

超短脉冲激光频率的线性及非线性扩展

魏志义, 钟 欣, 周斌斌, 朱江峰, 许长文, 张治国

(中国科学院物理研究所 光物理重点实验室, 北京 100190)

摘 要:通过采用若干激光增益介质和非线性频率变换技术,有效地扩展了皮秒及飞秒激光的波长。在可见光波段,利用自建的高能量 400 nm 倍频皮秒钛宝石激光作泵浦,通过 LBO 参量放大,得到了波长从 450~750 nm 可调、最高单脉冲能量达 30 mJ 的可调谐皮秒激光脉冲;在红外波段,通过上述方案不仅产生了波长 850 nm~3.6 μm 的皮秒闲频光,而且相继利用 Cr:Mg₂SiO₄ 和 Cr:YAG 晶体作为增益介质,获得了中心波长分别在 1 280 nm 和 1 450 nm 波段的飞秒激光脉冲。利用 Yb:YAG、Yb:GYSO、Nd:GdVO₄、Nd:LuVO₄ 等晶体作增益介质,获得了中心波长 1 053、1 093 nm 的飞秒激光脉冲及 912、916 nm 的皮秒脉冲。这些具有不同波长特性的超短脉冲激光光源,可望在许多领域获得重要应用。

关键词:飞秒; 皮秒; 参量振荡与放大; 啁啾脉冲放大; 全固态; 频率变换与扩展

中图分类号:TN24 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2008)06-0987-06

Frequency extending of ultrashort laser pulse with linear and nonlinear processes

WEI Zhi-yi, ZHONG Xin, ZHOU Bin-bin, ZHU Jiang-feng, XU Chang-wen, ZHANG Zhi-guo

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract:The available wavelengths of picosecond and femtosecond laser pulses were significantly extended by using of several laser gain media and nonlinear frequency conversion processes. In the visible range, tunable picosecond laser pulses from 460 nm to 750 nm, with the maximum pulse energy up to 30 mJ, were obtained by pumping LBO optical parametric amplification (OPA) system with a home-made frequency doubled picosecond Ti:sapphire amplifier. In the infrared range, we gained not only the idler laser with wavelength from 850 nm to 3.6 μm from the OPA system, but also the femtosecond laser pulses at central wavelengths of 1 280 nm and 1 450 nm by using of Cr:Mg₂SiO₄ and Cr:YAG as the gain medium respectively. In addition, we successfully obtained femtosecond pulses at wavelengths of 1 053 nm and 1 093 nm and picoseconds pulses at 912 nm and 916 nm by using of Yb:YAG, Yb:GYSO, Nd:GdVO₄, Nd:LuVO₄ as gain medium respectively. These ultrashort pulse laser sources at different wavelengths will play important roles in many fields.

Key words:Femtosecond; Picosecond; Optical parametric oscillation and amplification;

Chirped pulse amplification; All-solid-state; Frequency conversion and extension

收稿日期:2008-03-05; 修订日期:2008-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60490281, 60308001); 国家重点基础研究计划资助项目(973, 2007CB815104); 中国科学院知识创新方向性项目及国家高技术(863)804 专题资助项目

作者简介:魏志义(1963-),男,甘肃甘谷人,研究员,博士生导师,主要从事超短超强激光脉冲的产生及应用等方面的研究。

Email:zywei@aphy.iphy.ac.cn

0 引言

目前,超短激光脉冲在以钛宝石激光为增益介质的近红外波段取得了重要进展,并开拓了包括超快探测、量子保密通信在内的许多科学前沿和高技术应用。如何进一步扩展飞秒或皮秒超短脉冲激光的频率,是激光光谱学、激光制导等领域令人感兴趣的内容。采用非线性频率变换技术,是扩展超短脉冲激光频率的有效途径,并在最近 10 多年作为激光科学技术最重要的内容之一得到了广泛的研究和发展,特别是基于倍频飞秒钛宝石激光作泵浦的参量放大技术,不仅将脉宽压缩至不到 5 fs^[1],而且光谱覆盖了从 175 nm~50 μm 的范围^[2]。但是,迄今采用参量技术产生的超短激光脉冲所能达到的能量一般在毫焦量级^[3],在许多应用中,这一能量是不足的。采用综合性能优良的新型激光晶体作为增益介质,可在某些波段直接产生皮秒及飞秒激光脉冲输出^[4-5],经放大后可望得到高能量的新波长超短脉冲激光。目前,除钛宝石激光外,用 Yb:YAG、Cr:Mg₂SiO₄、Cr:YAG 等一些激光器件实现了红外波段的飞秒或皮秒激光运行,进一步探索并发展了新的锁模激光,是扩展超短激光脉冲波长最直接的技术内容。

文中介绍了通过采用新型激光增益介质和光学参量放大技术扩展超短激光脉冲频率的若干研究结果。利用自建的高能量倍频皮秒钛宝石激光作泵浦,通过 LBO 参量放大,得到了波长从 450~750 nm 可调、最高单脉冲能量达 30 mJ 的可调谐皮秒激光脉冲,据我们所知,这是可调谐超短脉冲激光得到的最短结果;四倍频该泵浦激光,通过调谐基频光,得到了波长从 195~205 nm 可调的近真空紫外脉冲,最高单脉冲能量达 16 mJ。此外,利用飞秒钛宝石激光作泵浦,成功实现了飞秒激光的参量振荡,获得了波长从 1 050~1 300 nm 的高重复频率可调谐飞秒激光脉冲。在红外波段,利用 Cr:Mg₂SiO₄ 和 Cr:YAG 晶体作为增益介质,获得了中心波长分别在 1 280 nm 和 1 450 nm 波段的飞秒激光脉冲,最高输出功率达 760 mW;利用 Yb:YAG、Yb:GYSO、Nd:GdVO₄、Nd:LuVO₄ 等晶体作增益介质,获得了中心波长 1 053、1 093 nm 的飞秒激光脉冲及 912、916 nm 的皮秒脉冲。这些不同的波长扩展了超短脉冲激光的应用范围。

1 参量放大皮秒钛宝石激光产生的高能量 460~750 nm 可调谐激光脉冲

参量产生和放大(OPG-OPA)是基于三波混频的一

种非线性技术频率变换过程,目前已有用该技术产生可调谐超短脉冲激光的大量研究报道^[6-8],但单脉冲能量多在毫焦量级。为了得到高能量的可调谐超短脉冲激光,设计了皮秒放大钛宝石倍频激光泵浦的方案。图 1 为实验装置图,其中泵浦源为一台自建的皮秒钛宝石激光器。由于种子脉冲放大的脉宽为 60 ps,因此采用了非啁啾脉冲放大的直接放大方式,经 10 Hz 重复频率的倍频 Nd:YAG 激光泵浦的再生及一级多通放大后,可输出单脉冲能量达 360 mJ、中心波长 800 nm 的皮秒脉冲^[9]。为了高效率产生 400 nm 的谐波脉冲以泵浦参量激光,进一步采用尺寸为 10 mm×10 mm×7 mm 的 LBO 晶体(C1)进行倍频。该晶体在两通光面均镀有 400 nm 和 800 nm 的增透膜,经优化后得到的倍频光能量为 135 mJ,对应 37.5%的倍频效率。

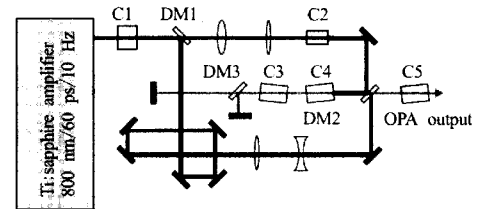


图 1 皮秒钛宝石激光器泵浦的 OPA 实验装置图

Fig.1 Experimental layout of OPA pumped by a picosecond

Ti:sapphire amplifier

倍频后剩余的 800 nm 基频光经 DM1 透射后直径被准直缩束至原光束的 1.5 倍,然后再经过另一块 LBO(C2)进行第二次倍频,所得到的 400 nm 光被用于泵浦 OPG 系统以产生参量光。OPG 由两块 BBO(C3,C4)作为非线性晶体。通过转动晶体角度实现波长调谐。所产生的参量光第二次通过 C3、C4 后得到一定程度的放大,然后通过 DM2 进入 OPA 级进行放大。由 DM1 反射并经一系列延迟调节后的 400 nm 泵浦光,在 DM2 处与 OPG 级产生的信频光优化重合后,在另一块 BBO 晶体(C5)中实现参量放大。

通过增加 OPG 级的泵浦光能量,观察到了在非相位匹配情况下产生的参量荧光环。仔细调节 C3 与 C4 的角度,可以使参量荧光环逐渐缩小直至一点,此时 C3 与 C4 达到相位匹配条件。在 30 mJ 的 400 nm 光泵浦下,OPG 级所产生的信频光能量可以达到 5 mJ。如果进一步增大泵浦光的能量,则很容易出现超荧光,导致参量光的光束质量变坏。而且,增大 OPG 级的泵光能量,会相应降低 OPA 级的泵光能量,也会导致最后放大后的信频光能量下降。因此,通过转动 C1 的角度来合理地调节倍频效率,使 OPG 级和 OPA 级的泵浦光能量达到

最佳平衡点是确保得到最大信频光能量的保证。

固定泵浦光的波长,通过转动 C3、C4、C5 的角度,得到了波长从 460~750 nm 连续可调的信频光。图 2 是实验得到的信频光输出能量与波长的调谐曲线。

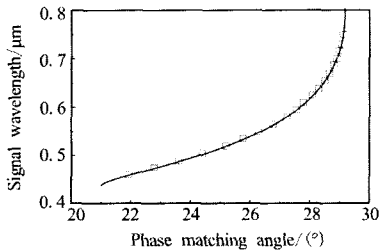


图 2 400 nm 泵浦 BBO 的 I 类匹配信频光波长与角度的关系

Fig.2 Curve of tunable wavelength vs phase matching angle for type I BBO at 400 nm pump

线,与理论模拟非常吻合。图中,实线表示模拟曲线,方块表示实验值。同时也发现,当波长继续往短波(小于 460 nm)或长波(大于 750 nm)调谐时,信频光能量急速降低,这与接近简并点有关。根据参量波长的关系:

$$1/\lambda_p = 1/\lambda_i + 1/\lambda_r$$

对应一个信频光 λ_i ,其同时伴随有一个满足上述关系的闲频光 λ_r ,对于 460~750 nm 的信频光调谐范围,考虑到 800 nm 的泵浦波长,同时存在着波长 850 nm~3.6 μm 的可调谐闲频光。

当信频光波长变化时,能量也相应有所改变。图 3 是在 300 mJ 基频光泵浦能量下,信频光能量随波长变化的关系,在绝大部分调谐范围内,信号的能量都大于 20 mJ,在某些波长处,甚至超过 30 mJ。据我们所知,这是在皮秒量级内采用类似泵浦方案所得到的最大单脉冲能量。

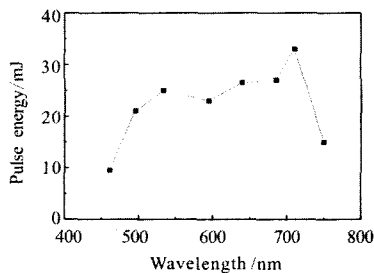


图 3 在 300 mJ 基频光泵浦下,信频光能量随波长变化的关系

Fig.3 Laser energy vs tunable wavelength at 300 mJ pump

2 四倍频皮秒钛宝石放大激光产生的可调谐 195~205 nm 激光

上述倍频皮秒钛宝石放大激光不仅为通过参量技术获得高能量的可调谐超短脉冲提供了有利的泵浦

光源,进一步四倍频后还可以得到在一定范围内可调谐的近真空紫外激光。基于这样的考虑建立了如图 4 所示的实验光路,图中,F 为基频光,SH、TH 和 FH 分别表示二、三、四次谐波,DM 为二透镜,D 为延迟线。与参量产生不同的是经二色镜后,反射后的倍频光与透射后经延时的基频光非共线聚焦重合于非线性晶体 BBO I 上以通过和频产生三次谐波。由于 BBO 晶体不能直接通过倍频获得短于 205 nm 波长的激光,为此采用了基频光与三次谐波和频的方案。对于三次谐波的产生,基频光与倍频光之间的非共线夹角为 6° ,这样小角度的夹角不仅保证三次谐波的产生效率不会有明显的下降,而且可以很好地与基频光与倍频光分离。采用尺寸为 10 mm×10 mm×9 mm (P-coating),切割角为 $\theta=55.5^\circ$ 、 $\varphi=30^\circ$ 的 II 类匹配 BBO,在全能量泵浦的情况下,三次谐波的最高能量达 40 mJ。

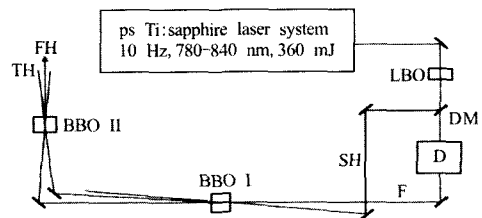


图 4 四倍频实验光路

Fig.4 Experimental layout of 4th harmonic generation

用于进一步非共线和频三次谐波与剩余基频光产生四次谐波的晶体为同尺寸的 BBO,采用切割角为 $\theta=64.8^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ 的 I 类匹配方式。调谐基频光的波长,得到了从 195~205 nm 可调谐的四倍频光。图 5 为优化的四次谐波转换效率与调谐波长的实验曲线。

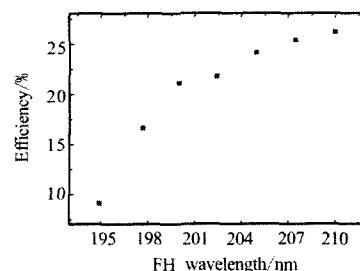


图 5 四次谐波转换效率与调谐波长的实验曲线

Fig.5 Conversion efficiency as a function of FH wavelength

在 210 nm 波长处,得到了单脉冲能量达 16 mJ、对应转化效率 26.2%的输出。但在 195 nm 波长处,四次谐波的能量仅 6 mJ,其主要原因有两方面:短波长的非线性效率较低,及空气中氧气的吸收所致。

3 飞秒钛宝石激光同步泵浦参量振荡器产生的 1.1~1.3 μm 可调谐飞秒激光

光参量振荡器类似于激光振荡器,可以直接高效地获得激光振荡。目前纳秒量级的参量激光振荡器已有较多的研究^[10],但是,对于飞秒或皮秒量级的参量振荡器而言,由于脉冲相互作用的时间宽度十分短,因此除了要满足稳腔条件与相位匹配条件以外,还必须满足同步泵浦条件,反映在实验装置上,就是必须满足参量腔与作为泵浦源的钛宝石激光谐振腔的长度严格一致。基于同步泵浦的考虑,将参量腔的一个端镜置于压电陶瓷(PZT)上,通过电子反馈控制保证与钛宝石泵浦激光相同的腔长^[11]。泵浦源为自建的一台 80 MHz 重复频率的飞秒钛宝石振荡器,用作参量的增益介质为掺 MgO 的 PPLN 晶体,极化周期为 21.4 μm 。在中心波长 800 nm、脉冲宽度 46 fs、平均功率 900 mW 的泵浦下,获得了信频光波长从 1.10~1.30 μm 连续可调的飞秒参量输出,图 6 所示为波长调谐曲线,相应的空频光的调谐范围是 2.08~2.93 μm 。当信号光波长调至 1 225 nm 时,得到最大为 130 mW 的输出功率,自相关仪测出典型的脉宽为 167 fs。

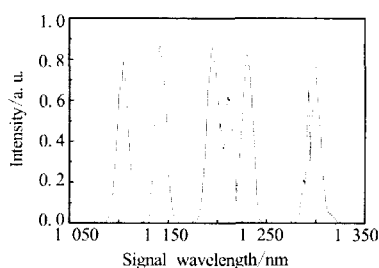


图 6 腔长调谐波长的归一化光谱曲线

Fig.6 Normalized spectra of the signal by tuning the cavith length

4 运行于 1.3~1.5 μm 通讯波段的掺 Cr 飞秒激光

采用非线性频率变换的方式虽然可以有效地扩展激光的调谐范围,但必须以激光器直接输出的基频光为基础,实际上发展不同波长激光的直接产生技术,是扩展激光频率最有效的手段。目前除钛宝石晶体外,掺铬镁橄榄石晶体 ($\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$)、铬钽铝石榴石 ($\text{Cr}:\text{YAG}$) 晶体是获得飞秒脉冲较为理想的另外两种激光增益介质,其中心波长分别在 1.3、1.5 μm 附近。由于该波段正好是光纤的零色散波长和零损耗波长,并且生物组织对该波段光的散射远小于其他波段,因此该激

光在光纤通信、超快光谱学、光学相干层析等领域都有重要应用价值。采用波长 1 030 nm 的 Yb:YAG 激光作泵浦,分别实现了两种激光的稳定锁模,在 7~9 W 的泵浦功率下,镁橄榄石激光的锁模脉宽为 29 fs、输出功率为 202 mW、中心波长 1 285 nm^[12];Cr:YAG 的锁模脉宽为 65 fs、输出功率为 95 mW、中心波长 1 508 nm^[13],所得光谱很好地覆盖了两个不同的光学通信窗口。图 7 是在同一个坐标上标出的该两激光的归一化光谱曲线。实验中通过波长调谐技术,两激光还可以分别在 1 190~1 320 nm 波段及 1 380~1 565 nm 实现连续可调谐输出。

但是,由于镁橄榄石晶体及 Cr:YAG 晶体的 FOM 值及热导率都比钛宝石晶体要低很多,因此所能获得的激光输出功率以及激光效率都远不如钛宝石激光。最近采用一台 1 064 nm 波长的光纤激光器作为新泵浦源,使用啁啾镜补偿腔内色散,通过选取合适的晶体参数和腔型结构,在泵浦源功率为 7.9 W 时,得到了平均功率 760 mW 的高功率镁橄榄石激光脉冲输出^[14]。图 8 为测得的锁模功率曲线,所取得的 12.3% 的斜效率是目前该激光所取得的最高结果,相关仪测得的典型脉宽为 46 fs。

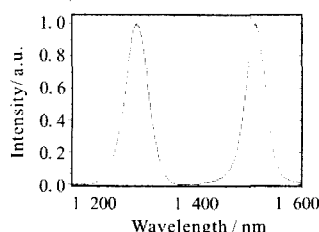


图 7 归一化光谱曲线

Fig.7 Normalized spectra

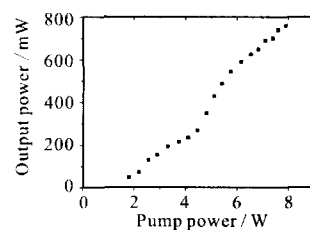


图 8 锁模功率曲线

Fig.8 Output power of mode-locking

5 运行于 1 μm 波段的掺 Yb 飞秒激光

随着超快激光科学技术的迅速发展与应用,能够采用半导体激光直接泵浦的飞秒激光源以其结构紧凑、造价低等优点引起了广泛的关注。在所有能够用于半导体直接泵浦的激光介质当中,掺 Yb³⁺晶体有着显著优势:其发射带宽宽,能够支持飞秒脉冲输出,能级结构简单、量子损耗小、热效应显著降低等。近年来,随着众多新型掺 Yb³⁺晶体材料的相继问题,Yb³⁺超快激光的研制取得了长足的发展,而其中 Yb:YAG 晶体以其成熟的生长加工工艺和优异的热力学性能成为同类晶体中的佼佼者。目前已报道的 Yb:YAG 激光调谐范围可

以覆盖从 1 024~1 109 nm 的波段,从原理上可以支持 1 053 nm 飞秒激光脉冲的产生。但是,由于该晶体的发射谱在 1 030 nm 波长处有一个很锐的尖峰,因此到目前为止,大部分报道的飞秒 Yb:YAG 激光中心波长都在 1 030 nm 左右,并且由于受到尖峰处窄的光谱带宽所限,脉宽一般都大于 300 fs^[15]。

针对高能量激光的应用需求,在对 Yb:YAG 激光不同输出波长情况进行理论研究的基础上,通过选取合适的晶体掺杂浓度和长度、有效抑制 1 030 nm 波段的激光振荡,成功实现了中心波长稳定在 1 053 nm、平均功率为 180 mW 的稳定锁模输出。由于该波段 Yb:YAG 晶体的发射谱较为平坦,实验得到的光谱半高全宽为 7 nm,利用强度自相关仪实测的脉冲宽度为 170 fs(如图 9 所示),优于国际上已报道

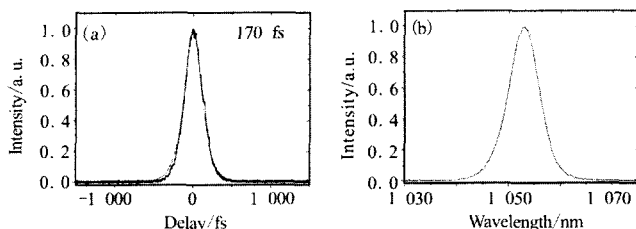


图 9 Yb:YAG 锁模激光的自相关曲线和光谱

Fig.9 Autocorrelation trace and spectrum of the mode-locking Yb:YAG laser

的 1 030 nm 波长结果,对应的脉冲时间带宽乘积为 0.34,接近理论转换极限。鉴于该晶体适合半导体激光直接泵浦以及优异的热力学性能和在 1 050 nm 波段的较宽增益带宽,用该晶体作为 1 053 nm 波段的飞秒种子源无疑比已有的飞秒钛宝石激光、光纤激光及钕玻璃激光有着更加出色的潜力,可以与现有的玻璃激光波长很好地匹配,发展高能量的超短超强激光装置。

Yb:GYSO 是由中科院上海光机所研发的一种新型合金型晶体材料,兼具 Yb:GSO 晶体优异的光学性能和 Yb:YSO 晶体良好的热力学性质。利用该晶体已有高效可调谐连续光输出与皮秒激光输出的研究结果^[16-17]。最近,我们利用该晶体首次获得了飞秒激光的实验运转。

实验中所用晶体的尺寸为 6 mm×5 mm×3 mm,掺杂浓度为 5%。由于该晶体的吸收峰位于 976 nm,为此通过调谐自建的一台连续钛宝石激光,首先获得了该波长平均功率 2 W 的激光输出,用以作为泵浦光。通过采

用平面啁啾镜进行腔内色散补偿,一块调制深度为 0.4%,饱和能量密度为 120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的半导体可饱和吸收片启动并维持锁模,得到了输出功率 300 mW、重复频率 80 MHz 的稳定锁模脉冲输出。实测脉宽为 210 fs,光谱半高全宽 6.4 nm,中心波长 1 093 nm。

此外,利用中科院上海光机所提供的另外一种晶体 Yb:LSO,采用类似的实验结构,得到了平均功率 70 mW 的稳定连续皮秒 Yb:LSO 激光脉冲输出,实测脉冲宽度为 3.6 ps,可分别运转于 1 047 nm 及 1 066 nm 的中心波长。

6 准三能级运行的 900 nm 波段掺 Nd 皮秒激光

在现有的激光介质中,Nd 掺杂的激光晶体是综合性能最好、研究最为广泛的一类增益材料,与 Yb 掺杂的晶体族系相比,虽然 Nd 类晶体的宽带较窄,一般不支持飞秒运行,但由于优良的机械性能、光学性能及四能级运行特性,是全固态激光首选的增益介质,在 1 μm 波段可以理想地实现皮秒激光运行。而在准三能级运行条件下,Nd 掺杂的激光可以实现 900 nm 波段的激光输出,倍频后可运行在蓝光波段。

在成功实现全固态 Nd:YAG 激光锁模及准三能级 974 nm 运行的基础上^[18-19],进一步开展了系列 Nd 掺杂激光晶体的准三能级运行与锁模研究。采用 Nd:GdVO₄ 晶体作增益介质,商用 SESAM 作用锁模启动和维持元件,通过抑制四能级振荡,在约 20 W 的入射泵浦功率下,得到了锁模平均功率 128 mW、脉宽 6.5 ps、中心波长 912 nm 的稳定锁模脉冲^[20],示波器观察到的激光脉冲踪迹清楚地显示了锁模的稳定性能。图 10 分别为示波器在 20 ns 和 20 μs 分辨率下的踪迹图(a)及脉冲

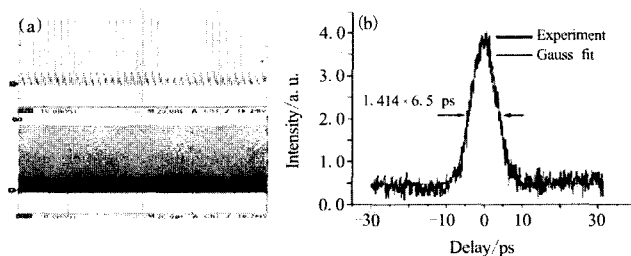


图 10 示波器在 20 ns 和 20 μs 分辨率下的踪迹图及脉冲的强度自相关曲线

Fig.10 Pulse trains observed with two different time scales 20 ns and 20 μs and measured autocorrelation trace of the pulses

强度自相关曲线(b)。同样采用 Nd:LuVO₄ 作为增益晶体,得到了平均功率 88 mW、脉宽 6.7 ps、中心波长 916 nm 的稳定锁模结果。

7 结 论

采用 60 ps 种子脉冲的皮秒钛宝石放大激光的二次谐波作泵浦,通过参量放大技术得到了波长 460 nm~3.6 μm 可调的皮秒激光脉冲,最高单脉冲能量达 30 mJ;通过四倍频泵浦激光,得到了波长从 195~205 nm 可调的近真空紫外皮秒激光,最高单脉冲能量达 16 mJ;通过钛宝石激光振荡器输出的 46 fs 脉冲同步泵浦参量振荡器,得到了波长从 1 100~1 300 nm 可调的 80 MHz 重复频率飞秒激光;采用掺铬的镁橄榄石及 YAG 晶体作为增益介质,得到了近 1.3 μm 及 1.5 μm 通讯波段的飞秒激光脉冲,其中前者的平均功率达 760 mW;采用掺镱的 YAG 及 GYSO 晶体作为增益介质,得到了波长 1 053 nm 及 1 093 nm 的 1 μm 波段飞秒脉冲;采用掺钕的钽酸钷及钽酸镨晶体作为增益介质,得到了波长 912 nm 及 916 nm 的皮秒脉冲。

参考文献:

- [1] BALTUSKA A, FUJI T, KOBAYASHI T. Controlling the carrier-envelope phase of ultrashort light pulses with optical parametric amplifiers[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**:133901.
- [2] RIEDLE E, BEUTTER M, LOCHBRUNNER S, et al. Generation of 10 to 50 fs pulses tunable through all of the visible and the NIR [J]. *Appl Phys B*, 2000, **71**(3):457-465.
- [3] KANG S, KIM D, RHEE, B K, et al. Tunable picosecond infrared pulses generated by optical parametric generation/amplification from a LiNbO₃ crystal [J]. *J of Korea Phys Soc*, 1999, **35**(3): 161-164.
- [4] GRAF TH, FERGUSON A I, BENTE E, et al. Multi-Watt Nd:YVO₄ laser, mode locked by a semiconductor saturable absorber mirror and side-pumped by a diode-laser bar[J]. *Opt Comm*, 1999, **159**:84-87.
- [5] HONNINGER C, ZHANG G, KELLER U. Femtosecond Yb: YAG laser using semiconductor saturable absorbers [J]. *Opt Lett*, 1995, **20**:2402.
- [6] PETROV V, SEIFERT F, NOACK F. Visible optical parametric generator producing nearly bandwidth limited femtosecond light pulses at 1 kHz repetition rate [J]. *Appl Opt*, 1994, **33**:6988.
- [7] GRAGSON D E, ALAVI D S, RICHMOND G L. Tunable picosecond infrared laser system based on parametric amplification in KTP with a Ti:sapphire amplifier [J]. *Opt Lett*, 1995, **20**:1991.
- [8] WANG H, WONG K S, DENG D, et al. Kilohertz femtosecond UV-pumped visible β-barium borate and lithium triborate optical parametric generator and amplifier [J]. *Appl Opt*, 1997, **36**:1889.
- [9] ZHU J F, LING W J, WANG Z H, et al. High-energy picosecond near-vacuum ultraviolet pulses generated by sum frequency mixing of amplified Ti:sapphire laser [J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(25): 6228-6231.
- [10] ZHANG Bai-gang, YAO Jian-quan, ZHANG Hao, et al. Temperature tunable infrared optical parametric oscillator with periodically poled LiNbO₃ [J]. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**: 1077-1080.
- [11] ZHU J F, ZHONG X, TENG H, et al. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator based on MgO-doped periodically poled LiNbO₃ [J]. *Chin Phys Lett*, 2007, **24**(9):2603-2605.
- [12] ZHOU B B, WANG P, CANG Y, et al. Self-starting mode-locked Cr: forsterite laser pumped by 1030 nm Yb:YAG laser [C]// *Proc of SPIE, 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*, 2006, **6279**: 62793W.
- [13] ZHOU B B, ZHANG W, ZHAN M J, et al. Self-starting mode-locked Cr³⁺:YAG laser with Gires-Tournois interferometer mirror for dispersion compensation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57** (3):1742-1745.
- [14] ZHOU B B, ZHANG Y D, ZHONG X, et al. Highly efficient self-starting femtosecond Cr:forsterite laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2008, **25**(10):3679-3681.
- [15] AUS DER AU J, SPÜHLER G J, SÜDMEYER T, et al. 16.2 W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser [J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(11):859-861.
- [16] DU J, LIANG X Y, XU Y. Tunable and efficient diode-pumped Yb³⁺:GYSO laser [J]. *Opt Express*, 2006, **14** (8): 3333-3338.
- [17] LI W X, HAO Q, DING L. Continuous-wave and passively mode-locked Yb:GYSO lasers pumped by diode lasers [J]. *IEEE of Quantum Electronics*, 2008, **44** (6):567-572.
- [18] JIA Y L, WEI Z Y, ZHENG J A. Diode pumped self-starting Nd:YVO₄ laser with semiconductor saturable absorber output coupler [J]. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**(11), 2209-2211.
- [19] LI X, LI D H, ZHANG Z G. Efficient generation of blue light by intracavity frequency doubling of a cw Nd:YAG laser with LBO [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 1421-1425.
- [20] XU CH W, WEI Z Y, HE K N, et al. Diode-pumped passively mode-locked Nd:GdVO₄ laser at 912 nm [J]. *Opt Commun*, 2008, **281**:4398-4400.