

文章编号: 0258-7025(2009)11-2812-05

# 基于光子晶体光纤飞秒激光技术的高功率 紫外激光源

刘华刚 胡明列\* 刘博文 宋有建 柴 路 王清月

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

**摘要** 实验研究了一种基于大模场面积光子晶体光纤飞秒激光技术的紫外飞秒激光源。分析了群速失配下的倍频光和基频光的走离长度,并实验比较了不同长度的 BBO 晶体的倍频功率和效率。分别采用 5 mm 和 0.18 mm 的两块 BBO 晶体,在 I 类相位匹配条件下,对光子晶体光纤放大器输出的脉宽为 110 fs,重复频率 50 MHz 的 1040 nm 飞秒激光进行腔外二倍频(SHG)和四倍频(FHG),获得了高功率紫外飞秒激光。在 20 W 的平均功率抽取下,获得了 8.88 W 的二倍频绿光输出,转换效率为 44.4%。同时获得了 656 mW 的四倍频 260 nm 紫外激光,单脉冲能量 13 nJ,最高功率时二次谐波(SH)到四次谐波(FH)的转换效率为 7.39%。

**关键词** 超快光学;倍频;紫外飞秒激光;光子晶体光纤激光器

中图分类号 TN248.3+5; O437.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093611.2812

## High Power Ultraviolet Laser Source Based on Photonic Crystal Fiber Femtosecond Laser System

Liu Huagang Hu Minglie Liu Bowen Song Youjian  
Chai Lu Wang Qingyue

(Key Laboratory of Optoelectronic Information and Technical Science, Ministry of Education,  
Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A novel ultraviolet (UV) femtosecond laser source is experimentally studied based on the large-mode-area photonic crystal fiber femtosecond laser system. Walk-off effecting due to the group velocities mismatch between the fundamental wave and the second harmonic is analyzed theoretically. The average power and the conversion efficiency of second harmonic generation with different crystal length are compared experimentally. Second harmonic generation (SHG) and fourth harmonic generation (FHG) of 1040 nm fundamental wave are demonstrated, and high power UV femtosecond laser is obtained out of cavity at the repetition rate of 50 MHz by using two pieces of Type-I BBO crystal, length of which is 5 mm and 0.18 mm respectively. The fundamental wave is generated from the photonic crystal fiber amplifier with pulses duration of 110 fs. At the average power of 20 W, 8.88 W frequency doubled green laser wave is obtained with the conversion efficiency up to 44.4%, and 656 mW FHG UV laser is also achieved with a single pulse energy of 13 nJ. The conversion efficiency from the second harmonic (SH) to the fourth

收稿日期: 2009-01-14; 收到修改稿日期: 2009-03-30

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327604, 2006CB806002)、国家 863 计划(2007AA03Z147)、国家自然科学基金(60678012, 60838004)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073)、教育部科学技术研究重点项目(108032)和教育部分新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 刘华刚(1981—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲激光和非线性光学频率变换技术等方面的研究。

E-mail: liuhg2007@gmail.com

导师简介: 王清月(1938—),男,教授,博士生导师,主要从事光子晶体光纤及超短脉冲激光技术等方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

harmonic (FH) is up to 7.39% at the maximum power.

**Key words** ultrafast optics; second harmonic generation; ultraviolet femtosecond laser; photonic crystal fiber laser

## 1 引言

波长小于 400 nm 的紫外脉冲激光由于具有单光子能量高、脉宽窄等优点,在光数据存储、激光微纳加工、光化学、光生物学、强场物理以及超快过程探测等科学技术领域都有巨大的应用潜力。目前获得紫外脉冲激光最有效的方法是对可见光和近红外光进行多级非线性频率变换,其中激光二极管(LD)直接抽运的全固态激光器是最常用的基频光源<sup>[1~7]</sup>。随着全固态激光技术以及新型深紫外非线性晶体的发展和应用,非线性频率变换方法已突破 200 nm 波长的限制<sup>[8~10]</sup>,获得最短的深紫外波长达 156 nm<sup>[11]</sup>。全固态紫外脉冲激光器输出平均功率最高可达 20 W 以上<sup>[5, 6]</sup>,但脉冲宽度为纳秒量级,重复频率为千赫兹量级。飞秒量级的紫外脉冲通常是采用钛宝石锁模激光器或放大器进行倍频或和频转换<sup>[12~15]</sup>,结合光参量放大技术还可以在紫外波段连续调谐,脉冲宽度可达 10 fs 以下<sup>[16]</sup>。钛宝石放大系统作为基频光获得的紫外脉冲虽然脉宽很窄,但重复频率较低,因此平均功率不高。

最近,我们研制成功大模场面积光子晶体光纤飞秒激光系统<sup>[17, 18]</sup>,这套系统由振荡级和放大级两部分组成,均采用掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积偏振光子晶体光纤作为增益介质,由 LD 直接抽运,效率高,结构紧凑,价格低廉。光子晶体光纤的无截止单模特性可以提供高出普通光纤两个数量级的模场面积,有效地降低了非线性效应,从而使光纤放大器能支持更高的功率。且光纤激光器将激光限制在光纤波导中传输,光束质量好,具有很好的环境稳定性。光子晶体光纤飞秒激光系统所具有的良好性能为获得高功率、高重复频率飞秒紫外脉冲激光提供了一种新的途径。本文从理论上分析了群速失配下的倍频光和基频光的走离长度,得出二倍频(SHG)和四倍频(FHG)过程中 BBO 晶体的理论长度,并实验比较了不同长度的 BBO 晶体的倍频功率和效率。基于大模场面积光子晶体光纤飞秒激光系统,采用 5 mm 和 0.18 mm 的两块 BBO 晶体分别进行腔外二倍频和四倍频,在 20 W 平均功率的飞秒激光抽运下,获得了 656 mW 的高功率四倍频紫外飞秒激光脉冲。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中光子晶体光纤飞秒

激光系统为基频光源,由振荡级和放大级组成。作为种子源的振荡级以孤子锁模方式运转<sup>[17, 18]</sup>,输出平均功率 300 mW,重复频率 50 MHz,脉冲宽度约为 550 fs。经放大级放大后,由于自相位调制效应,脉冲频谱被展宽,可支持的脉冲宽度变窄,用光栅对压缩后为 110 fs,平均功率为 20 W<sup>[18]</sup>,峰值功率可达 3.6 MW。基频光中心波长在 1040 nm 处,光谱带宽为 40 nm。L<sub>1</sub> 是焦距为 150 mm 的聚焦透镜,将基频光  $\omega_0$  聚焦到非线性晶体上,实验中采用有效非线性系数(约为 2.02 pm/V)和损伤阈值都较高的 BBO 晶体作为二倍频转换晶体(BBO-1)。为比较晶体长度的影响,BBO-1 晶体使用了 1 mm 和 5 mm 两种长度,采用 I 类相位匹配,切割角均为 23.2°。二倍频后的光束经 L<sub>2</sub> 准直后,由 M<sub>1</sub> 分离基频光  $\omega_0$  和倍频光  $2\omega_0$ ,倍频光高反后再经焦距为 100 mm 的凸透镜 L<sub>3</sub> 聚焦到 BBO-2 晶体上作四倍频转换,四倍频仍然采用 I 类相位匹配方式,晶体长度为 0.18 mm,切割角为 49.2°。最后由石英棱镜将二倍频激光和紫外激光分开。图 2 是平均功率为 20 W 时基频光的光谱和脉冲自相关曲线。

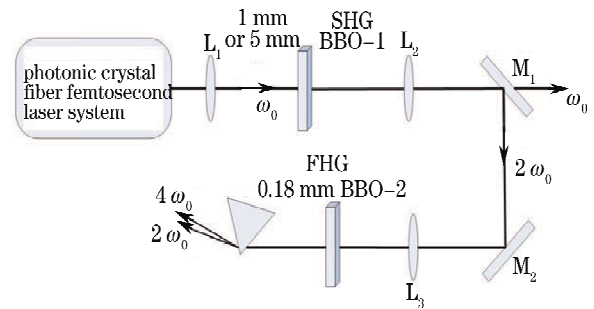


图 1 260 nm 紫外激光产生实验装置

Fig. 1 Experiment setup of the UV laser generation

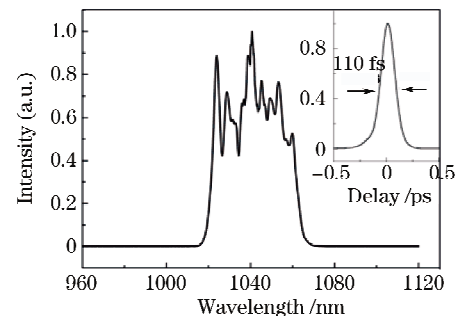


图 2 基频光光谱(插图为压缩后脉冲自相关曲线)

Fig. 2 Spectrum of the fundamental wave (inset: the autocorrelation trace of compressed pulses)

### 3 实验结果与分析

在超短脉冲光学中,脉冲包络在介质中以群速度( $v_g$ )传播,群速度定义为

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}, \quad (1)$$

式中  $\omega$  为角频率,  $k$  为波数。不同中心波长的脉冲在介质中传播时由于具有不同的群速度会导致脉冲之间的群速失配,当两个脉冲在时间和空间上没有交叠时,它们之间的非线性相互作用将会停止。对于本实验中使用脉宽为 110 fs 的飞秒脉冲作为基频光源,就必须考虑群速失配的影响。定义走离长度  $L_w$  为

$$L_w = \frac{T_0}{|v_g^{-1}(\omega_1) - v_g^{-1}(\omega_2)|}, \quad (2)$$

式中  $T_0$  为基频光脉宽。走离长度  $L_w$  表示脉冲之间完全走离时脉冲在介质中所传播的距离,它限制了脉冲在介质内的相互作用长度,从理论上来说,倍频时选取的非线性晶体长度应该小于走离长度。图 3 描绘了在 BBO 晶体中, I 类相位匹配时基频光(曲线 a)和相应倍频光(曲线 b)的群速度随波长的变化曲线,以及在晶体中的走离长度(曲线 c)。由图 3 可知基频光的群速度大于倍频光,即基频光比倍频光传播得快,由此在  $T_0$  取 110 fs 时,中心波长为 1040 nm 和 520 nm 的激光进行倍频时, BBO 晶体的理论长度分别为 1.2 mm 和 0.18 mm。

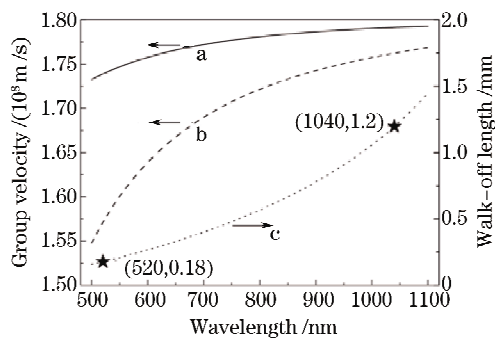


图 3 基频光、倍频光群速度及走离长度随波长的变化曲线

Fig. 3 Group velocities and the walk-off length as a function of the wavelength of the fundamental wave and the second harmonic

根据走离长度计算的理论长度,未必是晶体的最合适长度,在首先进行的二倍频实验中,比较了两块长度分别为 1 mm 和 5 mm 的 BBO 晶体倍频时的功率和效率,其中 1 mm 的接近于理论上的走离长度。由于二倍频的转换效率同光强的平方成正比,透镜  $L_1$  的焦距越小,聚焦到 BBO-1 晶体上的基

波光斑面积越小,可以获得更大的光强和倍频转换效率。但由于 BBO 晶体在相位匹配角方向上的接收角很小(约为  $0.33 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$ ),  $L_1$  焦距太小会造成光束发散角过大而使基频光不能被充分利用,同时还会降低光束质量。经系统实验后,选定  $L_1$  的焦距为 150 mm,可以兼顾二次谐波转换效率以及光束质量。图 4 是实验测量的不同长度晶体下二倍频功率随基频光功率的变化曲线,在 20 W 的基频功率条件下,1 mm 的晶体最高获得 6.5 W 的倍频光,转换效率为 32.5%,而采用 5 mm 的晶体获得 8.88 W 的倍频光,转换效率达 44.4%。显然仅从转换效率角度考虑,采用较长的非线性晶体可以获得更高的功率和转换效率,另一方面,倍频晶体也不能过长,晶体太长将使脉冲宽度展宽,同时限制倍频的参量带宽。图 4 还给出了采用 5 mm 晶体时二次谐波(SH)转换效率,由转换效率随基频光功率变化的趋势可知,基频光从 6 W 到 20 W,转换效率曲线接近于水平,维持在 44%左右,转换效率已达到饱和,这也使得二次谐波功率随基频功率接近直线增长。图 5 为最大功率时二次谐波的光谱曲线,中心波长在 520 nm 处,谱宽为 12 nm,相对于 40 nm 宽的基波光谱(图 2),光谱成分没有被充分利用,这是由于为了获得较高的转换效率,采用了较长的 BBO 晶体,降低了相位匹配的参量带宽。

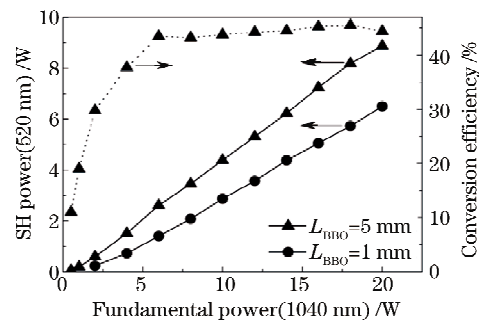


图 4 不同长度的 BBO 晶体的二倍频功率比较及长度为 5 mm 时的转换效率 ( $L_{\text{BBO}}$  为晶体长度)

Fig. 4 Comparison of the second harmonic power at different BBO crystal lengths, and the conversion efficiency at  $L_{\text{BBO}} = 5 \text{ mm}$  ( $L_{\text{BBO}}$  is the crystal length of BBO)

使用焦距为 100 mm 的透镜  $L_3$  将二次谐波聚焦到 0.18 mm 的 BBO-2 晶体上,进行四次谐波(FH)转换,可以获得 260 nm 的紫外脉冲激光。图 6 为紫外激光的功率和效率随二次谐波功率的变化曲线以及在最大功率时的四次谐波光谱。光谱曲线显示,四次谐波中心波长在 260 nm 处,带宽为

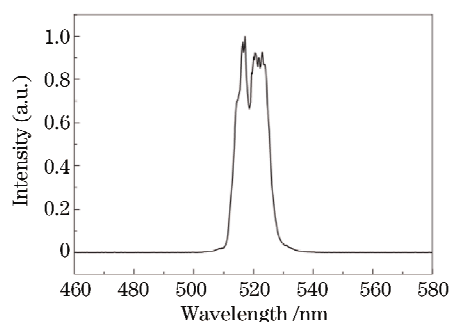


图5 最大功率时的二次谐波光谱

Fig. 5 Spectrum of the second harmonic at the highest power

3.7 nm。当二次谐波功率为 8.88 W 时(对应基频光功率 20 W), 获得最大的紫外平均功率为 656 mW, 单脉冲能量 13 nJ, 此时二次谐波到四次谐波的转换效率为 7.39%。转换效率曲线显示, 四次谐波效率已经达到饱和。由于实验中四次谐波使用的 BBO 晶体较短(0.18 mm), 为提高功率密度采用了较短焦距的透镜进行聚焦, 使转换效率达到了饱和。为获得更高的转换效率, 四倍频的晶体长度及透镜焦距等系统参数需要进一步优化, 同时需要减少表面反射等各种损耗, 以获得更高的紫外激光功率。

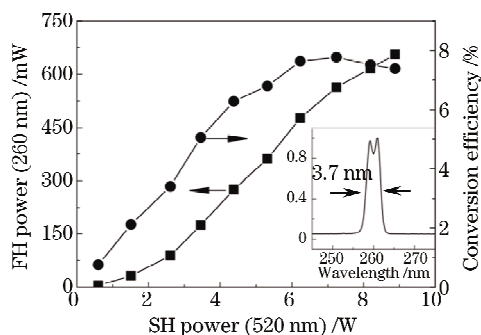


图6 四次谐波功率和转换效率随二次谐波功率的变化曲线(插图为最大功率时的四次谐波光谱)

Fig. 6 Output power and conversion efficiency of the FH as a function of the SH power (inset: spectrum of the FH at the highest power)

## 4 结 论

基于自制的大模场面积光子晶体光纤飞秒激光系统, 使用两块 BBO 晶体, 进行了飞秒激光脉冲的二次谐波和四次谐波实验。由于光子晶体光纤具有很大的面积-体积比, 散热性能好, 相对于复杂昂贵的 Ti:Sapphire 飞秒激光放大器系统, 大模场面积光子晶体飞秒放大器无需冷却系统, 预热时间短, 结

构紧凑, 操作和维护都很方便, 使其成为非线性频率变换的优良飞秒激光光源。实验结果也表明, 采用这种新型的飞秒激光系统, 可以获得宽光谱、高重复频率、高功率的紫外超短脉冲。在 20 W 的基频光平均功率下, 获得了重复频率 50 MHz, 平均功率为 8.88 W 的二倍频绿光输出, 转换效率达 44.4%。同时获得了中心波长为 260 nm, 平均功率为 656 mW 的四次谐波紫外脉冲激光, 最高功率时二次谐波到四次谐波的单次通过转换效率为 7.39%。这种高功率、高重复频率的飞秒紫外激光在高精度微纳加工、生物检测、紫外光谱技术以及化学反应动力学等领域都有着巨大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- 1 A. Dubietis, G. Tamošauskas, A. Varanavičius *et al.*. Generation of femtosecond radiation at 211 nm by femtosecond pulse upconversion in the field of a picosecond pulse [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1116~1118
- 2 He Jingliang, Lu Xingqiang, Jia Yulei *et al.*. All solid state Nd:YVO<sub>4</sub> UV laser at 266 nm by fourth harmonic using a BBO crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(10): 2106~2108  
何京良, 卢兴强, 贾玉磊等. BBO 四倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 紫外激光器 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(10): 2106~2108
- 3 Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 29~32  
石朝辉, 樊仲维, 张 瑛等. 高效率高功率全固态紫外激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
- 4 Su Yanli, He Jingliang, Jiang Qichang *et al.*. Efficient 213 nm radiation fifth harmonic generation of a laser diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1590~1592  
苏艳丽, 何京良, 姜其畅等. 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体五倍频 213 nm 深紫外激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1590~1592
- 5 T. Kojima, S. Konno, S. Fujikawa *et al.*. 20-W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 58~60
- 6 Guiling Wang, Aicong Geng, Yong Bo *et al.*. 28.4 W 266 nm ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 820~822
- 7 Xiaomeng Liu, Daijun Li, Peng Shi *et al.*. Highly efficient third-harmonic generation with electro-optically Q-switched diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(1): 192~196
- 8 Zhou Yong, Wang Guiling, Li Chengming *et al.*. Sixth harmonic of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser generation in KBBF for ARPES [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(3): 963~965
- 9 H. Zhang, G. Wang, L. Guo *et al.*. 175 to 210 nm widely tunable deep-ultraviolet light generation based on KBBF crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **93**(2-3): 323~326
- 10 C. T. Chen, T. Kanai, X. Y. Wang *et al.*. High-average-power light source below 200 nm from a KBe<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>F<sub>2</sub> prism-coupled device [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(3): 282~284
- 11 T. Kanai, T. Kanda, T. Sekikawa *et al.*. Generation of vacuum-ultraviolet light below 160 nm in a KBBF crystal by the fifth harmonic of a single-mode Ti:sapphire laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(2): 370~375

- 12 J. Ringling, O. Kittelmann, F. Noack *et al.*. Tunable femtosecond pulses in the near vacuum ultraviolet generated by frequency conversion of amplified Ti: sapphire laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(23): 2035~2037
- 13 Jiangfeng Zhu, Weijun Ling, Zhaohua Wang *et al.*. High-energy picosecond near-vacuum ultraviolet pulses generated by sum-frequency mixing of an amplified Ti: sapphire laser [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(25): 6228~6231
- 14 Zhao Shanghong, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. All-solid-state multi-wavelength laser system from 208 to 830 nm [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(4): 537~538
- 15 Liu Yunquan, Zhang Jie, Liang Wenxi *et al.*. Theoretical and experimental studies on third harmonic generation of femtosecond Ti: sapphire laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(4): 1593~1598  
刘运全, 张 杰, 梁文锡 等. 飞秒掺钛蓝宝石激光三倍频理论和实验研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(4): 1593~1598
- 16 P. Baum, S. Lochbrunner, E. Riedle. Tunable sub-10 fs ultraviolet pulses generated by achromatic frequency doubling [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 1686~1688
- 17 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814  
刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814
- 18 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6921~6925  
刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 亚百飞秒高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(11): 6921~6925