

# 波面倾斜脉冲泵浦的高效可见光飞秒 光参量产生和放大器\*

丘志仁<sup>a</sup> 黄锦圣<sup>b</sup> 汪 鸿<sup>b</sup> 余振新<sup>a</sup> G. K. L. Wong<sup>b</sup>

(<sup>a</sup> 中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室 广州 510275,

<sup>b</sup> 香港科技大学物理系 香港九龙)

**提要** 利用脉冲波面倾斜技术补偿三波相互作用的群速度失配,建立了掺钛蓝宝石飞秒再生放大器输出倍频光泵浦共线 $\pi$ -类匹配 BBO 晶体的光参量产生和放大器,其信号和空闲光输出调谐范围为 0.47~ 2.7  $\mu\text{m}$ ,脉冲宽度为 100~ 170 fs,重复率为 1 kHz。脉冲最大输出能量为 6.5  $\mu\text{J}$ ,总能量转换效率大于 15%。

**关键词** 波面倾斜脉冲泵浦,飞秒激光脉冲,光参量放大

## 1 引 言

可见光光谱区微焦耳能量的飞秒脉冲产生对于非线性光学和超快时间分辨光谱测量具有重要的意义。光参量产生(OPG)是获得宽调谐波长飞秒光脉冲相当有用的技术。然而在紫外和可见光光谱区的光参量产生的转换效率相当低<sup>[1,2]</sup>。因为泵浦光、信号光和空闲光之间存在较大的群速度失配。特别是利用光参量产生作为光参量放大(OPA)种子源的系统,离轴光参量产生较大地限制了共线超荧光种子<sup>[2,3]</sup>。如利用白光连续注入作为光参量放大种子源,则产生较好的可见光输出<sup>[4,5]</sup>,但是其稳定及高效的输出必须单细丝白光连续注入。众所周知,高重复率(即> 100 kHz)的钛宝石再生放大器可产生模式和稳定性相当好的单细丝连续光<sup>[4]</sup>。而 1 至几千赫兹的再生放大器所产生的连续光相对噪声较大,而且为了获得单细丝输出而需要仔细调整泵浦光束的能量。事实上,为了避免损伤和获得稳定输出,经常需要慢慢旋转产生连续光的晶体<sup>[5]</sup>。因此,对于千赫兹再生放大系统来说,为了避免单细丝白光连续产生中所遇到的这些复杂问题,光参量产生作为放大器种子注入的方法是很简单有效的。

在光参量三波相互作用中,通过非共线位相匹配方案可以补偿泵浦、信号和空闲光的群速度失配,采用这种方案,紫外光泵浦 BBO 晶体的光参量放大已获得能量转换效率达 20%<sup>[6]</sup>。然而,这类非共线 OPG/OPA 的主要缺点是输出方向在波长调谐区域内改变,调整较复杂。本

\* 得到 The Lightwave Technology Research Programme of the Hong Kong Telecom Institute of Information Technology 和广东省科学基金的部分支持,实验在香港科技大学 Joyce M. Kuok Laser and Photonics Laboratory 完成。

文报道采用倾斜泵浦脉冲的新技术补偿光参量产生中的群速度失配,所产生的较强共线荧光作为 OPA 的注入种子。使用倾斜紫外脉冲波面泵浦  $\pi$ -类共线位相匹配 BBO 晶体,建立了高效可见光区调谐飞秒 OPG/OPA 系统。该光参量放大系统输出波长的调谐方法简单,信号调谐范围为 470~780 nm,如果考虑空闲光,可达到 2.7  $\mu\text{m}$ ,脉冲宽度范围为 100~170 fs,总能量转换效率高于 15%。

## 2 实验方案与结果

数值模拟表明:当波矢量  $k_p/k_s/k_i$ ,即共线位相匹配情况下,信号和空闲光相对于泵浦光有相反的群速度,即  $(v_p - v_s)(v_p - v_i) < 0$  时,则群速度失配与信号及空闲光在非线晶体中的放大是不相干的<sup>[7]</sup>,  $v_p, v_s$  和  $v_i$  分别是泵浦、信号和空闲光的群速度。在这种情况下,即使信号和空闲光在非线晶体中传播的距离大于脉冲分离长度  $l_s$ ,它们的脉宽仍不加宽及增益饱和而获得泵浦脉冲的锁定放大<sup>[7]</sup>。对于  $\pi$ -类共线位相匹配 BBO 晶体,未倾斜泵浦脉冲是不能满足  $(v_p - v_s)(v_p - v_i) < 0$  的条件,R. Danielius 等人<sup>[8]</sup>证明:光脉冲通过色散棱镜后,其脉冲波面倾斜到一特定的角度  $\gamma$ ,在 OPG 的共线方向,这个倾斜泵浦脉冲有效群速度  $v_{ip//}$  相对于未倾斜泵浦脉冲的群速度  $v_{up//}$  修正量为  $\Delta v_p = (v_{ip//} - v_{up//}) = v_{up//} \tan \rho \tan \gamma$ ,其中  $\rho$  为泵浦光束(非常光)在晶体中的走离角, $\rho$  和  $\gamma$  以顺时针方向为正,而正常光的信号和空闲光群速度没有改变,因此满足  $(v_{ip//} - v_s)(v_{ip//} - v_i) < 0$  的条件。定义最佳倾斜角  $\gamma_0$  为满足等式  $v_{ip//} = (v_s + v_i)/2$  的  $\gamma$  值。这样对于波长为 400 nm 的泵浦脉冲在  $\pi$ -类位相匹配 BBO 晶体的 OPG 整个调谐范围内群速度匹配具有单个最佳倾斜角  $\gamma_0 = 27^\circ$ 。这个倾斜脉冲泵浦导致了较强的共线参量荧光。

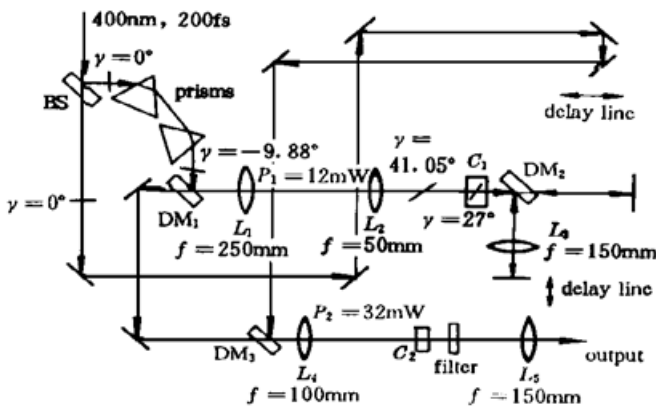


图 1 波面倾斜脉冲泵浦光参量产生和放大器系统示意图

DM<sub>1</sub> ~ DM<sub>3</sub>: 二色性镜; BS: 分束镜; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>: BBO 晶体

Fig. 1 Schematic layout of the tilted pulse pumped OPG/OPA

DM<sub>1</sub> ~ DM<sub>3</sub>: dichroic mirror; BS: beam splitter; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>: BBO crystal

我们采用这个倾斜的光脉冲泵浦 OPG/OPA 系统。该装置的实验安排如图 1,该系统有二块晶体,由三级组成,一级为光参量产生,另外二级为光参量放大。重复率为 1 kHz 的钛宝石再生放大器输出的基波被倍频至 400 nm 用作泵浦源。将脉冲宽度约 200 fs 的泵浦光束分成二束(强度比~30/70),较弱的泵浦束  $P_1$  以最小偏向角通过二个棱镜(顶角皆为  $68^\circ$ )后,其脉冲波面倾角为  $\gamma = -9.88^\circ$ ,接着采用一个 1.5 的望远镜缩小光束尺寸,可获得 OPG 的泵浦功率密度为  $50 \text{ GW}/\text{cm}^2$ ,并在 2 mm 厚的 OPG 晶体 BBO ( $C_1$ ) 外表面产生外倾斜角为  $\gamma = 41.05^\circ$  的泵浦脉冲。该泵浦脉冲在 BBO 晶体内相应的内倾斜角近似等于  $\gamma_0$ 。就是利用这一倾斜的泵浦脉冲获得较强的共线超荧光。我们使用校正的硅功率探测器及带宽为 10 nm 的 690 nm 窄带滤光片测量 400 nm 倾斜脉冲泵浦的共线超荧光功率。获得如下结果:由于倾斜的泵浦脉冲和适当的 BBO 晶

体的取向,使得满足离散角  $\rho > 0$  及  $(v_{tp} // - v_s)(v_{tp} // - v_i) < 0$  的条件,从而获得较强的共线荧光产生;而通过绕泵浦束方向转动 BBO 晶体  $180^\circ$  使  $\rho$  方向反转( $\rho < 0$ ) 及  $(v_{tp} // - v_s)(v_{tp} // - v_i) < 0$  条件不再满足。在这种情况下,没有观察到共线超荧光,或者至少低于热噪声和滤光片泄漏所致探测器的背景信号(几十 nW);而当一全反镜代替二个棱镜时,采用波面未倾斜的脉冲泵浦  $C_1$  晶体,其功率密度等于或大于上述倾斜泵浦脉冲的功率密度下,仍未探测到共线参量超荧光,但在群速度匹配满足的方向观察到较强的离轴参量超荧光。对于倾斜和未倾斜的泵浦脉冲在 BBO 晶体中所观察到的参量产生完全和 R. Danielius 等人<sup>[8]</sup>观察到的一致。

在参量产生后,共线超荧光及泵浦束  $P_1$  的剩余部分被双色性镜  $DM_2$  分离,然后它们以相同的路径返回 BBO 晶体 ( $C_1$ ),进行第一级放大,调整光学延时平台使泵浦和种子脉冲的时间重叠最佳化。信号放大输出平均功率为  $10 \mu\text{W}$ 。另一束紫外光  $P_2$  在第二块 BBO 晶体 ( $C_2$ , 1 mm 厚) 处泵浦放大从第一级放大输出的信号和空闲光。最后一级泵浦功率密度约为  $30 \text{ GW}/\text{cm}^2$ ,单通能量转换效率大于 20%,利用长通滤光片滤掉  $C_2$  晶体后剩余的紫外泵浦光束。二块 BBO 晶体均为  $\bar{\Gamma}$  类位相匹配  $29^\circ$  角切割。

图 2 显示了信号和空闲光平均输出功率与波长的关系,信号和空闲光输出调谐从 470 nm 到  $2.7 \mu\text{m}$ 。在总泵浦功率为 44 mW 情况下,最大输出功率(信号和空闲光)为 6.5 mW,因此在此  $\bar{\Gamma}$  类匹配 BBO 晶体-OPG/OPA 系统中总转换效率为 15%,其输出稳定性和模式均相当好。输出脉冲峰与峰的强度起伏在 5% 之内。该 OPG/OPA 系统总转换效率达到 15%,比 400 nm 泵浦可见白光连续注入 OPA 系统只有 7% 的总转换效率有较大改善<sup>[4,5]</sup>。事实上,倾斜紫外脉冲泵浦可见光  $\bar{\Gamma}$  类匹配 BBO 晶体-OPG/OPA 系统的能量转换效率可以和群速度失配不太严重的 800 nm 泵浦红外连续注入 OPG/OPA<sup>[9]</sup> 系统的能量转换效率相比较。

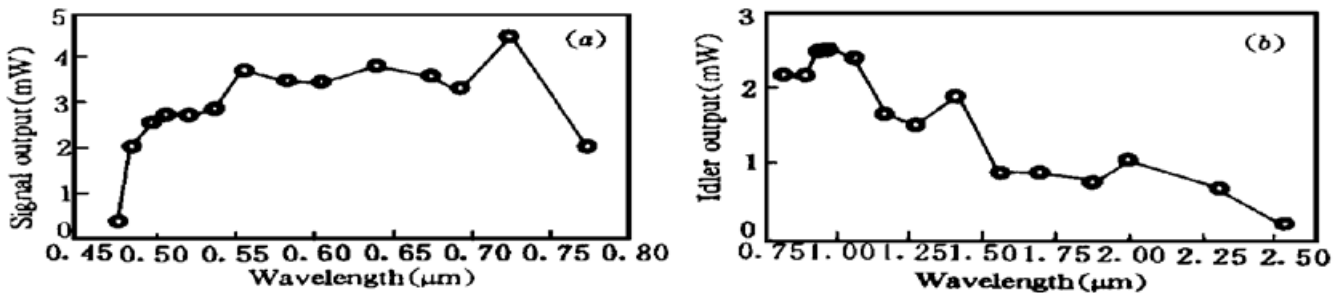


图 2 光参量放大器系统输出功率与波长的关系。(a) 信号光;(b) 空闲光

Fig. 2 The OPG/OPA average output power as a function of wavelength for (a) signal and (b) idler branches

自相关测量表明:在整个波长调谐范围,脉冲宽度为 100~ 170 fs。图 3 显示了信号脉冲波长为  $\lambda = 498 \text{ nm}$  的光谱和自相关曲线。自相关曲线可用一脉冲宽为 120 fs 的高斯函数所拟合(图 3(a)),图 3(b)的信号光谱是全半高宽为 7.4 nm 的高斯分布。信号波长从 470 nm 连续调谐到 760 nm 时输出光谱带宽慢慢增加,但输出波长接近简并点 800 nm 时,其输出光谱带宽迅速增加。理论和实验上已证实了  $\bar{\Gamma}$  类位相匹配 BBO 晶体 OPG/OPA 系统的输出带宽变化特点<sup>[10]</sup>。输出带宽的变化特性很类似于先前未倾斜脉冲泵浦  $\bar{\Gamma}$  类匹配 BBO 晶体 OPG/OPA 系统的结果<sup>[2]</sup>。

在最后一级放大器中采用了未倾斜泵浦脉冲放大轻微倾斜的种子脉冲,获得了较高的增益。而且输出脉冲宽度小于或等于紫外泵浦脉冲宽度。其中一个解释是未倾斜泵浦光束仅放

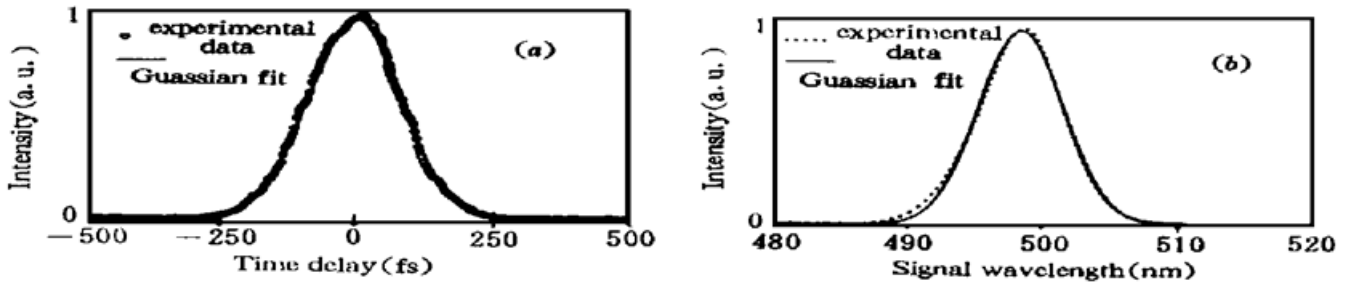


图 3 信号光(498 nm)光谱 (a) 和相应的自相关曲线 (b)。用高斯函数拟合(实线)光谱和自相关曲线得全半高宽分别为 7.4 nm 和 120 fs

Fig. 3 (a) The signal spectrum at 498 nm and (b) the corresponding autocorrelation curve. The spectrum and the autocorrelation curve are fitted with Gaussian functions (solid line) having a bandwidth of 7.4 nm (full width at half maximum) and a pulse width of 120 fs respectively

大经一级放大后强种子光束中时间与泵浦束重叠的那部分, 以及泵浦快速的增益衰减导致 OPA 输出脉冲宽度的减小<sup>[9, 11]</sup>。我们也采用了倾斜的泵浦脉冲加于这个放大级, 然而就转换效率而言, 与未倾斜脉冲泵浦相比较, 没有观察到改善, 其原因是这一级的 BBO 晶体仅 1 mm 厚, 已大于脉冲分离长度  $l_s = 0.7$  mm (对于 200 fs 泵浦脉冲而言)。这样对于倾斜和未倾斜脉冲泵浦, 其种子束的放大都大约相同。在这个未倾斜脉冲泵浦放大级中, 采用非线性晶体厚度近似等于  $l_s$  是很重要的, 否则晶体长度大于  $l_s$  时<sup>[12]</sup>, 非共线超荧光明显增大, 将较大地抑制共线放大信号。在最后一级放大中采用 2 或 3 mm 厚的 BBO 晶体, 则利用倾斜脉冲泵浦, 将获得较大的能量转换效率。对于倾斜脉冲传播一段距离后脉冲畸变及分离已有研究<sup>[13]</sup>, 我们观察到 OPA 信号输出传播几米距离后, 其空间模分布及自相关脉宽都没有较大变化。

### 3 结 论

总之, 采用倾斜泵浦脉冲新技术补偿光参量产生中的群速度失配, 使光参量放大系统的各级放大产生了较强的共线超荧光, 从而建立了倾斜紫外脉冲泵浦高效的  $\pi$ -类共线位相匹配 BBO 晶体可见光至红外光调谐 OPG/OPA 系统。信号和空闲光输出调谐范围从 470 nm 到 2.7  $\mu\text{m}$ , 脉冲宽度为 100~170 fs, 重复率为 1 kHz, 最大输出功率为 6.5 mW, 总能量转换效率大于 15%。实验结果显示了倾斜脉冲泵浦可见光至红外光 OPG/OPA 系统的性能就调谐范围及能量转换效率而言可以和连续光注入 OPA 系统相比较或更好, 而且方法简单、高效。如果采用较短的紫外泵浦脉冲或脉冲压缩技术, 该方案也能产生小于 100 fs 的 OPG/OPA 输出。

### 参 考 文 献

- 1 V. Petrov, F. Seifert, F. Noack. Visible optical parametric generator producing nearly bandwidth-limited femtosecond light pulses at 1 kHz repetition rate. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30) : 6988
- 2 H. Wang, K. S. Wong, D. Deng *et al.*. Kiloherzt femtosecond UV pumped visible BBO/LBO optical parametric generator and amplifier. *Appl. Opt.*, 1997, **36** : 1889
- 3 V. Krylov, A. Kalintsev, A. Rebane *et al.*. Noncollinear parametric generation in  $\text{LiIO}_3$  and  $\beta$ -barium borate by frequency-doubled femtosecond Ti:sapphire laser pulses. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2) : 151
- 4 M. K. Reed, M. K. Steiner-Shepard, M. S. Armas *et al.*. Microjoule-energy ultrafast optical parametric amplifiers. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **B12**(11) : 2229

- 5 S. R. Greenfield, M. R. Wasielewski. Near-transform-limited visible and near-IR femtosecond pulses from optical parametric amplification using type  $\bar{\beta}$ -barium borate. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12) : 1394
- 6 P. Di Trapani, A. Andreoni, C. Solcia *et al.*. Matching of group velocities in three-wave parametric interaction with femtosecond pulses and application to traveling-wave generators. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **B12**(11) : 2237
- 7 R. Danielius, A. Piskarskas, A. Stabinis *et al.*. Traveling-wave parametric generation of widely tunable, highly coherent femtosecond light pulses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, **B10**(11) : 2222
- 8 R. Danielius, A. Piskarskas, P. Di Trapani *et al.*. Matching of group velocities by spatial walk-off in collinear three-wave interaction with tilted pulses. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(13) : 973
- 9 M. Nisoli, S. De Silverstri, V. Magni *et al.*. Highly efficient parametric conversion of femtosecond Ti-sapphire laser pulses at 1 kHz. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23) : 1973
- 10 R. L. Bayer, R. L. Herbst. Parametric oscillation and mixing. in Y. R. Shen, ed., *Nonlinear Infrared Generation*, New York : Springer-Verlag, 1977, 81~ 137
- 11 A. Fendt, W. Kranitzky, A. Laubereau *et al.*. Efficient generation of tunable subpicosecond pulses in the infrared. *Opt. Commun.*, 1979, **28**(1) : 142
- 12 P. Di Trapani, A. Andreoni, G. P. Banfi *et al.*. Group-velocity self-matching of femtosecond pulses in noncollinear parametric generation. *Phys. Rev.*, 1995, **A51**(4) : 3164
- 13 O. E. Martinez. Pulse distortions in tilted pulse schemes for ultrashort pulses. *Opt. Commun.*, 1986, **59**(3) : 229

## Efficient Femtosecond Visible Collinear Optical Parametric Generator and Amplifier with Tilted Pulse Pumping

Qiu Zhiren<sup>a</sup> Wong Kamsing<sup>b</sup> Wang Hong<sup>b</sup> Yu Zhenxin<sup>a</sup> G. K. L. Wong<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*State Key Lab of Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275*

<sup>b</sup>*Department of Physics, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong*

**Abstract** Compensating for the group velocity mismatch in optical parametric interaction with tilted pumping pulse fronts, an efficient femtosecond collinear type- $\bar{\beta}$  phase matched  $\beta$ -barium borate optical parametric generator and amplifier pumped by a tilted second harmonic pulses of the Ti-sapphire regenerative amplifier is demonstrated. The signal and idler outputs are tunable from 470 nm to 2.7  $\mu\text{m}$  having pulse widths in the range of 100 to 170 fs at 1 kHz repetition rate. A maximum output energy of 6.5  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  and a total conversion efficiency of more than 15% are achieved.

**Key words** wave front tilted pulse pump, femtosecond laser pulse, optical parametric amplification