

高效宽带二倍频激光原理及实现方法

王伟^{1,2}, 张小民¹, 赵圣之², 李富全¹, 韩伟¹, 王芳¹,
冯斌¹, 王静¹, 李恪宇¹, 贾怀庭¹, 向勇¹, 王礼全¹, 钟伟¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

2. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要: 利用两块 I 类 KDP 倍频晶体级联的方式, 研究了时间相位调制宽带激光的二倍频特性。实验获得了二倍频转换效率与入射基频光功率密度的关系, 在基频光功率密度为 1.6 GW/cm^2 时, 最大二倍频转换效率达 70%, 接近理论模拟的结果。实验结果表明, 在高功率密度和低功率密度基频光条件下, 倍频光光谱宽度约为入射基频光带宽的一半, 与理论计算结果一致, 倍频光光谱未发生光谱窄化效应。实验结果为实现高效宽带二倍频和惯性约束核聚变(ICF)中利用高强度宽带二倍频光打靶提供了重要依据。

关键词: 宽带二倍频; 晶体级联; 时间相位调制; 宽带激光; 光谱窄化

中图分类号: O437.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)09-1653-04

High efficiency broadband second harmonic laser theory and implementation method

Wang Wei^{1,2}, Zhang Xiaomin¹, Zhao Shengzhi², Li Fuquan¹, Han Wei¹,
Wang Fang¹, Feng Bin¹, Wang Jing¹, Li Keyu¹, Jia Huaiting¹,
Xiang Yong¹, Wang Liquan¹, Zhong Wei¹

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: By using two type-I cascaded crystals, the second harmonic characteristics of temporal phase modulated broadband laser was demonstrated. The relation between second harmonic generation (SHG) efficiency and incident fundamental light power density was presented, and the highest efficiency of adjacent 70% was achieved when the fundamental laser power density was 1.6 GW/cm^2 , which was in agreement with the theoretical simulation. The experimental results show that the SHG spectrum bandwidths of high power density and low power density are about half of the incident fundamental lights, which is in excellent agreement with the calculated results and doesn't result in the spectrum narrowing effect. The experimental results are significant for the high efficient broadband SHG and operations on target in inertial confinement fusion (ICF) with high intensity broadband SHG.

Key words: broadband SHG; cascaded crystals; temporal phase modulated; broadband laser; spectrum narrowing

收稿日期: 2011-01-22; 修订日期: 2011-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(11074225)

作者简介: 王伟(1983-), 男, 博士生, 主要从事非线性光学方面的研究。Email: weiwang_06@yahoo.com.cn

导师简介: 张小民(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光技术与工程方面的研究。Email: winger_caep@hotmail.com

0 引言

在惯性约束聚变(ICF)的研究中,为了抑制激光等离子体相互作用时的有害非线性效应,提高激光和等离子体的耦合效率,具有一定光谱宽度的短波长激光被认为是一种较理想的光源。目前,世界上在建和已建的 ICF 激光驱动器普遍采用钨玻璃激光三次谐波转换后的紫外光(0.35 μm)作为打靶激光^[1-2]。但是,由于紫外光易导致光学元件损伤,严重制约了激光驱动器的输出能力和运行性能。而采用高能量宽带二倍频激光打靶则能避免元件的损伤问题,同时取得与紫外光打靶相当的物理实验效果^[3-4]。最近,国家点火装置(NIF)进行了二倍频激光打靶实验,192束的总能量高达 3.4 MJ,并未出现光学元件的损伤问题,并且激光等离子体相互作用效果与三倍频光打靶没有明显差异。因此,发展大宽带、高效率的二倍频技术具有重要的应用价值和需求牵引^[5-9]。文中开展了高效宽带二倍频实验,获得了 70% 的转换效率,并研究了倍频过程中光谱的变化特性,实验结果与理论模拟结果相符。研究结果为设计 ICF 激光驱动器的二倍频器件提供了重要的实验依据。

1 宽带激光谐波转换理论模型

对 I 类匹配二倍频过程,忽略横向衍射、空间走离和三阶非线性效应影响,时域上表示宽带二倍频谐波转换的瞬态耦合波方程组可以表示为^[9]:

$$\frac{\partial A_1(z,t)}{\partial z} + \beta_{11} \frac{\partial A_1(z,t)}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{12} \frac{\partial^2 A_1(z,t)}{\partial t^2} + \alpha_1 A_1(z,t) = -\frac{i\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c} A_2 A_1^* \exp(i\Delta k z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2(z,t)}{\partial z} + \beta_{21} \frac{\partial A_2(z,t)}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{22} \frac{\partial^2 A_2(z,t)}{\partial t^2} + \alpha_2 A_2(z,t) = -\frac{i\omega_2 d_{\text{eff}}}{n_2 c} A_1^2 \exp(-i\Delta k z) \quad (2)$$

式中: A_j 、 β_{j1} 、 β_{j2} 、 α_j 、 n_j 分别为频率 ω_j 处的复振幅、群速度的倒数、群速色散、吸收系数、折射率(倍频过程中,下标 $j=1,2$ 分别表示基频光和二倍频光); d_{eff} 为有效非线性系数; Δk 为相位失配量; c 为真空中的光速。

在二倍频过程中,由于晶体接受带宽较大,通过增加晶体厚度的方法可以提高倍频转换效率。采用

快速傅里叶变换和四阶龙格-库塔算法,对谐波转换的耦合波方程组进行了数值模拟^[9],得到了实验中所用带宽 1.2 nm 的时间相位调制宽带基频光的倍频晶体最佳厚度。图 1 是在基频光功率密度为 2 GW/cm^2 时,倍频转换效率随晶体厚度变化的关系曲线,从图中可得倍频晶体的最佳厚度约为 26 mm。

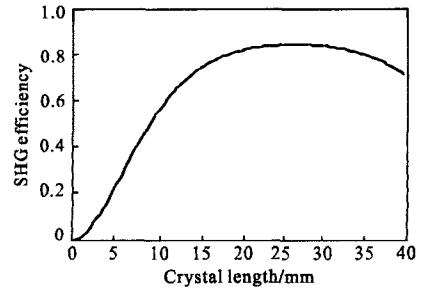


图 1 二倍频效率随晶体长度变化

Fig.1 SHG efficiency vs crystal length

同时,根据耦合波方程组理论模拟了倍频的光谱分布以及二倍频转换效率随入射基频光功率密度变化的关系曲线。基频光功率密度为 2 GW/cm^2 时,倍频光光谱分布如图 2 所示,倍频光光谱宽度约 0.6 nm,为基频光带宽的一半。

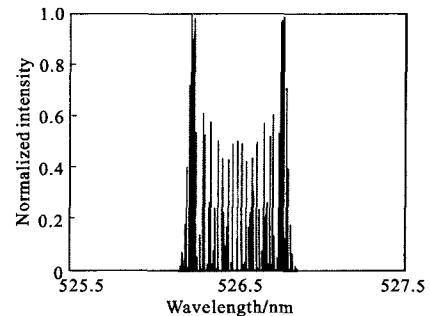


图 2 倍频光光谱分布理论模拟

Fig.2 Calculation results of generated SHG spectral distribution

图 3 中实线表示了二倍频转换效率随入射基频光功率密度变化关系,当基频光强度在 2 GW/cm^2

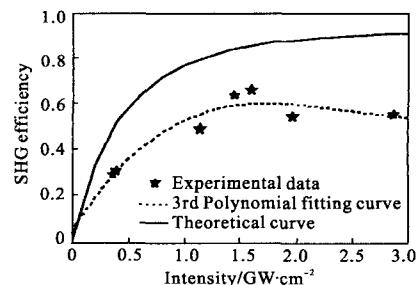


图 3 二倍频效率随基频光强度的变化

Fig.3 SHG efficiency vs fundamental light intensity

时,理论上可以得到约 90%的倍频转换效率。

2 实验装置

图 4 为实验装置图。实验采用的主激光由掺镱光纤振荡器产生,中心波长为 1 053 nm,经过一系列光纤器件进行振幅和相位控制,使得主激光为时间上平顶分布的相位调制宽带脉冲,其光场分布为:

$$A(t)=A_0(t)\exp[i\sigma\sin(2\pi\Omega t)] \quad (3)$$

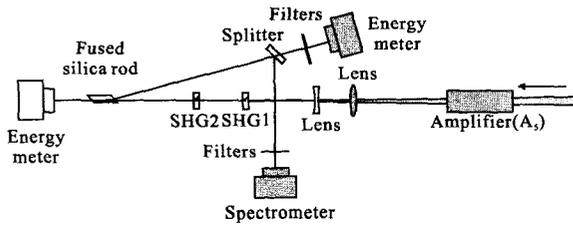


图 4 实验装置示意图
Fig.4 Experimental layout

式中: $A_0(t)$ 为脉冲的时间振幅; σ 为相位调制深度, Ω 为相位调制频率^[10-13]。实验中所用入射基频光为脉冲宽度 1 ns 的平顶脉冲,其时间波形如图 5 所示。

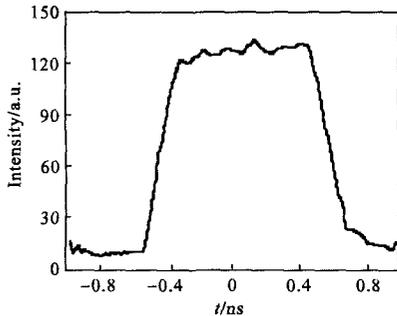


图 5 入射基频脉冲的时间波形

Fig.5 Temporal distribution of the input fundamental pulse

入射基频光的频谱宽度(FWHM)为 $\Delta\nu=2\sigma\Omega$,对应的光谱宽度为 $\Delta\lambda=\frac{c}{f_0^2}\Delta\nu$, f_0 为入射基频光的中心频率,基频光的瞬时频率随时间周期性变化^[10-11]。实验中相位调制器的调制频率为 14.2 GHz,调制深度为 11.4,相应的入射基频光光谱宽度为 1.2 nm,如图 6 所示,呈梳状结构分布。

光谱仪测量的基频光光谱分布如图 7 所示,为了消除入射基频光光谱不稳定性对实验结果的影响,静态采集了 11 发基频光光谱,从图中可以看出,基频光光谱的重复性很好,与理论结果相吻合。

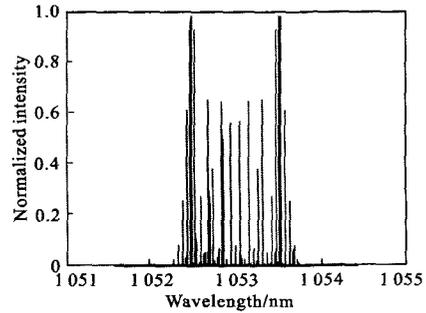


图 6 基频光光谱分布理论模拟

Fig.6 Calculation results of fundamental light spectral distribution

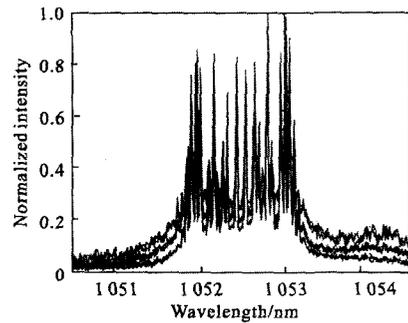


图 7 入射基频脉冲的光谱分布(11 发)

Fig.7 Spectrums of the input fundamental lights (11 shots)

相位调制后的脉冲经过四级钕玻璃棒状放大器以提高其功率密度,前端输出的光束口径为 22 mm×22 mm,后面增加了一级钕玻璃棒状放大器 A_5 ,进一步提高基频光能量,为了提高基频光的功率密度和减小光束发散角,用正负透镜进行缩束,经过透镜后,入射到晶体表面的光束口径为 10 mm×10 mm。实验中所用的两块 I 类 KDP 倍频晶体(SHG1 和 SHG2)的厚度均为 12 mm,且均处于最佳匹配位置,等效厚度为 24 mm,接近前面理论模拟得到的最佳倍频晶体厚度。实验中用熔石英棒进行分光,其中前表面反射的光经过劈板 M_1 反射后由滤波片滤光进入光谱仪,用来测量倍频光光谱,透射过 M_1 的用卡计 E_2 测量倍频光能量,剩余基频光和产生的倍频光能量由卡计 E_1 测量,倍频转换效率(内效率)定义为产生的二倍频光能量对剩余基频光与产生的倍频光能量总和的比例关系。实验中,通过改变放大器 A_5 的电压来改变入射基频光的强度。

3 实验结果及分析

3.1 倍频光转换效率

图 3 中的星号表示实验所得的倍频转换效率与

入射基频光功率密度的关系,从图中可见,当基频光功率密度为 1.6 GW/cm^2 时,得到了约 70% 的倍频效率,与理论计算接近,图中虚线是对实验结果进行拟合的结果,可见倍频转换效率随基频光功率密度的变化规律与理论计算结果相吻合。倍频晶体老旧导致的透过率、膜层质量降低以及基频光中存在较强的放大自发辐射(ASE)是造成实验与理论误差的主要原因。

3.2 倍频光光谱分析

笔者研究了提高入射基频光功率密度和增加晶体厚度对倍频光光谱的影响。当放大器 A_5 加电压和不加电压时,入射基频光的功率密度为 2.0 GW/cm^2 和 0.5 GW/cm^2 。实验中分别测量了上述高功率密度和低功率密度下的倍频光光谱,如图 8 所示。从图中可以看出,高功率密度和低功率密度下,倍频光光谱重合得很好,且倍频光光谱宽度约为 0.6 nm ,与理论计算结果一致,均没有发生光谱窄化。

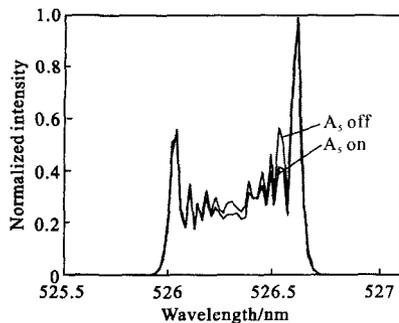


图 8 倍频光光谱分布实验结果

Fig.8 Experimental results of generated SHG spectral distribution

4 结论

文中采用两块晶体级联的方法,研究了时间相位调制带宽 1.2 nm 的宽带激光二倍频特性。理论模拟分析了时间相位调制宽带激光的谐波转换过程,在实验中,入射基频光功率密度为 1.6 GW/cm^2 时,得到了约 70% 的倍频转换效率,接近理论值。同时测得了入射基频光在高功率密度和低功率密度下的倍频光光谱,结果表明,倍频光光谱宽度为 0.6 nm 且均未发生光谱窄化效应。实验结果为实现高效宽带二倍频和物理实验中用高强度宽带倍频光打靶提供了重要的依据。

参考文献:

[1] Seka W, Jacobs S D, Rizzo J E, et al. Demonstration of high

efficiency third harmonic conversion of high power Nd-glass laser radiation[J]. *Opt Commun*, 1980, 34(3): 469-473.

- [2] Murray J R, Smith J R, Ehrlich R B, et al. Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components [J]. *J Opt Soc Am B*, 1989, 6(12): 2402-2411.
- [3] Suter L J, Glenzer S, Haan S, et al. Prospects for high gain, yield National Ignition Facility targets driven by 2W (green light)[J]. *Phys Plasmas*, 2004, 11(5): 2738-2745.
- [4] Huang Wanqing, Han Wei, Wang Fang, et al. Laser-induced damage growth on large-aperture fused silica optical components at 351 nm [J]. *Chin Phys Lett*, 2009, 26(1): 7901-7904.
- [5] Heestand G M, Haynam C A, Wegner P J, et al. Demonstration of high energy 2W operation on the National Ignition Facility Laser System[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(19): 3494-3499.
- [6] Norton M A, Donohue E E, Feit M D, et al. Growth of laser damage in SiO_2 under multiple wavelength irradiation [C]// SPIE, 2006, 5991: 599108.
- [7] Han Wei, Zheng Wanguo, Zeng Xiaoming, et al. Experimental study of the broadband frequency doubling at the retracing point of phase matching[J]. *Chin J Laser*, 2006, 33(1): 31-33. (in Chinese)
- [8] Zhuang Shuanggen, Yao Jianghong, Li Yongnan, et al. Technology and applications of QPM-SHG using periodically poled crystals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 233-236. (in Chinese)
- [9] Li Kun, Zhang Bin, Yuan Xiaodong, et al. Optimizing parameters of third harmonic generation of broadband laser using cascade crystals [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2005, 17(7): 995-999. (in Chinese)
- [10] Eimerl D, Auerbach J M, Barker C E, et al. Multicrystal designs for efficient third harmonic generation [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(16): 1208-1210.
- [11] Zhang Yan, Wu Liying, Zhang Jian. Phase modulation characteristics of electrically addressed spatial light modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 316-318. (in Chinese)
- [12] Li Kun, Li Keyu, Zhang Bin, et al. Analysis of third harmonic generation of broadband laser using cascaded crystals [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2006, 18(8): 1282-1286. (in Chinese)
- [13] Chen Hui, Xia Yuanqin, Lu Zhenzhong. Broadband tunable output of Ti:sapphire lasers by BF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 461-463. (in Chinese)