

与 794 nm 飞秒激光精确同步的无直流背底的 1064 nm 脉冲光的产生^{*}

翟 惠 徐世祥 许智雄 蔡 华 杨 旋 吴 昆 曾和平[†]

(华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

(2006 年 7 月 27 日收到 2006 年 8 月 28 日收到修改稿)

基于非共线光参量放大(NOPA), 以宽带 794 nm 飞秒激光的倍频光为抽运光, 以连续的 He-Ne 激光为信号光, 产生了与宽带 794 nm 飞秒激光精确同步的无直流背底的 1064 nm 的脉冲光。实验结果显示该 1064 nm 的光脉冲可作为光参量啁啾脉冲放大系统的抽运激光链的种子光, 从而实现用全光学方法实现 OPCPA 系统抽运光和信号光的精确同步。还将非共线光参量放大器置于经特殊设计的 He-Ne 激光腔内, 也同样成功得到了无直流背底的 1064 nm 的光脉冲。经一次光参量放大后所得到的 1064 nm 光的光谱和空间啁啾特性与非共线光参量放大器置于 He-Ne 激光腔外时得到的 1064 nm 的光脉冲相同, 而其单脉冲能量约为腔外 NOPA 的 10 倍。

关键词: 非线性光参量放大, 光参量啁啾脉冲放大, 时间同步

PACC: 6180B, 4265, 4265K

1. 引言

自从激光诞生以来, 追求更高功率和更短的光脉冲宽度一直是科学家们孜孜以求的研究目标。目前激光脉冲的宽度已经到了光周期量级^[1], 噪啾脉冲放大技术(CPA)的出现使当今的高功率迈上了拍瓦(PW)的台阶^[2]。然而, 介于增益线宽的限制, CPA 技术不能够拓展应用到光周期量级的超短脉冲放大中。光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术因其超宽的增益带宽成为代替 CPA 技术产生超强超短激光的一种可行的最新技术^[3-10]。除上述优势外, 与 CPA 技术比较 OPCPA 还具有高增益、高信噪比以及高光束质量等优点。在光周期量级的 OPCPA 系统中, 其宽带的信号光来自于中心波长为 800 nm 附近的 Ti:Sappire 激光器以充分利用 Ti:Sappire 超宽的增益带宽^[8], 而抽运光则选用波长在 1064 nm/1053 nm 的掺钕介质激光系统的倍频光, 以利用掺钕介质激光可获得较高的单脉冲能量优势。为了获得 OPCPA 系统的稳定输出, 抽运光和信号光间的时间同步是非常重要的。如果抽运光和信号光来自两个独立的激光器系统, 利用传统的电子控制技术, 同步精度为 100

ps 左右^[11]。将锁腔和精密电子控制技术相结合, 目前已能将两独立激光器输出脉冲间的时间抖动控制在 2 ps 左右^[12]。对于几个皮秒的抽运脉冲, 该技术可将抽运光和信号光间的时间抖动降到 100 fs^[13]。其缺陷是难以长时间地维持高精度的脉冲同步。于是科学家们提出了用全光学方法实现时间同步方案^[13], 其核心是设法使抽运光和信号光来自相同的激光种子源。Leng 及其合作者在中心波长为 1064 nm 的 OPCPA 系统中实现了这种想法^[14]。为了能将此设计概念用于中心波长在 800 nm 附近的 OPCPA 激光系统, Teisset 等提出利用高非线性光子晶体光纤(PCF) 将部分宽带 800 nm 附近的种子光能量转移到了 1064 nm 附近^[15]。该方法对入射光强度的波动较为敏感和对调整要求较高。另外已见报道的有效的方法是用中心波长为 800 nm 附近的 Ti:Sappire 激光器的倍频光为抽运脉冲, 以连续 1064 nm 激光为信号光, 通过两级非共线光参量放大得到与 800 nm 附近宽带脉冲同步的 1064 nm 脉冲, 从而实现 OPCPA 系统中抽运光和信号光的时间同步^[16]。

本文以氦氖激光器产生的 632.8 nm 的连续光作为信号光, 以 800 nm 附近的激光器的倍频光为抽运光, 利用一级非共线光参量放大(NOPA), 直接实

* 上海市科委重点项目(批准号 04dz14001)国家自然科学基金(批准号: 10525416, 60478011, 10234030)教育部重点基金(批准号: 04193)和上海市自然科学基金(批准号 05ZR14044)资助的课题。

† 通信作者, E-mail: hlpzeng@phy.ecnu.edu.cn。

现了与 Ti:Sappire 飞秒激光同步的无直流背底的 1064 nm 脉冲光。本文对参量晶体放置在 He-Ne 激光器的腔内腔外两种情况进行了实验研究。

2. 实验装置

为了得到 1064 nm 的光脉冲, 根据参量放大过程中的能量守恒原理, 对于 632.8 nm 的信号光, 其抽运脉冲波长应在 396.9 nm 处。为此在本实验中, 首先将 1 kHz 的 Ti:Sappire 喷射脉冲再生放大激光系统(spitfire, spectra-physics)的中心波长调整为 794 nm 左右。此时该系统的输出脉冲能量约为 0.6 mJ、光谱宽度为 26 nm、脉冲宽度约 45 fs。如图 1 所示, 该系统的输出光脉冲先经过一片半波片和一由凹面反射镜 M_1 和凹透镜 L_1 组成的望远镜系统后, 光束直径从 8 mm 缩到了 2.5 mm 左右。这里半波片是为了调整光束的偏振方向。然后飞秒光脉冲通过一厚度为 0.2 mm 的一类相位匹配的 β -BBO 倍频晶体产生中心波长在 397 nm 附近的光脉冲。通过调节再生放大器中光栅压缩器以补偿由半波片和凹透镜引入的色散来提高 BBO 晶体的倍频效率。经测量二次谐波平均功率为 210 mW, 其中心波长为 397 nm, 带宽为 6 nm, 相应的倍频效率为 35%。图中 DM 是对中心波长在 400 nm 附近光宽带高反同时对中心波长在 800 nm 附近光宽带增透的介质镜。397 nm 的带宽光脉冲作为非共线参量放大的抽运光被 DM 反射和适当的聚焦后入射到另一块 31.5°切割的一类相位匹配的 β -BBO 参量晶体上。这里连续的 632.8 nm 信号光由一外腔式的单横模 He-Ne 激光器提供, 其输出功率约 22 mW。该光束经焦距为 250 mm 的凸透镜 L_2 后聚焦到参量晶体上, 与 397 nm 的宽带光脉冲在 β -BBO 参量晶体上重合, 发生非线性光参量放大, 产生了与 794 nm 飞秒激光同步的无直流背底的 1064 nm 光脉冲。

为进一步放大 1064 nm 光脉冲, 除用一凹面反射镜 M_6 将从 β -BBO 参量晶体发出的 1064 nm 光脉冲成像反射回 β -BBO 晶体外, 剩余的抽运光也被一平面高反镜原路反射回 β -BBO 晶体, 于是构成第二级参量放大器。

3. 实验结果及其讨论

在本实验中, 397 nm 的抽运光为水平偏振, 而连

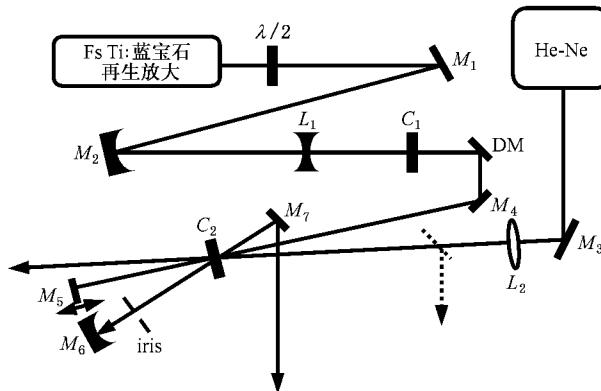


图 1 NOPA 发生在 He-Ne 腔外的实验装置图。 $\lambda/2$:800 nm 的二分之一波片; M_1 : 30° 高反 800 nm 的平面镜; M_2 : 30° 高反 800 nm 的凹面镜; M_3 : 45° 高反 632.8 nm 的平面镜; M_4 : 45° 高反 400 nm 的平面镜; M_5 : 30° 高反 400 nm 的平面镜; M_6 : 30° 高反 1064 nm 的凹面镜; M_7 : 45° 高反 1064 nm 的平面镜; DM: 45° 高反 400 nm, 增透 800 nm 的平面镜; L_1 , L_2 分别为凹透镜和凸透镜; C_1 , C_2 都为 β -BBO 晶体。

续的 632.8 nm 的信号光为垂直偏振。经过优化调整后, 发现当抽运光在空气中的入射角为 13° 、抽运光和信号光在空气中的夹角大约为 10° 时, 闲频光较强, 此时闲频光和抽运光之间的夹角大约为 12° 。

首先我们在参量过程之前测量了抽运光的光谱。如图 2(a)所示, 抽运光的中心波长在 397 nm 附近, 带宽为 9.5 nm。图 2(b)是经一级 NOPA 后测得的信号光的频谱, 可见信号光的带宽很窄, 与从 He-Ne 激光器直接输出的激光没有区别。这是因为经 NOPA 后, 尽管信号光和闲频光都被放大, 但由于 He-Ne 光与 β -BBO 作用时间特别短(百飞秒量级), 而抽运脉冲时间间隔为 1 ms, 也就是说, 632.8 nm 激光被放大部分和未放大部分的时间比小于为 5×10^{-10} 量级($\sim 5 \times 10^{-13}/10^{-3}$)。按照我们的理论估算, 这儿参量增益约为 8×10^5 , 所以一级放大后信号光每秒内脉冲光和连续背底能量比约 $4 \times 10^{-4}:1$, 所以所测到的光谱成分绝大部分仍然是连续光, 其光谱有明显连续光光谱特性。图 2(c)是经一级 NOPA 后闲频光的光谱, 它的中心波长在 1064 nm 处, 其光谱相当的宽, 约为 15 nm, 显示出明显的脉冲光谱特性。图 2(d)是经第二级 NOPA 后测量得到的 632.8 nm 激光光谱。该光谱图中心有一高而窄的尖峰, 表明连续背底仍然占有一定的能量比例。与图 2(b)光谱比较, 该图中光谱底部明显加宽, 表明脉冲能量和连续背底能量比较不再是可忽略的了。理论估算第二级 NOPA 的增益约 4×10^3 , 所以经两级放大后, 每秒内

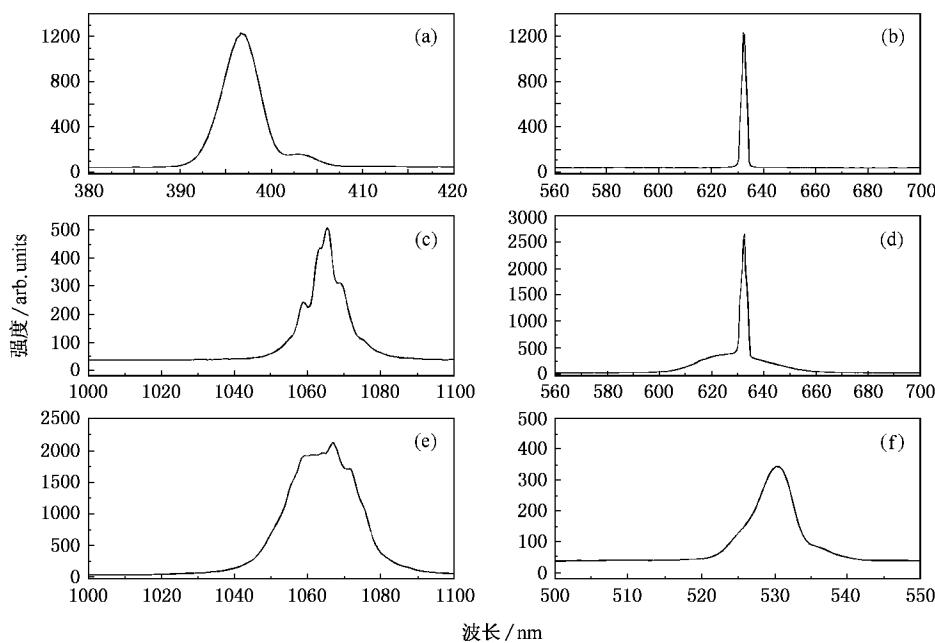


图2 NOPA发生在He-Ne腔外时测得的光谱图 (a)为抽运光的光谱 (b)(c)分别为经一级光参量放大后测得信号光和闲频光的光谱 (d)(e)(f)分别为经二级光参量放大后测得信号光、闲频光以及闲频光的倍频光的光谱

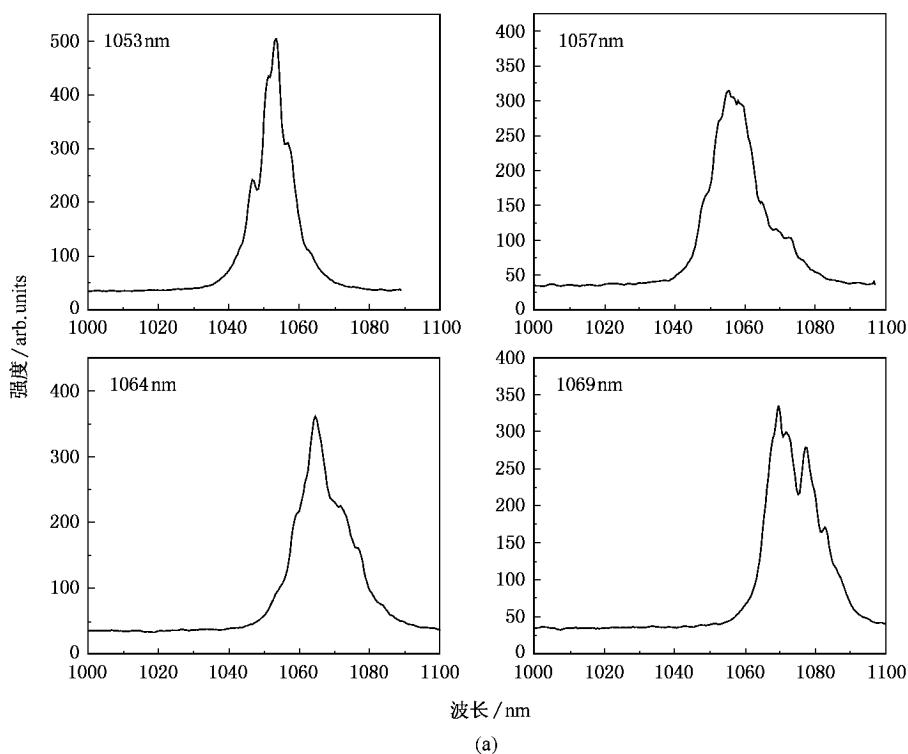
信号光的光脉冲和连续背底能量比约1.6:1.这个值说明光谱图中应该能显示出明显的脉冲光谱特性.经第二级NOPA,1064 nm的脉冲光被进一步放大,同时可观察到它的倍频光(中心波长在532 nm左右).图2(e)(f)分别表示经二级NOPA后测得的闲频光及其倍频光的光谱.图2(e)中光谱宽度约14 nm略宽于图2(c)中的光谱宽度.532 nm的光脉冲出现说明此时1064 nm的光脉冲具有高光强.用自相关仪测得1064 nm的光脉冲时间宽度为265 fs,此时1 kHz的1064 nm的光脉冲串的平均功率为2.5 mW对应的脉冲能量为2.5 μ J.按照两级参量放大总增益约 10^9 估算^[17],1064 nm的光脉冲的单脉冲能量约2.8 μ J,所以测量数据和理论估算基本相符.

实验中闲频光具有椭圆形的空间分布.图3(a)是在不同的横向位置(图3(b)中的B,C,D和E位置)所测得闲频光的光谱,它们的中心波长分别为1053 nm,1059 nm,1064 nm和1069 nm.D和E,C和D,B和C之间的距离大约为2.5 mm,D和O之间的距离为100 cm.显然,闲频光的空间强度分布存在空间啁啾性,这主要是因为在光参量放大过程中抽运光是宽带的,而信号光是窄带的,于是相应的闲频光也是宽带的.相位匹配要求不同频率分量的闲频光对应不同的传输方向.根据测量结果可知,闲频光的空间啁啾约为 5.0×10^{-4} rad/nm.在这里信号光在参

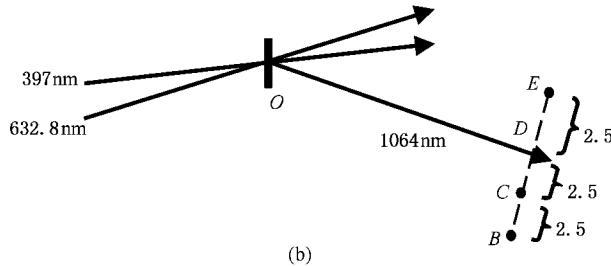
量晶体上的聚焦光斑大小约为0.15 mm.假定闲频光在此处的束腰半径与信号光的一样,可估算出闲频光的发散角约为 2.2×10^{-3} rad.在掺Nd介质的激光放大链中,激光的增益线宽一般均小于1 nm,而光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)系统中也不需要宽带增益,所以闲频光经掺Nd介质的激光放大链后由空间啁啾引起的发散角将大大小于高斯光束传输的衍射角.因此,这些1064 nm的闲频光脉冲有足够的光束质量充当OPCPA系统中抽运激光放大链的种子光.由于它们与宽带794 nm飞秒激光可实现被动式的精确同步(无需电子同步控制系统),所以本文提供了一种用全光手段解决OPCPA系统中抽运光和信号光时间同步的方法.

4. He-Ne腔内 NOPA 实验及其讨论

用He-Ne连续激光作为信号光的好处是它的高光束质量和He-Ne激光器的廉价.另外与用连续1064 nm激光作为信号光技术方案比较^[15],仅需一级参量放大就可得到无直流背底的1064 nm的光脉冲,无须任何同步装置.现有的单横模He-Ne激光器输出功率一般只有几十毫瓦,为了克服单横模He-Ne激光器的功率限制,从而有效地控制参量荧光并提高产生1064 nm的闲频光脉冲的功率,我们将

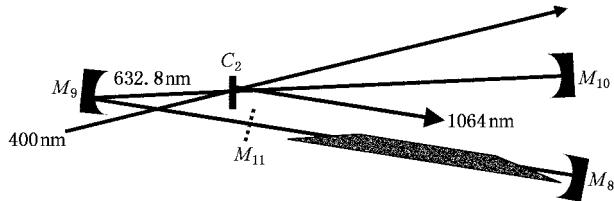


(a)

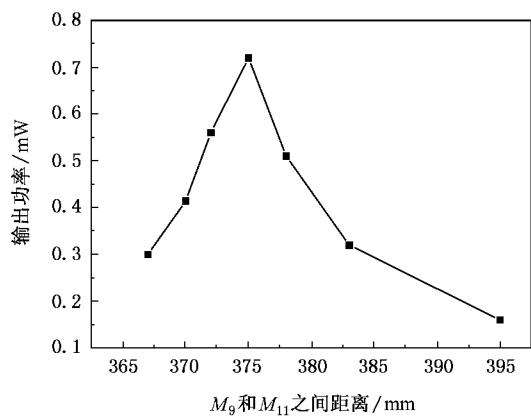


(b)

图 3 (a) 在(b)图中不同的横向位置 B ,C ,D 和 E 测得的闲频光的光谱

图 4 He-Ne 激光器腔内 NOPA 装置图(M_{11} 为高反 632.8 nm 的 0° 平面镜; M_8 , M_9 和 M_{10} 为凹面高反镜; C_2 为 β -BBO 晶体)

BBO 参量晶体放置于 He-Ne 激光腔内。为提高参量转换效率,首先对原来的 He-Ne 激光器进行改造。如图 4 所示,原来的 He-Ne 激光腔由 M_8 和 M_{11} 组成,腔长为 1.45 m,其中 M_8 是曲率半径为 5 m 的高反 632.8 nm 的凹面镜, M_{11} 是 97.5% 的耦合镜。在改造 He-Ne 激光腔时我们遵循两个原则:1)原激光腔设计是最佳化的,也就是说,改造后的光学谐振腔在

图 5 在 M_9 后测得改造后的 He-Ne 激光器的输出功率随 M_9 和 M_{11} 之间距离的变化曲线

He-Ne 气体管中的传输模式应和改造前的一样;2)在气体管外存在一个较小线度的束腰,以便有足够的

的He-Ne激光强度参加光参量放大。为此,改造后的光学谐振腔采用三镜腔结构,由 M_8 , M_9 和 M_{10} 组成。其中 M_9 和 M_{10} 都是曲率半径为500 mm的高反镜。这样在 M_9 和 M_{10} 之间存在一个高斯光束的束腰。为满足1)的要求,我们通过调整 M_9 和 M_{10} 位置使得从原 M_{11} 的位置到 M_{10} 之间的往返矩阵为单位矩阵。图5所示是 M_9 漏出的He-Ne激光功率随 M_9

相对原 M_{11} 位置的距离变化的实际测量曲线。实验结果表明:当 M_9 和 M_{10} 之间的距离为750 mm时, M_9 相对原 M_{11} 位置的距离为375 mm所对应的He-Ne激光输出功率为最大。这个结果与我们的理论预见很符合。所测到的最大的输出功率为0.72 mW。 M_9 镜的反射率测量值约为99.9%,这样在没有参量晶体在腔内时所对应的腔内光功率为720 mW。

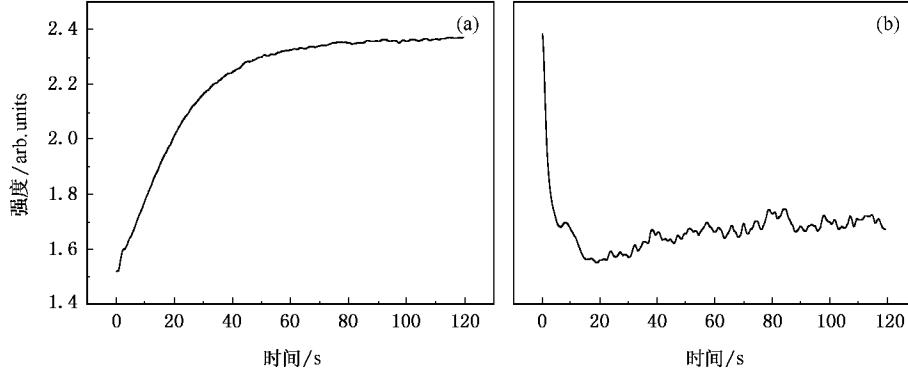


图6 (a)在挡去抽运光的瞬间,在 M_6 后测得He-Ne光强随时间的变化曲线 (b)在加入抽运光的瞬时,在 M_6 后测得He-Ne光强随时间的变化曲线

将 β -BBO参量晶体插入 M_9 和 M_{10} 之间的束腰位置时,适当调节晶体和397 nm宽带光脉冲,就可以得到与Ti Sappire飞秒激光精确同步的无直流背底的1064 nm的脉冲光。然而我们发现此时 M_9 漏出的He-Ne激光功率从0.72 mW下降到了0.20 mW,即腔内的功率下降到了200 mW左右。其主要原因由于参量晶体每个表面有约1%的反射损耗。另外由于397 nm宽带光脉冲对参量晶体折射率的慢调

制从而改变He-Ne激光的腔内损耗也是造成功率下降的原因之一。图6是用锁相放大器测到的 M_9 漏出的He-Ne激光功率随时间的变化图。其中(a)是 β -BBO晶体在原先397 nm光脉冲辐照情况下挡住397 nm光脉冲He-Ne激光功率随时间的增加而增加,并逐渐达到平衡。这期间的时间跨度约为50 s。(b)是(a)的相反情况。这部分的研究内容将在另外文章中详细给出。

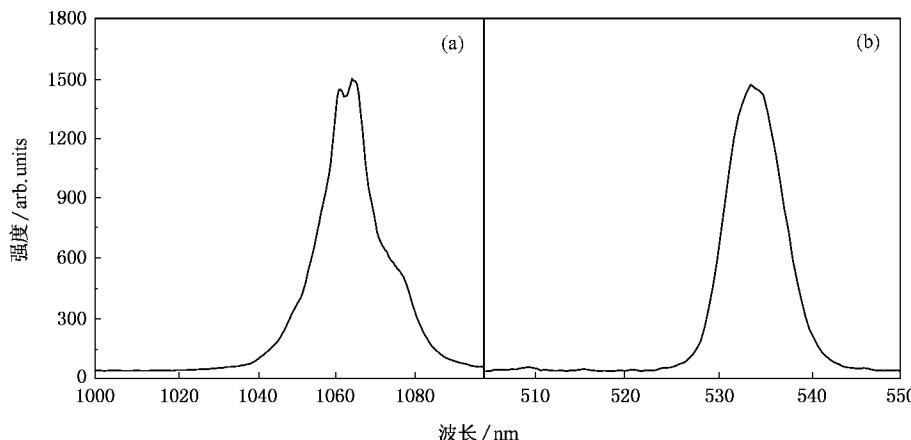


图7 NOPA发生在He-Ne腔内时测得的光谱图 (a)(b)分别为产生的闲频光及其倍频光的光谱图

图7(a)给出了所测到的闲频光的光谱图,与图7(c)比较,其中心波长和光谱宽度基本上是一样的。与腔外的 NOPA 比较,由于信号光功率比较高,所以此时经一级参量放大就观察到了闲频光脉冲的倍频信号。图7(b)是所测到的倍频信号的光谱图。

将 NOPA 过程发生在 He-Ne 腔内和腔外两种情况比较,可知采用内腔的最大优势就是内腔中 He-Ne 光的功率要远大于外腔。采用外腔 NOPA 时,He-Ne 激光器的输出功率仅为 20 mW。根据前面腔外 NOPA 的实验测量和理论估算,经第一级参量放大,闲频光的单脉冲能量为 0.7 nJ。而 He-Ne 腔内 NOPA,连续的 He-Ne 激光率提高了近 10 倍,经一级非饱和参量放大后,相应的闲频光脉冲能量也应提高同样的倍数,实验测得单脉冲能量为 6 nJ。所以利用腔内 NOPA 方案,仅通过一级 NOPA 得到的闲频光脉冲,其脉冲能量就足够作为光参量啁啾脉冲放大系统的抽运激光链的种子光。

NOPA 过程发生在 He-Ne 腔内和腔外两种情况下,都得到了与 794 nm 飞秒激光精确同步的无直流背底的 1064 nm 的超短脉冲,以此脉冲光作为种子光,经过注入放大、倍频,即可获得与 794 nm 超短脉冲同步的绿光,从而实现光周期量级的 OPCPA 系统中信号光和抽运光的精确同步。在 OPCPA 系统中,抽运光和信号光的同步精度主要受制于 Ti:Sappire

飞秒再生放大器的时间抖动。其时间抖动在几秒钟之内大约为 10 fs,而在一小时之内小于 200 fs^[18]。由于光脉冲通过 Ti:Sappire 飞秒再生放大器前后的时间间隔大约为 350 ns,而且 He-Ne 激光的光谱稳定性通常小于 1 GHz,它对通过 NOPA 产生的 1064 nm 闲频光的时间抖动的影响可以忽略,因此 OPCPA 系统的宽带 794 nm 信号光与 1064 nm 脉冲光之间的时间抖动可估测为 10 fs 量级。

5. 结 论

本文提出了一种新颖的方法,即通过以 Ti:Sappire 飞秒激光倍频光为抽运光以连续的 He-Ne 激光为信号光的非共线参量放大,将 Ti:Sappire 飞秒激光倍频光的部分能量转移到 1064 nm 的脉冲光上。1064 nm 的脉冲光经进一步放大,即可作为抽运光的种子光,从而实现 OPCPA 系统抽运光和信号光的全光学同步。本文分别使 NOPA 过程在 He-Ne 激光腔外和腔内进行,并对两种情况进行了比较。内腔 NOPA 能有效地克服 He-Ne 激光功率的限制,经一级参量放大后所得到的闲频光具有更大的单脉冲能量。实验测得闲频光单脉冲能量为 6 nJ,为腔外 NOPA 的 10 倍,而两种方案所产生的闲频光脉冲的空间和光谱特性基本相同。

-
- [1] Kobayashi T, Baltuska A 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** 1671
[2] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, Tietbohl G, Britten J A, Brown C, Herman S, Golick B, Kartz M, Miller J, Powell H T, Vergino M, Yanovsky V 1999 *Opt. Lett.* **24** 160
[3] Yang X D, Xu Z Z, Leng Y X, Lu H H, Lin L H, Zhang Z Q, Li R X, Zhang W Q, Yin D J, Tang B 2002 *Opt. Lett.* **27** 1135
[4] Jovanovic I, Comaskey B J, Ebbers C A, Bonner R A, Pennington D M, Morse E C 2002 *Appl. Opt.* **41** 2923
[5] Schlup P, Biegert J, Hauri C P, Arisholm G, Keller U 2004 *Appl. Phys. B* **79** 285
[6] Jovanovic I, Brown C G, Ebbers C A, Barty C P J, Forget N, Le Blanc C 2005 *Opt. Lett.* **30** 1036
[7] Leng Y X, Yang X D, Lu H H, Lin L H, Zhang Z Q, Li R X, Yin D J, Xu Z Z 2004 *Opt. Eng.* **43** 2994
[8] Backus S, Durfee III C G, Murnane M M, Kapteyn H C 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 1207
[9] Cerullo G, De Silvestri S 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1
[10] Zhu P F, Qian L J, Xue S L, Lin Z Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 587
(in Chinese) [朱鹏飞,钱列加,薛绍林,林尊琪 2003 物理学报 52 587]
[11] Ross I N, Collier J L, Matousek P, Danson C N, Neely D, Allott R M, Pepler D A, Hernandez-Gomez C, Osvay K 2000 *Appl. Opt.* **39** 2422
[12] Rudd J V, Law R J, Luk T S, Cameron S M 2005 *Opt. Lett.* **30** 1974
[13] Witte S, Zinkstok R Th, Hogervorst W, Eikema K S E 2005 *Opt. Express* **13** 4903
[14] Leng Y X, Lin L H, Yang X D, Lu H H, Zhang Z Q, Xu Z Z 2003 *Opt. Eng.* **42** 862
[15] Teisset C Y, Ishii N, Fuji T, Metzger T, Köhler S, Holzwarth R, Baltuškal A, Zheltikov A M, Krausz F 2005 *Opt. Express* **13** 6550
[16] Zeng H P, Wu J, Xu H, Wu K, Wu E 2004 *Appl. Phys. B* **79** 837
[17] Xu S X, Zhai H, Wu K, Peng Y, Wu J, Zeng H P 2006 *Opt. Express* **14** 2487
[18] Miura T, Kobayashi K, Takasago K, Zhang Z, Torizuka K, Kannari F 2000 *Opt. Lett.* **25** 1795

Generation of background-free pulses at 1064 nm accurately synchronized with femtosecond laser pulses at 794 nm^{*}

Zhai Hui Xu Shi-Xiang Xu Zhi-Xiong Cai Hua Yang Xuan Wu Kun Zeng He-Ping[†]

(Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy ,and Department of Physics , East China Normal University , Shanghai 200062 , China)

(Received 27 July 2006 ; revised manuscript received 28 August 2006)

Abstract

This paper reports on generation of background-free pulses at 1064 nm accurately synchronized with femtosecond pulses at 794 nm , by the use of a continuous-wave He-Ne laser seeded non-collinear optical parametric amplification(NOPA) pumped by frequency-doubled Ti :sapphire femtosecond laser at 396nm. Experimental results showed that the 1064 nm light pulses can be used as the pump seed for optical parametric chirped pulse amplification to realize an all-optical synchronization between pump and signal beams. Background-free pulses at 1064 nm could also be generated by using a NOPA with continuous-wave seed from the intracavity 632.8 nm light of an appropriate He-Ne cavity. The spectral and spatial chirp properties of the idler pulses were quite similar in both cases according to our measurements. The generated idler pulses in the intracavity seed case have single pulse energy 10 times that of the external cavity case.

Keywords : non-collinear optical parametric amplification , optical parametric chirped pulse amplification , temporal synchronization

PACC : 6180B , 4265 , 4265

* Project supported by the Key Project from Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (Grant No. 04dz14001), the National Natural Science Fund (Grant Nos. 10525416 , 60478011 and 10234030), Key Project Sponsored by National Education Ministry of China (Grant No. 104193) , and the Shanghai Municipality Natural Science Fund (Grant No. 05ZR14044).

† Corresponding author , E-mail : hpzeng@phy.ecnu.edu.cn .