

角调谐飞秒同步泵浦 KTP 红外光 参量振荡器

毛宏伟

A. 白川 T. 小林

(中国科学院福建物构所 福晶公司, 福州 350002)

(日本东京大学理学部物理系)

提要 用平均输出功率为 1.1 W, 脉宽为 90 fs 的商用再生锁模 Ti:Sapphire 激光器作为泵浦源, 用 KTP 作为非线性光学介质, 制成一台同步泵浦飞秒光学参量振荡器。其输出调谐范围为 1.04 μm 至 1.26 μm , 平均输出功率在 100 mW 左右, 脉宽仅约 100 fs。

关键词 同步泵浦, 群速失配, 腔长匹配, 泵浦阈值

1 引言

在超快现象研究领域里, 人们一直希望得到脉宽窄、输出波长又可调谐的光源。为此前几年超快研究界流行一种做法是, 将 CPM 染料激光器的输出光经放大后, 聚焦至三阶非线性材料上以产生超连续白光^[1,2]。但是这种方法产生的光涨落大, 重复频率低, 且光束质量差, 因此不太实用。近几年由于科研的深入以及技术的发展, 出现了以 Ti:Sapphire 为代表的固体可调谐飞秒激光器^[3]。然而这些激光器的输出波段覆盖范围毕竟有限, 许多令人感兴趣的波段仍然无法从这些光源中直接获得。为此人们自然而然地想到了光学参量振荡器(OPO)。OPO 是人们熟知的波长扩展有效的方法之一, 但作为飞秒同步泵浦器件只是在 1989 年才开始有所报道^[4]。在此之后, 这方面的工作开始热了起来, 其中绝大部分工作都集中在 Ti:Sapphire 同步泵浦 KTP 的 OPO 上^[5~8]。本文将报道前述文献中未作报道的角调谐、输出波长在 1.05~1.26 μm 可调谐的 Ti:Sapphire 同步泵浦飞秒 KTP 的红外光参量振荡器(OPO)。

2 设计原理

OPO 由二阶非线性晶体加谐振腔构成。设计工作就是一方面选择合适的晶体作为非线性增益材料, 另一方面则是谐振腔的设计。

2.1 晶体设计

我们选 KTP 作为非线性增益材料。作为腔内元件, 在诸如有效非线性系数、群速失配等参

数指标相差不太大的情况下,应选取小角度调谐就能覆盖所需波段的晶体取向配置。现在泵浦光源是钛宝石激光器,泵浦波长为 790 nm,而 OPO 波长的设计调谐范围是 1~1.24 μm 。

根据文献[9,10]中报道的类似的计算方法,我们采用自编程序计算得出了在 0.79 μm 泵浦,信号光波长为 1.1 μm 的情况下,KTP 的相匹配轨迹。从器件的角度考虑,我们只关心主平面的情况,即 X-Z 和 Y-Z 面。通过计算我们得出的结论是,对于 1~1.24 μm 波段,在主平面上适合的相匹配方式是 $S(W_s) + F(W_i) - F(W_p)$,其中 S 指慢光,F 指快光,而 W_s, W_i 和 W_p 分别代表信号光、闲波光和泵浦光,相反地在另外一种 KTP 的二类相匹配方式中,匹配角变化太快,且无法在全波段满足相匹配。至于就 X-Z 和 Y-Z 平面比较而言,在一般情况下,改变相同的角度量,在 Y-Z 平面上获得的调谐范围较广,但在我们关心的波段 1~1.24 μm 处,两者相差不大。对于 0.79 μm 泵浦,而在 1~1.24 μm 调谐的情况,在 X-Z 平面上,相匹配角从 42.1° 调至 46.5°,相应地在 Y-Z 平面上,相匹配角从 33.5° 调至 37.8°,两种情况下,角度调谐量都只有 4° 左右,但是在 X-Z 平面上 KTP 的有效非线性系数却比 Y-Z 平面上所相对应的系数大 1.6 倍左右。因此我们选定 X-Z 切的晶体。

从全面衡量的角度考虑,我们还计算出其它一些影响 OPO 转换效率的有关参数。在 X-Z 平面上波长调谐的相匹配点上的 Walk-off 角、角接受特性以及群速失配的计算值由图 1 所示。

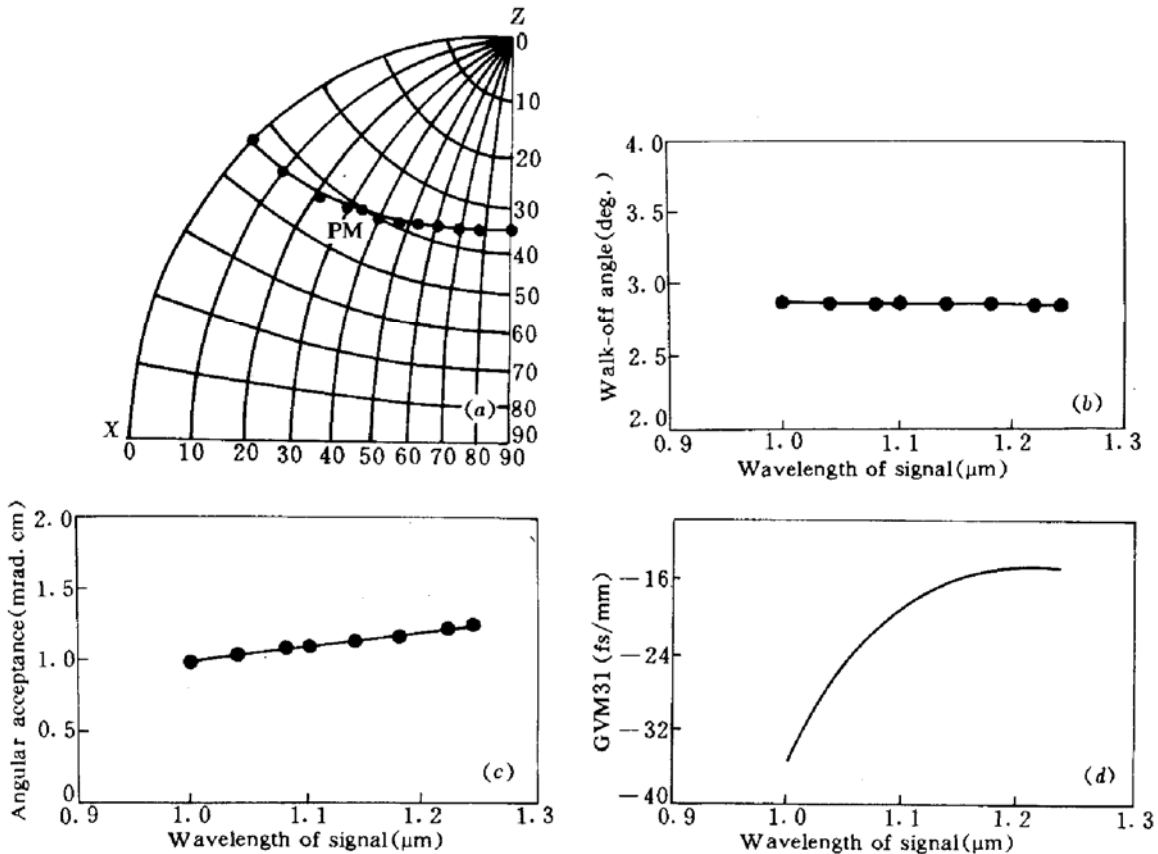


Fig. 1

(a) phase-matching locus of KTP when pumping wavelength is 0.79 μm , and signal wavelength is 1.1 μm ; (b~d) walk-off angle, group velocity mismatching between pump beam and signal wave, and angular acceptance at phase-matching points, as a function of the wavelength of the signal wave

2.2 腔体设计

OPO 是一个三波耦合的非线性过程,因此在接收角允许的范围,我们应设计腔体以便

腔模的光腰半径尽可能地小,这样就可以降低 OPO 的泵浦阈值并提高转换效率。

我们选用的腔是四镜线性折迭腔,如图 2 所示,并将 KTP 晶体置于两面镜之间的光腰处。本文将采用单向传递矩阵法来分析腔体^[11]。采用该理论计算我们可得

$$\text{稳区范围为: } \Delta Z = \min(|Z_A - Z_B|, |Z_A - Z_C|)$$

$$\text{光腰半径为: } W_{00}^2 = \lambda \Delta Z / 2\pi$$

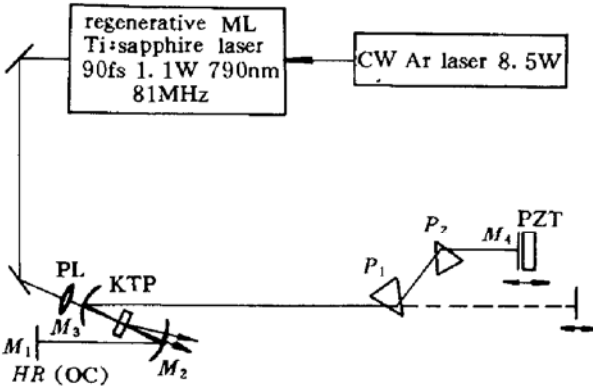


Fig. 2 Cavity configuration of a synchronously pumped fs KTP OPO. Where l_1 and l_2 are the lengths of the two folded arms respectively

其中 $Z_A = f_1 - l_2 * f_2 / (f_2 - l_2)$; $Z_B = -l_1 * f_1 / (f_1 - l_1) - l_2 * f_2 / (f_2 - l_2)$; $Z_C = f_1 + f_2$, l_1 和 l_2 分别为 Z 型腔的两臂长,而 f_1 和 f_2 为两凹面镜的焦距。在我们设计的腔中 $l_1 = 71.3 \text{ cm}$; $l_2 = 102.8 \text{ cm}$; $f_1 = f_2 = 5 \text{ cm}$, 因此腔的稳区范围 $\Delta Z = 2.6 \text{ mm}$, 即两凹面镜偏离共焦所容许的范围是 2.6 mm ; 而光腰半径为 $21.2 \mu\text{m}$ 。

对于 OPO,除了晶体中的群速色散可估算外,由于串级二阶非线性效应所引入的位相调制情况较复杂,况且没有腔镜的色散参数,所以在具体工作中很难精确计算出总体的群速色散。因此我们从尽量减少棱镜引入的 Cubicerror 角度考虑,选用 SF12 玻璃棱镜,实验中通过调整棱镜的插入量和间距来获得最佳群速色散补偿。

3 器件调试与参数测量

与一般的激光器相比,同步泵浦 OPO 的调整有两点需注意的,一是腔长与泵浦源匹配,另一是泵浦光的偏振与晶体取向的配置要正确,以保证三波耦合过程满足相匹配。至于腔长匹配,我们的做法是用宽带示波器看泵浦源的脉冲序列,较精确地定出泵浦光脉冲的重复频率后,粗略地排布腔以保证腔长匹配点落在装有后腔镜的平移台的扫程范围内。至于腔体准直,我们采用泵浦光通过非相匹配过程所产生的倍频蓝光来准直。由于 KTP 晶体中的 Walk-off 影响,当粗略对好腔后,应精调腔镜作适当补偿。一旦 OPO 振荡后,精调各腔镜以及它们之间的间距,我们就可获得最佳功率输出。当未插入棱镜的腔体调整后,我们可将色散补偿棱镜半插入,用最小偏向法调整棱镜,从而完成带棱镜补偿色散的腔体调整。

我们测量了带棱镜和不带棱镜的两种情况下 OPO 的输出特性。我们首先测得的是不插入棱镜的情况下,同步泵浦 OPO 输出的性能指标。图 3 是在 OPO 输出调谐范围内,信号光的输出频谱分布。该曲线表明在泵浦波长为 790 nm 情况下,未插入棱镜时,通过转动晶体我们可获得从 $1.04 \sim 1.26 \mu\text{m}$ 波段的调谐输出。由于腔内光场的峰值功率极高,所以许多不满足相匹配的三波耦合过程得以发生,以致于在调整过程中可观察到多彩的可见光斑。图 4 所示的是用 $0.79 \mu\text{m}$ 泵浦输出 $1.1 \mu\text{m}$ 光时,泵浦光与信号光和频所产生的蓝光,信号光倍频所产生的绿光,以及闲波与泵浦和频所产生的红光的频谱分布。

图 5 是未插入棱镜时,在信号光波长分别为 1.12 和 $1.24 \mu\text{m}$ 两个波长的情况下,脉冲自相关以及频谱分布曲线。在测试中我们发觉脉宽与波长有很大的关系。在输出波长为 $1.24 \mu\text{m}$ 时,无需腔内插入群速色散补偿棱镜,我们就可获得 91 fs 的光脉冲。通过分析我们认为这

是由于在长波边,多层介质腔镜能够提供负群速色散,来补偿光在晶体中传播时的群速色散,以及非线性过程所引入的啁啾的缘故。

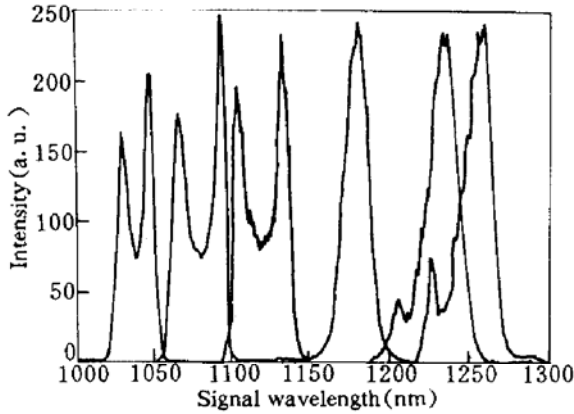


Fig. 3 Output spectral distribution of the angular tuning KTP OPO synchronously pumped at 0.79 μm

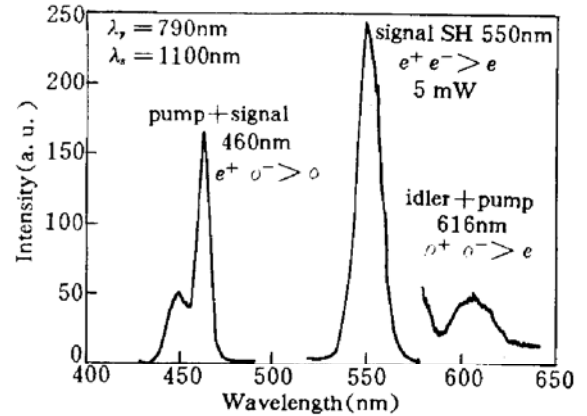


Fig. 4 Spectra of some visible light pulses generated via the intracavity nonphase-matching three wave mixing process

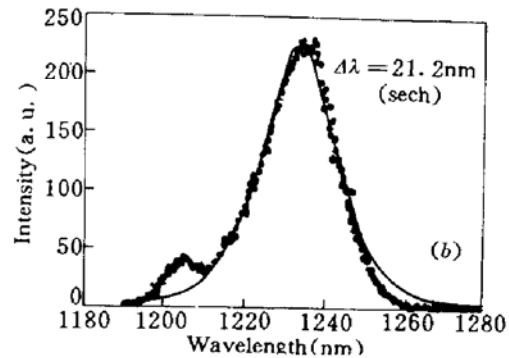
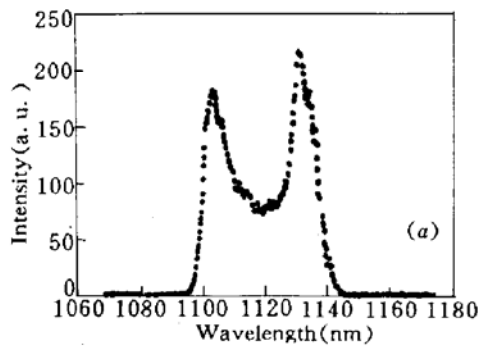
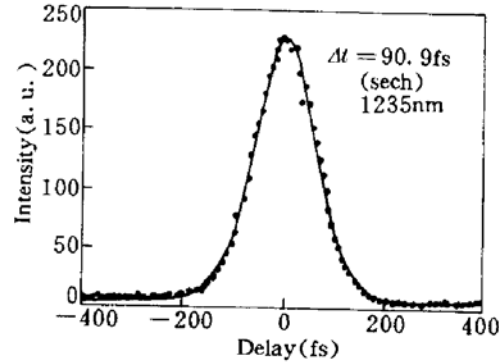
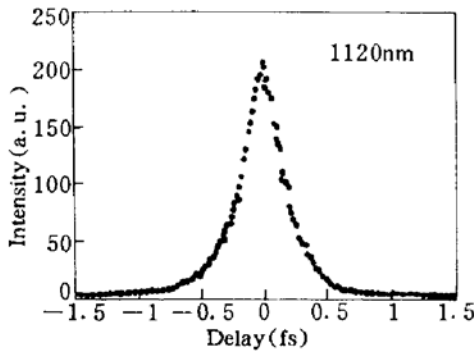


Fig. 5 Autocorrelation traces and spectra of the 1.12 and 1.24 μm signal waves, when the cavity dispersion has not been compensated

在图 6 中,上半部实心圆点给出的是未插入棱镜时,OPO 平均输出功率随输出波长变化的曲线。由图可见在输出的中心波段区,我们可获得近 120 mW 的输出。如有可能多试几块输出耦合镜找到不同波段的最佳耦合的话,OPO 的输出功率还有望进一步提高。

在测试完上述曲线后,我们将棱镜插入,并调整腔以获得最佳功率输出。同时用光栅将输出光的光谱展开,通过调节棱镜插入量,找出光谱展至最宽处,然后细调棱镜插入量反复测量脉宽,直至找到最佳位置(脉宽最短),同时记录下自相关曲线以及相应的光谱分布。作为一个典型代表例,图 7 给出了在输出波长为 1.12 μm 时,棱镜插入量处最佳位置的情况下,脉冲的自相关曲线以及输出的光谱分布。

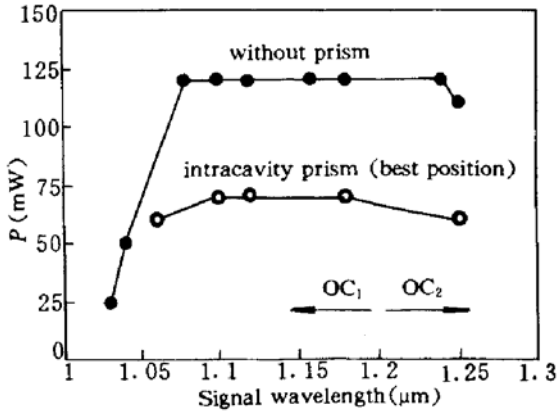


Fig. 6 The average output power of the synchronously pumped OPO versus its output wavelength for two different cases (with intracavity prisms and without intracavity prisms). In the Fig. dots correspond to the case without intracavity prisms, and circles correspond to the case when intracavity dispersion is completely compensated. OC1 and OC2 are the 3% and 5% output couplers respectively

图 8 给出的是棱镜处最佳位置的情况下, OPO 的输出调谐曲线。在实验中, 通过仔细调整棱镜插入量, 引入适当的负群速度色散, 在整个调谐范围内 OPO 输出的脉冲宽度皆短于 80 fs。

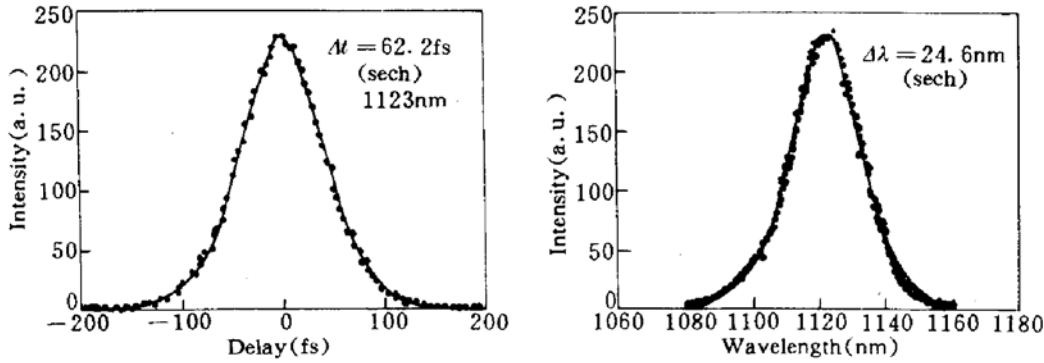


Fig. 7 Autocorrelation trace and corresponding spectrum of the 1.12 μm signal wave, when the cavity dispersion is best compensated

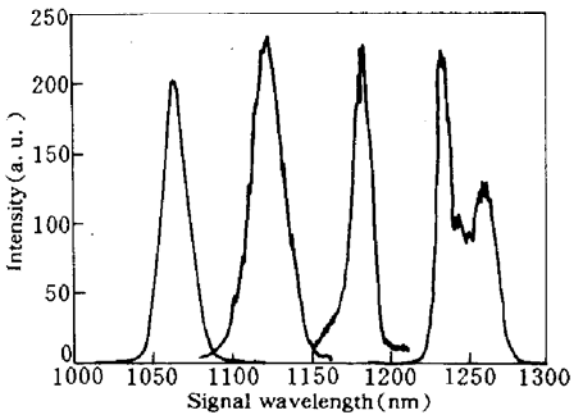


Fig. 8 Output tuning spectrum of OPO, when its intracavity dispersion is best compensated

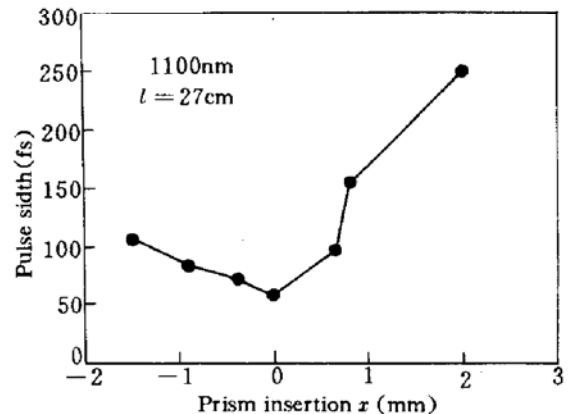


Fig. 9 Pulse width of the 1.1 μm signal wave versus the inserting amount of the intracavity prism

另外我们还研究了棱镜插入量对输出脉宽的影响, 我们定义脉冲宽度最短处的棱镜插入量为零。进一步减少棱镜插入时则棱镜的插入量为负, 当棱镜对引入过量的负色散使整个腔处负色散区时, 输出脉宽缓慢变宽, 同时输出稳定性变差, 相反如增加棱镜的插入量, 则输出脉宽急剧变宽, 但输出却比较稳定。图 9 给出了输出脉宽随棱镜插入量改变而变化的关系。

最后我们测量了输出的信号光中心波长随腔长变化而飘移的情况。图 10 是当输出中心波长为 1.1 μm 时, 腔长变化而导致输出波长改变的曲线。这是同步泵浦激光器所具有的特性,

利用此特性我们可用电子负反馈伺服系统控制同步泵浦 OPO 腔长以获得稳定输出。

4 结束语

我们已制成一台实用的同步泵浦飞秒参量振荡器,在 1.1 W 泵浦下,获得了在近红外区可调谐的,输出功率近 100mW 的飞秒脉冲光源。在整个调谐区输出脉宽可短于 80 fs。通过观察我们发觉当光学平台远离振动源的情况下,即使没加腔长控制系统,OPO 能保持稳定输出达 3 h 左右。一旦使用者熟悉了腔体调整后,人们可很方便地改变输出波长。总之它已是一台较实用的飞秒光源,其基波可用于半导体材料中的超快过程研究。

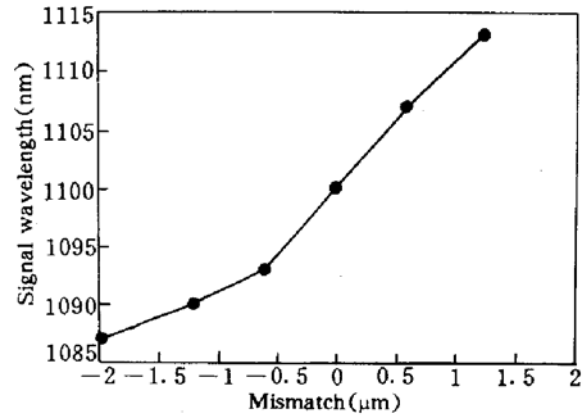


Fig. 10 Relationship between the output wavelength and the cavity length

参 考 文 献

- 1 H. Glowina, J. Misewich, P. P. Sorokin. Subpicosecond time-resolved infrared spectral photography. *Opt. Lett.*, 1987, 12:19
- 2 W. H. Knox. Generation and Kilohertz-rate amplification of fs optical pulse around 800 nm. *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, B4:1771
- 3 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60 fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, 42:16
- 4 D. C. Edelstein, E. S. Wachman, C. L. Tang. Broadly tunable high repetition rate fs OPO. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54:18
- 5 R. J. Ellingson, C. L. Tang. High-power, high-repetition-rate fs pulse tunable in visible. *Opt. Lett.*, 1993, 18(6):438~440
- 6 J. M. Dudley, D. T. Reid, M. Ebrahimzaden *et al.*. Characteristics of a noncritically phasematched Ti:sapphire pumped femtosecond optical parametric oscillator. *Opt. Commun.*, 1994, 104:419
- 7 P. E. Powers, R. J. Ellingson, W. S. Pelouch *et al.*. Advance in synchronously pumped fs OPO. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, B10:11
- 8 C. L. Tang. Optical parametric generators from the nanosecond to the femtosecond time domain. IQEC' 94 Technical Digest QTu11, 1994
- 9 J. Yao, T. S. Fahlen. Calculations of optimum phase match parameters for the biaxial crystal KTP. *J. Appl. Phys.*, 1984, 55(1):65
- 10 J. Yao, W. Shen, W. Shi. Accurate calculation of the optimum phase-matching parameters in three-wave interactions with biaxial nonlinear-optical crystals. *J. Opt. Soc. Am.*, 1992, B9(6):891
- 11 V. Magni, S. D. Silvestri, Alessandro Cybo-Ottone. On the stability mode properties and misalignment sensitivity of fs dye laser. *Opt. Commun.*, 1991, 82(1,2):137

Angular Tuning fs Synchronously Pumped KTP IR OPO

Mao Hongwei

(Fujian Institute of Research on the Structure of Mater, Fuzhou 350002)

A. Shirakawa T. Kobayashi

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

Abstract Using a 1.1 W, 90 fs commercial regenerated mode locked Ti:Sapphire laser as the pump source, and KTP as the nonlinear gain medium, we construct a synchronously pumped fs OPO. Its tuning range is 1.04~1.26 μm , the average output power is about 100 mW, and the pulse width is about 100 fs.

Key words synchronous pumping, group velocity mismatching, cavity length matching, pumping threshold

掺 Nd^{3+} 和染料聚合物光纤及其荧光特性研究

聚合物光纤具有价格低、容易制作和处理等优点,已应用于光通讯中的局域网、数据连接、汽车制造业、医疗和传感等领域。最近我们成功地研制出掺 Nd^{3+} 和掺若丹明染料两类有源聚合物光纤,并进行了荧光特性研究。

掺 Nd^{3+} 和若丹明聚合物光纤直径 650 μm ,掺 Nd^{3+} 浓度分别为 70 ppm 和 700 ppm;掺若丹明浓度为 17 ppm,采用 Clark-MXR 公司生产的 ORC-1000 型倍频 Nd:YAG 连续波激光器作泵浦源,额定功率 1 W,波长 532 nm 的激光束由 10 \times 的显微物镜耦合进聚合物光纤,用滤波片除去光纤输出端残余的泵浦光,由光谱仪、光电倍增管、锁相放大器、微机组成的系统进行发射谱分析。

获得掺 Nd^{3+} 聚合物光纤荧光中心波长为 585 nm,光谱范围 550~700 nm,与我们用 532 nm 波长泵浦掺 Nd^{3+} 石英光纤和掺 Nd^{3+} 双包层石英光纤位于 580 nm 附近的荧光峰相比,光谱范围略有展宽,这主要是由于掺 Nd^{3+} 离子与有机配位体强烈的相互作用。随着光纤长度的改变,掺 Nd^{3+} 聚合物光纤的荧光中心波长不变,从 15 cm 长的掺 Nd^{3+} 聚合物光纤获得 60 μW 的荧光。由于若丹明染料分子能带宽、泵浦吸收峰与荧光峰有较大的重叠。当泵浦功率一定时,掺若丹明 B 聚合物光纤长度从 52 cm 逐步截断到 8 cm,荧光峰值波长从 647 nm 蓝移至 587 nm。用 15 cm 掺若丹明聚合物光纤获得 5.8 μW 的荧光。

实验表明,与染料掺杂聚合物光纤相比较,掺稀土离子聚合物光纤具有更强的光化学和热稳定性,发光中心波长不随光纤长度变化,如果完善有源聚合物光纤包层工艺和改进光纤特性,两类掺杂聚合物有源光纤均可望研制成宽带的聚合物光纤放大器和可见光波段的调谐激光器。

有源聚合物光纤荧光实验是在香港科技大学进行的。

(明 海* A. R. Fedotov** 张其锦* X. Xiao** M. M. T. Loy**

* 中国科学技术大学 ** 香港科技大学 1995 年 10 月 16 日收稿)