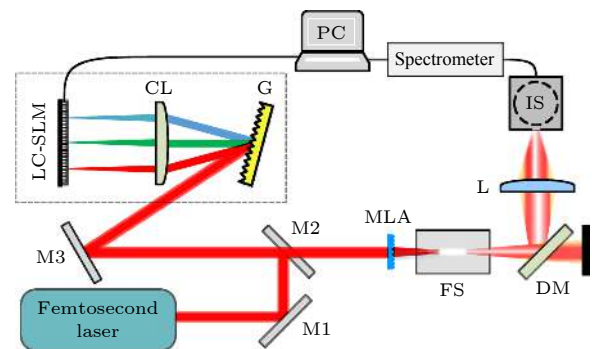


图1 实验装置示意图(M, 800 nm高反镜; G, 光栅; CL, 柱面镜; LC-SLM, 液晶空间光调制器; MLA, 微透镜阵列; L, 平凸透镜; FS, 熔融石英; DM, 二向色镜; IS, 积分球)

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup. M, 800 nm HR mirror; G, grating; CL, cylindrical lens; LC-SLM, liquid crystal spatial light modulator; MLA, microlens array; L, plano-convex lens; FS, fused silica; DM, dichroic mirror; IS, integrating sphere.

基于遗传算法编写了闭环反馈控制程序(程序流程图与参考文献 [32] 类似), 其中, 光谱仪采集的超连续辐射光谱作为遗传算法的反馈信号, 用于实现对时空调制飞秒脉冲成丝超连续辐射强度的闭环优化控制. 首先, 通过算法随机生成 50 组补偿相位, 并通过电脑依次加载到 LC-SLM 上得到对应的整形激光脉冲. 激光脉冲经 MLA 在熔融石英中成丝后得到 50 组对应的超连续辐射光谱. 然后, 提取超连续辐射光谱中指定波长或波长范围的强度, 对其强度进行评估并分配相应的适应度值; 根据得到的适应度值对其对应的补偿相位进行筛选和排序. 最后, 选取其中 20 组最优的补偿相位作为父代, 通过交叉和变异的方法生成新的 50 组补偿相位作为下一代. 依照上述流程实现闭环反馈迭代, 直到满足适应度要求, 程序结束.

3 实验结果分析

实验得到了整形飞秒脉冲成丝产生超连续辐射的光谱强度随迭代代数的演化, 如图 2(a) 所示. 需要指出的是, 由于实验中采用了二向色镜进行滤光, 因此实验只得到了 400—700 nm 可见光区域的超连续辐射光谱. 为了更清晰地说明超连续辐射光谱的反馈优化过程, 图 2(b) 给出了几个典型迭代代数对应的超连续辐射光谱. 从图 2 可以看出, 初始迭代时, 因为入射激光脉冲的补偿相位是随机产生的, 因而超连续辐射在可见光区域的强度很低, 整体光谱能量密度低于 $0.03 \mu\text{J}/\text{nm}$. 随着迭代代数增加, 优化后可见光区域的超连续光谱逐渐增强. 当迭代到第 8 代时, 光谱强度增加趋势趋于平缓. 随着迭代代数的进一步增加, 光谱强度在第 10 代后趋于稳定; 继续增加迭代代数, 光谱强度不再出现明显变化. 第 10 次迭代后, 光谱能量密度最高可达 $0.09 \mu\text{J}/\text{nm}$, 大于 $0.05 \mu\text{J}/\text{nm}$ 的波长范围超过了 100 nm. 需要指出的是, 与我们之前的工作 [22] 相比, 本实验获得的超连续辐射光谱能量密度较低. 这主要是因为本实验中采用了较低的入射激光能量, 并且, 通过相位整形后的激光脉冲的脉宽达到了 ps 量级, 从而造成了成丝和超连续辐射强度相对较弱. 此外, 随着迭代代数的增加, 超连续光谱向短波方向展宽, 截止波长逐渐向短波方向移动, 并且短波方向的光谱强度也得到了更为显著的增加. 与仅使用激光光束空间调制对超连续辐射

的展宽进行控制相比 [33], 本实验得到的超连续辐射展宽波形更为稳定, 并且允许使用更高的入射激光能量, 从而可以实现更大强度的可控超连续辐射输出. 可以看出, 利用整形脉冲对成丝产生的超连续辐射进行反馈优化控制, 能够实现光谱整体强度的控制, 使其随迭代代数的增加而增强, 同时, 还有对短波方向的截止波长的控制, 使其随着迭代代数的增加而变小.

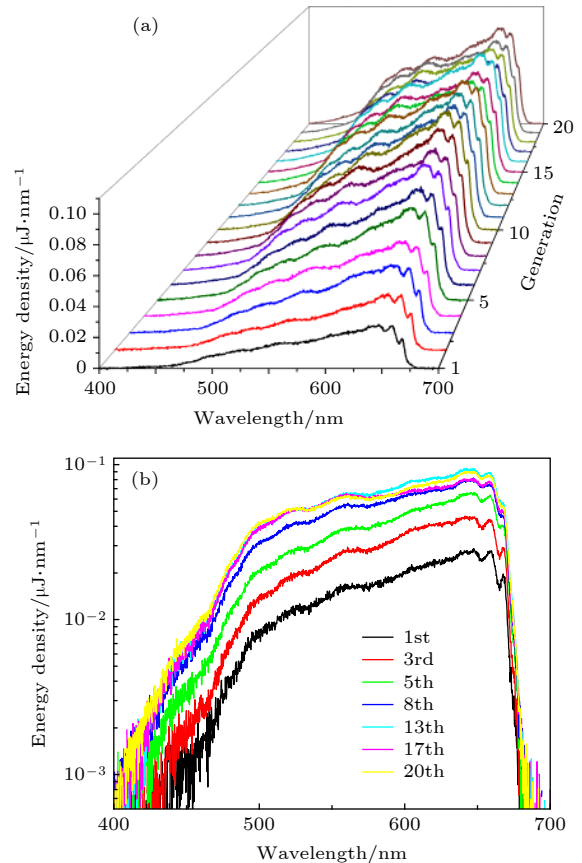


图 2 (a) 时空调制飞秒脉冲成丝的超连续辐射随迭代代数的演化; (b) 典型迭代代数对应的超连续辐射光谱

Fig. 2. (a) Evolution trend of supercontinuum generation by the spatiotemporal modulation femtosecond pulse filamentation with the increasing of iterative generation; (b) supercontinuum spectra of several typical iterative generations.

进一步, 我们对不同迭代代数得到的超连续辐射的 400—700 nm 范围的可见光光谱强度进行了积分, 该积分直接体现了超连续辐射在可见光波段的转换效率, 结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 随着迭代代数增加, 超连续辐射转换效率(强度)迅速增强, 经过 8 次迭代后增强趋势逐渐变缓. 超连续辐射转换效率在第 10 次迭代后趋于稳定, 继续增加迭代代数, 也不再明显增加. 在这个迭代优

化过程中, 可见光波段的超连续辐射光谱强度积分, 即该波段的能量从 3.3 μJ 增加到 12 μJ 左右, 增强了约 3.6 倍.

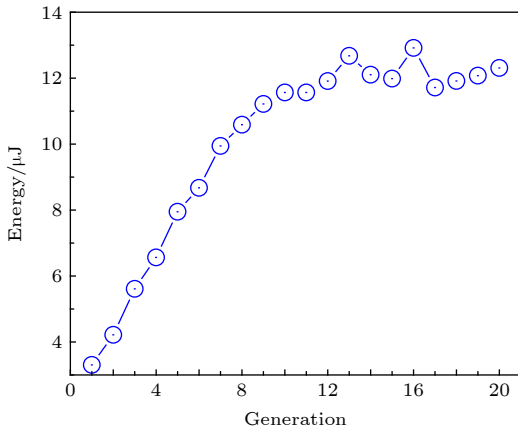


图 3 超连续辐射光谱积分 (400—700 nm 波段) 随迭代代数的变化

Fig. 3. Spectral intensity integration (400–700 nm) of the supercontinuum as a function of the iterative generation.

为了分析超连续光谱随迭代代数演化的物理机理, 利用补偿相位和初始脉冲光谱计算了几个典型迭代代数情况下初始整形脉冲的波形, 结果如图 4 所示. 从脉冲时域包络波形分布可以看出: 初始迭代时, 子脉冲偏离脉冲包络中心, 且子脉冲

间隔很大, 中心峰值强度较低; 脉冲展宽范围将近 ± 2 ps, 脉冲峰值功率大约为 0.46 GW. 随着迭代代数的增加, 包络中的子脉冲逐渐向包络中心集中, 中心脉冲峰值强度逐渐增强, 当迭代到第 8 代后脉冲展宽减小到 ± 0.5 ps, 脉冲峰值功率大约为 0.77 GW. 形成了具有一个主脉冲和靠近主脉冲前沿多个低强度子脉冲的分布, 并且时域包络的宽度也随着迭代代数的增加而明显减小. 随着迭代代数的进一步增加, 脉冲时域包络不再出现明显变化. 最终, 经过多次迭代反馈优化后的脉冲具有一个较强的主脉冲, 该主脉冲具有较为陡峭的脉冲后沿, 主脉冲的前沿还有多个次强的子脉冲. 这个陡峭的脉冲后沿致使成丝产生的超连续光谱在短波方向显著增强 [36,37].

在反馈优化的第一代中, 补偿相位是随机生成的, 得到的整形脉冲的包络分布十分复杂, 脉冲宽度达到 ps 量级, 脉冲峰值功率较低, 经过 MLA 聚焦到熔融石英中后, 成丝的数目较少, 丝的强度也比较弱, 因此, 产生的超连续辐射强度也较低 (见图 2). 随着迭代代数增加, 脉冲包络宽度减小, 能量主要集中在包络中心较强的子脉冲上, 并出现了陡峭的脉冲后沿, 这将使得更多的 MLA 微元能够产生等离子体丝, 并形成更强的超连续辐射. 由上

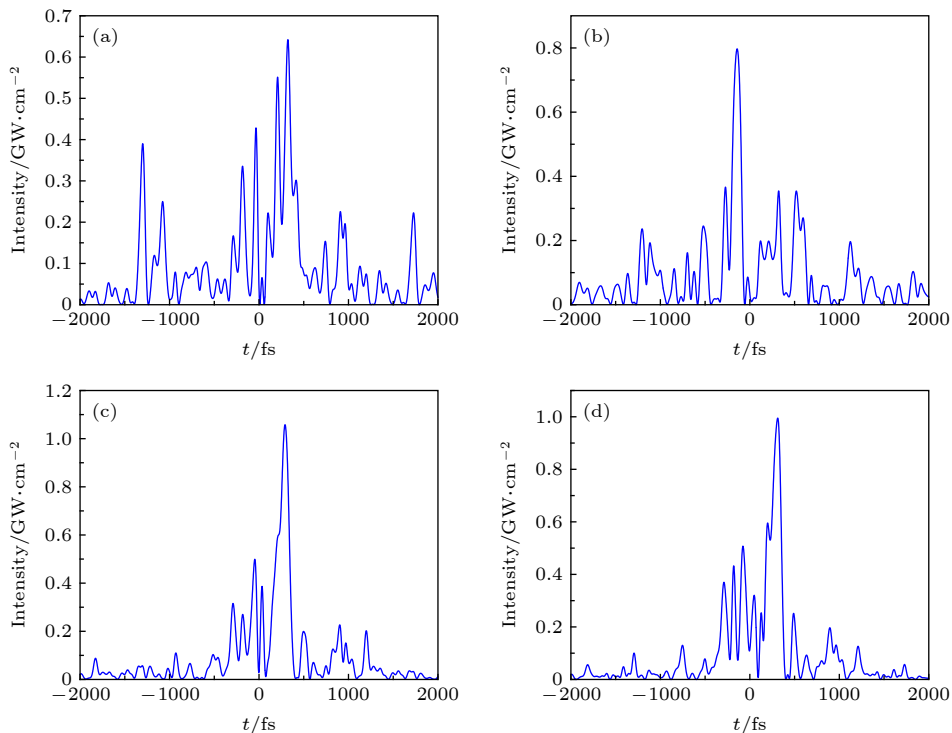


图 4 典型迭代代数对应整形激光脉冲初始包络, 图中迭代代数依次为 (a) 1, (b) 3, (c) 8 和 (d) 17

Fig. 4. Initial envelopes of shaped laser pulse with typical iteration generations of (a) 1, (b) 3, (c) 8 and (d) 17, respectively.

述分析可知, MLA 的空间调制允许更高的入射能量, 可产生更多的细丝, 直接提高了超连续辐射的能量. 而脉冲波形分布和峰值强度, 影响了超连续辐射的转换效率和展宽. 总之, 结合整形激光脉冲的时域调制和 MLA 的空间调制, 可以在更大的范围内控制超连续辐射的强度.

4 结 论

利用基于 MLA 的空间调制和 LC-SLM 的脉冲整形技术实现的时空调制飞秒激光脉冲, 进行了熔融石英中激光成丝产生超连续辐射的反馈优化控制研究, 实现了超连续辐射光谱能量密度的优化调制, 调制光谱的能量密度相对于初始值提高了 3 倍; 同时, 超连续辐射逐渐向短波方向展宽. 此外, 研究发现影响超连续辐射强度的主要物理机理是时域脉冲的峰值强度和包络分布, 陡峭脉冲后沿有利于超连续辐射在短波方向的展宽和增强. 这为研究可控的高能量成丝超连续光源提供了一个新的思路, 可以为荧光显微光谱技术^[5,6]、光谱学^[7,8]等应用领域提供更高效的光源.

参考文献

- [1] Chin S L, Hosseini S A, Liu W, Luo Q, Théberge F, Aközbeke N, Becker A, Kandidov V P, Kosareva O G, Schroeder H 2005 *Can. J. Phys.* **83** 863
- [2] Alfano R R, Shapiro S L 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 584
- [3] Alfano R R, Shapiro S L 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 592
- [4] Petersen C R, Prtljaga N, Farries M, Ward J, Napier B, Lloyd G R, Nallala J, Stone N, Bang O 2018 *Opt. Lett.* **43** 999
- [5] Dupont S, Petersen C, Thøgersen J, Agger C, Bang O, Keiding S R 2012 *Opt. Express* **20** 4887
- [6] Poudel C, Kaminski C F 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** A139
- [7] Riedle E, Bradler M, Wenninger M, Sailer C F, Pugliesi I 2013 *Faraday Discuss.* **163** 139
- [8] Petersen C R, Moselund P M, Huot L, Hooper L, Bang O 2018 *Infrared Phys. Technol.* **91** 182
- [9] Kasparian J, Rodriguez M, Méjean G, Yu J, Salmon E, Wille H, Bourayou R, Frey S, Mysyrowicz A, Sauerbrey R 2003 *Science* **301** 61
- [10] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [11] Price J H V, Feng X, Heidt A M, Brambilla G, Horak P, Poletti F, Ponzio G, Petropoulos P, Petrovich M, Shi J, Ibsen M, Loh W H, Rutt H N, Richardson D J 2012 *Opt. Fiber Technol.* **18** 327
- [12] Labrüyère A, Tonello A, Couderc V, Huss G, Leproux P 2012 *Opt. Fiber Technol.* **18** 375
- [13] Lefort C, O'Connor R P, Blanquet V, Magnol L, Kano H, Tombelaine V, Lévêque P, Couderc V, Leproux P 2016 *J. Biophotonics* **9** 709
- [14] Budriunas R, Stanislauskas T, Adamonis J, Aleknavi Cius A, Veitas G, Gadonas D, Balickas S, Michailovas A, Varanavicius A 2017 *Opt. Express* **25** 5797
- [15] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, Chen Y 2012 *Opt. Express* **20** 7119
- [16] Chin S, Petit S, Borne F, Miyazaki K 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** L126
- [17] Alfano R R 2006 *The Supercontinuum Laser Source: Fundamentals with Updated References* (New York: Springer) pp473–480
- [18] Garejev N, Tamošauskas G, Dubietis A 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** 88
- [19] Dubietis A, Tamošauskas G, Šuminas R, Jukna V, Couairon A 2017 *Lith. J. Phys.* **57** 113
- [20] Lu C H, Tsou Y J, Chen H Y, Chen B H, Cheng Y C, Yang S D, Chen M C, Hsu C C, Kung A H 2014 *Optica* **1** 400
- [21] He P, Liu Y Y, Zhao K, Teng H, He X K, Huang P, Huang H D, Zhong S Y, Jiang Y J, Fang S B, Hou X, Wei Z Y 2017 *Opt. Lett.* **42** 474
- [22] Camino A, Hao Z Q, Liu X, Lin J Q 2014 *Opt. Lett.* **39** 747
- [23] Li D W, Xi T T, Zhang L Z, Tao H Y, Gao X, Lin J Q, Hao Z Q 2017 *Opt. Express* **25** 23910
- [24] Li D W, Zhang L Z, Xi T T, Hao Z Q 2019 *J. Opt.* **21** 065501
- [25] Curtis J E, Koss B A, Grier D G 2002 *Opt. Commun.* **207** 169
- [26] Weiner A M 2011 *Opt. Commun.* **284** 3669
- [27] Mendoza-Yero O, Carbonell-Leal M, Doñate-Buendía C, Mínguez-Vega G, Lancis J 2016 *Opt. Express* **24** 15307
- [28] Hong Z F, Zhang Q B, Ali Rezvani S, Lan P F, Lu P X 2016 *Opt. Express* **24** 4029
- [29] Li P P, Cai M Q, Li J Q, Wang D, Liu G G, Qian S X, Li Y, Tu C, Wang H T 2016 *AIP Advances* **6** 125103
- [30] Heck G, Sloss J, Levis R J 2006 *Opt. Commun.* **259** 216
- [31] Chen A M, Li S Y, Qi H X, Jiang Y F, Hu Z, Huang X R, Jin M X 2017 *Opt. Commun.* **383** 144
- [32] Chang J W, Xu M N, Wang D, Zhu R H, Xi T T, Zhang L D, Li D W, Hao Z Q 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 0126021 (in Chinese) [常峻巍, 许梦宁, 王頔, 朱瑞哈, 奚婷婷, 张兰芝, 李东伟, 郝作强 2019 *光学学报* **39** 0126021]
- [33] Zhdanova A A, Shen Y J, Thompson J V, Scully M O, Yakovlev V V, Sokolov A V 2018 *J. Mod. Opt.* **65** 1332
- [34] Ackermann R, Salmon E, Lascoux N, Kasparian J, Rohwetter P, Stelmaszczyk K, Li S, Lindinger A, Wöste L, Bédot P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 171117
- [35] Thompson J V, Zhokhov P A, Springer M M, Traverso A J, Yakovlev V V, Zheltikov A M, Sokolov A V, Scully M O 2017 *Sci. Rep.* **7** 43367
- [36] Zhan L D, Xu M N, Xi T T, Hao Z Q 2018 *Phys. Plasmas* **25** 103102
- [37] Xu M N, Zhan L D, Xi T T, Hao Z Q 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** G6

Control of supercontinuum generation from filamentation of shaped femtosecond laser pulses^{*}

Chang Jun-Wei¹⁾²⁾ Zhu Rui-Han¹⁾ Zhang Lan-Zhi²⁾

Xi Ting-Ting^{3)†} Hao Zuo-Qiang^{1)2)‡}

1) (*School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

2) (*Shandong Provincial Engineering and Technical Center of Light Manipulations, Shandong Provincial Key Laboratory of Optics and Photonic Device, School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250358, China*)

3) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China*)

(Received 20 September 2019; revised manuscript received 24 October 2019)

Abstract

Supercontinuum (SC), as one of the most spectacular phenomena occurring in the nonlinear process of intense femtosecond laser-material interaction, has attracted considerable interest. The broadband SC sources have a variety of applications including the spectroscopy, fluorescence microscopy, remote sensing, and generation of few-cycle pulses. Over the last few decades, the SC has been extensively investigated in various optical media, including liquid, gas, and solid. Especially, ultrabroadband SC sources have achieved remarkable development in the photonic crystal and micro-structured fibers. Even so, the generation of the SC with high brightness, high spatiotemporal coherence and good maneuverability, is still a challenging topic. The SC generation from femtosecond filamentation is a unique white light source with high pulse energy, high brightness and high spatiotemporal coherence, whose spectral range spans from ultraviolet to mid-infrared. In recent years, numerous studies have been conducted to optimize the filamentation and SC. The control of filamentation such as the filament length, number and position, as well as the generation of the ultra-broadband spectrum with high spectral energy density has been realized. To date, the optimal control of SC has been realized by the spatial modulation or time-domain shaping of the femtosecond laser pulse. However, there is no report on the control of SC generation and filamentation by spatiotemporally modulating the femtosecond laser pulses as far as we know. In this work, a spatiotemporal modulation for the femtosecond laser pulse is proposed, which combines the spatial modulation by using microlens array (MLA) and the laser pulse shaping based on liquid crystal spatial light modulator. We investigate the control of the SC generation from the filamentation of the spatiotemporally modulated femtosecond laser pulses in fused silica by using the feedback optimal control based on genetic algorithm. In our experiments, with the increase of the iterative generation, the cut-off wavelength in the blue-side extension of the SC becomes shorter gradually, and the spectral intensity of the SC increases significantly. After the eighth iteration, the increase of the spectral intensity slows. With the number of iterations increasing further, the intensity and broadening of SC spectrum will no longer apparently change. Hence, the feedback optimization control of spectral intensity of SC is realized, and the SC with controllable spectral intensity in a certain range is obtained. The maximum intensity variation of SC is more than three times. By integrating the spectral intensities of SC for different iterative generations, we characterize the

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11774038, 11874056, 11474039, 11274053) and the Taishan Scholar Project of Shandong Province, China.

[†] Corresponding author. E-mail: ttxi@ucas.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zqhao@sdu.edu.cn

increase trend of SC conversion efficiency. During the first few iterations, the conversion efficiency increases rapidly. Then it increases slowly after eighth generations and reaches its maximum after several generations (10th generation). The conversion efficiency has a similar evolution to the spectral intensity of the SC. To explain the physical mechanism, the initial envelope of the shaping pulse with typical iteration generation is calculated. It can be concluded that the spatial modulation of MLA allows for higher incident laser energy and for more filaments' generation, which increases the energy of SC radiation directly. The peak intensity and envelope distribution of time domain pulse are the main factors affecting the spectral intensity and broadening the SC.

Keywords: femtosecond filamentation, supercontinuum, laser pulse shaping, feedback control

PACS: 42.65.Jx, 42.65.Re, 52.38.Hb

DOI: [10.7498/aps.69.20191438](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191438)