

# 高能量环形长腔再生放大啁啾脉冲激光的研究\*

刘成 王兆华<sup>‡</sup> 沈忠伟 张伟 滕浩 魏志义<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)

(2012年2月16日收到; 2013年1月10日收到修改稿)

介绍了一种新型的高能量环形长腔再生放大器, 通过对谐振腔的模式分布进行计算, 建立了腔长为 12 m 的环形腔再生放大器, 在 150 mJ 的抽运能量下, 得到了单脉冲能量为 20 mJ 的放大激光输出, 对应的转化效率为 13.3%, 其输出激光的能量远远超过了常规的再生放大器输出激光的单脉冲能量. 放大激光的输出光谱为 30 nm, 可以支持 < 40 fs 的傅里叶转换极限脉宽.

**关键词:** 环形腔, 再生放大, 高能量

**PACS:** 42.60.-v, 42.60.Da

**DOI:** 10.7498/aps.62.094209

## 1 引言

在采用啁啾脉冲放大技术 (chirped-pulse amplification, CPA) 的超强激光系统中<sup>[1]</sup>, 由于再生放大器具有光束质量好、光路稳定、便于维护等特点, 通常会被用作放大系统的前级, 常规的再生放大器谐振腔长度一般在 1—2 m 左右, 晶体上的光斑直径在 100—500  $\mu\text{m}$ , 对于掺钛蓝宝石晶体来说, 其饱和能流密度约为 0.9 J/cm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>, 因此线性短腔再生放大器所能输出的最大的单脉冲能量只能限制在 1—5 mJ. 百太瓦啁啾脉冲放大系统中<sup>[3,4]</sup>, 饱和放大后输出的能量需要在焦耳乃至几十焦耳量级, 将线性短腔输出的脉冲放大到如此大的能量需要 10<sup>3</sup> 以上的增益, 单级多通放大并不能引入如此大的增益, 但是多级多通大会造成光束质量的恶化以及增加整个激光系统的复杂性. 因此, 建立一台输出单脉冲能量为几十毫焦耳的再生放大器作为 CPA 系统的前级具有重要的实际意义.

同样腔长的环形腔<sup>[5-8]</sup>与线性腔相比, 具有更大的腔内光斑尺寸, 并且腔长越长, 光斑尺寸越大, 在同样的饱和能流下, 利用环形长腔可以得到更大的能量. 因此, 我们建立了腔长为 12 m 的环形

长腔再生放大器, 在 150 mJ 的抽运能量下, 得到了单脉冲能量为 20 mJ 的放大激光输出, 对应的转化效率为 13.3%, 再生放大器输出的光谱半高全宽为 30 nm, 可以支持小于 40 fs 的脉冲宽度.

## 2 环形长腔的腔型设计

对于再生放大器而言, 腔型的设计至关重要. 首先, 腔内的光学元件应该尽量远离束腰的位置, 这样才能避免光学元件受到损伤; 其次, 为了得到更大的能量, 腔型的设计应该使得在激光增益介质内的光斑尺寸较大, 保证种子光在饱和之前从抽运光中得到更大的增益, 从而得到更高的能量. 为了使抽运光和种子光在空间模式上得到更好的重合, 应该使增益介质中抽运光和种子光的光束直径得到匹配.

我们选用环形共焦腔作为再生放大器的谐振腔, 腔长为 12 m, 在腔内放置两片曲率半径  $R = 4$  m 的宽带凹面反射镜, 二者之间的距离为 5 m, 腔内的普克尔盒、格兰棱镜以及 Ti: sapphire 晶体放置在远离腰斑的位置, 普克尔盒以及格兰棱镜处的光斑直径约为 2.5 mm, 不会造成损伤. 经过计算, 在 10 Hz、150 mJ 的抽运能量下, 晶体的热透镜焦距

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10804128, 11174361)、国家高技术研究发展计划 (863 计划) 和中国科学院知识创新工程方向性项目 (批准号: KJCX2-YW-N36) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

<sup>‡</sup> 通讯作者. E-mail: zhwang@iphy.ac.cn

为 20 m, 这样长的热透镜焦距, 在计算腔内模式的时候可以忽略不计. 利用 ABCD 矩阵计算环形长腔的稳腔条件以及腔内各个位置处的光斑分布, 计算得到该谐振腔稳腔条件

$$\frac{A+D}{2} = -0.62. \quad (1)$$

两片凹面镜上的光斑直径  $\omega_1 = \omega_2 = 3$  mm, 腔内腰斑直径  $\omega_0 = 1.2$  mm. 由于 Ti: sapphire 晶体靠近凹面镜放置, 其上的光斑近似为 3 mm, 因此能够支持的最大能量为 56 mJ.

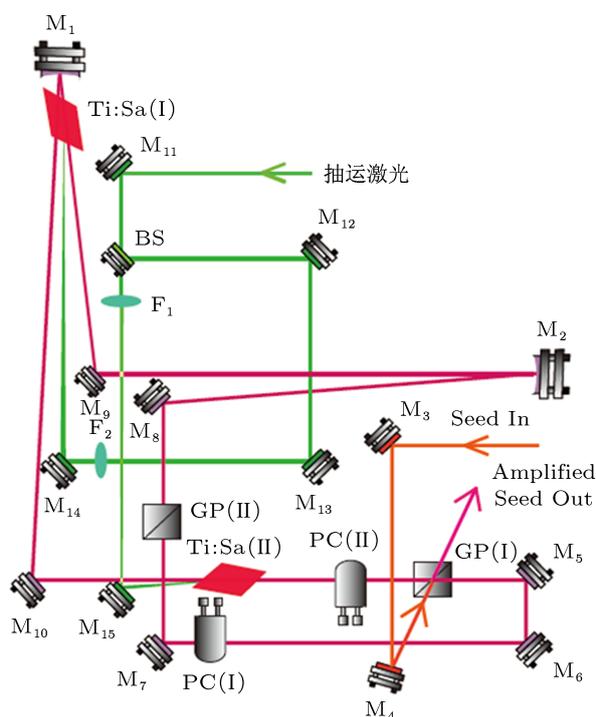


图 1 环形长腔再生放大器光路布局图(图中  $M_1, M_2$  为曲率半径为 4 m 的 700—900 nm 宽带凹面镜,  $M_3—M_{10}$  为 700—900 nm 45° 全反的宽带平面反射镜,  $M_{11}—M_{15}$  为 45° 532 nm 全反镜,  $F_1, F_2$  为焦距为 1000 mm 的正透镜, BS 为 532 nm 1:1 分束镜, GP(I), GP(II) 为格兰棱镜, PC(I), PC(II) 为普克尔盒, Ti:Sa(I), Ti:Sa(II) 为掺钛蓝宝石晶体)

该再生放大器的抽运源是一台闪光灯抽运的腔外倍频 532 nm 绿光激光器 (Quanta-Ray Pro, 光谱物理公司), 该激光器最大的输出单脉冲能量为 300 mJ, 激光的重复频率为 10 Hz. 实际使用的抽运能量为 150 mJ, 抽运能量通过分束比为 1:1 的绿光分束片分束以后, 分别经过焦距为 1000 mm 的正透镜聚焦到布鲁斯特角切割的钛宝石晶体上. 钛宝石晶体对于水平偏振的抽运光单程的吸收效率为 90%, 抽运激光在两块钛宝石晶体上的光斑直径均为 3 mm, 对应的功率密度为 20 MW/cm<sup>2</sup>. 为了增加有效增益长度并降低热效应的影响, 在腔内放置

两块钛宝石晶体 (具体位置如图 2 中所示), 晶体的尺寸为 7 mm × 7 mm × 10 mm, 既能得到更高的转化效率, 也可以缓解单块晶体上的热压力. 其中一块晶体放在腔内凹面反射镜的附近, 这样可以保证种子腔内单程两次通过钛宝石晶体, 更有效地利用抽运光的能量, 得到更高的增益.

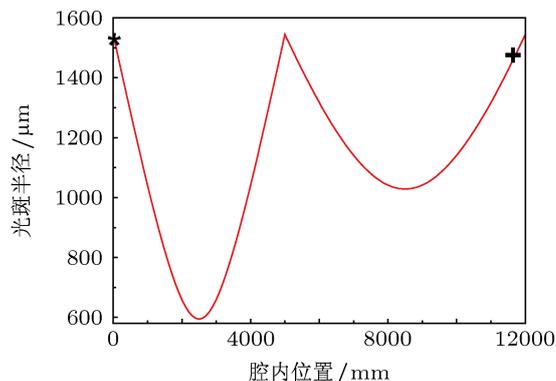


图 2 环形再生谐振腔内光斑分布 (“\*”代表贴近凹面镜的 Ti: sapphire 晶体所在的位置, “+”表示靠近普克尔盒的 Ti: sapphire 晶体所在的位置)

### 3 环形长腔再生放大器光路结构以及实验结果

环形长腔再生放大器种子来自于自行搭建的棱镜对补偿色散的 20 fs 振荡器<sup>[9]</sup>, 该振荡器输出功率为 300 mW, 重复频率为 80 MHz, 光谱的半高全宽为 50 nm (图 5(a)), 经过 Öffner 展宽器展宽至 600 ps 以后, 注入到再生放大腔内. 按照计算得到的再生谐振腔内的光斑分布, 合理设置各个光学元件在腔内的位置, 以免造成对光学元件的损伤. 展宽后的水平偏振种子光, 经过选单以后, 经过由半波片和法拉第旋光器组成的隔离器, 偏振方向变成垂直偏振, 经过格兰棱镜反射到腔内, 再经过普克尔盒之后偏振转为水平偏振, 进入到钛宝石晶体内进行放大, 当脉冲放大到饱和状态以后, 经过第二个普克尔盒, 偏振方向又变成垂直偏振, 由格兰棱镜导出腔外. 再生放大器中, 分别采用两个普克尔盒的电压上升沿来控制种子的注入和导出, 这是因为普克尔盒控制电压的上升时间要短于下降时间, 更有利于去除预脉冲和后脉冲, 提高纳秒量级的信噪比. 与一般的再生腔相比, 我们没有选择薄膜偏振片作为腔内的偏振元件, 而是使用格兰棱镜, 是因为薄膜偏振片前后两个表面的反射不仅损失能量, 并且还会在主脉冲之前引入皮秒量级预脉冲, 降低系统的信噪比. 格兰棱镜虽然会引入少量的空

间色散, 但不足以影响压缩后放大脉冲的聚焦. 利用焦距为 1000 mm 的正透镜对抽运光进行聚焦, 透镜离钛宝石晶体的距离为 700 mm, 经过计算, 抽运激光在钛宝石晶体上的光斑直径为 3.2 mm, 与上述计算得到的再生腔内 Ti: sapphire 晶体上的模式匹配, 从而可以达到对抽运光的最大利用率.

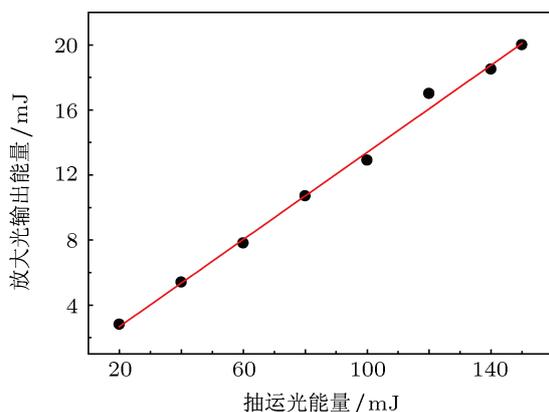


图3 放大激光输出能量随着入射抽运能量的变化 (黑点表示实际测量值, 红线表示线性拟合结果)

在 150 mJ 抽运能量下, 得到了 20 mJ 的放大能量, 转化效率为 13.3%, 图 3 为输出能量随着抽运能量的变化. 考虑到腔内元件的损伤阈值, 并没有继续增加抽运光的能量, 并且 20 mJ 的放大光能量足以满足后续放大的饱和输出要求.

图 4(a) 是长腔再生放大器腔内的脉冲序列, 从图中可以看出, 脉冲之间的间隔为 40 ns, 对应的腔长为 12 m. 对于放大系统来说, 要适当的选择一个种子进行放大, 避免出现多个种子的情况, 因此要严格监视从放大器冲输出脉冲的情况; 种子倒空后, 使用一个光电二极管探测输出激光的情况; 图 4(b) 表示放大后倒空输出的放大单脉冲, 在饱和的情况下, 利用示波器没有观察到预脉冲, 经过测量系统的纳秒预脉冲信噪比为  $1.6 \times 10^5$ , 纳秒预脉冲的来源主要是由于选单以及倒空过程中普克尔盒以及格兰棱镜有限的消光比造成的, 利用后续的两个普克尔盒进一步对纳秒预脉冲进行抑制, 可以提高三个数量级, 达到  $10^8$  以上. 对于放大器而言, ASE 的单程增益可以由 (2) 式表示, 从 (2) 式可以看出, 立体角越小, ASE 的强度  $I_{ASE}$  就会越小. 在激光谐振腔内, 平面发散角  $\theta$  与腰斑半径  $\omega_0$  之间的关系由 (3) 式所示<sup>[10]</sup>, 腰斑半径越大, 平面发散角越小, 对应的空间立体角  $\Omega$  就越小, 所以 ASE 的强度就越小. 谐振腔的腔长越长, 对应的腔内腰斑尺寸就越大. 对于一般的腔长在 1 m 之内的再生腔来说, 其

腰斑直径在 100  $\mu\text{m}$  左右, 而如图 1 所示, 本文环形长腔中腰斑直径为 1.2 mm 左右, 所以单从这一个因素考虑, ASE 的强度将有一个数量级的降低.

$$I_{ASE} = I_s \frac{\Omega}{4} \frac{G_0}{(\ln G_0)^{1/2}}, \quad (2)$$

$$\frac{\theta}{2} \omega_0 = \frac{\lambda}{\pi}, \quad (3)$$

$$\Omega = \pi \left( \frac{\theta}{2} \right)^2, \quad (4)$$

其中,  $\theta$  为发散角、 $\omega_0$  为腰斑半径、 $I_s$  为饱和能流、 $G_0$  为小信号增益系数.

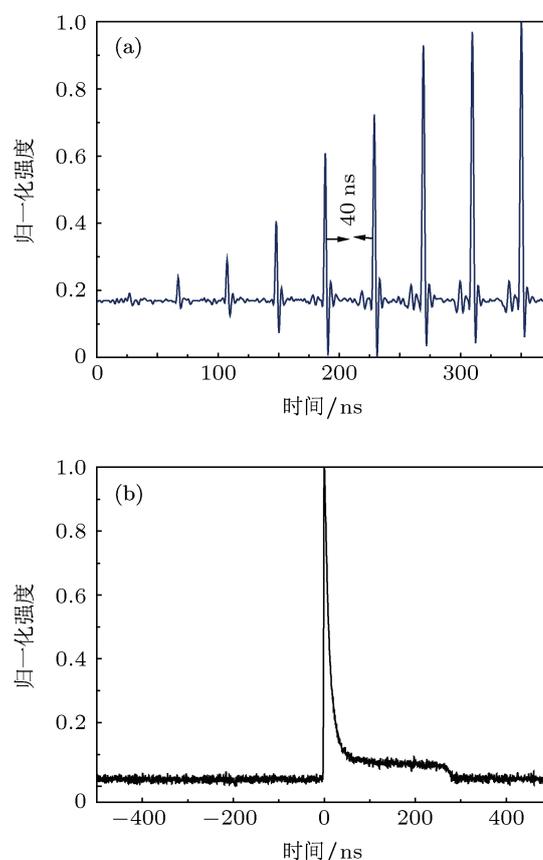


图4 (a) 倒空以后环形长腔腔内放大脉冲序列; (b) 示波器观察到的环形长腔输出的单个放大激光脉冲

从振荡器输出的脉冲光谱半高全宽为 50 nm, 如图 5(a) 所示. 未注入种子时, 环形再生腔自由振荡的激光光谱底宽为 100 nm 左右, 如图 5(b) 所示, 可以支持种子光所有光谱成分进行放大, 注入种子之后, 由于增益窄化效应, 放大光的光谱变窄, 此时的光谱宽度为 30 nm, 如图 5(c) 所示, 这样的光谱带宽可以支持小于 40 fs 的压缩脉冲宽度. 在后续的实验中将使用声光调制晶体 (AOPDF) 对种子光的光谱进行调制, 抑制增益窄化效应, 并且优化整个系统的色散, 以得到更窄的压缩脉冲宽度. 再对种

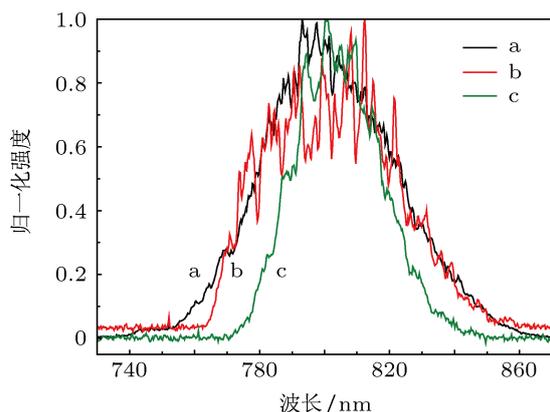


图5 (a) 振荡器输出光谱; (b) 未注入种子再生腔自由振荡激光光谱; (c) 注入种子后再生放大输出光谱

子光不展宽直接进行预放大, 然后利用饱和吸收体对 ASE 进行滤波, 提高种子激光的信噪比, 以期得

到更高能量和更高信噪比的种子脉冲, 注入到环形长腔再生放大器中, 将进一步提高放大器输出激光的信噪比, 满足物理实验的要求.

## 4 结论

设计搭建了一套环形长腔再生放大激光系统, 在 150 mJ 抽运能量下, 得到了单脉冲能量为 20 mJ 的放大激光输出, 对应的转化效率为 13.3%. 输出光谱为 30 nm, 可以支持小于 40 fs 的压缩脉宽. 系统中的 ASE 成分得到了有效抑制, 可以作为高信噪比啁啾脉冲放大系统的前级预放大器, 为研制高信噪比的几百 TW 量级的超强激光系统打下了良好的基础.

- [1] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219
- [2] Yanovsky V, Felix C, Mourou G 2001 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **7** 539
- [3] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H, Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
- [4] Wei Z Y, Wang Z H, Wang P, Ling W J, Zhu Z F, Han H N, Zhang J 2008 *Journal of Physics: Conference Series* **112** 032003
- [5] Zhao H, Wang P, Wei Z Y, Tian J R, Li D H, Wang Z H, Zhang J 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 115
- [6] Matsushima Isao, Yashiro Hidehiko, Tomie Toshihisa, 2006 *Opt. Lett.* **31** 2066
- [7] Yamakawa Koichi, Barty C P J 2003 *Opt. Lett.* **28** 2402
- [8] Yanovsky V, Felix C, Mourou G 2002 *Appl. Phys. B* **74** 181
- [9] Zhao Y Y, Han H N, Teng H, Wei Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1709 (in Chinese) [赵研英, 韩海年, 滕浩, 魏志义 2009 物理学报 **58** 1709]
- [10] Koechner W 1996 *Solid-State Laser Engineering, Vol. 1 of Springer Series in Optical Sciences* (Springer-Verlag, 1996) p183

# A long ring regenerative cavity for high energy chirped pulse amplification\*

Liu Cheng Wang Zhao-Hua<sup>‡</sup> Shen Zhong-Wei Zhang Wei  
Teng Hao Wei Zhi-Yi<sup>†</sup>

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

(Received 16 February 2012; revised manuscript received 10 January 2013)

## Abstract

We demonstrate a novel regenerative amplifier with a long ring cavity. Calculation on cavity parameters supports a large mode size. Based on the simulation with the cavity design software, we successfully established a 12 m ring regenerative amplifier. The amplified laser energy up to 20 mJ was obtained under 150 mJ green pump laser at a repetition rate of 10 Hz, corresponding to 13.3% conversion efficiency. The spectral bandwidth of the output pulse was 30 nm, which could support a sub 30 fs pulse duration. After seed injection, the ASE of the amplifier was effectively suppressed.

**Keywords:** ring cavity, regenerative amplifier, high-energy

**PACS:** 42.60.-v, 42.60.Da

**DOI:** 10.7498/aps.62.094209

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804128, 11174361), the National High Technology Development Program of China, and the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJCX2-YW-N36).

† Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhwang@iphy.ac.cn