

输出 13.5fs 激光脉冲的非共线式光参量放大器^{*}

孙 涛¹⁾²⁾ 黄锦圣¹⁾ 张伟力²⁾ 王清月²⁾

¹⁾香港科技大学物理系, 香港)

²⁾天津大学超快激光研究室, 天津 300072)

(2001 年 12 月 20 日收到 2002 年 3 月 23 日收到修改稿)

利用 BBO 晶体在 400nm 的抽运光与信号光夹角为 3.7° 时, 可同时在可见光范围内很宽的光谱范围里实现相位匹配的特点, 实现了在可见光范围内具有极宽输出光谱宽度的飞秒光学参量放大器 (OPA) 的稳定运转. 其输出脉冲能量大于 $1.5\mu\text{J}$, 转换效率超过 15%. 并且在仅采用啁啾镜作为脉冲压缩器的情况下, 获得了输出脉冲宽度为 13.5fs 的极窄光脉冲, 其脉冲宽度压缩比高达 22 倍.

关键词: 非共线相位匹配, 光学参量放大, 啁啾镜

PACC: 4280W, 4265, 4265K

随着飞秒激光脉冲的产生和放大技术的迅速发展, 使得通过光参量振荡 (OPO) 和光参量放大 (OPA) 技术获得在可见光范围内可调谐的, 高能量的, 脉冲宽度极窄的激光脉冲成为可能^[1-6], 而这种激光脉冲正是一些超快光谱实验所需要的. 本文报道了一种以非共线相位匹配方式工作的飞秒激光 OPA 系统, 其输出范围从 510nm 至 650nm, 工作频率为 1kHz, 输出脉冲能量大于 $1.5\mu\text{J}$. 在仅采用一对啁啾镜作为脉冲压缩器对放大后的光脉冲进行压缩^[7]后, 得到了宽度为 13.5fs 的窄激光脉冲.

当高能量的 800nm 飞秒激光脉冲聚焦到 Sapphire Plate 上时, 可以产生超连续的白光, 它的光谱范围很宽, 覆盖范围从 450nm 左右一直到近红外. 通过精心控制聚焦在 Sapphire Plate 上的飞秒激光的能量和焦点的位置, 可以使白光获得稳定输出, 并且在整个的输出光谱范围内能量没有大的起伏, 为光参量放大提供了一种很优秀的种子光源. 在光参量放大部分, 传统的共线式相位匹配技术只能使信号光和抽运光在较窄的光谱范围内实现相位匹配, 使放大后的信号光的光谱较窄 ($\sim 300\text{cm}^{-1}$), 从而使得 OPA 不可能有极窄的激光脉冲输出. Gale 等人^[8,9]发现在 400nm 抽运的情况下, 当 BBO 晶体内抽运光和信号光的夹角为 3.7° 时, 在大部分可见光范围内的信号光光谱可与抽运光实现相位匹配, 从而使

OPA 系统获得很大的增益区间. 而且这个角度很接近 BBO 晶体的空间离散角 ($\sim 4^\circ$), 可使 OPA 系统获得很高的增益. 这样就使得非共线式 OPA 系统可以输出能量高且脉宽极窄的飞秒激光脉冲.

本文的实验装置如图 1 所示. 由 Ti:Sapphire 产生的 800nm 飞秒激光脉冲经过放大器放大后脉冲宽度为 300fs, 能量为 $320\mu\text{J}$, 重复率为 1kHz. 这束激光脉冲的一小部分被聚焦在一起 5mm 厚的 Sapphire Plate 上, 产生超连续的白光. 通过精心控制聚焦在 Sapphire Plate 上的激光的能量和其焦点的位置, 可以得到输出十分稳定的白光, 并且其光谱在 450—700nm 之间很光滑, 没有大的起伏. 为了减少白光中的啁啾和色散, Sapphire Plate 前 800nm 激光的聚焦和白光的收集都采用了凹面反射镜. 经收集和准直后的白光作为信号光又被一凹面镜聚焦在一起 1mm 厚, 以 $\theta = 32^\circ$ 角切割的 BBO 晶体上. 由放大器输出的其余部分激光经过光学延迟线 D 后在一起 2mm 厚, $\theta = 29^\circ$ 的 BBO 晶体处倍频, 产生 400nm, $10\mu\text{J}$ 左右的倍频光. 这部分光也被聚焦在 $\theta = 32^\circ$ 的 BBO 晶体上, 作为抽运光对信号光进行参量放大. 这时可以看到抽运光的周围有很强的离轴的光环, 其在空间形成一圆锥形. 根据非共线的相位匹配理论, 为在抽运光与信号光之间获得最大的相位匹配范围, 应使它们在 BBO 晶体内部保持 3.7° 的夹角,

^{*} 国家自然科学基金 (批准号 69978016), 高等学校优秀青年教师教学及研究奖励基金、霍英东教育基金会资助的课题.

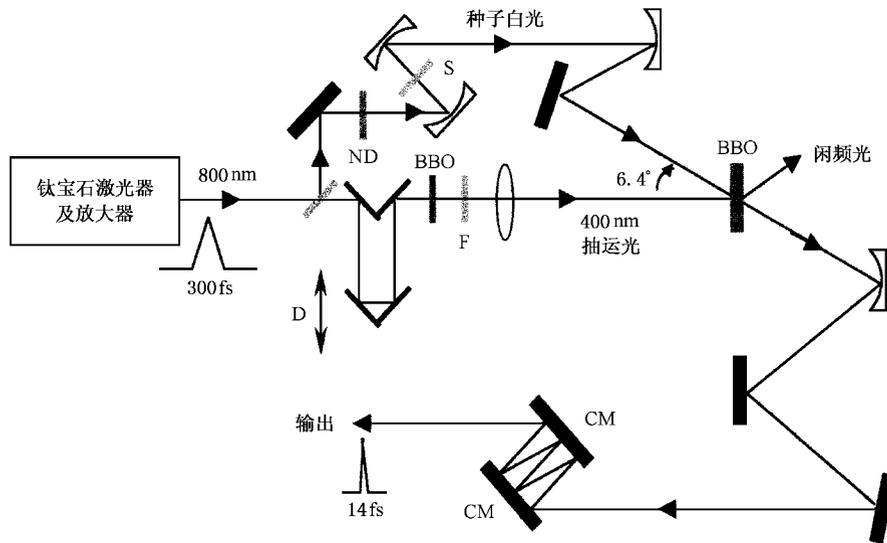


图1 试验光路图(S为宝石片,CM为啁啾镜,D为延迟线,F为低通滤光片,ND为可调式强度滤光片)

其中 BBO 晶体外部所对应的夹角为 6.4° . 当抽运光与信号光之间存在适当的延迟时,信号光中很宽的一部分光谱成分将被放大,同时在光环的另一侧将有红外波段的闲频光(1040—1854nm)输出. 信号光经光参量放大后脉冲能量大于 $1.5\mu\text{J}$, 其抽运效率高于 15%.

冲宽度的控制变得十分简便,只需改变信号光在啁啾镜对中往返的次数,就可以方便的调整输出激光脉冲的宽度(如图2所示).由于在实验装置中全部采用了反射镜和凹面镜,所以放大后的信号光中所含有的啁啾量主要来自于 5mm 厚的 Sapphire Plate 和 1mm 厚的 BBO 晶体.由 Sapphire 的折射率方程^[10]和 BBO 晶体的折射率方程^[11]可以很容易得到由 5mm 厚的 Sapphire Plate 和 1mm 厚的 BBO 晶体引入的不同光谱成分在时域上的延迟

$$\Delta t = \sum_{i=1}^2 [l_i/v_{g_i}(\lambda_1) - l_i/v_{g_i}(\lambda_2)],$$

其中

$$v_{g_i}(\lambda) = \frac{c}{n_i(\lambda) - \lambda \frac{dn_i(\lambda)}{d\lambda}} \quad i = 1, 2,$$

分别为激光脉冲在 Sapphire Plate 和 BBO 晶体中的群速度, l_1 和 l_2 分别为 Sapphire Plate 和 BBO 晶体的厚度, n_1 和 n_2 分别为 Sapphire 和 BBO 晶体的折射率.从图3中可以看到计算结果与实验中所测得的结果是一致的.采用啁啾镜的 Group Delay 曲线对上面所得到的结果进行拟合后可以看到,当放大后的信号光在啁啾镜对中往返 8 次时,可以取得最好的补偿效果,这与我们在实验中得到的结果也是一致的.

由于白光中所含有的啁啾使得白光的不同光谱成分在时域内产生分离,所以通过改变信号光与抽运光之间的延迟,可以使抽运光与信号光(白光)中的不同光谱成分产生重叠,使不同波长的光得到放

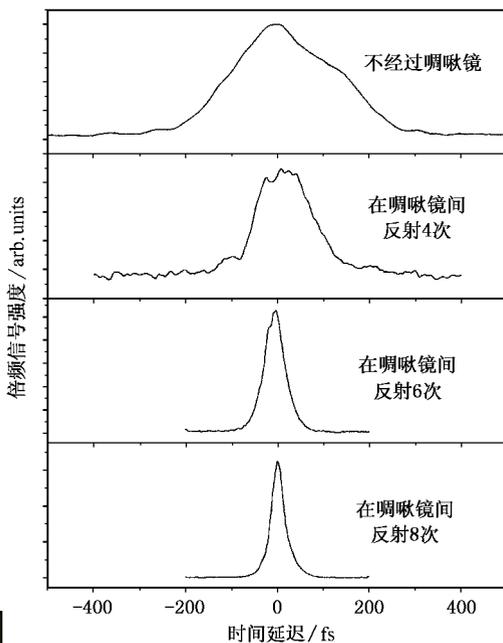


图2 在啁啾镜间经过不同次数反射后输出的压缩脉冲的自相关曲线.从图中可以看到,8次反射后得到的脉冲的宽度最窄.

放大后的信号光经过由一对啁啾镜组成的压缩器进行脉宽压窄.啁啾镜的使用使得对信号光的脉

大.因此,只需改革抽运光路中的光学延迟线 D 的位置,就可以很方便的调节输出的信号光的中心波长.图 4 给出了实验中所得到的放大后信号光的光谱.通过改变光学延迟线 D 的位置而得到的不同中心波长的信号光经过啁啾镜压缩后,被送进一自相关器中对其脉冲宽度进行测量.为了尽量减少自相关器本身引入的啁啾和色散,在相关器中全部采用反射镜,采用薄膜分束器(薄膜厚度仅为 $2\mu\text{m}$),并使用 $\theta = 29.2^\circ$ 厚度为 $100\mu\text{m}$ 的 BBO 晶体来产生 SHG 信号,这样就保证了测量的精度.从图 5 中可以看

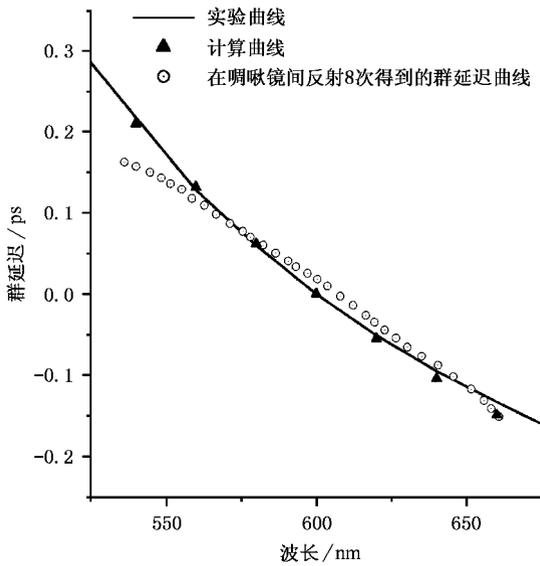


图 3 计算和实验得到的连续白光光源的群速度曲线及啁啾镜对的色散补偿

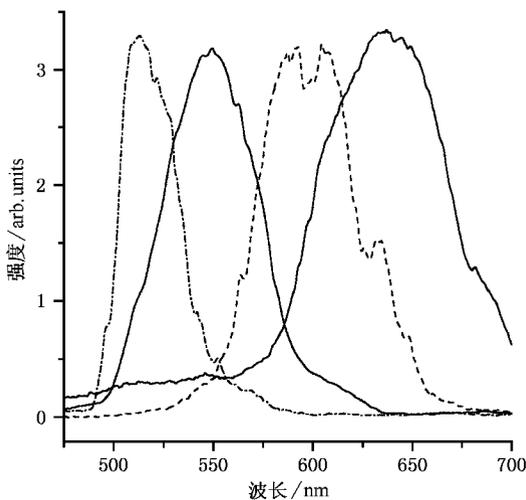


图 4 OPA 在不同输出波长范围内的输出光谱

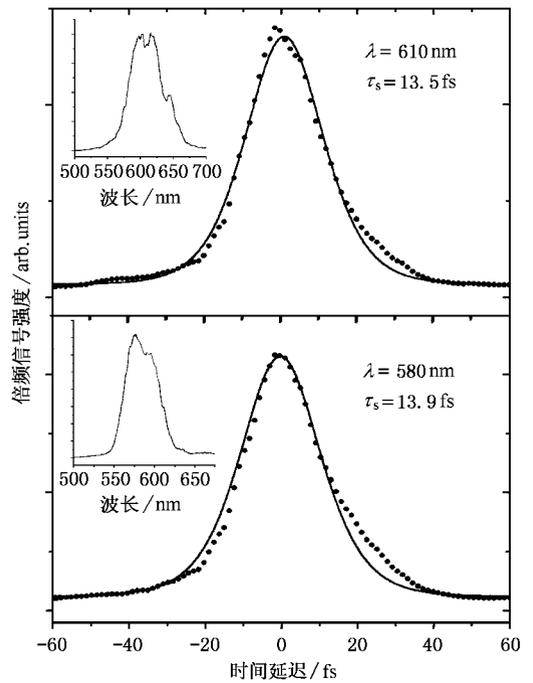


图 5 中心波长在 580nm 和 610nm 时输出脉冲的自相关曲线 (小图为相应的 OPA 输出光谱)

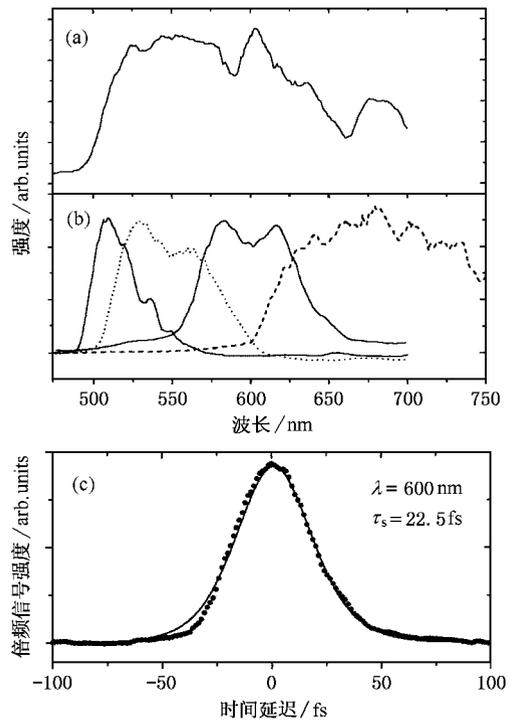


图 6 (a)使用 2mm 厚的宝石片时 OPA 的输出光谱 (b)使用 2mm 厚的宝石片和 2mm 厚的光学玻璃时 OPA 的输出光谱 (c)图 (b) 中中心波长在 600nm 的输出脉冲的强度自相关曲线 (·) 及经过 sech^2 函数拟合后得到的曲线 (—)

到,在 $\lambda = 610\text{nm}$ 和 $\lambda = 580\text{nm}$ 时,信号光脉冲可以被压缩至 14fs 以下.如果能够进一步补偿信号光中的高阶色散,相信能够将脉冲压至更窄的宽度.

需要指出的是,OPA 输出的信号光的谱宽度与白光中所含有的啁啾量有直接的关系,较大的啁啾量对应于较窄的谱宽度.因此,要使放大后的信号光有较宽的光谱,应尽量减小白光中的啁啾量.在本文的实验装置中,白光中所含有的啁啾主要来自于 Sapphire Plate 本身.由于我们所采用的飞秒激光放大器输出的 800nm 激光脉冲的脉宽较宽(300fs),使得使用较薄的 Sapphire Plate 很难获得稳定的,光学质量很好的白光,而稳定的白光光源是使 OPA 稳定工作的关键.而且,我们所使用的啁啾镜的工作范围为 $530\text{—}650\text{nm}$,若激光的谱宽太宽超出了它的工作范围,则不能有效的补偿激光脉冲中所含有的啁啾,从而使得输出激光脉冲的脉宽较宽.所以我们采用了较厚的 Sapphire Plate(5mm),虽然它会在白光中引入较多的啁啾量,使得 OPA 输出激光的谱宽变窄,但是它可以使 OPA 长时间的稳定地连续工作,而且这时输出的激光脉冲的宽度仍可达到 15fs 以下.

另一方面,有一些实验要求 OPA 输出的激光有较窄的光谱,可以利用在白光中引入啁啾的方法来实现.图 6(a)为使用 2mm 厚的 Sapphire Plate 时所得到的输出光谱,其光谱宽度达到 150nm 以上.图 6(b)和图 6(c)分别为在 Sapphire Plate 后加入一块 2mm 厚的光学玻璃(Schott optical glass)时得到的输出光谱和这时经啁啾镜压缩后所得到的中心波长在 600nm 的激光脉冲的自相关曲线.可以看到加入光学玻璃后 OPA 输出的光谱明显变窄,而且由于在白光中引入了较多的啁啾,使得输出的脉宽变宽.

总之,我们利用 BBO 晶体在特殊的匹配角时可以在很宽的连续光谱范围内实现相位匹配的特点,在试验中建成了一套在可见光范围内输出光谱很宽($\sim 100\text{nm}$)的 OPA 系统.并且仅采用啁啾镜作为压缩器,得到了 13.5fs 的超短激光脉冲,使整个 OPA 系统在脉冲宽度上具有超过 20 倍的压缩比(从 300fs 到 13.5fs).同时,利用在白光中引入啁啾的方法实现了对于 OPA 输出激光脉冲的谱宽度的控制,使其能够适应不同实验的要求,为超快光学实验提供了一种优秀的实验工具.

- [1] Krylov V , Kalintsev A , Rebane A *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 151
 [2] Krylov V , Ollikainen O , Gallus J *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 100
 [3] Cerullo G , Nisoli M and De Silvestri S 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 3616
 [4] Cerullo G , Nisoli M , Stagira S *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 1283
 Cerullo G , Nisoli M , Stagira S *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 1529
 [5] Shirakawa A , Sakane I and Kobayashi T 1998 *Opt. Lett.* **23** 1292

- [6] Shirakawa A and Kobayashi T 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 147
 [7] Szipöcs R and Köháci-Kis A 1997 *Appl. Phys.* **B 65** 115
 [8] Gale G M , Cavallari M , Driscoll T J *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 1562
 [9] Driscoll T J , Gale G M and Hache F 1994 *Opt. Commun.* **110** 638
 [10] Malitson I H 1967 *J. Opt. Soc. Am.* **525** 1377
 [11] CASIX crystal guide (1995) p11

Generation of the visible 13.5fs laser pulses by noncollinearly phase-matched optical parametric amplification *

T. Sun^{1,2)} K.S. Wong¹⁾ Zhang Wei-Li²⁾ Wang Qing-Yue²⁾

¹⁾(Department of Physics , Hong Kong University of Science and Technology , Hong Kong , China)

²⁾(Ultrafast Laser Laboratory , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 20 December 2001 ; revised manuscript received 23 March 2002)

Abstract

We demonstrate a noncollinear optical parametric amplifier (OPA) which generates 13.5fs pulses tunable in the visible region from 510 to 650nm. The ultrashort pulse is generated via pulse compression using chirp mirrors. The OPA output pulse energy is over 1.5 μ J and the spectral bandwidth can be controlled by the chirp in white light seed.

Keywords : noncollinear phase matching , OPA , chirp mirror

PACC : 4280W , 4265 , 4265K

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69978016) , the Teaching and Research Award Fund for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE , the Fok Ying-dong Education Foundation for Young Faculties.