

飞秒平顶光束经微透镜阵列在熔融石英中的成丝及其超连续辐射

周宁 张兰芝 李东伟 常峻巍 王毕艺 汤磊 林景全 郝作强

Filamentation and supercontinuum emission with flattened femtosecond laser beam by use of microlens array in fused silica

Zhou Ning Zhang Lan-Zhi Li Dong-Wei Chang Jun-Wei Wang Bi-Yi Tang Lei Lin Jing-Quan Hao Zuo-Qiang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 174205 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180306

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180306>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[偏振对飞秒激光辐照 LiF 晶体的影响](#)

Influence of polarization on irradiating LiF crystal by femtosecond laser

物理学报.2015, 64(20): 205204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.205204>

[紧聚焦飞秒脉冲与石英玻璃相互作用过程中的电子动量弛豫时间研究](#)

Analysis of electron momentum relaxation time in fused silica using a tightly focused femtosecond laser pulse

物理学报.2014, 63(7): 074209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074209>

[飞秒激光成丝过程中由等离子体光栅引起的超连续谱增强与转移](#)

Supercontinuum enhancement and transfer induced by a plasma grating in air

物理学报.2012, 61(18): 184209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.184209>

[飞秒激光离焦抽运熔融石英产生超连续白光的实验研究](#)

Off-focus generation of strong super-continuum emission in fused silica using high power femtosecond laser pulses

物理学报.2012, 61(17): 174206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174206>

[有外加电源的串联光折变晶体回路中的独立空间全息-哈密顿屏蔽孤子对](#)

Separate holographic-Hamiltonian screening soliton pairs in a biased series photorefractive crystal circuit

物理学报.2012, 61(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064213>

# 飞秒平顶光束经微透镜阵列在熔融石英中的成丝及其超连续辐射\*

周宁<sup>1)</sup> 张兰芝<sup>1)†</sup> 李东伟<sup>1)</sup> 常峻巍<sup>1)</sup> 王毕艺<sup>2)</sup> 汤磊<sup>3)</sup>  
林景全<sup>1)</sup> 郝作强<sup>1)‡</sup>

1) (长春理工大学理学院, 长春 130022)

2) (光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

3) (中国兵器科学研究院, 北京 100089)

(2018年2月7日收到; 2018年3月13日收到修改稿)

实验研究了平顶激光光束经微透镜阵列在熔融石英中成丝的演化以及超连续辐射的产生, 并进一步与高斯光束的成丝和超连续辐射进行了对比研究. 分别对这两种光束的多丝传输进行了横向和纵向成像. 结果表明, 使用平顶光束可以获得更为均匀的多丝分布, 成丝的起点也更为一致; 尤其重要的是, 相对于高斯光束, 平顶光束可以使用更高的入射激光脉冲能量而不会造成介质的损伤, 从而可以获得更高脉冲能量和更高转换效率的超连续辐射.

**关键词:** 激光成丝, 平顶光束, 超连续辐射产生, 微透镜阵列

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180306

## 1 引言

飞秒激光在非线性介质中传输时, 当其功率大于自聚焦临界功率时会由于克尔自聚焦、等离子体散焦以及衍射等效应的动态平衡, 产生等离子体丝<sup>[1]</sup>; 并且, 在此过程中由于自相位调制、自陡峭、多光子电离等非线性效应, 会发生光谱展宽, 覆盖整个可见光和近红外波段, 即产生超连续辐射. 成丝过程存在强度钳制效应<sup>[2]</sup>, 当激光功率远大于临界功率时, 会产生多丝; 又由于初始光斑的随机抖动和调制不稳定性, 激光横截面上会产生随机位置分布的多丝分布<sup>[3]</sup>. 飞秒激光在超连续辐射<sup>[4]</sup>、等离子体光栅<sup>[5]</sup>、空气检测<sup>[6,7]</sup>等领域有着重要应用, 引起了人们的广泛关注. 而在一些应用, 比如产生毫焦量级的超连续白光<sup>[8]</sup>、形成瞬态波导<sup>[9]</sup>、阵列成丝加工<sup>[10]</sup>等方面, 则需要可控的多丝分布. 因

此, 科学家们提出了一系列方法进行多丝控制, 主要有引入像散<sup>[11]</sup>、望远缩束系统<sup>[12]</sup>、加入光阑<sup>[13]</sup>、相位板<sup>[14]</sup>、栅格<sup>[15]</sup>、改变入射光椭圆度<sup>[16]</sup>等. 利用这些方法在不同程度上都实现了等离子体多丝的优化控制, 但是有些方法是以牺牲激光功率和超连续辐射功率为代价, 有些方法则改变了光束横截面的相位分布, 各有优缺点. 利用微透镜阵列对激光脉冲的空间强度分布进行调制是近年来发展起来的一种成丝控制方法<sup>[17]</sup>, 与单透镜或栅格结构成丝有着很大的区别, 相对其他波前调制手段具有损伤阈值高、无能量损失等优良特性. 微透镜阵列对激光光束横截面的能量分布进行调制, 形成阵列聚焦点, 这些聚焦过程逐渐演化形成等离子体丝, 通过对这些阵列聚焦点的调控, 即可进行阵列多丝控制.

通常使用的飞秒激光的光强为高斯分布, 其中

\* 国家自然科学基金(批准号: 11474039, 11774038, 11274053)、吉林省科技厅项目(批准号: 20170519018JH)和长春理工大学科技创新基金(批准号: XJJLG-2016-02)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzzhang@cust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zqhao@cust.edu.cn

心强度远高于边缘强度,在固态光学介质中成丝传输过程中容易造成介质永久损伤.因此可采用一些空间整形的方法<sup>[18-21]</sup>,使光束强度分布均化,产生平顶光束.相对于高斯光束,平顶激光束经微透镜阵列在介质中成丝,有望在整个微透镜阵列区域形成强度均匀的阵列多丝,进而在不损伤介质的前提下提高超连续辐射的功率.本文采用非球面透镜组系统将高斯光束整形为平顶光束,对其经微透镜阵列在熔融石英中成丝进行了研究,并与空间分布为高斯型的飞秒激光成丝和超连续辐射进行了对比,获得了阵列区域强度分布均匀的多丝以及更强的超连续辐射.

## 2 实验装置

实验装置示意图如图1所示,实验采用的是掺钛蓝宝石飞秒激光放大器 (Libra, Coherent Inc.),其重复频率为1 kHz、脉宽50 fs、中心波长800 nm.通过空间整形器( $\pi$  Shaper, AdlOptica GmbH)把空间分布为高斯型的飞秒激光光束整形为接近平

顶分布的飞秒激光束.激光入射到微透镜阵列 (microlens array, MLA) 上,经过50 mm长的熔融石英块,并在其内成丝.其中MLA微透镜元间距1 mm,焦距为218.3 mm.熔融石英固定在沿光传播方向上的一维平移台上,以便于改变微透镜阵列与熔融石英间距.再通过焦距为50.8 mm的透镜把熔融石英内的阵列丝分布成像在白屏上,成像透镜与白屏间距为2.6 m.通过CCD在熔融石英侧面拍摄成丝的荧光图,在熔融石英后用光纤光谱仪测量超连续辐射光谱以及光谱稳定性.在测量高斯光的成丝传输和超连续辐射时,移除空间整形器.

## 3 结果与讨论

图2为高斯光束和平顶光束分别经微透镜阵列在熔融石英中成丝的侧面荧光图以及各自的横截面强度分布图.两种情况下使用了相同的激光能量0.9 mJ,微透镜阵列与熔融石英间距均为130 mm.在这个实验条件下,按照理想高斯光束进行分析,位于其中心区域的单个微透镜所占的激光

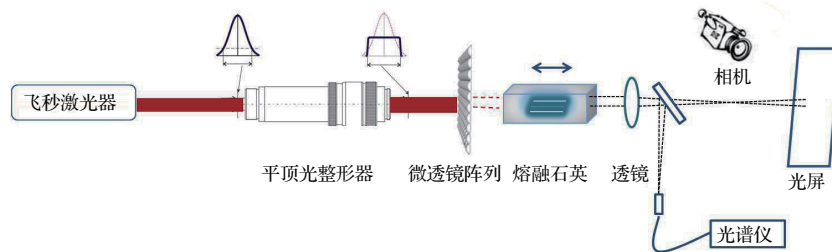


图1 实验装置示意图  
Fig. 1. Experimental setup.

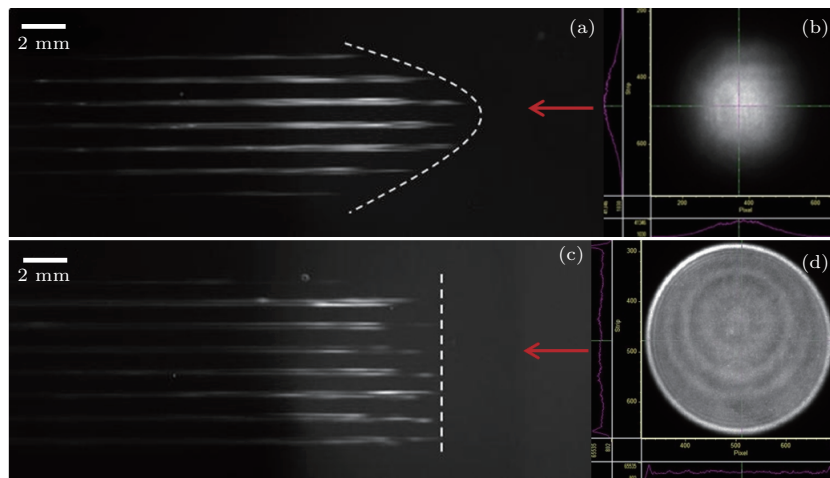


图2 (a) 高斯光束和 (c) 平顶光束飞秒激光在熔融石英中成丝的荧光图像; (b) 高斯光束和 (d) 平顶光束的横截面强度分布图  
Fig. 2. Fluorescence images of the filaments formed by (a) Gaussian beam and (c) flattened beam in the fused silica, respectively; the intensity distributions in the cross sections of (b) Gaussian beam and (d) flattened beam.

功率为 480 mW 左右, 约为熔融石英自聚焦临界功率 ( $P_{cr}$ ) 的 240 倍, 即  $240P_{cr}$ , 而光束边缘附近约为 120 mW ( $60P_{cr}$ ). 对于理想平顶光束的情况, 每个微透镜所占的激光功率约为 260 mW ( $130P_{cr}$ ). 由此可见, 高斯光束中心区域的激光功率相对其他区域和平顶光束来说要大得多. 从图 2(a) 中可以看出, 激光光束的中心区域比周围区域先成丝, 并且强度较高. 而平顶光束由于其横截面内的强度分布较为均匀, 在经过几乎相同的传输距离之后, 光束中心和周围区域同时开始成丝, 并且成丝的程度比较均匀.

为了更清晰地观测平顶光束和高斯光束在熔融石英中的成丝分布, 实验测量了两种光束分别经微透镜阵列后在熔融石英中的成丝演化. 图 3 是高斯光束和平顶光束在熔融石英中不同传输位置处的强度分布图. 实验中, 高斯光束入射能量为 0.94 mJ, 平顶光束入射能量为 1.9 mJ, 微透镜阵列

与熔融石英间距为 115 mm. 从图 3(a) 可以看出, 高斯光束在熔融石英中, 传输至 19 mm 处中心区域时先成丝, 随着传输距离的增加从中心区域到边缘区域逐渐成丝; 传输至 26 mm 处时, 阵列区域成丝已经完成, 中心区域由于强度较高支持多丝的产生, 而强度较低边缘区域只能形成较少的丝甚至不能成丝; 在传输至 31 mm 及以后时, 成丝逐渐结束, 只有中心区域有丝传输, 而边缘区域形成的丝已经结束. 从图 3(b) 可以看出, 平顶光束在传输至 21 mm 处时在整个区域内基本上同时成丝了, 整个区域内丝的强度基本一致, 并且稳定传输至 36 mm 处; 传输至 38 mm 处时可以看出丝几乎同时结束了. 改变微透镜阵列与熔融石英间距为 130, 140 和 150 mm 时仍发现两种光束具有同样的演化过程. 图 4 为只改变相对间距为 130 mm 处时高斯光束和平顶光束的成丝演化. 从图 4 中可以看出,

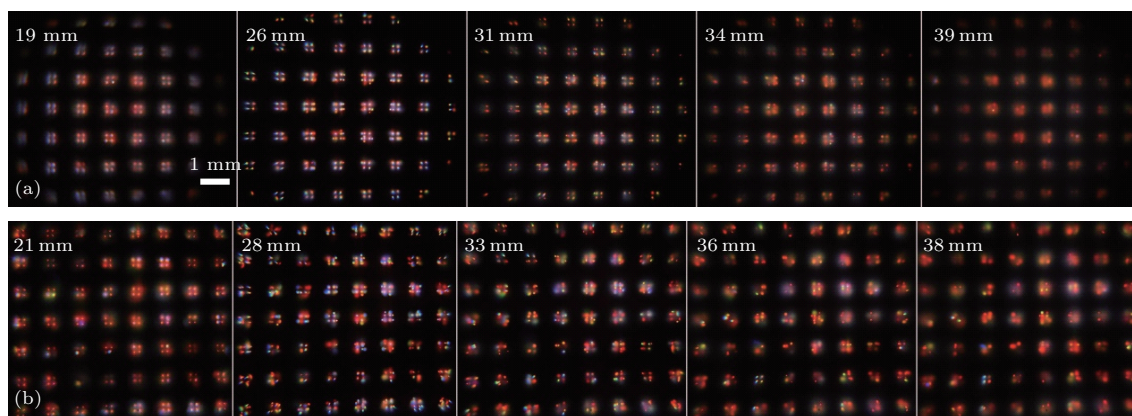


图 3 (a) 高斯光束和 (b) 平顶光束分别经 MLA 在熔融石英中不同位置处的成丝分布图 (MLA 与熔融石英相距 115 mm)  
Fig. 3. The filamentation distributions of (a) Gaussian beam and (b) flattened beam at different positions in the fused silica, respectively (MLA and fused silica spacing is 115 mm).

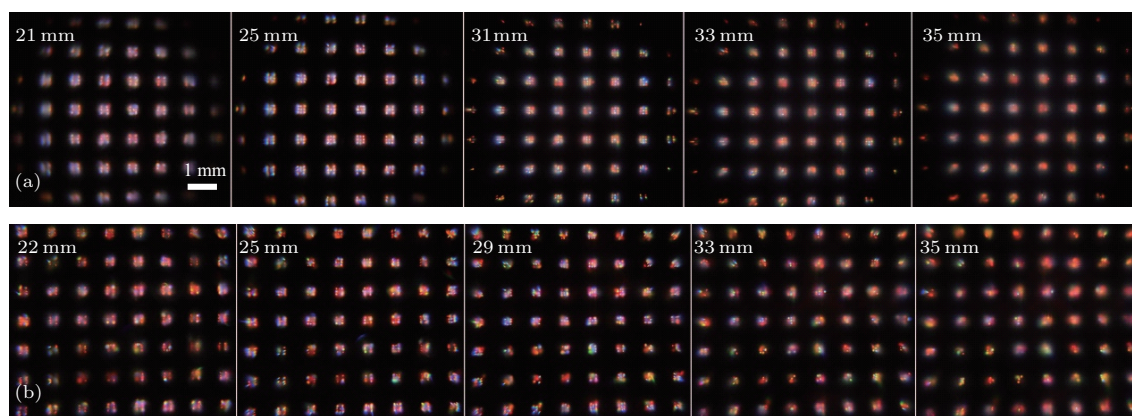


图 4 (a) 高斯光束和 (b) 平顶光束分别经 MLA 在熔融石英不同位置处成丝分布图 (MLA 与熔融石英相距 130 mm)  
Fig. 4. The filamentation distributions of (a) Gaussian beam and (b) flattened beam at different positions in the fused silica, respectively (MLA and fused silica spacing is 130 mm).

其演化过程与图3相似, 高斯光束在传输过程中是中心区域先成丝, 边缘区域成丝较晚且丝的强度较低, 传输至33 mm及以后时, 中心区域的丝结束较晚. 平顶光束在传输至22 mm处时同时成丝, 传输过程中, 可以在整个区域内形成强度相同的丝, 在传输至35 mm处时成丝同时结束. 综上对比可知, 平顶光束在熔融石英中成阵列多丝更加稳定, 且可以在整个区域内成强度分布均匀的多丝.

飞秒激光在介质中成丝时伴随产生的超连续辐射光谱是一种相干光, 而高强度以及良好稳定性是很多实际应用所需要的. 我们之前的工作已经测量了高斯光束下微透镜阵列在熔融石英中产生超连续辐射的强度, 研究表明, 由于高斯光束的强度分布特性, 光束中心区域易损伤熔融石英, 而其边缘区域等离子体丝较弱甚至未形成细丝. 在本文中, 平顶光束是把能量均匀分布在光束平面内, 预计可以输入更大激光能量, 进而增加超连续辐射的强度. 如果固态光学介质发生损伤, 其产生的超连续辐射光谱的强度会随时间变化. 为了研究平顶光束和高斯光束对损伤熔融石英方面的区别, 分别测量了不同能量下的两种光束成丝产生超连续辐射的光谱稳定性. 通过光谱仪采集平顶光束和高斯光束在熔融石英中的超连续辐射光谱, 并对8 min计数周期内的光谱稳定性进行了测量.

图5为1.46 mJ的高斯光束和1.9 mJ的平顶光束产生的超连续辐射光谱在三个波长处的计数统计. 从图5(a)可以看出, 高斯光束入射能量为1.46 mJ时, 在波长为600, 650和675 nm处的计数统计演化发生了明显向下偏移. 而对于平顶光束的情况, 如图5(b)所示, 平顶光束在1.9 mJ时, 其计数统计演化仍保持水平不变. 因此, 高斯光束的成丝引起了熔融石英的损伤而平顶光束则没有. 由此可见, 相对于高斯光束, 平顶光束可以输入更大的能量而不损伤熔融石英.

为了对比高斯光束和平顶光束产生的超连续辐射光谱强度, 实验测量了在不损伤熔融石英情况下两种光束的超连续辐射光谱, 其中高斯光束能量取为1.35 mJ, 平顶光束的能量取为1.9 mJ, 两种光束分别成丝产生的超连续辐射光谱如图6所示. 首先, 从图中可以看到, 在波长520—690 nm内, 平顶光束产生的超连续辐射光谱能量密度是高斯光束情况下的2倍以上. 然后, 对两种情况下的超连续辐射转换效率进行了比较, 采用的计算方法为,

将激光基频区域以外的超连续辐射光谱区域进行积分, 再除以整个光谱的积分, 从而得到了超连续辐射的转换效率. 对于高斯光束和平顶光束两种

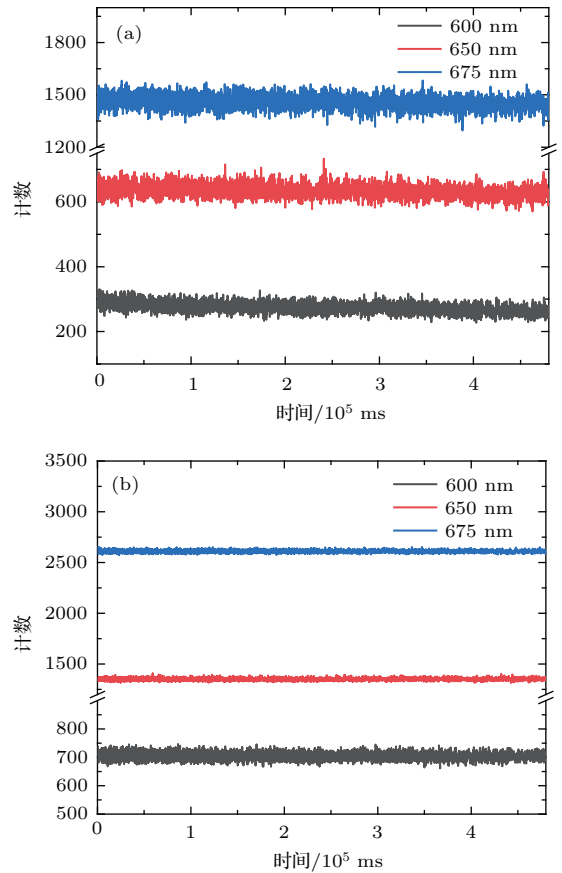


图5 (a)和(b)分别是能量为1.46 mJ的高斯光束和能量为1.9 mJ的平顶光束在波长600, 650和675 nm处经8 min的计数统计

Fig. 5. Spectrometer counts evolutions at three wavelengths of 450, 550 and 650 nm of the supercontinuum for (a) Gaussian beam with an energy of 1.46 mJ and (b) flattened beam with an energy of 1.9 mJ, respectively.

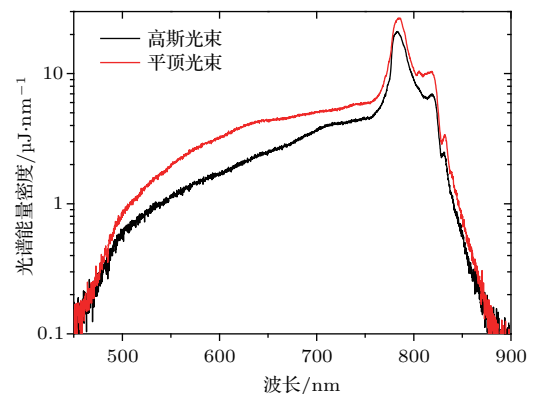


图6 入射能量为1.35 mJ的高斯光束和1.9 mJ的平顶光束的超连续辐射光谱

Fig. 6. Supercontinuum spectra from filamentation of the Gaussian beam with an incident energy of 1.35 mJ and the flattened beam of 1.9 mJ.

情况, 其超连续转换效率分别为49%和55%。由此可见, 使用平顶光束还可以提高超连续辐射的转化效率。从上述两方面的比较分析可以看出, 平顶光束在产生高强度高转换效率超连续辐射方面相对于高斯光束更具优势。

## 4 结 论

本文实验研究了平顶光束与高斯光束分别经微透镜阵列在熔融石英中的成丝分布及其超连续辐射。通过改变光束能量的空间分布, 产生平顶激光束, 实现了更加均匀、稳定的阵列丝分布。此外, 平顶光束可以允许更大的初始激光能量在熔融石英中成丝传输而不损伤介质, 其伴随成丝产生的超连续辐射的强度远高于高斯光束, 也将更有利于需要高能量的飞秒超连续辐射的应用领域。

## 参考文献

- [1] Braun A, Korn G, Liu X, Du D, Squier J, Mourou G 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [2] Becker A, Aközbek N, Vijayalakshmi K, Oral E, Bowden C M, Chin S L 2001 *Appl. Phys. B* **73** 287
- [3] Chin S L, Talebpour A, Yang J, Petit S, Kandidov V P, Kosareva O G, Tamarov M P 2002 *Appl. Phys. B* **74** 67
- [4] Zhang L Z, Xi T T, Hao Z Q, Lin J Q 2016 *J. Phys. D* **49** 115201
- [5] Shi L P, Li W X, Wang Y D, Liu X, Ding L E, Zeng H P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 095004
- [6] Yuan S, Wang T J, Lu P F, Chin S L, Zeng H P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 091113
- [7] Yuan S, Wang T J, Teranishi Y, Sridharan A, Lin S H, Zeng H P, Chin S L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 224102
- [8] Camino A, Hao Z Q, Liu X, Lin J Q 2014 *Opt. Lett.* **39** 747
- [9] Alshershby M, Hao Z Q, Camino A, Lin J Q 2013 *Opt. Commun.* **296** 87
- [10] Matsuo S, Juodkazis S, Misawa H 2005 *Appl. Phys. A* **80** 683
- [11] Zafar S, Li D W, Hao Z Q, Lin J Q 2016 *Optik* **130** 765
- [12] Luo Q, Hosseini S A, Liu W W, Gravel J F, Kosareva O G, Panov N A, Aközbek N, Kandidov V P, Roy G, Chin S L 2005 *Appl. Phys. B* **80** 35
- [13] Hao Z Q, Zhang J, Xi T T, Yuan X H, Zheng Z Y, Lu X, Yu M Y, Li Y T, Wang Z H, Zhao W, Wei Z Y 2007 *Opt. Express* **15** 16102
- [14] Bérubé J, Vallée R, Bernier M, Kosareva O, Panov N, Kandidov V, Chin S L 2010 *Opt. Express* **18** 1801
- [15] Liu J S, Schroeder H, Chin S L, Li R X, Xu Z Z 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 161105
- [16] Majus D, Jukna V, Valiulis G, Dubietis A 2009 *Phys. Rev. A* **79** 033843
- [17] Camino A, Hao Z Q, Liu X 2013 *Opt. Express* **21** 7908
- [18] Dickey F M, Weichman L S, Shagam R N 2000 *Proc. SPIE* **4065** 338
- [19] Gao Y H, An Z Y, Li N N 2011 *Optics Precis. Eng.* **19** 1464 (in Chinese) [高瑀含, 安志勇, 李娜娜 2011 光学精密工程 **19** 1464]
- [20] Wippermann F C, Zeitner U, Dannberg P, Bräuer A, Sinzinger S 2007 *Proc. SPIE* **6663** 666309
- [21] Shealy D L, Hoffnagle J A 2006 *Appl. Opt.* **5876** 5118

# Filamentation and supercontinuum emission with flattened femtosecond laser beam by use of microlens array in fused silica\*

Zhou Ning<sup>1)</sup> Zhang Lan-Zhi<sup>1)†</sup> Li Dong-Wei<sup>1)</sup> Chang Jun-Wei<sup>1)</sup> Wang Bi-Yi<sup>2)</sup>  
Tang Lei<sup>3)</sup> Lin Jing-Quan<sup>1)</sup> Hao Zuo-Qiang<sup>1)‡</sup>

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

2) (Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

3) (China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China)

( Received 7 February 2018; revised manuscript received 13 March 2018 )

## Abstract

The high power supercontinuum from femtosecond filamentation has attracted great attention for recent years due to its various applications. In our previous researches, we have used microlens array to obtain filament-array in fused silica and to generate the high spectral power supercontinuum. To further improve the ability to generate the high power supercontinuum by using microlens array, in this work we adopt flattened femtosecond laser beam with a flat-top energy distribution to generate filament-array in fused silica and supercontinuum. By using a laser beam shaping system consisting of aspherical lenses, the Gaussian intensity distribution of initial femtosecond laser beam is converted into a flat-top distribution. The flattened laser beam is focused by a microlens array into a fused silica block, and consequently a filament array is formed in the block. Our experimental results show that compared with the filaments formed by a Gaussian laser beam, the filaments formed by the flattened beam have a uniform distribution and almost the same onset due to the initial uniform energy distribution across the section of the laser beam. Furthermore, the spectral stability of supercontinuum emission is used to evaluate the damage of the fused silica block. It is demonstrated that the flattened beam with a pulse energy of 1.9 mJ does not induce permanent damage to the fused silica block, while the Gaussian beam with a relatively low pulse energy of 1.46 mJ leads to the damage to the block. Therefore, a higher incident laser pulse energy is allowed in the case of flattened laser beam, and consequently stronger supercontinuum generation than in the case of the Gaussian laser beam can be expected. In our experiments, the relative spectral intensity of flattened beam generated supercontinuum in the visible range is about twice higher than that for the Gaussian beam case. The conversion efficiencies of the supercontinuum for the two kinds of laser beams are further analyzed. The conversion efficiencies are 49% and 55% for the cases of Gaussian and flattened beams respectively. In this work, we demonstrate the formation of filament array with uniform distribution in fused silica, and, as a proof of principle, we also demonstrate the high power supercontinuum generation with high conversion efficiency from the filamentation, by using flattened femtosecond laser beam as the incident laser and microlens array as the focusing element. This approach provides a way to obtain a high power femtosecond supercontinuum source which is of great importance in many applications such as some absorption spectroscopies based on coherent supercontinuum light.

**Keywords:** filamentation, flattened beam, supercontinuum generation, microlens array

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180306

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11474039, 11774038, 11274053), the Science and Technology Department of Jilin Province, China (Grant No. 20170519018JH), and the Innovation Fund of Changchun University of Science and Technology, China (Grant No. XJLJG-2016-02).

† Corresponding author. E-mail: [lzzhang@cust.edu.cn](mailto:lzzhang@cust.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zqhao@cust.edu.cn](mailto:zqhao@cust.edu.cn)