

文章编号: 0258-7025(2004)07-0769-04

高效全固化钛宝石腔内倍频蓝光和四倍频 紫外激光器的研究

程光华, 王屹山, 于连君, 程 昭, 赵 卫, 陈国夫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068)

摘要 用半导体抽运的 Q 开关 YLF 倍频激光器抽运钛宝石晶体, 在平凹腔内加入组合的石英双折射滤光片压缩线宽, 用 LBO 晶体腔内激发二次谐波, 聚焦到 BBO 上产生四次谐波深紫外光。在抽运功率 3.8 W 时, 输出 610 mW, 416 nm 蓝光。用长焦距的透镜聚焦二次谐波, 得到 64 mW, 208 nm 的紫外激光。基频光的谱线宽度是决定倍频效率的关键因素。实验观察到激光器的频谱宽度与双折射滤光片的带宽有一个数量级的差别, 考虑到模式竞争和增益饱和效应, 数值模拟了加入双折射滤光片后的钛宝石激光器的实际线宽, 结果与实验中测量的数据基本一致。实验还分析了基频光的线宽对二次谐波效率的影响、二次谐波的线宽对四次谐波效率的影响、基频光的波长对四次谐波激发效率的影响。

关键词 激光技术; 钛宝石; 腔内倍频; 四次谐波; 双折射滤光片; 线宽

中图分类号 NT 248.1 文献标识码 A

High Efficient Second Harmonic at 416 nm and Fourth Harmonic Generation at 208 nm in Compacted All-Solid-State Ti:Sapphire Laser

CHENG Guang-hua, WANG Yi-shang, YU Lian-jun,
CHENG Zhao, ZHAO Wei, CHEN Guo-fu

(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract Second harmonic and fourth harmonic are generated from Ti:sapphire laser pumped by a diode-Q-switched, doubling-frequency YLiF₄ (YLF) laser at 527 nm. The nonlinear crystal LiB₃O₅ (LBO) is used to generate the second harmonic wave in the Ti:sapphire cavity at I-phase match with birefringent filter, and β -BaB₂O₄ (BBO) crystal is used to generate ultraviolet at 208 nm. Maximum average power of 610 mW at 416 nm, and 64 mW at 208 nm are obtained at 1 kHz repetition rate when the pumping power is 3.8 W. The high conversion efficiency is attributed to the birefringent filter which narrows the linewidth of Ti:sapphire laser. Considering mode-competition and gain saturation, the dependence of line width of Ti:sapphire laser with birefringent filter (BF) on pumping power is investigated in theory and experiment, and there is good agreement between theoretical and experimental results.

Key words laser technique; Ti:sapphire; intracavity doubling; fourth harmonic generation; birefringent filter; linewidth

1 引 言

掺钛蓝宝石激光器具有调谐范围宽、输出功率

高、转换效率高、运转方式多等优点, 是发展最迅速、最成熟、使用最广泛的一种固体可调谐激光器^[1~6]。它的倍频蓝光是海下通信和探测的最佳海水“窗

收稿日期: 2003-03-03; 收到修改稿日期: 2003-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60078004)资助项目。

作者简介: 程光华(1976—), 男, 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室博士研究生, 主要从事超短激光技术及其应用研究。E-mail: guanghuacheng@163.com

口”，而其四次谐波紫外光在诸如生物学、光化学、激光医学等领域有很广泛的应用。尤其是波长在 200 nm 附近的毫瓦级纳秒激光作用在人体组织上，可以有效地避免等离子体云的形成，是进行医疗手术理想的激光光源^[7]。产生这种光源的方法比较多，如和频、反 Stokes 相移、利用超短激光脉冲产生超连续谱等，但这些方法还不能临床应用^[8~11]。而利用光学性质和物理性能优异的钛宝石和各种倍频晶体组成的波长各异的全固体脉冲激光系统，以其波长可变、结构紧凑、性能稳定等优点将会得到越来越多的应用。本文报道了一个结构紧凑(40 cm×20 cm×20 cm)、性能稳定、双波长全固化激光系统，在 3.8 W 抽运功率时，输出 1 kHz 纳秒蓝光 610 mW 和深紫外光 64 mW，能够用于角膜切除术(PRK)的激光器，其性能具备了实用化的要求。

2 实 验

半导体激光抽运的 Q-YLF 倍频激光 (Photonics Industries DS-20 美国)经焦距 160 mm 的透镜聚焦后抽运钛宝石，钛宝石激光腔采用凹-平镜组成的稳定腔，如图 1 所示。其中 Q-YLF 可输出重复频率 1 kHz，波长 527 nm 的激光脉冲，平均功率最大为 4 W。 M_1 是曲率半径为 500 mm 凹面镜，镀有 527 nm 增透膜和 830 nm 全反膜。钛宝石长度为 20 mm，两端均为布儒斯特角切割。双折射滤光片(BF)是由两片单晶石英组成，厚度分别为 4.768 mm 和 9.536 mm，透过率曲线的半高全宽为 4.1 nm。 M_3 是楔形镜，其目的是避免腔镜的外表面反射形成子腔，即所谓的标准具效应，对 830 nm 光 99.16% 反射，对 415 nm 蓝光 95% 透射，与 M_1 构成

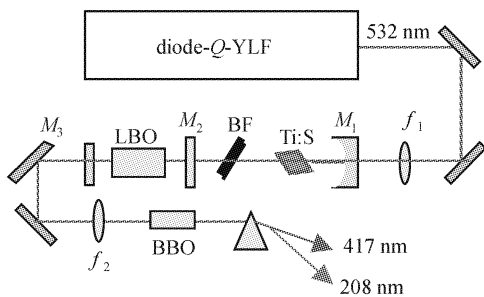


图 1 全固态双波长激光系统结构示意图
 M_2 : 二次谐波反射镜

Fig. 1 Schematic of the all-solid-state ultraviolet laser system

BF: two-plate birefringent mode-selector;
 M_2 : second harmonic (SH) reflective mirror

谐振腔。钛宝石激光器输出波长为 832 nm 的红外光，线宽约 0.8 nm，脉宽约 30 ns。在腔内插入非线性晶体 LBO 产生二次谐波， M_2 对 830 nm 全透，对 415 nm 全反。倍频晶体 LBO 长度为 8 mm，整体固定在水平旋转台上。用非线性晶体 BBO 进一步作四倍频，可产生波长为 208 nm 的紫外光。BBO 晶体长度为 10 mm，为防止 BBO 晶体潮解，晶体的安装作了密封防潮保护。钛宝石腔长为 27 cm。

由于自由振荡的钛宝石激光器线宽大约为 26 nm，而非线性晶体 LBO 的允许线宽大约 4 nm，BBO 的允许线宽约 0.3 nm^[12]，因此，倍频效率非常低，3.6 W 抽运时，输出蓝光不到 100 mW，紫外光不到 1 mW。为了提高倍频效率必须对线宽进行压缩即模式选择。由于双折射滤光片抗损伤阈值高、插入损耗小、操作方便，选用了由单晶石英组成的组合片来压缩钛宝石激光器的振荡线宽^[13]。两片 BF 的厚度分别为 4.768 mm 和 9.536 mm，相对于 50 级和 100 级零级双折射滤光片的厚度，理论半高全宽为 4.1 nm。钛宝石激光器自由运行时的光谱宽度为 24 nm，加入双片双折射滤光片后钛宝石基频光的光谱为 0.8 nm，如图 2 所示。图 3 是二次谐波和四次谐波输出功率与抽运功率的关系曲线，与前面的实验结果相比有 50% 的提高。

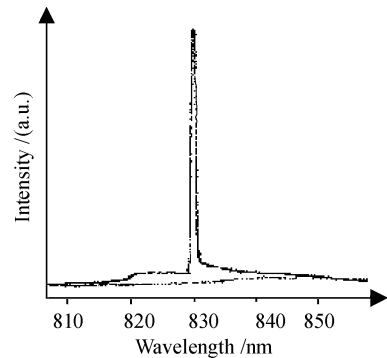


图 2 插入双折射滤光片的钛宝石激光二次谐波光谱

Fig. 2 Spectrum of second harmonic wave of Ti:sapphire laser with multi-plate BF

3 结果和讨论

图 4 是不同厚度的双折射滤光片的钛宝石激光器线宽和相应的倍频效率。基频光的线宽对二次谐波激发效率有很大影响，830 nm 的基频光线宽依次为 26 nm, 6.2 nm(对于 0.477 mm 厚的双折射滤光片), 1.72 nm(对于 4.768 mm 厚的双折射滤光片), 0.84 nm(对于 9.536 mm 厚的双折射滤光片)时，倍

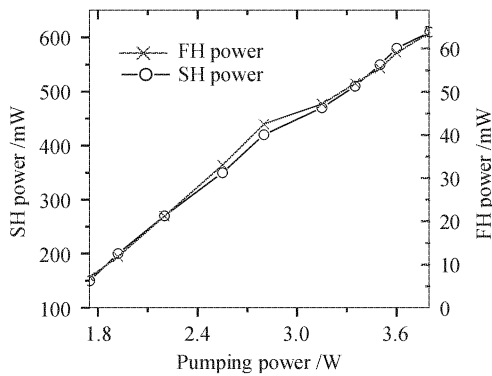


图3 钛宝石激光二次谐波和四次谐波输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 3 Second harmonic (SH) and fourth harmonic (FH) power versus incident pumping power

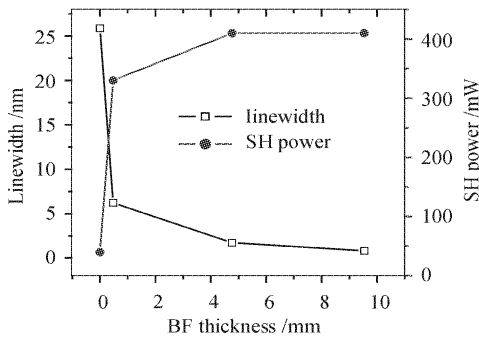


图4 二次谐波输出功率与双折射滤光片的厚度和基频光线宽的关系曲线

Fig. 4 Dependence of the Second harmonic (SH) power Ti:sapphire laser on its fundamental linewidth and the thickness of BF in cavity

频光的输出功率分别为60 mW, 330 mW, 410 mW, 410 mW(LBO的允许线宽是4 nm)。但基频光的线宽比允许线宽小很多时,倍频的效率由于饱和因素而不再增加。对于允许线宽较窄的非线性晶体来说,基频光的线宽对倍频效率的影响更为严重,416

nm的蓝光线宽依次为3 nm, 1.1 nm, 0.8 nm和0.7 nm时,倍频后的紫外激光输出功率分别为1 mW, 8 mW, 18 mW和34 mW。

3.1 激光器的实际线宽

0.477 mm, 4.768 mm, 9.536 mm厚的双折射滤光片的透过率曲线理论线宽分别为82 nm, 8.2 nm, 和4.1 nm,但激光器输出的线宽远小于理论计算的线宽,这是由于均匀增宽和饱和吸收效应引起的,激光只有在接近100%的透过率附近的波段才能产生振荡,模式竞争效应使振荡谱线更窄^[14]。下面定量地分析双折射滤光片在激光腔内的实际线宽。

从双折射滤光片的原理可知,透过率曲线是与滤光片所改变的相位差紧密相关的,而相位差与双折射滤光片的厚度是一致的。理论计算的双折射滤光片的半高全宽是激光通过它一次后的谱线宽度。激光在输出之前在腔内要振荡很多次,激光每通过一次滤光片,线宽就被压缩一次。可见,实际的谱线宽度是与激光通过双折射滤光片的次数密切相关的,即与激光在腔内的振荡次数相关。而激光在腔内的振荡次数与输出镜的透过率、脉冲宽度及腔长是相联系的,通过这些参数准确地计算出实际的频谱宽度。在激光谐振腔中,双折射滤光片的透过率 $T = T_0^n(d, \lambda, \gamma)$, n 为单脉冲在谐振腔内振荡的次数,对连续运转的激光器来说, n 为激光输出前在腔内振荡的次数。

实验中用99.16%的全反镜,腔长275 mm,脉宽30 ns,光传输距离为9 m,由此可计算出振荡次数为33次。实际透过率曲线为 $T = T_0^{33}(d, \lambda, \gamma)$ 。由于组合双折射滤光片的透过滤曲线半高全宽由最厚片确定,而自由光谱范围由最薄片确定,对厚度为9.536 mm的双折射滤光片,理论线宽4.06 nm,通过上式计算的半高全宽是0.83 nm,实测为0.85

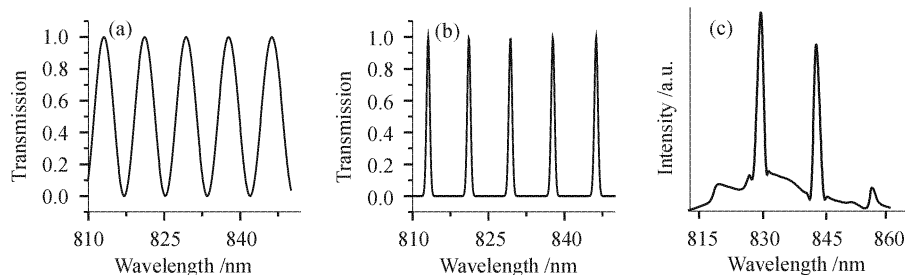


图5 厚度为9.536 mm和4.768 mm的组合双折射滤光片的透过率曲线

(a) 单次通过双折射滤光片;(b) 33次通过双折射滤光片;(c) 钛宝石激光光谱

Fig. 5 Transmission curves of 9.536 mm and 4.768 mm thickness BF

(a) single pass transmission; (b) 33 pass transmission; (c) Ti:sapphire laser spectrum

nm(如图 5 所示)。由此可见理论和实验结果是相一致的(这与厚度增加 33 倍完全不同)。最薄片的厚度为 4.768 mm,自由光谱范围为 16 nm。如图 5(c)所示,除了 830 nm 一个峰外,在 845 nm 处还有另外一个峰,我们在腔镜上镀膜,使它在 845 nm 处的反射率小于 10%,抑制了边峰,最后只有一个峰,如图 2 所示。

3.2 紫外激光的转换效率

实验中通过旋转双折射滤光片来改变基频光波长,当基频光的波长在 820 nm 到 840 nm 变化时,二次谐波的功率几乎不变;但四次谐波的功率变化非常大,基频光每增加 2 nm,四倍频的效率将增加 0.5%。这是由于 BBO 在 210 nm 附近的有效非线性系数随波长的变短而迅速下降的缘故。因此,用 BBO 倍频晶体要得到波长更短的深紫外激光的转换效率是比较低的。

4 结 论

用高光束质量的基模激光来抽运钛宝石晶体,同时,在腔内加入组合双折射滤光片来压缩线宽,获得了比较高的倍频效率。不考虑损耗,用 LBO 晶体倍频获得了 16% 的光-光转换效率,将二次谐波聚焦到 BBO 晶体上产生四次谐波,在深紫外光获得了 10.5% 的效率。整个系统结构紧凑,易维护,性能稳定,具备实用化的要求。

参 考 文 献

- 1 T. T. Kajava, A. L. Gaeta. Intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched with GaAs [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**:93~97
- 2 William H. Arnold, Peter Hagelstein, Minoru Obara *et al.*. Introduction to the issue on short wavelength lasers and applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(3):765~768
- 3 Eric C. Honea, Christopher A. Ebberts, Raymond J. Beach *et al.*. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched NdYAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15):1203~1205
- 4 T. Togashi, N. Nabekawa, T. Sekikawa *et al.*. Generation of milliwatt narrow-bandwidth vacuum ultraviolet radiation by an all-solid-state tunable high-average-power laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(11):831~833
- 5 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12):875~877
- 6 Zhou Shuyu, Zhou Shanyu, Wang Yuzhu. Computer sampling error signal control output voltage to stabilize frequency of the Ti:sapphire laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):9~11
周蜀渝,周善钰,王育竹. 计算机采样-输出实现钛宝石激光器稳频[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):9~11
- 7 A. Agnesi, S. Dell'Acqua, E. Piccinini *et al.*. Efficient wavelength conversion with high-power passively Q-switched diode-pumped neodymium lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(8):1480~1484
- 8 Dana J. Berkeland, Flavio C. Cruz, James C. Bergquist. Sum-frequency generation of continuous-wave light at 194 nm [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18):4159~4162
- 9 J. O. White. High-efficiency backward Stokes Raman conversion in deuterium [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(5):785~789
- 10 J. M. Dudley, L. Provino, N. Grossard *et al.*. Supercontinuum generation in airsilica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4):765~771
- 11 Zhao Shang-hong, Chen Guo-fu, 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
- 12 Zhao Shanghong, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Experimental study of high efficiency all-solid-state pulse-blue laser system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(7):1273~1277
赵尚弘,陈国夫,赵卫等. 高效全固体脉冲蓝光系统实验研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(7):1273~1277
- 13 Cheng Guanghua, Yu Lianjun, Wang Yishan *et al.*. Experimental study of all-solid-state second harmonic and fourth harmonic generation in Ti:sapphire laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):330~334
程光华,于联军,王屹山等. 高效全固体紫外四倍频激光器的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):330~334
- 14 Yao Jianquan. *Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* [C]. Beijing: Science Press, 1995. 258~268
姚键铨. *非线性频率变化和激光调谐技术*[C]. 北京:科学出版社,1995. 258~268