DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.03.004
文献引用：刘子豪，曾维旺，李嘉杰，等．利用多片薄板产生稳定且高效率的超连续谱[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46(3)：24-29.
LIU Z H，ZENG W W，LI J J，et al. Reliable high-efficiency supercontinuum generation with multiple thin plates [J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2025，46(3)：24-29.

利用多片薄板产生稳定且高效率的超连续谱*

刘子豪[1,2,3]，曾维旺[2,4]，李嘉杰[2,5]，孙文峰[1,3**]，任泽峰[2]，张　岩[1,3]

（1. 首都师范大学物理系，北京　100048；2. 中国科学院大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室，辽宁 大连　116023；3. 太赫兹光电子教育部重点实验室，超材料与器件北京市重点实验室，北京　100048；4. 中国科学院大学，北京　100049；5. 中国科学技术大学化学物理系，安徽 合肥　230026）

摘要：超连续谱（SC）在超快光学领域有着非常广泛的应用。本文基于自相位调制效应，研究了利用多片介质板产生强度高、宽带宽、稳定的SC技术。通过将0.5 mJ、40 fs和5 kHz重频的Ti：Sapphire激光脉冲作用于熔融石英和蓝宝石混合排列的12块介质薄板上产生SC。这些介质薄板被放置在充有低压氦气的腔室中，解决薄板在空气中使用容易损坏和在空气中产生等离子体丝的问题。最终，获得了光谱范围为500~950 nm的SC，能量传输率为88%，并且相对于峰值强度，在600和550 nm的转化效率分别高达15%和6%。研究结果表明，该方案产生的SC具有光强高和稳定性好的优点，在非线性光学和强场物理等领域中具有潜在的应用价值。

关键词：超连续谱；多片板超连续谱产生系统；高功率；宽光谱；自相位调制
中图分类号：N93；O433　　**文献标志码**：A

Reliable high-efficiency supercontinuum generation with multiple thin plates*

LIU Zihao[1,2,3]，ZENG Weiwang[2,4]，LI Jiajie[2,5]，SUN Wenfeng[1,3**]，REN Zefeng[2]，ZHANG Yan[1,3]

（1. Department of Physics，Capital Normal University，Beijing　100048；2. State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics，Dalian Institute of Chemical Physics，Chinese Academy of Sciences，Dalian Liaoning　116023；3. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics Ministry of Education，Beijing Key Lab for Metamaterials and Devices，Beijing　100048；4. University of Chinese Academy of Science，Beijing　100049；5. Department of Chemical Physics，University of Science and Technology of China，Hefei Anhui　230026）

Abstract：Supercontinuum（SC）has a wide range of applications in the field of ultrafast optics. Based on the self-phase modulation effect，this paper demonstrates a high intensity，wide band and stable SC generation with multiple dielectric plates. The SC pulses were generated by the 0.5 mJ，40 fs Ti：Sapphire laser pulses at 5 kHz applied to 12 thin plates of hybrid fused silica and sapphire. These thin plates were placed in a vacuum chamber with low-pressure helium，which can solve the questions of the

收稿日期：2023-04-03
*科技部国家重点研发计划项目（2018YFA0208700，2021YFA1500600）；国家自然科学基金项目（22073097）
**通信作者：wfsun@cnu.edu.cn

damage of the thin plates surface and filamentation in air. This study obtained a continuum covering 500 to 950 nm with the transmission of 88%, and the conversion efficiency was as high as 15% at 600 nm and 6% at 550 nm relative to the wavelength of peak intensity. The results show that the SC generated by this scheme has the advantages of high intensity and good stability, which has potential application value in the fields of nonlinear optics and strong field physics.

Keywords: supercontinuum; multiple-plates supercontinumm generation system; high power; broad spectrum; self-phase modulation

CLC: N93; O433 **DC**: A

0 引 言

超连续谱(supercontinuum, SC)产生是将脉冲激光转换成具有极宽光谱带宽光的过程[1]。由于SC具有超宽带、高光谱强度和良好的空间相干性等优点,其在超快光学和分子反应动力学等领域具有广泛的应用前景[2-4]。虽然SC产生的技术已经发展了很长一段时间[5-9],但对这项技术的应用却面临着很多问题。SC的产生机制比较复杂,涉及自聚焦、自相位调制(self-phase modulation, SPM)、自陡峭效应、群速度色散(group velocity dispersion, GVD)和多光子吸收等非线性过程[10-11],所以在实际操作中需要考虑的因素也非常多。如在固体材料的SC产生过程中除了SPM和自陡峭效应来展宽输入脉冲的光谱外,由光学克尔效应引起的自聚焦效应也会影响SC的产生。自聚焦效应具有聚焦光束的特性,因此其具有使微弱脉冲产生SC的优点。然而,在强脉冲作用下自聚焦效应很容易在固体材料中引起明显的多光子激发和电离,从而导致脉冲能量的严重损失和固体材料的永久性损伤[12-13]。当由自聚焦效应引起的多光子吸收过程开始发挥明显作用时,入射脉冲的峰值强度将会被遏制住,从而使光谱无法进一步展宽[14]。同时,自聚焦效应也会使光束的调制稳定性变差,产生多重长丝和脉冲劈裂的情况,最终形成光学击穿和损坏[15-18],这会严重影响脉冲的横模品质,并明显降低其透过率。此外,在SC产生的过程中介质板的材料属性也不应忽略,因为相对较高的材料色散系数和较低的损伤阈值均会极大地限制SC脉冲的能量和峰值功率。

已有研究表明,在SC产生的过程中,光谱展宽先于脉冲劈裂或光学击穿[17,19]。这表明在时间和空间上存在一个窗口,在这个窗口内,频谱可以展宽并且脉冲保持完整[9]。基于这个原则,研究者利用固体介质薄板的方式来产生高脉冲能量、高品质的强飞秒SC[9,20]。在已报道的实验中,激光脉冲入射到熔融石英薄板阵列中使脉冲的频谱展宽,在多重成丝和介质光学损伤之前离开介质。研究者还利用自聚焦效应的影响即每个介质薄板都相当于一个小透镜,使光束基本保持直径不变[21-22],在光路的传播路径上放置多个薄板,实现多轮的光谱扩展直到获得一个宽带宽的SC脉冲[9]。若入射激光脉冲的功率较高则还会面临一些问题,如介质表面的污染程度对光谱扩展的影响,激光在空中自聚焦产生等离子体丝对SC产生的影响。这些因素均会影响SC输出的稳定性和相干性。

本文展示了一种产生SC的技术,该技术是基于多片固体薄板并结合低压高损伤阈值的气体环境来产生高功率、高效率的SC脉冲。通过在封闭的低压氦气腔室中放置12片熔融石英和蓝宝石薄板并且优化介质板的位置和厚度,成功地产生了稳定、高强度的SC脉冲。

1 实验装置

为了产生高效率的SC,需要在脉冲劈裂或介质材料光学损伤之前尽可能地利用自相位调制和自陡峭效应。因此,需要满足以下要求:(1)用于产生连续谱的介质薄板的材料具有尽可能小的群速度色散系数和较大的非线性折射率系数。(2)这些薄板需要被放置在合适的位置并且选择合适的厚度,使其能激发强的自相位调制。同时,必须避免自聚焦效应产生的高强度激光造成的光学损伤和多重成丝的情况。(3)必须避免击穿空气而产生等离子体丝,因为其会破坏SC的稳定性。为了防止空气电离,必须增加薄板之间的距离,但距离的增加却会削弱脉冲的自相位调制和自陡峭效应,占用更多的空间。因此,本文可以选择具有较高击穿阈值的实验气体环境。

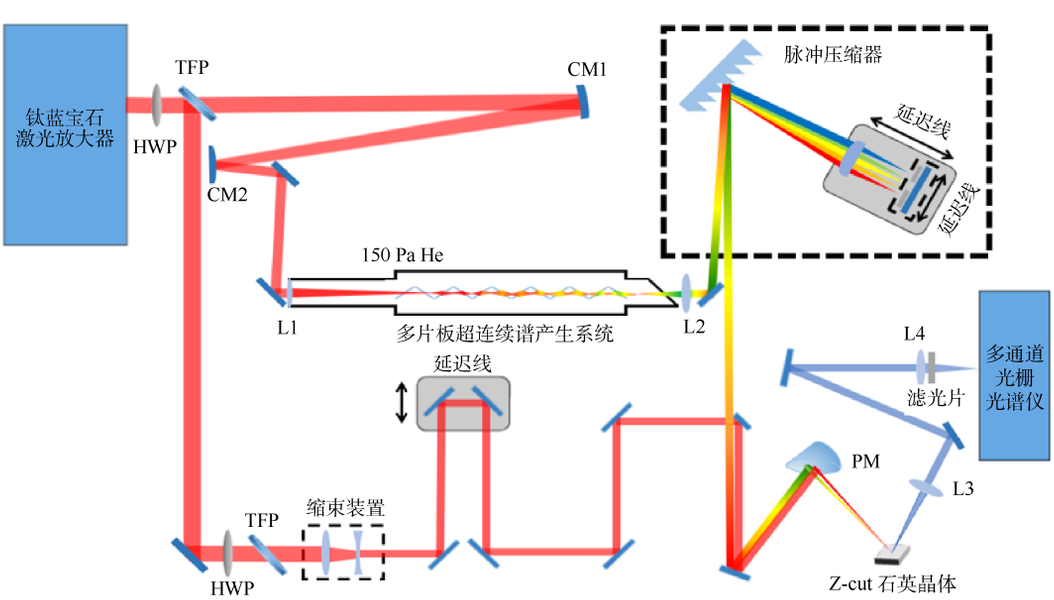
在本实验中,就介质材料而言有如下因素需要考虑:(1)虽然介质板材料的高非线性折射率系数

会增强自相位调制过程,但过大的非线性折射率系数引起的光束自聚焦效应会损伤材料本身,而且也容易击穿介质板后面的空气产生等离子体丝影响SC的稳定性。同时,如果聚焦能力太强,光束会迅速收缩和发散,导致光路下游的薄板不能有效利用。(2)应该考虑材料透射的能带隙与波长匹配。所选材料的能带隙应尽可能大使其不会限制光谱的展宽,并且根据实验的激光参数选择拥有合适波长匹配的材料。(3)材料的导热性能不可以被忽略,良好的导热性能能够降低热效应对SC产生的影响,从而提高SC的光谱稳定性。(4)选用的材料群速度色散系数应该尽可能小,减少脉冲传播过程中的啁啾效应对SC的影响。基于以上因素,本文选择熔融石英和蓝宝石作为实验材料。通过选择将熔融石英薄板和蓝宝石薄板混合使用,并且熔融石英薄板放置在光路前端,蓝宝石薄板放在光路末端,以减少单一材料自身弊端对SC产生过程中的影响。

在实验过程中,针对在空气中等离子体丝的产生和薄介质板表面容易被污染的问题,将介质板放置在低压氦气腔室中。低压、高电离能的实验气体条件不仅可以解决上述2个问题,而且相比于真空通入少量气体可以减少热效应的影响。

综合以上因素,本文设计了多片板SC产生系统,并在此基础上搭建了SC测量与表征系统,装置示意如图1所示。再生放大器(legend duo, coherent)产生激光脉冲,脉冲的中心波长为800 nm、重频为5 kHz、脉宽为40 fs,单脉冲能量可达到3 mJ。采用零级半波板和薄膜偏振分光片组合,将光束分成2部分,调整光束能量。利用凹面镜和凸面镜的组合缩小激光束的直径。将焦距为2 000 mm的透镜安装在充满低压氦气的铝制真空腔前,将光聚焦且焦点处束腰直径约为0.50 mm。真空室由3个部分组成,包括长1.70 m的前管、长0.90 m的长方体主容器和长0.10 m的后管。光束通过12块介质板后产生白光连续谱,连续谱的光谱由光纤耦合光谱仪(HR2000+CG-UV-NIR, Ocean Optics)采集。利用4f脉冲压缩器对SC脉冲进行脉宽压缩,同时通过调节4f脉冲压缩器的狭缝来选择SC频谱。另一束光用作互相关测量的探测光。通过在Z型切割石英上SC脉冲与另一束光相互作用,利用和频率相关的方法来确定脉冲宽度。

多片板系统的装置如图2所示。在多片板系统中,使用了12块10 mm×10 mm熔融二氧化硅和蓝宝石介质板,厚度分别为0.10、0.15和0.20 mm。多片板的顺序是3块0.10 mm熔融石英板,4块0.15 mm熔融石英板,1块0.10 mm蓝宝石板,2块0.20 mm蓝宝石板,2块0.10 mm蓝宝石板,相邻薄板之间距离分别为60、170、130、115、95、80、65、50、50、45和35 mm。每个板都安装在一个铝支架上,在介质板和支架之间放置铟箔垫片,以便更好地进行热扩散。所有的



注:TFP为薄膜偏光片;PM为离轴抛物面镜(f=76.20 mm);f为焦距;L1、L2、L3和L4为凸透镜(f=2 000.00、500.00、100.00和75.00 mm);HWP为半波板;缩束装置由凸透镜(f=150.00 mm)和凹透镜(f=−50.00 mm)组成;CM1为凹面镜(f=1 250.00 mm);CM2为凸面镜(f=−500.00 mm);脉冲压缩器由光栅、柱面透镜、可调谐狭缝和反射镜组成,后三者放在延时平移台上。

图1　超连续谱(SC)产生和表征的实验装置示意

介质板都放置在光束焦点附近,以熔融石英薄板的布鲁斯特角(55°)对称排列放置来减小表面的菲涅耳反射损失,同时对称排列可以抵消光束以非正入射角度通过介质板引起的光束位置偏移。介质板的摆放位置和板间间距是通过实验优化得到的结果,具体摆放情况如下:(1)在第一个焦点前放置2个薄板。一个距离焦点约250.00 mm,另一个放在新焦点之前,同时要注意避免多丝的产生和材料的光学损坏。在放置接下来的几个介质板之前,需要确定每个新焦点的位置。(2)这些介质板被放置在新焦点之后的一段距离,在不引起多丝产生和介质板光学损伤的前提下,尽可能地靠近新焦点激发最大的自相位调制效应。一方面是为了优化SC的光谱展宽达到最优效果;另一方面,是为了避免空气中多丝的产生和材料损坏。薄板的位置和厚度是根据焦点处光强和每个焦点的位置来确定,根据不同的实验条件优化得出最佳的实验结果。

为了有效抑制空气中等离子体丝的产生,并且减少介质板表面的污染,将所有介质薄板放置在填充约150 Pa的氦气封闭腔中。在封闭的腔室中通入150 Pa氦气,是通过多次实验得出的最适合系统运转的参数。一方面,从气体的分子种类分析,与空气相比,拥有更高电离能的惰性气体对于SC产生明显是更好的选择,其不但可以抑制空气中等离子的产生,而且外部通入气体可以将腔室内部分污染物吹出去提高输出脉冲的光谱稳定性;另一方面,腔室中气体分子数量越多,气体的导热性也就更好,更有利于实验条件。但是,压强越大,气体中的自聚焦效应会导致光束的收缩效果越明显,为了避免介质薄板的损伤和多丝的产生,介质板间的距离要适当扩大,这意味着要重新优化所有介质板的位置。并且,由于腔室的长度是有限的,改变气压也可能导致室内空间不足以容纳所有的介质板的情况出现。经过多次实验和分析,针对本次实验条件,150 Pa氦气的气体条件是最佳选择。

2　实验结果

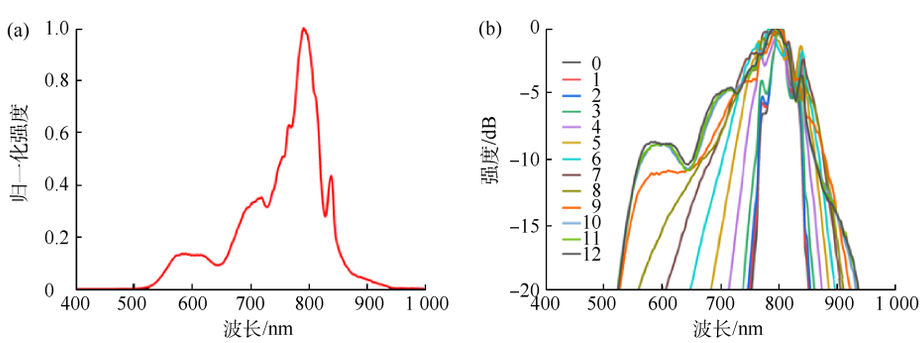
2.1　SC的测量和光谱表征

激光脉冲通过12个薄板产生的SC光谱如图3(a)所示。光谱范围为500~950 nm,输入和输出脉冲能量分别为0.50和0.44 mJ,透射效率为88%。由图3可知,本实验的多片板系统产生的白光连续谱相对于峰值强度波长在600 nm处的转换效率约为15%,在550 nm处的转换效率约为6%(注:所有光谱均已归一化到最大值)。

为了了解激光脉冲在介质薄板中的光谱演化过程,本文还测量了每块介质薄板后面的光谱,结果如图3(b)所示。入射脉冲通过前2块介质薄板后,光谱对称展宽,展宽效果并不明显(红色和蓝色曲线所示)。入射脉冲通过第3和4介质薄板后,频谱开始轻微地不对称展宽(绿色和紫色曲线所示),此时自相位调制效应仍然起主要作用。从第5板块开始,由于自陡峭效应的影响增强,入射脉冲的频谱开始变陡,光谱展宽更倾向于高频方向,光谱开始不对称展宽。直到在第9块介质薄板之后,由于激光器脉冲宽度的限制,入射脉冲的光谱不会随着介质板数量的增加进一步展宽。此时,入射的光谱只会受自陡峭效应的影响促使能量向高频方向转化。在12片薄板之后再放置更多的薄板,光谱不会进一步变化,主要原因是脉冲啁啾或强光



图2　多片板系统设置示意



注:图中每个板后的光谱图以对数图表示;0谱线对应输入脉冲的谱线;其他谱线是每片薄板之后的谱线。

图3　SC的光谱表征

(a)SC光谱;(b)每个介质板后的光谱

子吸收使输入峰值功率大幅度降低无法使脉冲进行新一轮的展宽。在本实验条件下,12个薄板是最合理的数量。最后,得到的SC光谱在线性图中光谱范围为500~950 nm,在对数图中光谱范围为520~940 nm,强度为-20 dB,覆盖大约一个八度。

2.2　SC的稳定性

在实际应用中,光谱的稳定性是评价SC性能的一个重要参数,本实验使用光纤耦合光谱仪记录光谱,在测量过程中每次测量的曝光时间为50 ms,并设置100帧的平均值作为每次的输出结果。SC的稳定性测试如图4所示,每5 min测量一次,共测量8 h。结果显示强度和光谱都非常稳定,光谱主要在蓝频一侧略有收窄。大概在8 h后,在-20 dB的强度下,SC的光谱范围从520~940 nm变为540~930 nm。实验结果表明,虽然随时间推移SC的光谱有轻微的收缩,但依旧可以证明本文搭建的多片板SC产生系统可以长期稳定地运行。

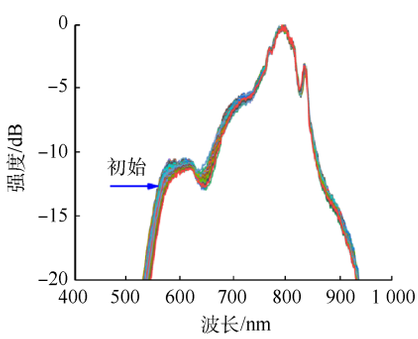


图4　SC的稳定性测试

2.3　SC的脉宽

本文利用4f脉冲压缩器实现了波长选择和脉宽压缩。4f脉冲压缩器(图1)由光栅、柱面透镜、可调谐狭缝和0°反射镜组成。除光栅外的所有部分都被放在平移台上。通过调整狭缝宽度来选择光谱范围,通过移动放置狭缝的线性平移台来调整中心波长。移动平移台可以优化脉冲啁啾的补偿,压缩脉冲宽度。当选择压缩的SC光与探测脉冲在Z形切割石英晶体表面发生时间和空间重叠时,产生和频信号。然后,利用互相关的方法测量连续谱的脉宽。本实验将SC的频谱分段进行测量,以减少脉冲压缩器中光栅引入的三阶色散,SC的脉冲宽度和分段频谱如图5所示。SC频谱被分为3段来测量SC的脉宽,分别是500~650、650~750和750~950 nm。最后利用4f脉冲压缩器将SC脉冲的脉宽进行压缩,其中图5(a~c)分别代表了500~650、650~750和750~950 nm波段的脉冲在脉宽压缩后的时域图,图5(d~f)分别代表了500~650、650~750和750~950 nm波段的脉冲频谱图。压缩后的SC时域图的线形是类高斯型的,利用高斯拟合的方式对数据进行拟合处理得到SC的脉宽。通过拟合得到SC脉冲在500~650、650~750和750~950 nm的脉冲宽度分别为61.72和91.00 fs。与利用啁啾镜将脉冲的脉宽压缩不同[20],本文利用光栅方式的压缩会面临受限于光栅的三阶色散的问题,压缩效果并不是非常完美,但是仍然可以将连续谱的脉宽压缩到100.00 fs以下。这说明利

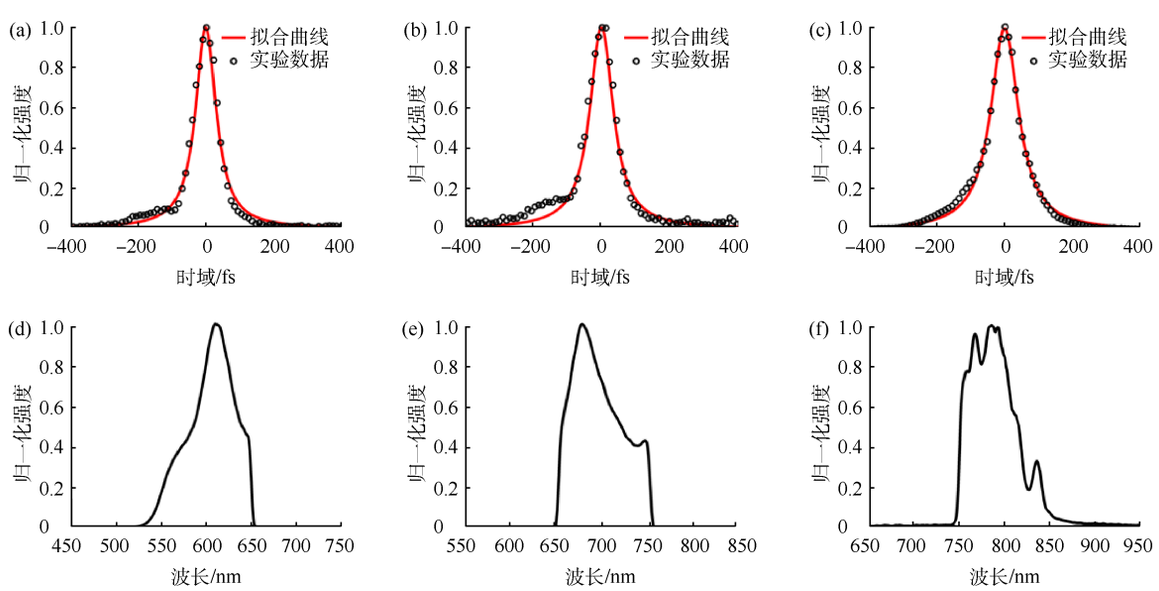


图5　SC的脉冲宽度和分段频谱

(a)500~650 nm脉宽;(b)650~750 nm脉宽;(c)750~950 nm脉宽;(d)500~650 nm分段频谱;(e)650~750 nm分段频谱;(f)750~950 nm分段频谱

用该技术可以产生窄脉宽的SC,从而使其在分子反应动力学和界面超快光学等领域具有潜在的应用价值。

3 结 论

本文展示了一种SC产生技术,利用多个固体薄板产生强度强、光谱宽和稳定的SC。通过将12块熔融二氧化硅和蓝宝石板放置在通有150 Pa氦气的低压腔室中,并且根据实际情况确定介质薄板的位置和材料,获得光谱覆盖范围500~950 nm的SC,频谱跨越大约一个八度。而且相对于峰值强度波长,脉冲的转化效率在600 nm处高达15%,在550 nm处高达6%。在SC的稳定性测试中,8 h内SC的光谱没有明显变化,多片板SC产生系统可以长时间稳定地运行。本文还利用光栅分段压缩并测量了SC的脉宽,结果显示即使受光栅三阶色散的限制,依旧可以将SC的脉宽压缩到100.00 fs以下,产生的SC具有脉宽窄的优点。研究表明,该方案产生的SC在超快科学、非线性光学和强场物理等方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] ALFANO R R. The supercontinuum laser source [M]. New York:Springer,1989.

[2] BRABEC T,KRAUSZ F. Intense few-cycle laser fields: frontiers of nonlinear optics [J]. Reviews of Modern Physics,2000,72(2):545-591.

[3] HAURI C P, KORNELIS W, HELBING F W, et al. Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation [J]. Applied Physics B,2004,79:673-677.

[4] WIRTH A, HASSAN M T, GRGURAŠ I, et al. Synthesized light transients [J]. Science, 2011, 334(6053):195-200.

[5] SHIMIZU F. Frequency broadening in liquids by a short light pulse [J]. Physical Review Letters,1967,19(19):1097-1100.

[6] FORK R L, SHANK C V, HIRLIMANN C, et al. Femtosecond white-light continuum pulses [J]. Optics Letters,1983,8(1):1-3.

[7] CORKUM P B, ROLLAND C, SRINIVASAN-RAO T. Supercontinuum generation in gases [J]. Physical Review Letters,1986,57(18):2268-2271.

[8] BRODEUR A, CHIN S L. Ultrafast white-light continuum generation and self-focusing in transparent condensed media [J]. Journal of the Optical Society of America B,1999,16(4):637-650.

[9] LU C H, TSOU Y J, CHEN H Y, et al. Generation of intense supercontinuum in condensed media [J]. Optica, 2014,1(6):400-405.

[10] GAETA A L. Catastrophic collapse of ultrashort pulses [J]. Physical Review Letters,2000,84(16):3582-3585.

[11] COUAIRON A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. Physics Reports, 2007,441(2/3/4):47-189.

[12] BRODEUR A, CHIN S. Band-gap dependence of the ultrafast white-light continuum [J]. Physical Review Letters,1998,80(20):4406-4409.

[13] CHIN S L. Femtosecond laser filamentation [M]. New York:Springer,2010.

[14] LIU W,PETIT S,BECKER A,et al. Intensity clamping of a femtosecond laser pulse in condensed matter [J]. Optics Communications,2002,202(1/2/3):189-197.

[15] SUDRIE L, COUAIRON A, FRANCO M, et al. Femtosecond laser-induced damage and filamentary propagation in fused silica [J]. Physical Review Letters, 2002,89(18):186601.

[16] LENZNER M, KRÜGER J, SARTANIA S, et al. Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. Physical Review Letters,1998,80(18):4076-4079.

[17] NGUYEN N, SALIMINIA A, LIU W, et al. Optical breakdown versus filamentation in fused silica by use of femtosecond infrared laser pulses [J]. Optics Letters, 2003,28(17):1591-1593.

[18] COUAIRON A, SUDRIE L, FRANCO M, et al. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. Physical Review B,2005,71(12):125435.

[19] KRETSCHMAR M, BREE C, NAGY T, et al. Direct observation of pulse dynamics and self-compression along a femtosecond filament [J]. Optics Express,2014, 22(19):22905-22916.

[20] HE P, LIU Y, ZHAO K, et al. High-efficiency supercontinuum generation in solid thin plates at 0.1 TW level [J]. Optics Letters,2017,42(3):474-477.

[21] BERGE L, SKUPIN S, STEINMEYER G. Temporal self-restoration of compressed optical filaments [J]. Physical Review Letters,2008,101(21):213901.

[22] VLASOV S N, KOPOSOVA E V, YASHIN V E. Spectral broadening and compression of high-intensity laser pulses in quasi-periodic systems with Kerr nonlinearity [J]. Quantum Electronics, 2012, 42(11): 989-995.

(责任编辑:兰丽丽)