

# 双向抽运钛宝石的高效率多通脉冲主放大研究<sup>\*</sup>

令维军 王兆华 王 鹏 贾玉磊 田金荣 魏志义<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2004 年 7 月 23 日收到, 2004 年 8 月 16 日收到修改稿)

从啁啾脉冲放大的基本理论出发, 系统地计算了啁啾脉冲在多通放大过程中的增益特性, 并设计了一个六通主放大器, 对应能量提取效率为 38%, 输出能量大于 1J.

关键词: 双向抽运, 多通放大, 钛宝石激光器

PACC: 4260B, 4280W

## 1. 引 言

高强度超短脉冲的产生一直是激光技术研究的热点之一. 目前, 基于啁啾脉冲放大(CPA)技术的高峰功率掺钛蓝宝石激光器已取得了长足的进展和广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 在诸多 CPA 系统的工作介质中, 掺钛蓝宝石是首选的增益放大介质之一. 这不仅是因为它具有极宽的增益带宽(660—1100nm), 而且其良好的热性能和极高的损伤阈值, 使其十分适合于高重复频率和高能量运转. 同时, 宽带的吸收谱(400—600nm)十分适合于已商业化的输出波长 532nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器抽运. 通常 CPA 技术是先将飞秒脉冲展宽至几百皮秒甚至纳秒量级, 经过再生预放大或多通预放大将纳焦量级的脉冲放大至毫焦量级, 然后通过一级或两级多通主放大系统, 将毫焦量级脉冲放大至几百毫焦到几焦耳, 最后用光栅压缩器将脉冲压缩到接近初始脉宽. 再生放大仅适合于将纳焦量级脉冲放大至毫焦量级, 其腔内较多的光学元件和放大次数带来的严重的增益窄化效应及材料色散, 不利于最后的脉冲压缩, 同时, 也限制了输出能量的提高. 为了进一步提高脉冲能量, 则需对预放大的脉冲进一步进行多通主放大. 本文考虑到晶体的损伤阈值和增益均匀性, 采用双向抽运机理, 分别用两个 1.3J 倍频光能量、10Hz 重复率的 Nd:YAG 激光器双向抽运掺钛蓝宝石晶体, 采用一个六通的主放大结构, 获得了大于 1J 的输出能量.

## 2. 双向抽运钛宝石激光的多通放大理论

多通放大器是用一组小角度排列的镜子将放大光依次反射, 使放大光多次通过增益介质, 以便尽可能多地从增益介质中提取能量, 放大光经过增益介质的次数一般在 2—10 之间, 对于多通预放大典型值为 8—10<sup>[4,5]</sup>. 对于多通主放大, 由于受限于放大光空间像散及抽运光与放大光在增益区的有效耦合, 一般放大程数小于 6 程, 对于需要大于 6 程的主放大器, 一般采用两级多通主放大系统<sup>[6]</sup>. 多通放大过程表现为光场与受激发物质之间的相互作用, 可以用麦克斯韦电场方程、薛定谔材料极化方程和粒子数反转方程来表征其作用过程<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \mu_0 \alpha \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial z^2} + \frac{2}{T_2} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \omega_a^2 \mathbf{P} = -KNE, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{N - N_e}{T_1} = \frac{2}{\hbar \omega_a} \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{P}$  分别为放大光的电场分量和介质的共振跃迁极化矢量,  $\alpha$ ,  $n$  和  $\hbar \omega_a$  分别为介质的损耗系数、介质的折射率和跃迁能级的光子能量,  $N_e$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  分别为无外加信号时初始热平衡态下的反转粒子数、纵向和横向弛豫时间,  $\omega_a$  为受激发射的中心频率. 注意到大多数固体激光介质的横向弛豫时间  $T_2$  约为 1—10ps, 而待放大的脉冲一般大于 100ps, 远大

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60225005 和 10227401)和国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1999075202)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

于横向弛豫时间  $T_2$ . 可简化消去共振跃迁极化矢量  $P$ , 得到放大光的传输方程:

$$\left(\frac{1}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathcal{K}(z, t) = [\sigma \mathcal{N}(z, t) - \gamma] \mathcal{K}(z, t), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathcal{N}(z, t)}{\partial t} = -\frac{2\sigma}{\hbar\omega_a \mathcal{N}(z, t)} \mathcal{K}(z, t). \quad (5)$$

在热平衡下, 一个三能级系统粒子数变化遵循以下两式:

$$\frac{\partial N_1(z, t)}{\partial t} = -\frac{n\sigma}{\hbar\omega_a} \mathcal{K}(z, t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} = \frac{n\sigma}{\hbar\omega_a} \mathcal{K}(z, t) + \frac{N_2}{\tau_R}, \quad (7)$$

其中  $\gamma$ ,  $\sigma$ ,  $\tau_R$  分别为介质内部线性损耗系数、跃迁发射截面和下能级态的衰变时间, 对于固体材料,  $\tau_R$  的典型值为 1—100ns, 相对于其他弛豫过程可近似认为  $\tau_R \rightarrow \infty$ , 在内部损耗  $\gamma = 0$  时, 经过复杂的代换后积分, 可得到关于放大光通量的方程为

$$\mathcal{K}(z) = J_s \ln\{\alpha(z) \exp[\mathcal{K}(0) J_s] - 1\}, \quad (8)$$

其中  $\alpha(z) = \exp\left(\sigma \int_0^z n(\xi) d\xi\right)$  为小信号增益,  $\mathcal{K}(z)$  为放大光的光通量,  $J_s$  为饱和通量, 它主要由增益介质的特性决定. 显然在单程放大过程中, 只要给定初始小信号增益及光通量的值即可求得介质任何位置的放大光的光通量. 但在实际的多通放大过程中, 随着放大程数的增加, 会消耗大部分介质储能, 使介质的增益降低, 同时, 下能级的弛豫时间对增益有一定的影响, 可引入增益恢复系数  $P^{[7]}$ , 介质各段上在放大前后的增益迭代关系为

$$g_{k+1} = g_k - P \Delta J_k / J_s, \quad (9)$$

$$\alpha(z) = \exp(g(z)), \quad (10)$$

$$\Delta J_k = J_{k+1} T^{-1} - J_k, \quad (11)$$

其中  $k$  为放大次数, 对于非简并情况,  $P$  的范围为  $1/(X \text{ 完全恢复}) < P < 1$  (完全未恢复), 在我们的放大装置中, 相邻放大的时间间隔约为 5ns, 远小于下能级的弛豫时间, 可认为是完全未恢复,  $P = 1$ . 在放大光传输过程中, 存在光的反射、吸收、散射等损耗, 可引入单程损耗系数  $T$ , 得到第  $k$  次放大与第  $k+1$  次放大的迭代关系:

$$J_{k+1} = T J_s \ln\{G_k [\exp(J_k / J_s) - 1]\}. \quad (12)$$

### 3. Nd:YAG 双向抽运数值模拟与实验

在实际的多通光路设计中, 往往是事先知道抽

运光的能量以及所要实现的输出能量的大致范围, 因此, 在多通光路的设计中, 首先要进行数值模拟, 以确定设计光路的放大程数、抽运光的光斑大小, 以及预放大光的扩束比等. 对于多通主放大器, 虽然单向抽运具有简单的结构<sup>[8]</sup>, 但对于大能量抽运的情况, 一般多采用双向抽运机理. 这是因为双向抽运在保证高增益的前提下, 可有效降低能量密度, 避免了晶体端面的损伤, 同时也改善了介质增益的空间均匀性. 为了建立双向抽运计算模型, 首先须确定介质增益与抽运光通量的关系:

$$G = \exp(J_{\text{sto}} / J_s), \quad (13)$$

$$J_{\text{sto}} = \eta J_{\text{pa}} (\lambda_p / \lambda_s), \quad (14)$$

其中  $J_{\text{sto}}$ ,  $J_{\text{pa}}$  分别为介质的储能通量和抽运光通量,  $\eta$  为介质吸收抽运光能量到上能级储能的转换效率,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_s$  分别为抽运光波长和放大光波长. 根据以上定义, 可求出在双向抽运下, 增益介质任何一点  $z$  处的介质增益系数为

$$g = J_{\text{sto}} / J_s = \alpha (g_r + g_l), \quad (15)$$

$$C = \eta \mathcal{K}(0) J_s (\lambda_p / \lambda_s), \quad (15a)$$

$$g_r = e^{-\alpha z} (1 - e^{-\alpha \Delta z}), \quad (15b)$$

$$g_l = e^{-\alpha(l-z)} (1 - e^{-\alpha \Delta z}), \quad (15c)$$

$l$  为晶体的长度, 下标  $r, l$  分别为右边和左边. 利用上述关系式, 结合具体实验参数, 首先对主放大实验进行了数值模拟, 模拟结果显示六通放大后输出饱和能量为 1.1J, 如图 1 所示. 为了全面了解 Nd:YAG 激光器双向抽运钛宝石的放大特性, 分别模拟了在不同能量的入射光下, 以及不同能量的抽运光下放大光的输出特性. 图 2 为多通主放大的数值模拟结果. 结果表明, 抽运光的抽运通量对多通放大程数影响最为显著, 例如在抽运通量为  $0.5 \text{ J/cm}^2$  时, 需要约 20 程放大能量才能达到饱和, 而抽运通量为  $3 \text{ J/cm}^2$  时, 仅需 4 程放大能量就能达到饱和, 这显然是大的抽运通量具有较高的介质增益的缘故. 在扩束比一定时, 不同能量的入射光虽然对放大程数的影响没有抽运通量那么显著, 但对达到饱和前的放大光能量影响十分明显, 例如在第四程放大后,  $1 \text{ mJ}$  的入射光仅放大到  $288 \text{ mJ}$ , 而  $3 \text{ mJ}$  的入射光已经放大到  $615 \text{ mJ}$ , 如图 3 所示. 在大多数情况下, 人们仅关注的是放大光的能量, 而不考虑是否达到饱和, 所以多通主放大前尽可能提高入射光的能量, 即从预放大输出的能量, 则可用较少的放大程数达到很高的放大能量输出. 在实际的多通光路设计中, 预放大光的扩束比是一个很有用的参数, 它直接关系到主放

大器可输出的最终放大能量及放大光对放大元件的损伤程度,图4模拟了不同扩束比下六通路中输出放大光的通量.结果表明:小的扩束比对应着较高的放大光通量,加上主放大严重的自聚焦效应,很容易损坏光学元件和晶体,但扩束比过大则放大效率低,不易达到饱和.

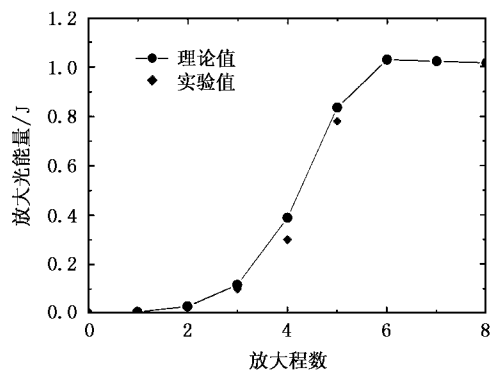


图1 多通放大程数与放大光输出能量关系

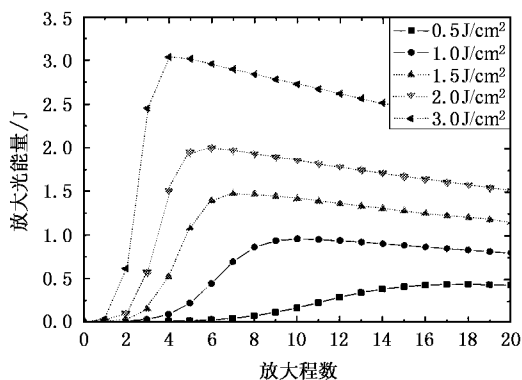


图2 不同抽运通量对脉冲放大能量的影响

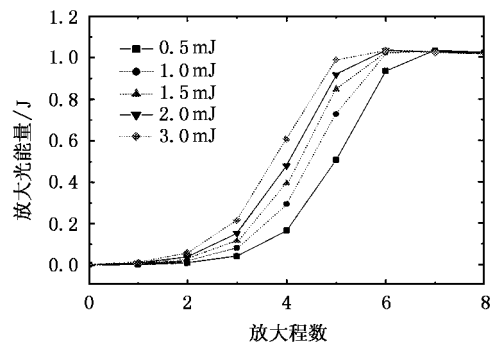


图3 不同能量的预放大光对脉冲放大能量的影响

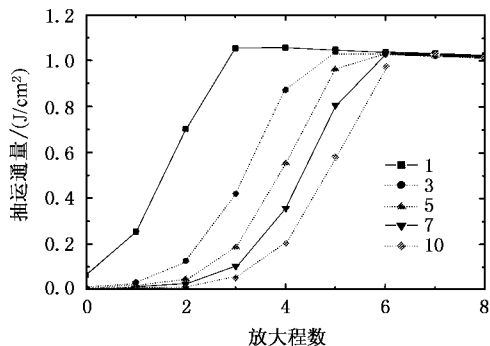


图4 不同扩束比对放大光能量的影响

kHz的Nd:YAG作为抽运源的再生放大器,输出能量的稳定性和光束质量均优于10Hz的Nd:YAG,将10Hz的触发信号与主放大抽运源同步后作为普克尔盒的外触发信号,经普克尔盒选单后获得稳定的单脉冲能量约为1.5mJ.在7倍的扩束比下,将预放大光扩束至11mm.为了获得较高的增益,同时又不损伤钛宝石晶体,利于晶体的长期安全使用,选取抽运通量为 $1.37\text{J}/\text{cm}^2$ ,低于钛宝石晶体的经验损伤阈值 $4\text{J}/\text{cm}^2$ .所用的钛宝石激光晶体的吸收系数为 $1.6\text{cm}^{-1}$ ,其形状为直径25mm、长20mm的圆柱体,两端均镀有对532和800nm宽带增透的高损伤阈值膜.为了使钛宝石晶体能够最大程度地吸收抽运光,实验中先旋转晶体以使抽运光的波矢垂直于晶体的c轴,即使p偏振在晶体的 $\pi$ 平面内,此时对应的透射光最小.在设置多通路时,采用相对于晶体表面最小的入射角将各程的反射镜以约 $45^\circ$ 角排列,这样保证了抽运光与放大光的有效耦合,从而获得尽可能高的增益.经过优化调试后,6程放大后的能量高于1J,对应38%的放大效率.据我们所知,目前的这一结果是双向1.3J能量抽运下的最好结果.

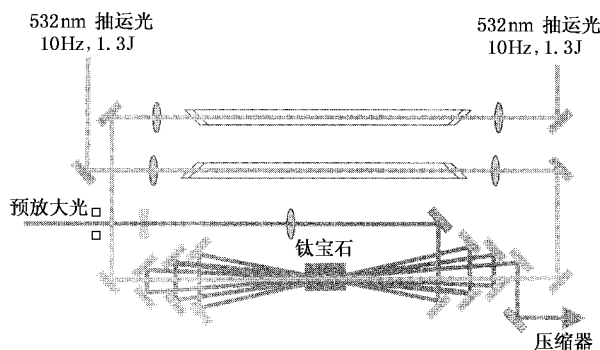


图5 六通主放大光路示意图

结合以上数值模拟结果,我们设计了一个六通主放大光路,如图5所示.前一级预放大系统是用

## 4. 结果与讨论

从光在增益介质中传输放大的基本理论出发,对多通主放大进行了模拟计算,并根据数值模拟结果设计了一个六通主放大器,在 10Hz, 1.3J 的抽运能量下,获得了超过 1J 的放大光能量,对应 38% 的转换效率.

为了获得高稳定和高光束质量的放大光输出,我们采用了 kHz 的 YAG 激光器作为再生预放大的抽运源,这种激光器具有极高的能量稳定性和极好的光束质量,保证了预放大种子光的稳定性和高的光束质量,这也是本实验的特色之一.同时,对进行空间滤波前和空间滤波后的抽运光对放大输出光的影响进行了比较,结果发现,进行空间滤波后的抽运

光不仅使放大光的光斑质量得到明显的改变,而且提高了放大光的输出能量,这主要是因为空间滤波改善了抽运光的横向分布,使增益区的增益分布更加均匀,使边缘的放大光与中心的放大光几乎得到同样的增益.主放大过程中严重的自聚焦效应很容易损坏放大元件,而且使光束质量变差,除了选择适当的扩束比外,晶体的均匀冷却十分重要,我们将圆柱形晶体用导热钢薄均匀包边后,通过水冷的紫铜夹将晶体固定冷却,用低于 10℃ 的水冷却晶体,大大地降低了高能量抽运带来的热效应,有效地抑制了噪声,提高了光束质量.经过上述特性化设计后,得到高光束质量高于 1J 放大光输出.

感谢张杰院士的有益讨论.感谢徐军教授提供优质的钛宝石晶体.

- [ 1 ] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H and Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
- [ 2 ] Kalachnikov M P, Nickles P V, Schönagle H and Sandner W 2001 *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A* **472** 254
- [ 3 ] Wang Y S, Cheng G H, Liu Q, Sun C D, Zhou W and Chen G F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 87 [ in Chinese ] 王屹山、程光华、刘青、孙传东、赵卫、陈国夫 2004 物理学报 **53** 87 ]
- [ 4 ] Cheng Z, Krausz F and Spielman C 2002 *Opt. Commun.* **201**

145

- [ 5 ] Zhang S K, Wen G Q, Zhou P Z, Wang X D, Man Y Z and Peng H S 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 908 [ in Chinese ] 张树葵、文国庆、周丕璋、王晓东、满永在、彭翰生 1997 物理学报 **46** 908 ]
- [ 6 ] Pittman M *et al* 2002 *Appl. Phys. B* **74** 529
- [ 7 ] Lowdermilk W H and Murray J E 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 2436
- [ 8 ] Wei Z Y, Zhang J and Xia J F 2000 *Sci. China* **30** 1083

# The main multi-pass amplifier with double-side pumped Ti :sapphire<sup>\*</sup>

Ling Wei-Jun Wang Zhao-Hua Wang Peng Jia Yu-Lei Tian Jin-Rong Wei Zhi-Yi<sup>†</sup>

( *Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China* )

( Received 23 July 2004 ; revised manuscript received 16 August 2004 )

## Abstract

Based on the theory of multi-pass amplification , we analyse numerically the character of gain for amplified pulse and design a 6-pass amplifier. With two 1.3J , 532nm Nd :YAG lasers as the source , amplified pulse energy as high as 1J was obtained , which corresponds to a 38% conversion efficiency .

**Keywords :** double-side pumped , multi-pass amplifier , Ti :sapphire laser

**PACC :** 4260B , 4280W

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos .60225005 and 10227401 ) , and the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. G1999075202 ) .

<sup>†</sup>E-mail :wzhy@aphy . iphy . ac . cn