

同步泵浦飞秒非临界相匹配红外光 参量振荡器

毛宏伟

(福晶公司, 中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

A. 白川 T. 小林

(日本东京大学 理学部物理系)

提要 采用非临界相匹配方式,制成一台同步泵浦飞秒红外光参量振荡器。其输出波长的调谐是靠改变泵浦光掺钛蓝宝石激光器的输出波长而得以实现的,其调谐范围为 $1.08\sim 1.13\ \mu\text{m}$ 。在 $90\ \text{fs}$ 、 $1.1\ \text{W}$ 左右的掺钛蓝宝石激光器的泵浦下,同步泵浦光参量振荡器的输出功率为 $100\ \text{mW}$,而脉宽只有 $60\ \text{fs}$ 左右。

关键词 同步泵浦, 非临界相匹配, 群速匹配, 飞秒

1 引 言

飞秒同步泵浦光参量振荡是产生飞秒可调谐光脉冲最为有效的方法之一。它具有重复频率高,光束质量好,和输出涨落小等优点^[1~5]。

本文将报道同步泵浦非临界相匹配的飞秒光参量振荡器。在制做应用器件时,采用非临界相匹配方式,可获得高的转换效率,并使得腔体调整问题变得极为方便。

2 器件结构介绍与分析

整机系统如图 1 所示,它由三部份组成:(1) 额定功率为 $20\ \text{W}$ 的连续氩离子激光器;(2) 自锁模飞秒掺钛蓝宝石激光器;(3) 同步泵浦光参量振荡器。各部分之间是一种串级泵浦的关系。当氩离子激光器的输出模式调至较佳状态时,我们的自锁模掺钛蓝宝石激光器能在整整一天的工作时间内保持自锁模飞秒输出状态,在 $8.5\ \text{W}$ 的氩离子激光器的全谱线泵浦下,该激光器在 $0.79\ \mu\text{m}$ 附近可获得 $1.1\ \text{W}$ 的平均输出。该掺钛蓝宝石激光器的重复频率为 $82\ \text{MHz}$,其输出脉冲宽度因输出波长不同而异,但一般在 $100\ \text{fs}$ 左右。至于本实验中的同步泵浦光参量振荡器的腔体,则是由两个平面镜和两个曲率半径为 $10\ \text{cm}$ 的凹面镜构成的 Z 型折迭腔。该腔的长短臂的臂长分别为 $L_1 = 71.3\ \text{cm}$, $L_2 = 102.8\ \text{cm}$ 。为了补偿腔中的群速色散,我们在实验中引入了一对 SF10 玻璃棱镜。腔中用作非线性增益的 KTP 晶体被置于两凹面镜的

焦点处,由于采用非临界匹配方式,在目前这种聚焦方式下,既使在焦点处,光波波矢的角方向展开也完全落在相匹配所容许的角接受范围内。

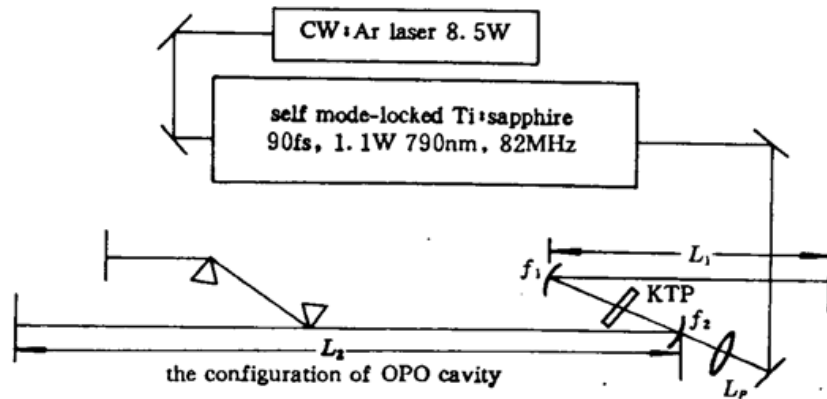


Fig. 1 System configuration of synchronously pumped NCPM fs OPO

实验中所选用的 KTP 晶体是沿 x 轴切割的, $\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$, 腔中相互作用的三波的相对偏振配置为: 泵浦光和信号光偏振相互平行, 都为 e 光沿晶体的 y 轴偏振, 而闲波光为 o 光沿晶体 z 轴偏振, 相应的相匹配条件由下式给出

$$N_y(p)\omega_p = N_y(s)\omega_s + N_z(i)\omega_i$$

其中 N_y, N_z 为折射率, 而 $\omega_p, \omega_s, \omega_i$ 分别为泵浦光、信号光和闲波光的频率。通过计算可得当泵浦波长改变时, 满足相匹配条件下, 相应的输出信号光波长。计算出的调谐曲线由图 2 给出。相应过程的有效非线性系数 $d_{eff} \sim 5.7 \text{ pm/V}$ 。

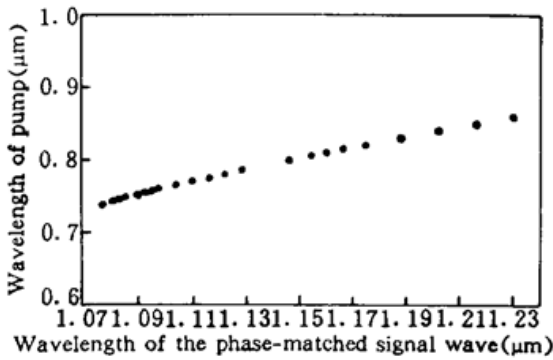


Fig. 2 The relationship between the wavelength of the phase-matched signal wave and the pumping wavelength

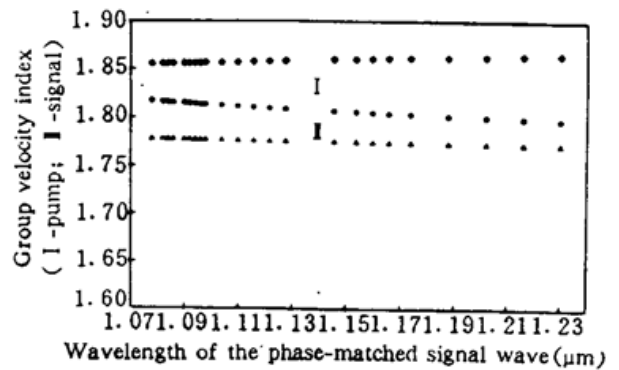


Fig. 3 The group velocity index of KTP crystal as a function of wavelength. Where diamonds correspond to the idle wave, dots to the pump wave, and trigons to the signal wave

对飞秒光脉冲的非线性相互作用,除了相位匹配外,群速匹配也至关重要。因此如同折射率一样,人们定义一个群速指数 M

$$M = c/v_g = N - \lambda dn/d\lambda$$

其中 c 为光在真空中光速, v_g 为群速度, n 为折射率, 而 λ 为光波波长。采用数值计算可得泵浦光、信号光、闲波光相应的群速指数, 如图 3 所示。从图中可见, 在长波段, 泵浦光与信号光的群速失配减小, 而泵浦光与闲波光的群速失配增大。在实际应用中, 人们往往无法找到合适的晶体, 使得位相和群速同时满足匹配。再者由于在非相位匹配方向上, 晶体的相干长度急剧变短,

因此人们在选晶体时首先保证满足相位匹配,然后选晶体的长度使得因群速失配导致的光脉冲在时域的离散不超过泵浦光的脉冲宽度。在 OPO 的调谐中心波段处泵浦光与 OPO 的信号光之间的群速失配为 117 fs/mm ($\omega_s = 765 \text{ nm}$, $\omega_s = 1104 \text{ nm}$),因此我们在实验中选用 1 mm 厚的 KTP 晶体。实验中所用晶体的双面镀有增透膜,在中心波段处,晶体的剩余反射率损耗约为 0.3%。

采用单向传递矩阵法^[6],我们可算得此腔的稳区范围为 $\Delta z = 2.6 \text{ mm}$,而光腰直径为 42.4 μm 。在实验中我们采用刀口法测得泵浦光的发散角为 0.8 mrad,为了使泵浦光的聚焦光斑与腔模匹配我们采用一个焦距为 4.5 cm 的透镜将泵浦光聚至 KTP 上,由于泵浦光是通过凹面镜进入晶体的,因此当计入凹面镜的负透镜效应后,整个组合聚焦系统的等效焦距约为 6 cm,这样最终在 KTP 晶体上的聚焦光斑约为 48 μm ,所以模式匹配还是很好的。

3 实验结果与讨论

由于同步泵浦 OPO 的输出特性在很大程度上依赖于泵浦源的特性。因此在实验上我们首先测试了掺钛蓝宝石激光器的输出功率、脉宽、光谱分布以便参照比较。图 4 给出的是掺钛蓝宝石激光器的输出功率随波长改变的曲线以及在相应波段处,由自相关曲线在高斯波型假设下拟出的脉冲宽度。图 5 给出的是在一些典型波段处,其输出脉冲的自相关曲线和相应的频谱分布。通过测试我们发觉,泵浦光在 750 nm 处平均输出功率达到最高,但此处器件的自锁模状态不稳,输出脉冲的宽度在整个测试波段内是最宽的,而且脉冲包络的两翼中出现卫星脉冲。当泵浦光的输出波长进一步向短波移动时,泵浦激光器的输出功率急聚下降,且很难出自锁模飞秒光脉冲。在下面我们将看到正是在短波方向泵浦源的性能指标急剧恶化,才相应地限制了同步泵浦 OPO 的输出波长向短波的推进。与此相反,当泵浦源的输出波长向长波移动时,输出功率下降是缓慢的,而自锁模状态逐渐变好,特别是 790 nm 处,输出功率能达 1.1 W,而脉宽只有 90 fs,在该波段自锁模状态非常稳定能维持 12 h 以上。

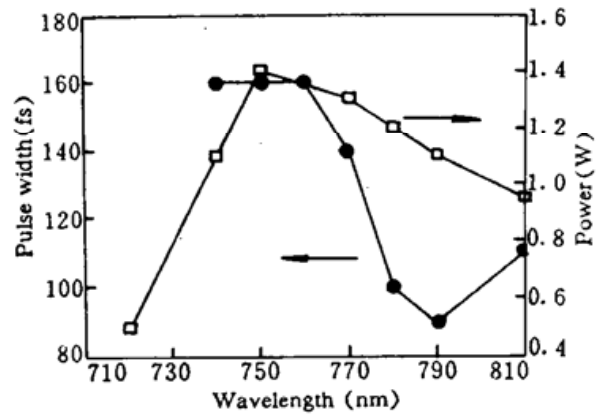


Fig. 4 The average output power and pulse duration of the Ti : sapphire laser versus output wavelength

采用一块在 1.1 μm 中心波段处透过率为 3% 的介质镜作为输出耦合镜时,在输出调谐范围内,我们的 OPO 的输出功率随波长变化的关系由图 6 给出。我们 OPO 的输出调谐完全是被泵浦光在两端输出性能指标急剧下降所限。从应用器件角度考虑采用非临界相匹配方式有着其独特的优点,但采用改变泵浦波长来调谐输出的确不太理想,最好是能采用温度或加电压等方式调谐。在这方面光谱物理公司最近开发出的 OPal 系统就是采用 LBO 晶体控温方式来实现飞秒同步泵浦 OPO 的输出调谐^[9]。该 OPO 适合于 1.2~2.6 μm 的长波段调谐,相比之下在短波段我们的同步泵浦非临界相匹配 KTP OPO 还是有着温度调谐 LBO OPO 所不能及的优点。当未插入色散补偿棱镜时,我们 OPO 输出的平均功率在 150 mW 以上,在 1.08 μm 处可高达 200 mW。但插入棱镜后,调整棱镜插入量找到脉宽最短位置处时,OPO 的输出功率只有

100 mW 左右。这种差别主要有两个原因,一是本实验中所用的 SF10 棱镜不是针对本实验特

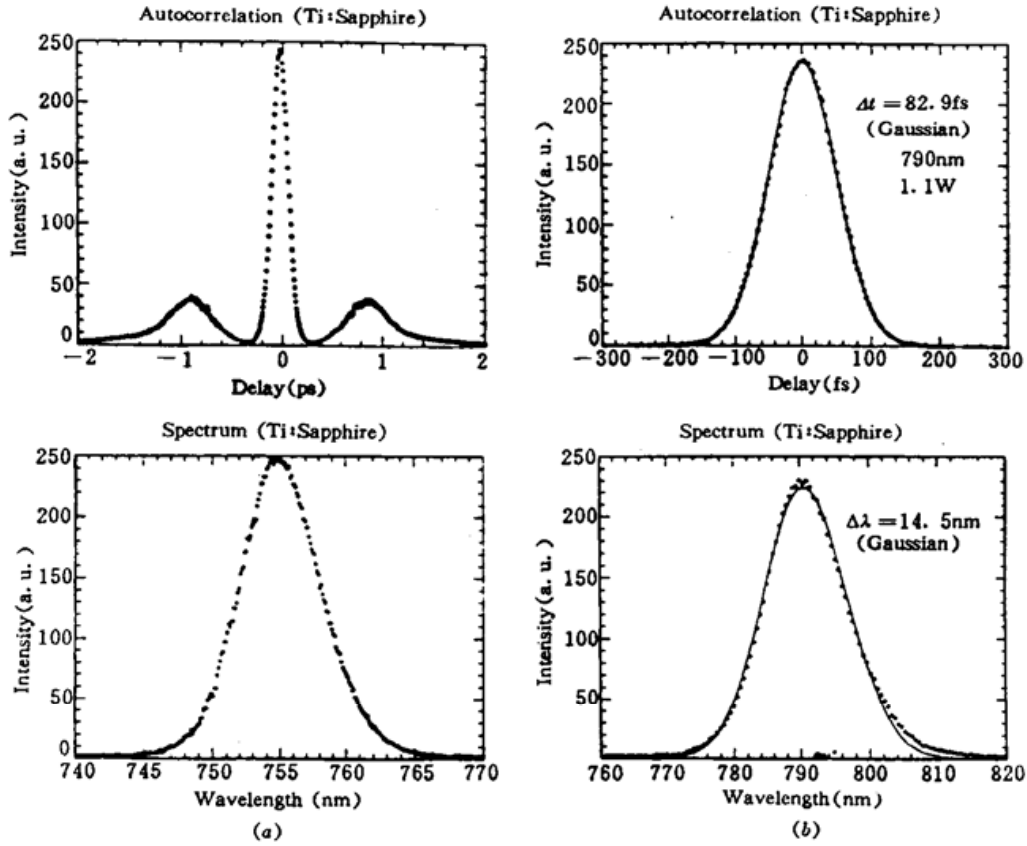


Fig. 5 Autocorrelation traces and corresponding spectra of the Ti : sapphire laser in some typical cases

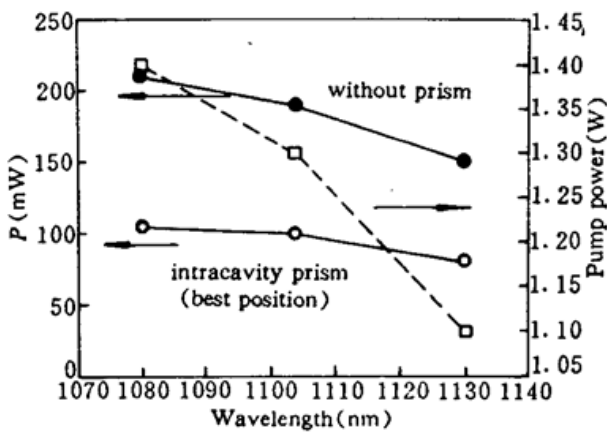


Fig. 6 The Output power of synchronously pumped OPO as a function of its output wavelength

别设计的,棱镜的顶角在 $1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 波段相对理想情况有一定的偏差,另一因素就是实验上调整的问题。因此光入射棱镜时对布儒斯特角有偏差,从而导致腔内棱镜的插入损耗过大。在实验中我们测量了几个典型波段处 OPO 的输出脉冲的自相关曲线和相应的频谱分布如图 7 所示。由图 7 可见在 $1.114 \mu\text{m}$ 处, $\Delta t * \Delta \nu = 0.338$ 表明其为达到傅里叶极限的双切正割脉冲,而在 $1.08 \mu\text{m}$ 处由于受泵浦光的影响,输出脉冲远未达转换极限且出现卫星脉冲。OPO 的输出脉冲波形是受多种因素影响的,在同步泵浦光参量振荡器中,脉冲的形成过程是一个动态自组织的过程。

输出脉冲的脉宽是由增益时间窗口的脉冲压缩效应,与腔体的有限带宽,三波相互作用时的群速失配和群速色散所导致的脉冲展宽效应之间的一种动态平衡的结果。实际上飞秒 OPO 中脉冲的形成过程远比此复杂,除了上述因素外还得考虑三阶非线性所导致的位相调制,以及串级二阶非线性效应对位相的影响。正是串级二阶非线性效应所致的含时非线性相移,使得 OPO

输出脉冲或多或少地畸变而带有啁啾的成份,这是靠调节腔长所无法补偿的。

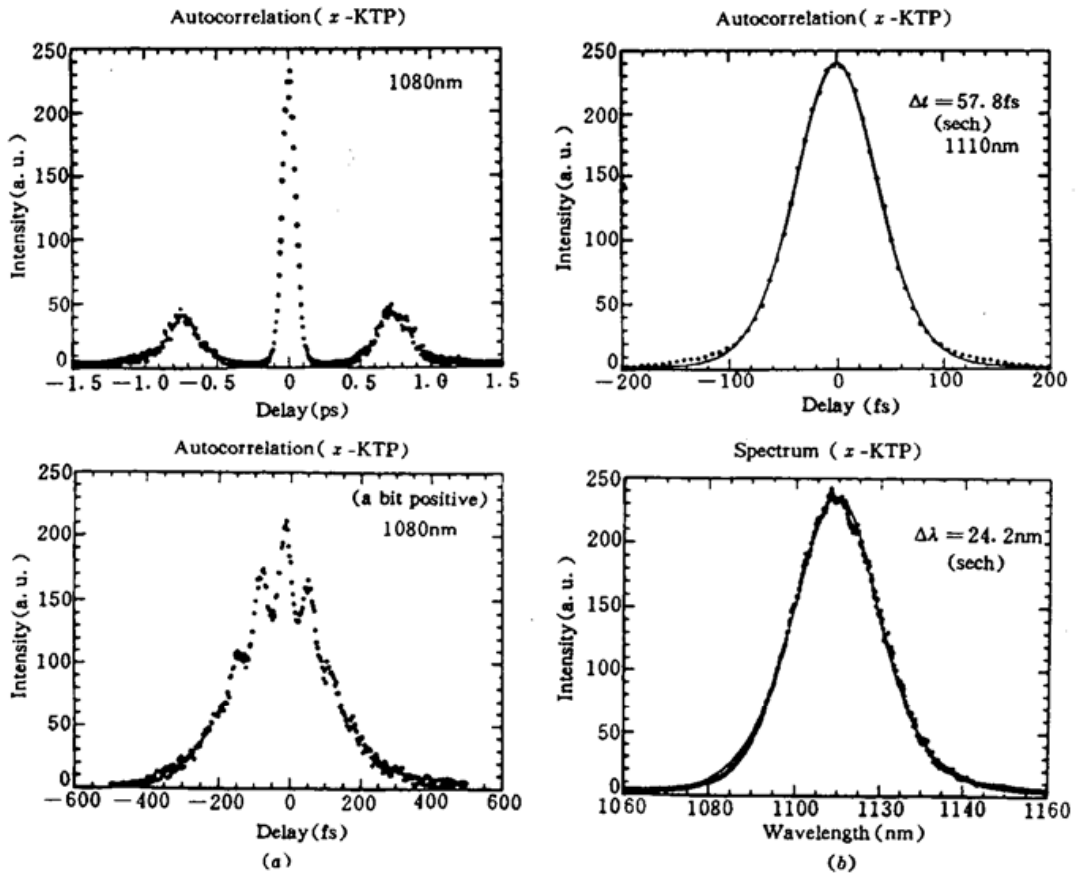


Fig. 7 Autocorrection traces and corresponding spectra of synchronously pumped OPO at some typical output wavelengths

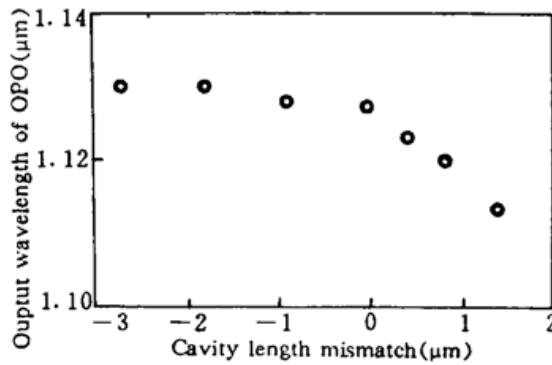


Fig. 8 Relationship between the output wavelength and the cavity length

最后我们还测量了腔长对输出波长的影响如图 8 所示。当腔长在有限的范围内变化时,同步泵浦 OPO 仍能维持振荡,只是输出波长发生飘移而已。这种现象也正是超短脉冲在腔中通过竞争自组织的结果,从而选择那些色散与非线性相移的调节能自动补偿腔长效应的脉冲获得了振荡输出。

参 考 文 献

- 1 D. C. Edelstein, E. S. Wachman, C. L. Tang. Broadly tunable high repetition rate femtosecond optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**: 1728~1730
- 2 G. Mak, Q. Fu, H. M. Van Driel. Externally pumped high repetition rate femtosecond infrared optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 542~544
- 3 Q. Fu, G. Mak, H. M. Van Driel. High-power 62 fs infrared optical parametric oscillator synchronously pumped by a 76 MHz Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**: 1006~1008
- 4 P. E. Powers, S. Ramakrishna, C. L. Tang *et al.*. Optical parametric oscillation with KTiOAsO_4 . *Opt. Lett.*, 1993, **18**: 1171~1173
- 5 T. J. Driscoll, G. M. Gale, F. Hache. Ti : Sapphire second-harmonic-pumped visible range femtosecond optical parametric oscillator. *Opt. Commun.*, 1994, **110**: 638~644
- 6 V. Magni, S. D. Silvestri, Alessandro Cybo-Ottone. On the stability, mode properties and misalignment sensitivity of fs dye laser resonators. *Opt. Commun.*, 1991, **82**: 137~142
- 7 Spectra-Physics Lasers Inc. Introducing Opal. Commercial Booklet, 1994

Synchronously Pumped fs NCPM Infrared Optical Parametric Oscillator

Mao Hongwei

(Fujian CASTECH Crystal Inc., Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Fuzhou 350002)

A. Shirakawa T. Kobayashi

(Physics Department, Faculty of Science, The University of Tokyo, Japan)

Abstract Using NCPM technique, we construct a synchronously pumped fs infrared OPO. Tuning of the output wavelength of this OPO is realized via changing the pumping wavelength, and its tuning range is 1.08~1.13 μm . Under a pump power of 1.1 W of a 90 fs Ti : sapphire laser, the average output power of the synchronously pumped OPO is 100 mW, and the pulse duration is about 60 fs.

Key words synchronously pumping, noncritical phase matching, group velocity matching, femtosecond