

5 ps 紫外超短光脉冲产生技术

赵 卫 杨斌洲 乔学光¹ 杨鸿儒

(中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068; ¹西安石油学院 西安 710065)

提要 描述了采用国内新型高效的二倍频晶体 KTP 和四倍频晶体 LAP 建立起来的一套稳定可靠的 1.06 μm 脉冲激光四倍频系统,通过计算机模拟确定了运行参数的最佳值,从而使谐波器件的转换效率提高,另外还分析了失配角 Δθ, 光功率密度等因素对倍频效率的影响。该系统产生的超短紫外光脉冲对 X 光条纹相机的动态参数及带时标的条纹相机的研究具有重要意义。实验测得最短的紫外光脉冲宽度为 5 ps。

关键词 紫外超短光脉冲, 谐波, 相位匹配

1 引 言

在瞬态光谱学及超快过程与诊断研究中,紫外超短光脉冲的产生引起人们极大的兴趣,如利用超短紫外激光脉冲对 X 射线条纹相机的动态参数^[1](时间分辨、动态范围、扫描线路的晃动及扫描线路的线性等)进行测试及利用超短紫外光脉冲在激光等离子体物理诊断中作为基准时标等一些重要的应用^[2-4]。

目前,可调谐紫外超短激光脉冲光源基本上都是基于掺钛宝石激光器和各种染料激光器加上放大器及波长转换器,但这些系统极其复杂而且体积大、成本高。最近出现了一些新的固体可调谐紫外激光材料^[5],如 LuLiF₄, LiCaAlF₆ 和 LiSrAlF₆。尽管这样可以实现真正的全固体激光器直接产生紫外光,但泵浦源却需要紫外激光,而且脉宽目前只做到了几百个皮秒,所以在一些超快过程及诊断研究中使用时有很大的局限性。为此,我们建立了一套 1.06 μm 脉冲最短紫外激光脉冲宽度为 5 ps 左右的四倍频激光系统,实验并分析了失配角 Δθ, 光功率密度等对倍频效率的影响。

2 实验原理

光和物质相互作用的耦合波方程^[6]为

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dz} + \frac{1}{2}r_1E_1 = -iKE_1^*E_2\exp(-i\Delta kz) & (1) \\ \frac{dE_2}{dz} + \frac{1}{2}r_2E_2 = -iKE_1^2\exp(+i\Delta kz) & (2) \end{cases}$$

对于无吸收、大信号平面波近似的情况,解得单脉冲谐波转换效率 η 为^[7]

$$\eta = \tanh \left\{ \frac{1}{2} \tanh^{-1} [\operatorname{sn}(2\eta_0^{1/2}, 1 - \delta/4\eta_0)] \right\}$$

可见转换效率 η 与入射波激励因子 η_0 和相位失配因子 δ 有关, sn 为雅可比椭圆函数。而

$$\eta_0 = C^2 I L^2$$

其中 I 为入射光功率密度, L 为晶体长度, C 为耦合因子, 且 $C = D |d_{\text{eff}}| / \mathcal{N}(n_1, n_2, n_3)$, D 为与晶体有关的常数。对 LAP 晶体 $D = 5.46$, n_1, n_2, n_3 为晶体的主轴折射率。

$$\delta = \frac{1}{2} \Delta K \cdot L$$

综合考虑 η_0 和 δ 两个因子, 可定义一个量纲为功率的由晶体非线性特性决定的阈值功率^[8]

$$P_{\text{th}} = (1/2f_2 Z_0) (n_1 n_2 n_3 \beta_{\theta, \phi} \lambda^2 / 2\pi d_{\text{eff}})^2$$

这里 $Z_0 = 377 \Omega$, 对二倍频(SHG) $f_2 = 1$, 对四倍频(FHG) $f_2 = 2$ 。所以, 谐波器件为了达到最大的转换效率 η_{max} 应综合考虑相位匹配方向。

波矢失配灵敏度不仅与匹配角 θ 有关, 还与方位角 ϕ 有关, 在线性近似下^[8,9], 有

$$\beta_{\theta, \phi} = \left[\left[\frac{\partial(\Delta k)}{\partial\theta} \right]^2 + \left[\frac{\partial(\Delta k)}{\partial\phi} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

最佳晶体长度随着波矢失配灵敏度 $\beta_{\theta, \phi}$ 的增加而减少, 即有 $l \sim 1/\beta_{\theta, \phi}$ 这样的关系^[8]。在谐波器件设计时, 应选择 $\beta_{\theta, \phi}$ 较小的晶体, 这样容易获得高的转换效率及倍频稳定性。由于 LAP 具有强的非线性效应、低的功率阈值、高的损伤阈值、不易潮解、易获得高质量光学晶体等特点, 性能优于 KDP 晶体, 与其他新型高效的非线性晶体相比也有其独特的优势。实际上激光脉冲的峰值功率 P_L 与阈值功率 P_{th} 之比决定了最佳的效率和最佳的晶体长度^[7], 最佳转换效率随着 P_L/P_{th} 比值的增大而单调增加, 所以低的阈值功率就相当于增加了激光脉冲的峰值功率, 故在设计晶体参数时, 选择的 θ 及 ϕ 值使 $\beta_{\theta, \phi}$ 尽量小而使 d_{eff} 值最大就可达到使阈值功率 P_{th} 最小的目的, 对获得大的转换效率有利。

3 实验结果及讨论

实验系统的结构如图 1 所示。超短基频光脉冲来自对撞脉冲锁模 Nd:YAG 激光器 (CPM) 直接产生 20 ps 序列脉冲^[10]。用可饱和吸收体作为腔外压缩介质进行腔外压缩^[11]。其中, DC₁, DC₂ 为透过率不同的可饱和吸收体, P_1, P_2 是对 P 分量透过、对 S 分量全反的偏振片, QP 是 $\lambda/4$ 波片。为了保证脉冲压缩后不使峰值功率或能量受到损失, 能量补偿是必要的, 所以采用了同轴双程光放大器以及多级单程 YAG 放大器, 压缩比是正比于光脉冲通过染料的数量。DC₁, DC₂ 对 1.06 μm 激光的透过率分别为 25% 和 20%, 20 ps 光脉冲首先通过 DC₁ 进行

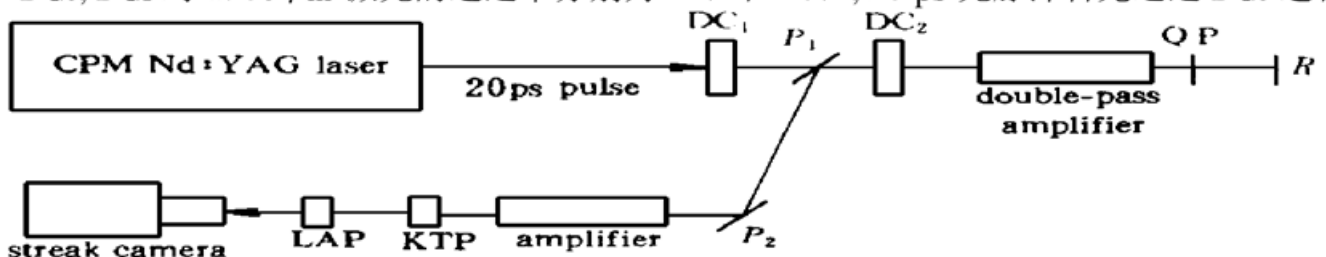


图 1 腔外脉冲压缩及倍频系统结构示意图

Fig. 1 The diagram of a pulse compression external cavity and harmonic system

第一次压缩, 此时脉宽为 14 ps, 压缩比约为 1.5。而后进入同轴双程放大器再经过两次压缩, 得到了能量为 0.3 mJ 的脉冲, 另一级 Nd·YAG 放大器将 0.3 mJ 的光脉冲放大到 4 mJ。KPT-2K 型可见光条纹相机用来测量经 KTP 倍频后的光脉冲, 其宽度为 4 ps。实验表明, 脉宽的压缩比与光脉冲通过可饱和吸收体的次数成正比。将可饱和吸收体和放大器组合在一起, 通过适当地选择整个系统的参数可得到更好的压缩效果、更加实用。

实验中, 脉宽为 14 ps, 能量为 4 mJ 的单脉冲再经一级 YAG 放大器放大后, 能量达 15~20 mJ 左右, 用条纹相机测得 1.06 μm 激光脉宽为 5.6 ps。四倍频晶体有两种, 一种厚为 6 mm, 一种厚为 3 mm, 为了准确测量倍频光能量, 用了两片滤光片, 一片对 0.53 μm 透过率为 90%, 对 1.06 μm 全部吸收, 另一片对 0.53 μm 全部透过, 对 0.26 μm 反射率为 80% 左右。

首先对二倍频的转换效率进行了测量, 发现对于 KTP 晶体, 在实验中的最大倍频效率为 55%, 一般在 47% 左右, 很难做到 60% 或大于 60%, 这是由于晶体尺寸、相位匹配及离散效应等的影响。KTP 在较大的功率密度范围内, 其转换效率随着功率密度的提高而上升, 对失谐角并不很灵敏。对两块不同的四倍频晶体 LAP 进行了倍频效率的测量, 一种厚为 6 mm, 一种厚为 3 mm, 结果发现薄的 LAP 晶体, 在较高功率密度下的转换效率比厚的 LAP 晶体要高 10%

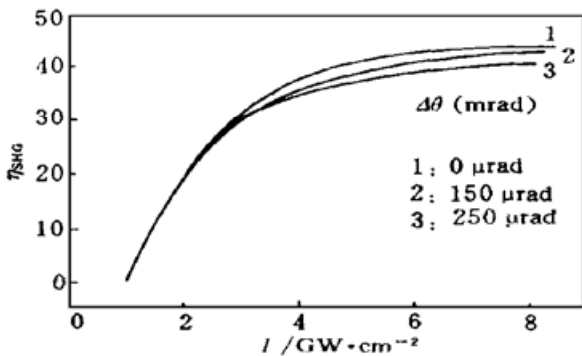


图 2 二倍频转换效率与入射光强及失谐角度的关系

Fig. 2 The relation of second harmonic conversion efficiency at different incident intensities I_0 and at different $\Delta\theta$

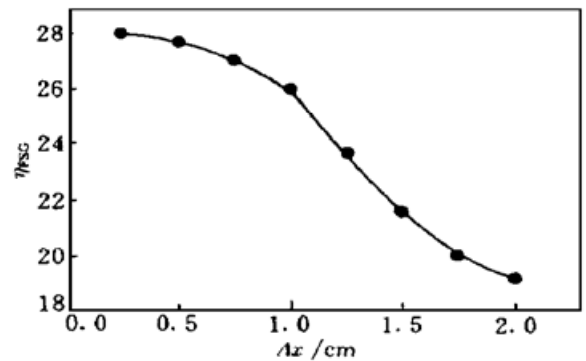


图 3 KTP 和 LAP 之间的空间距离与四倍频效率的关系

Fig. 3 The relation of space distance between KTP and LAP and fourth harmonic conversion efficiency

左右, 而且薄的 LAP 的调谐半宽度高, 四倍频的稳定性优于厚的 LAP 晶体, 另外在实验中当 KTP 和 LAP 的距离加大时, 倍频效率也会明显下降, 这是由于二倍频时二次谐波的光束发散角随传播距离的增大而显著增加。所以, 我们尽可能把 KTP 和 LAP 的距离减小, 最大限度地减低发散角的影响。图 2, 图 3 分别是二倍频的转换效率与失谐角、入射光密度及四倍频的转换效率与两块晶体之间距离的关系曲线。

用紫外条纹扫描相机对四倍频的超短紫外光脉冲进行了测量, 相机的阴极是 16 nm 厚的 Au 膜, 衬底是 100 nm 厚的 parylene 膜。测得的紫外脉冲宽度

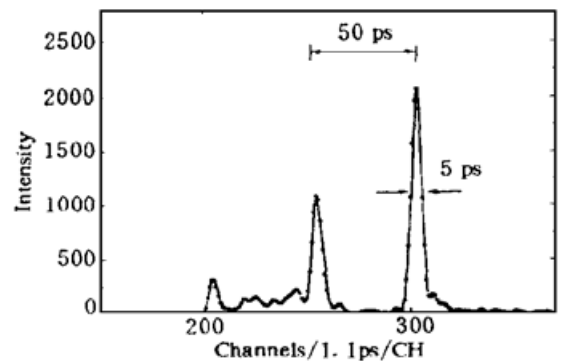


图 4 5 ps 紫外光脉冲的测量曲线

Fig. 4 The measured 5 ps ultrashort UV laser pulse

为 5 ps 左右, 紫外光脉冲的能量为 3.5 mJ, 图 4 就是用条纹相机测得 5 ps 紫外脉冲条纹像的积分测量曲线。

通过以上的分析与实验, 得到了最大能量为 3.5 mJ, 脉宽为 5 ps 左右的紫外光脉冲, 并得出以下结论: (1) KTP 在较大的功率密度范围内, 其转换效率随着功率密度的提高而上升, 对失谐角不很灵敏; (2) KTP 与 LAP 应尽量靠近, 最大限度地降低发散角影响; (3) 薄的 LAP 比厚的具有较大的调谐半宽度和转换效率。

参 考 文 献

- 1 Paul D. Rockett. X-ray transmission photocathode sensitivities at $\lambda = 0.266 \mu\text{m}$. *Appl. Opt.*, 1984, **23** (1): 176~ 179
- 2 D. G. Nison, B. J. MacGowan. Green light 2ω as an X-ray streak camera fiducial. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(8): 2187~ 2188
- 3 P. A. Jaanimagi, L. DaSilva, G. G. Gregory *et al.*. Optical fiducials for X-ray streak camera at LLE. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(8): 2189~ 2191
- 4 R. Popil, R. Fedosejevs, A. A. Offenberger. Fiducial monitor for an X-ray streak camera. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(6): 1049~ 1051
- 5 Liu Zhenlin, Y. Oyama, K. Kawamura. Ultrashort short pulse train generation from an all-state-state Ce:LiCAF laser. *Laser & Infrared* (激光与红外), 1996, **26**(1): 13~ 15 (in Chinese)
- 6 R. S. Craxton. High efficiency frequency tripling schemes for high-power Nd:glass lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1771~ 1782
- 7 David Eimerl. High average power harmonic generation. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5): 575~ 592
- 8 D. Eimerl, S. Velsko, L. Davis *et al.*. Deuterated L-arginine phosphate: A new efficient nonlinear crystal. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **QE-25**(2): 179~ 193
- 9 D. Eimerl. Quadrature frequency conversion. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(8): 1361~ 1371
- 10 Yang Bingzhou, Zhao Wei, Zhang Xiaoqiu *et al.*. High power laser with ultrashort pulse. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1994, **23**(Z3): 315~ 322 (in Chinese)
- 11 Zhao Wei, Yang Bingzhou, Sun Yongdao. Research on output energy of colliding mode-locked Nd:YAG laser selected mode in antiresonant ring. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1997, **26**(4): 326~ 329 (in Chinese)

Generation of a 5 ps Ultrashort UV Laser Pulse

Zhao Wei Yang Binzhou Qiao Xueguang* Yang Hongru

State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

* Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065

Abstract This paper describes a fourth-harmonic system for a $1.06 \mu\text{m}$ laser using nonlinear optic crystals, which are a frequency doubling KTP crystal and a frequency quadrupling LAP crystal. Using computer simulation, we have got optimal parameters of the harmonic device. Some parameters of affecting the harmonic conversion efficiency, phased-matching, maximum direction of the effective nonlinear coefficient and threshold power are discussed. This fourth-harmonic system offers wide applications to the diagnostics of the soft X-ray ps streak camera and framing camera, nonlinear optics and other ultrafast phenomena study. Finally, a 5 ps ultrashort UV laser pulse has been generated and measured using a streak camera.

Key words ultrashort UV laser pulse, harmonic, phase-matched