

钛宝石飞秒激光脉冲的产生和高重复率放大及压缩实验研究*

赵尚弘 王屹山 陈国夫 王贤华 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要 国内首次完成的高重复率掺钛蓝宝石(简称钛宝石)飞秒激光脉冲的产生和放大实验研究工作. 用自行设计的钛宝石激光器实现了最短脉宽为 15 fs、谱宽为 80 nm、平均输出功率为 200 mW 的自锁模脉冲的稳定输出, 以此作为种子脉冲, 在钛宝石放大器中采用啁啾脉冲再生放大技术, 经展宽、放大、压缩后获得重复率 5 kHz、单脉冲能量大于 100 μ J、脉宽小于 50 fs 的超短脉冲. 文中就该系统的设计及实验结果进行了分析和讨论.

关键词 钛宝石 自锁模 飞秒脉冲 啁啾脉冲放大

近年来, 各种类型的超短脉冲激光的产生技术和应用研究一直是备受关注的课题. 这是由于超短脉冲(脉宽在飞秒量级)在诸如强场物理、化学、生物、医学等领域的超快现象和超快过程研究中有广泛的应用前景. 这其中以钛宝石为代表的固体激光器最为引人注目. 钛宝石由于具有很宽的吸收谱(400~600 nm)和荧光谱(660~1 100 nm, 中心波长为 800 nm)、上能级寿命长(3.2 μ s)、有良好的光学均匀性和导热性、硬度大以及损伤阈值高(0.2~1.2 GW/ cm^2)等优点, 因而很适宜作激光振荡器和放大器的增益介质, 特别是利用自锁模原理可获得飞秒脉冲. 目前国外已有 7.5 fs 的脉冲在腔内群色散补偿很好的钛宝石自锁模激光器中产生出来^[1], 国内见报道有 19 fs 的实验结果^[2]. 但由于一般的钛宝石激光器产生的飞秒脉冲的能量很小(约为 nJ 量级), 还不能作为广泛领域内适用的研究工具, 为此必须将单脉冲能量放大到 μ J 甚至 mJ 量级^[3~6]. 超短脉冲的放大是一项要求极高综合技术的实验工作, 我们用自行设计的自锁模钛宝石激光器产生了最短脉宽 15 fs(一般在 20 fs 以下)、谱宽 80 nm 的激光脉冲, 平均输出功率 200 mW, 重复率 91 MHz. 以此作为种子脉冲, 运用啁啾脉冲再生放大技术作进一步放大、压缩, 最后获得单脉冲能量 100 μ J、脉宽 50 fs、重复率 5 kHz 的超短脉冲.

1 实验系统及结果

本实验由振荡器和放大器两大部分组成, 总体框图如图 1 所示. 我们用 Ar^+ 激光器泵浦

1996-12-29 收稿, 1997-07-20 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

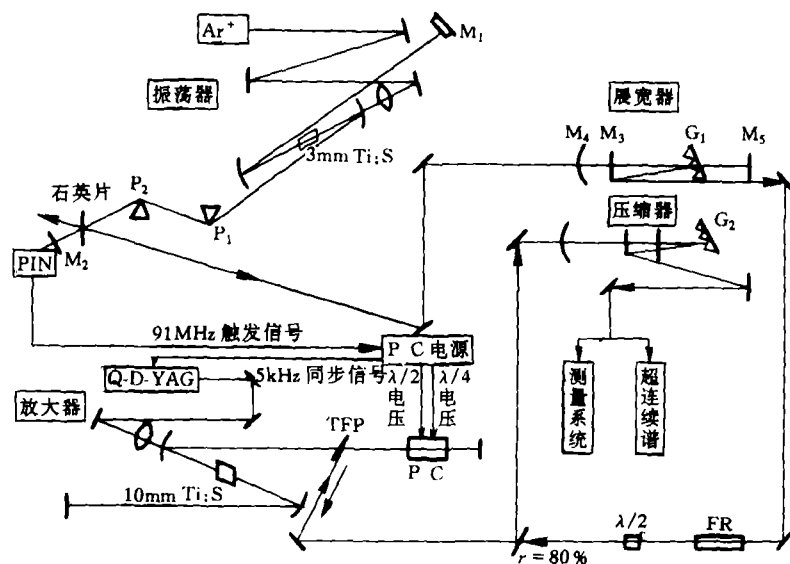


图 1 钛宝石飞秒脉冲的产生和啁啾脉冲再生放大实验结构图

FR 为 Faraday 旋转器, PC 为 Pockelscell 盒, TFP 为薄膜偏振片

的自锁模钛宝石激光器作为种子源振荡器, 用声光调 Q 倍频 YAG 脉冲激光器泵浦的钛宝石晶体作为放大器, 为了避免飞秒脉冲在直接放大时由于其过高的峰值功率给放大器腔内光学元件产生严重损伤和各种可能的非线性效应, 我们采用啁啾脉冲放大技术 (CPA), 即先将脉冲在时域展宽后再进行放大, 最后再压缩到尽可能接近初始脉宽。因此, 放大系统由脉冲展宽器、放大器和脉冲压缩器 3 部分组成。

1.1 带宽扩展腔自锁模钛宝石振荡器

振荡器是 CW 全线 Ar^+ 激光器泵浦 3 mm 的钛宝石激光器, 腔型为四腔镜象散补偿 Z 形折叠腔, 其结构如图 1 中所示, 图中 P_1 和 P_2 组成石英棱镜对, 作腔内群色散补偿用; 平面镜 M_1 安装在扬声器上作自锁模启动用。大多数同类振荡器中, 钛宝石超短脉冲激光器的输出镜 M_2 是在 750~950 nm 范围内的平面镜。通常的镀膜技术难于保证在如此广的光谱范围内维持恒定的部分透过率, 该输出镜的镀膜带宽对输出脉冲的光谱宽度有明显的限制, 这阻碍了产生更短的脉冲。因此, 我们改用平面高反镜代替部分反射镜 M_2 。这样就使谐振腔的带宽达到 200 nm 以上, 从而克服了上述问题。为了获得激光输出, 我们在腔内插入一薄石英片 (1 mm 厚), 一面镀有增透膜, 当石英片法线与光路有一小角度时, 就会在两相反方向上反射出自锁模脉冲, 一路作放大用, 一路作监测用。这一措施大大改进了输出脉冲的光谱宽度, 因而有可能获得更短脉冲。这是本工作的独特之处。

实验所用钛宝石棒长 3 mm (中国科学院上海光学精密机械研究所提供), 当用 5W 的 Ar^+ 激光 (Coherent. Innova 300) 泵浦时, 该系统实现了稳定的自锁模脉冲输出, 平均输出功率在 200 mW 左右; 用自行设计的共线 2 次谐波自相关仪测得脉冲宽度一般在 20 fs 以下, 最短可达 15 fs; 光谱宽度 80 nm。其自相关曲线和光谱曲线如图 2(a)、(b)。

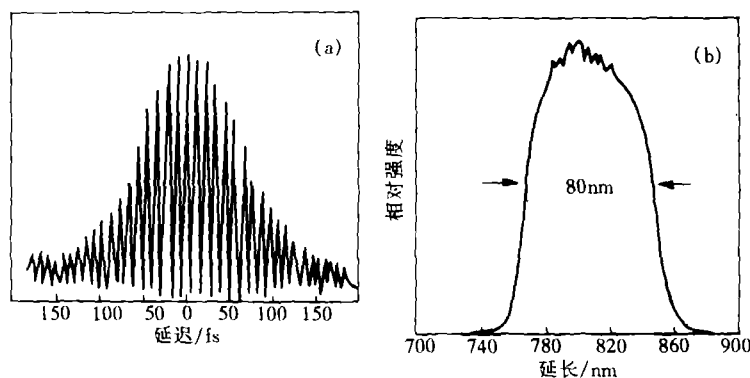


图 2 15.6 fs/80 nm 自锁模种子脉冲自相关曲线(a)和光谱曲线(b)

1.2 啁啾脉冲再生放大系统

1.2.1 脉冲展宽 脉冲展宽是 CPA(chirped-pulse-amplification)技术的一个重要环节,其目的是通过在时域内展宽脉冲,防止超短脉冲在放大后由于峰值功率过高而给放大器光学元件带来损伤,和产生的一些非线性效应如自聚焦、自相位调制、高阶非线性等。我们设计的是一种单光栅展宽器,其结构如图 1 所示。展宽器由 1 200 条/mm 镀金衍射光栅 G_1 、焦距 50 cm 的球面镜 M_4 、位于球面镜焦平面处的平面反射镜 M_5 以及反射镜 M_3 组成。种子脉冲进入展宽器后 4 次经过光栅,由不同频谱成分的角色散形成群色散,从而使脉冲展宽。为了使飞秒脉冲能够安全放大,一般要求将脉冲宽度展宽到皮秒量级^[7],我们在设计时预计将脉冲展宽 1 000 倍,通过计算整个展宽器的群色散量以确定展宽有效距离即光栅 G_1 和平面镜 M_5 之间的距离。用 CCD 相机监测脉冲光束在光栅 G_1 和平面镜 M_5 上的空间展宽图样可判定种子脉冲的带宽是否足够;图 3 是用皮秒条纹相机测得的展宽脉冲形状,展宽脉冲宽度为 22 ps。

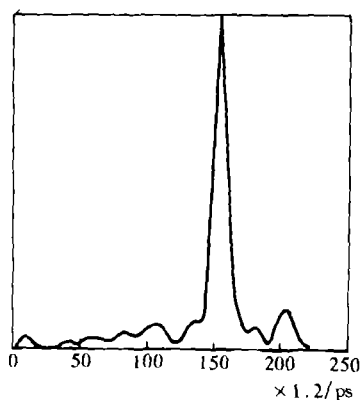


图 3 实验中用皮秒条纹相机测得的展宽脉冲(脉宽 22 ps)

1.2.2 再生放大 我们设计的再生放大器如图 1 所示。由声光调 Q 倍频 YAG 脉冲激光器(北京机电部十一研究所)泵浦 10 mm 长的钛宝石棒,腔型仍为四腔镜 Z 形折叠腔,腔长 1.7 m,再生放大过程包括:

(1) 种子脉冲的注入和同步 展宽后的种子脉冲是水平偏振的,经过 Faraday 旋转器(亦作隔离用)和 $1/2$ 波片后被转为垂直偏振,再以 Brewster 角入射到水平偏振的薄膜偏振片(TFP)上后进入放大器腔内。腔内的 Pockelscell 盒(PC)在静态时已被调节到具有 $1/4$ 波片作用,若未加第 1 个 $\lambda/4$ 阶梯电压,则脉冲经过两次循环后即被倒出腔外,此时脉冲未得到有效放大。若加上第 1 个 $\lambda/4$ 阶梯电压,就可使脉冲持续在腔内振荡,种子脉冲被放大。同时要注意的是放大器腔的调节应保证注入的种子脉冲严格在放大器腔内的原荧光路上振荡,这样才能避免衍射损耗。然而,要真正实现脉冲放大,还必须解决种子脉冲和放大器泵浦源的同步问

题. 只有当泵浦光使放大介质中的粒子数密度达到最大时种子脉冲同时达到, 才可能有最明显的放大效果, 这也是实现放大的关键所在. 实验中首先用振荡器腔镜 M_2 (图 1) 的微弱透射光信号通过 PIN 产生电信号 (91 MHz) 输入到 Pockelscell 盒的驱动电路的分频器上产生 5 kHz 的 TTL 电平信号. 其中一路作为 Pockelscell 盒的阶梯高压驱动信号的触发脉冲, 另一路就用作泵浦源 YAG 激光器的外触发信号, 调节这两路触发脉冲之间的延迟最终实现种子脉冲与泵浦光的严格同步, 从而使脉冲充分放大. 图 4(a) 是脉冲放大后

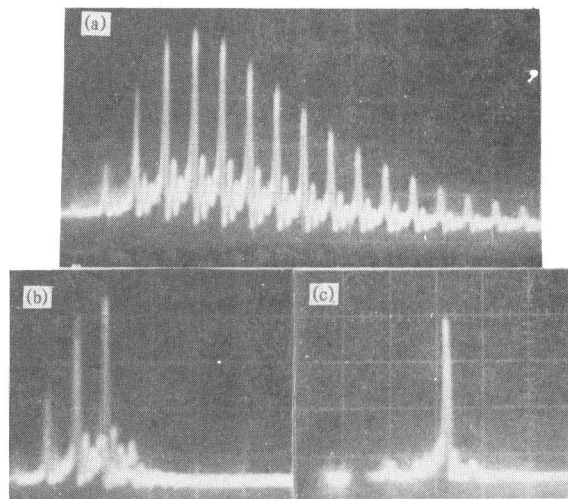


图 4 光脉冲再生放大过程中的能量变化(a)、腔倒空情形(b)和放大后单脉冲(c)

(2) 腔倒空 实验中用示波器实时观察放大效果, 使脉冲达到最充分放大时才给 Pockelscell 盒加上第 2 个 $\lambda/4$ 阶梯高

压, 可通过调节腔倒空延迟时间使放大的脉冲从腔内倒出. 图 4(b) 和 (c) 分别是腔倒空和倒出单脉冲的情形. 放大后的脉冲经 80% 反射率的分束镜取出, 实验中用 4 W 的 YAG 泵浦时获得平均输出功率 0.15 W; 当用 8 W 泵浦时获得输 0.83 W, 重复率 5 kHz, 单脉冲能量 166 μJ .

1.2.3 脉冲压缩 脉冲压缩是 CPA 中的最后一步, 能否将脉冲压缩到尽可能接近初始脉宽关系到整个实验的成功. 我们设计的压缩器结构与展宽器类似, 如图 1, 不同的是改变平面镜与光栅的位置以使群色散符号变为负, 起到脉冲压缩效果. 实验中将展宽光栅和压缩光栅安装在一旋转平台上, 保证进入压缩器的光路和进入展宽器的光路严格平行, 这样才能实现脉冲压缩^[8]. 用自相关仪测量脉宽时, 考虑到压缩脉冲的底座可能较大, 若用共线法测量, 则本底过大影响测量结果, 故用非共线自相关方法. 最后获得脉冲宽度 50 fs、单脉冲能量最大 100 μJ 、重复率 5 kHz 的超短脉冲. 图 5 是实验中测得的压缩脉冲的自相关迹和光谱曲线.

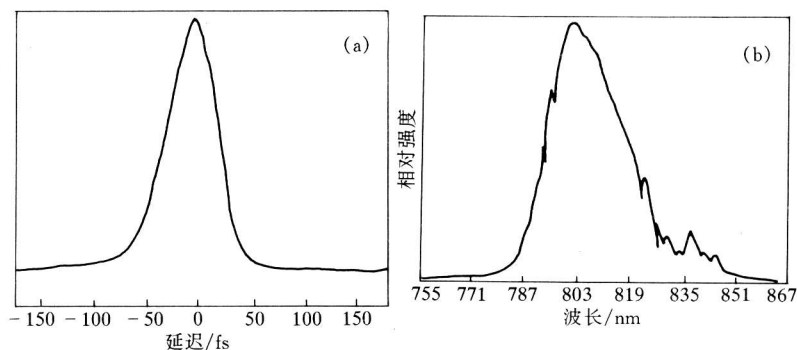


图 5 压缩脉冲的自相关迹(a)和光谱(b)

明显看出,与种子脉冲相比,放大后脉冲光谱变窄.这正是放大过程中的增益窄化效应所致^[9],关于这一问题已另文分析^[10].

1.2.4 超连续谱的产生 用压缩后的脉冲与 1 mm 厚熔融石英片相互作用,进行了超连续谱实验,产生了白光超连续谱,结果如图 6 所示.

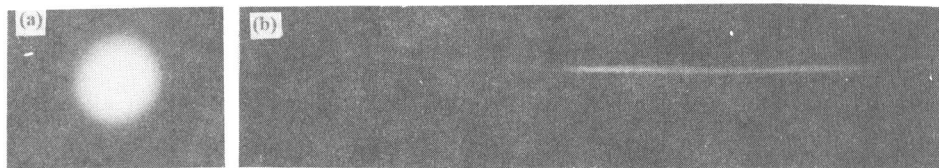


图 6 压缩后的脉冲与石英作用后产生的超连续谱
(a) 是光束经过石英后的白光斑, (b) 是经过光栅衍射后的光谱

2 若干讨论

2.1 关于振荡器

由于该系统的振荡器中采用带宽扩展腔技术使种子脉冲带宽大大加宽,这对脉冲放大起了重要作用.因为在啁啾脉冲再生放大技术中,脉冲的频谱越宽,则脉冲会有足够的展宽,同时在放大器中的增益窄化效应会减弱^[10].实验中亦发现,自锁模脉冲的锁模质量直接影响放大效果:(a)一旦自锁模脉冲由于受到幅度调制(通常是空气中的灰尘使腔镜面变脏所致)过大,则可看到放大脉冲不能实现完全的腔倒空,因此,要求自锁模脉冲接近无调制.(b)注入的种子脉冲的能量大小也对脉冲放大有影响.实验发现,如果注入的种子脉冲平均功率(展宽后)过小,则由于种子脉冲不能完全消耗放大介质中的反转粒子数;而放大器中的自发辐射荧光会很强,因此脉冲就不能被充分放大.增加种子脉冲的功率到一定值时,脉冲就被充分放大,同时自发辐射荧光明显减弱,在图 6 中可看出脉冲链底部基本平直,说明此时荧光很弱.在该实验中测得注入种子脉冲的能量下限约为 60 pJ(平均功率约为 6 mW).但若种子脉冲能量过大,非但不会改善放大效果,反而会降低单程循环增益.这是因为在再生放大系统中,如果种子脉冲能量过大,由于存在非放大的单脉冲 2 次放大而消耗增益介质中的反转粒子数,使放大器的增益下降.

2.2 关于放大器

在啁啾脉冲再生放大器中,影响放大效果的主要因素有 3 个:泵浦源的功率稳定性、放大器腔型设计以及腔倒空效果.在该系统中,泵浦源(YAG)由种子脉冲通过 Pockelscell 盒(图 1 中的 PC)提供的主时钟信号外同步,因此,种子脉冲的随机抖动直接影响放大器泵浦源的功率稳定性.如果泵浦功率抖动过大,则可观察到放大的脉冲链剧烈起伏以致不能实现腔倒空,这也是本实验中的一个难点.只有精心设计、调试振荡器才可避免上述问题.放大器腔型设计决定了输出光束的模式质量.除了应与振荡器腔型匹配外,特别要考虑到使腔模与泵浦光束匹配,这不但会提高放大器的效率,而且有利于种子脉冲充分消耗放大介质中的反转粒子数,提高放大效果.该系统中设计的放大器工作在振荡器条件下的输出功率斜度效率为 30%^[11],放大自发辐射荧光很弱,由图 5 可看出这一点.腔倒空效果直接决定最终得到的放大脉冲能量.实验表明,尽可能严格保持泵浦源与种子脉冲的同步、准确调节 PC 的静态 $\lambda/4$ 效应才可

能得到理想的腔倒空效果。多次测量表明, 该系统的腔倒空效率不小于 90%。

该实验获得的高重复率微焦级飞秒脉冲与国外同类实验系统相比, 技术指标处于同一水平, 有望为我国在生物、医学等领域开展各种超快过程和超快现象研究提供帮助。由于该实验要保证 4 台激光器同时协调、稳定运转才能进行, 特别是自锁模和啁啾脉冲再生放大都要求有相当高的综合技术, 要排除外界因素的细微影响, 泵浦源输出功率要稳定, 腔型设计、光学元件加工要求极高, 这些问题都使本实验难度加大, 因此, 该系统仍有一些地方需要进一步改进。如: (1) 尽可能充分地补偿振荡器腔内的群色散和高价色散, 以期获得更短的脉冲。因为根据变换限制条件, 实验中获得的 80 nm 谱宽可支持 8.5 fs 的脉冲, 而实际测得 15 fs, 这主要是腔内色散补偿不够充分所致。这也说明我们设计的振荡器还有潜力可望获得接近 10 fs 的脉冲。(2) 在放大器中, 提高放大器的效率, 使种子脉冲尽可能多地提取能量, 同时减少放大循环次数以减弱增益窄化效应对脉冲谱宽的影响, 减弱自相位调制效应带来的压缩脉冲的底座子脉冲, 这样有望得到更理想的放大效果。

致谢 中国科学院上海光学精密机械研究所邓佩珍实验组提供了优质钛宝石晶体, 上海仪表公司夏敬芳、王国益以及北京机电部十一研究所竺佩芳研究员在实验中提供了大力帮助, 在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Xu L., Spielmann C H., Krausz F. Ultrabroadband ring oscillator for sub-10 fs pulse generation. *Opt Lett*, 1996, 21: 1256~1258
- 2 林位殊, 赖天树, 陈毓川, 等. 由自锁模钛宝石激光器产生 19 fs 脉冲. *光学学报*, 1995, 15: 1151~1152
- 3 Wynne K., Reid G D., Hochstrasser M. Regenerative amplification of 30 fs pulses in Ti:sapphire at 5 kHz. *Opt Lett*, 1994, 19: 895~897
- 4 Backus S., Peatross J., Huang C P., et al. Ti:sapphire amplifier producing millijoule-level, 21-fs pulses at 1kHz. *Opt Lett*, 1995, 20: 2000~2002
- 5 Zhou J., Huang C., Murnane M M., et al. Amplification of 26-fs, 2-TW pulses near the gain-narrowing limit in Ti:sapphire. *Opt Lett*, 1995, 20: 64~66
- 6 Lenzner M., Spielmann C H., Wintner E., et al. Sub-20-fs, kilohertz-repetition-rate Ti:sapphire amplifier. *Opt Lett*, 1995, 20: 1397~1399
- 7 Joo T., Jia Y., Fleming G R. Ti:Sapphire regenerative amplifier for ultrashort high-power multikilohertz pulses without an external stretcher. *Opt Lett*, 1995, 20: 389~391
- 8 Kane S., Squier L., Rudd J V., et al. Hybrid grating-prism stretcher-compressor system with cubic phase and wavelength tunability and decreased alignment sensitivity. *Opt Lett*, 1994, 18: 1876~1878
- 9 Chuang Y H., Meyerhofer D D., Augst S., et al. Propagation of light pulses in a chirped-pulse amplification laser. *J of Q E*, 1993, 29: 270~280
- 10 赵尚弘, 王屹山, 陈国夫, 等. 超短脉冲放大过程中的增益窄化效应. *光子学报*, 1997, 3: 197~200
- 11 赵尚弘, 陈国夫, 王屹山, 等. 高效高重复率 Q-YAG 倍频脉冲激光器泵浦钛宝石激光器输出特性的研究. *中国激光*, 1996, 11: 961~965