

高质量高效率高稳定性参量放大光产生的研究*

刘红军 陈国夫 赵 卫 王屹山

(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)

(2002 年 9 月 2 日收到 2003 年 3 月 18 日收到修改稿)

针对光参量放大实验中存在的参量转换效率低、输出光脉冲形状畸变和输出稳定性差等问题进行了详细研究,对注入信号光强、抽运光耗尽、增益饱和、和频过程等因素对参量过程的影响进行了详细分析讨论,并进行了光学参量放大的实验研究。理论和实验研究结果表明通过优化选择合适的注入信号光强、抽运光强和晶体长度等参数,使参量放大运行在深度增益饱和状态的稳定区,完全可以获得高质量高效率高稳定性的参量放大输出光。

关键词:光参量放大,抽运光耗尽,增益饱和,稳定性

PACC:4265K,4280W

1. 引 言

超短超强激光脉冲的产生是近年来人们研究的重点,而传统的啁啾脉冲放大(CPA)技术由于窄的增益带宽限制了超短脉冲的放大^[1]。光参量放大(OPA)技术具有在简并或非共线相位匹配下^[2]能实现超宽带高增益的特点,利用 OPA 技术来放大啁啾脉冲(OPCPA)产生超短超强激光脉冲已成为目前人们研究的热点^[3-7]。光参量放大的理论及实验研究已有许多报道^[8-11],但这些报道主要侧重于小信号(无抽运光损耗)下的研究,抽运光损耗和增益饱和对 OPA 的影响以及 OPA 的稳定性等问题则很少考虑,尤其是注入信号光强、抽运光强、晶体长度等参数的优化选择以及它们对 OPA 过程的影响则很少有研究。目前利用 OPA 多级放大的 OPCPA 技术中^[7],一般是第一级小信号放大,第二级以后大信号放大,各级 OPA 之间是相互影响相互关联的,因此很有必要考虑抽运光损耗和增益饱和的影响,以及注入信号光强和抽运光强的变化对 OPA 稳定性的影响。图 1(a)和(b)是在 OPA 的实验中测量到的两个结果,实验中存在输出信号光强不稳定、抽运光耗尽小而导致的参量转换效率低(图 1(a)所示)、输出信号光的时间波形畸变(图 1(b)所示)等问题。为了从根本上解决这些问题,本文依据三波耦合方程,利

用数值计算的方法对上述问题进行了详细研究,并进行了小信号和大信号的参量放大实验研究。理论和实验研究结果表明:通过选择合适的注入信号光强、抽运光强和晶体长度等参数,使参量放大过程运行在深度增益饱和的稳定区,完全可以获得高质量高效率高稳定性的参量放大光输出,这对目前进行的 OPCPA 技术研究具有十分重要的实际意义。

2. OPA 的理论模型及小信号下解析解

光参量放大是典型的三波耦合过程,依据文献[12],若参量光脉冲宽度大于 100ps,群速失配可忽略不计,其理论模型可用归一化的耦合波方程来描述,即

$$\begin{aligned}\frac{du_1}{d\xi} &= -u_2 u_3 \sin\theta, \\ \frac{du_2}{d\xi} &= -u_1 u_3 \sin\theta, \\ \frac{du_3}{d\xi} &= +u_1 u_2 \sin\theta, \\ \frac{d\theta}{d\xi} &= \Delta S + \left(\frac{u_1 u_2}{u_3} - \frac{u_2 u_3}{u_1} - \frac{u_1 u_3}{u_2} \right) \cos\theta, \quad (1)\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}W &= I_1(0) + I_2(0) + I_3(0) \cos^2\beta, \\ \Delta S &= \Delta kr/\xi, \\ \theta &= \Delta k + \phi_3 - \phi_2 - \phi_1,\end{aligned}$$

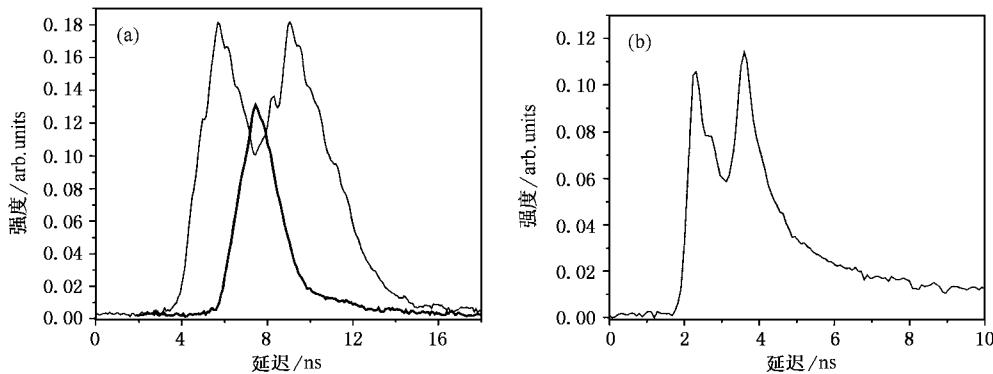


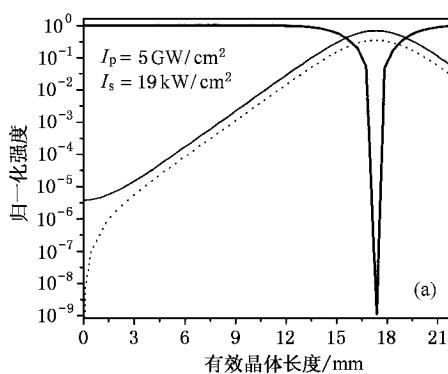
图 1 在 OPA 实验中测量到的 (a) 输出抽运光(细实线) 和放大信号光(粗实线) 的脉冲时间谱图 , 抽运光耗尽小 ; (b) 不完整的放大信号光的脉冲时间谱图

$$\begin{aligned}
 u_1 &= [I_1(\omega_1 W)]^{1/2}, \\
 u_2 &= [I_2(\omega_2 W)]^{1/2}, \\
 u_3 &= [(I_3 \cos^2 \beta)(\omega_3 W)]^{1/2}, \\
 \xi &= \frac{4d_{\text{eff}}\pi(\pi W)^{1/2}r}{(\epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 n_1 n_2 n_3 \cos^2 \beta)^{1/2}}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中下标 1, 2 和 3 分别表示信号光、闲频光和抽运光 , $I_i(0)$ ($i = 1, 2, 3$) 表示三波的初始强度 , ω_i ($i = 1, 2, 3$) 表示三波的圆频率 , λ_i ($i = 1, 2, 3$) 表示三波的中心波长 , Δk 表示三波的相位失配 , d_{eff} 表示非线性耦合系数 , ϕ_i ($i = 1, 2, 3$) 表示初始相位 , β 为坡印亭矢量走离角 . 方程(1)一般没有准确的解析解 , 在小信号下(抽运光无损耗) 的近似解析解为^[8]

$$\begin{aligned}
 I_1(r) &= I_1(0) \cosh^2[\Gamma_0^2 - (\Delta k/2)^2]^{1/2} r, \\
 I_2(r) &= (\omega_1/\omega_2) I_1(0) \sinh^2[\Gamma_0^2 - (\Delta k/2)^2] r, \\
 I_3(r) &= I_3(0). \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中参量增益耦合系数



$$\Gamma_0 = \sqrt{\frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 I_3(0)}{\epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 n_1 n_2 n_3 c}}.$$

(3) 式表明信号光的增益仅与晶体的有效非线性耦合系数、抽运光强和晶体长度有关 ,而在实际的参量放大中 ,还应考虑注入信号光强、抽运光损耗和增益饱和等因素的影响 .

3. 高效率高质量参量光的产生

用龙格库塔法并借助 Matlab6.1 对方程(1) 进行数值计算解 . 计算时假定信号光和抽运光都是高斯型 ,以文献 [4, 5, 7] 中的 LBO 光参量放大器 ($x-y$ 面内类型 I 相位匹配) 为例 , 抽运光中心波长为 532nm , 信号光中心波长为 800nm , 计算中所取的晶体长度都指参量相互作用的有效长度 .

3.1. OPA 过程

图 2(a) 反映了 OPA 过程中抽运光、信号光和

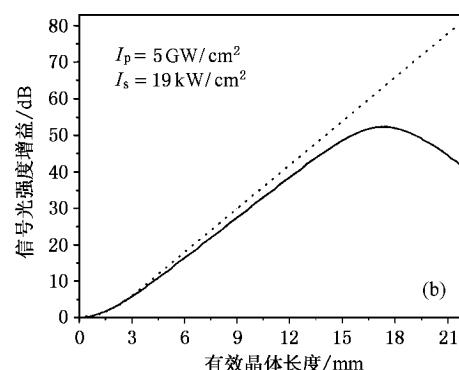


图 2 (a) 在 OPA 中信号光、闲频光和抽运光变化的数值模拟解(— 为抽运光 , — 为信号光 , 为闲频光) (b) 数值解与解析解的比较(..... 为解析解 , — 为数值解)

闲频光在晶体中相互作用传播时变化的真实情况。由图 2(a)可知,在小信号增益范围内,信号光和闲频光的强度随着晶体长度的增加呈指数增长,直到抽运光被耗尽而趋于饱和,在饱和点增益最大,抽运光到信号光的能量转换效率达到最大值 $100\% \times \omega_1 / \omega_3$,当三波在晶体中相互作用继续传播超过饱和点时,由于参量放大的逆过程——和频过程产生,能量又从信号光和闲频光转移回到抽运光,于是信号光和闲频光的强度逐渐减弱,参量转换效率降低。图 2(b)给出了方程(1)的数值解和解析解(小信号下)的对比,仅在很小的增益范围内,解析解和数值解结果一致,当增益逐渐增大而趋于饱和时,两者之间的差值越来越大。解析解(3)仅在小信号增益下适用,因此不能用来优化选择 OPA 过程的相关参数。

3.2. 增益与注入信号光强的关系

图 3 给出了信号光的增益随注入信号光强变化的关系,注入信号光强很小时($I_s / I_p \leq 10^{-7}$),增益基本上不随注入信号光强的变化而改变,随着注入信号光强的增大,参量放大过渡到饱和放大状态,即增益饱和状态,增益变得越来越小,最后趋于 1。对于短脉冲参量放大,通常情况下,输出信号脉冲的能量可以通过对输出信号光强度在时空域上的积分给出: $E_s = \iint I_s dA dt$,因此输出信号光脉冲能量近似等于注入信号光脉冲能量乘以其强度的实际增益倍数。由此可知,要获得较大的能量增益,注入信号光的光斑尺寸不宜聚焦太小,以保证较小的注入信号光强度来获得较大的增益倍数,从而获得较高的参量转换效率。

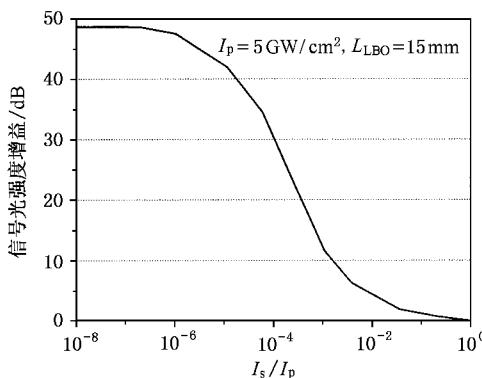


图 3 信号光强度增益与注入信号光强度的关系

3.3. 增益饱和

图 4 表明,在相同注入信号光强下,抽运光强越强,增益饱和出现越早,达到增益饱和所需要的晶体长度越短,饱和点的增益也越来越大。图 5 表明,在相同抽运光强下,注入信号光强度越小,信号光能获得的最大增益值(饱和点增益)越大,但增益饱和所需的晶体长度越长。结合图 4 和 5 可知,在晶体的损伤阈值范围内,应尽可能提高抽运光强度,并选择较短的晶体长度和合适的注入信号光强,使 OPA 运行在增益饱和状态,不仅可以获得高参量转换效率,还可以实现超宽带增益^[13]。

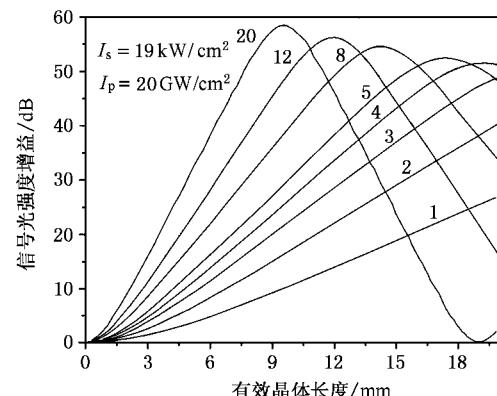


图 4 不同抽运光强度下,信号光强度增益的数值模拟解

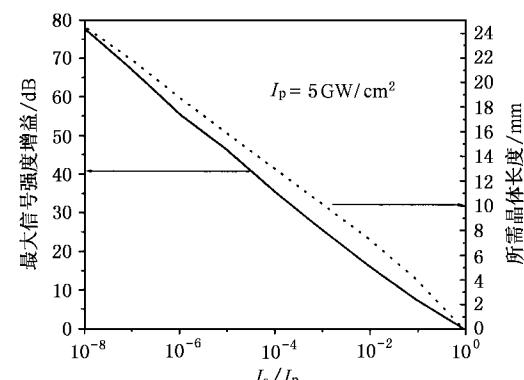


图 5 信号光强度的最大增益与注入信号光强度和所需晶体长度的关系

3.4. OPA 输出光束质量

图 6 给出了注入信号光强和抽运光强不变,不同晶体长度下输出参量光的脉冲时间形状谱图。其中图 6(a)表示抽运光耗尽小时的参量光脉冲时间谱图,此时信号光脉冲时间谱形状完整,但参量转换

效率低,图6(b)表示抽运光完全耗尽即增益饱和时参量光脉冲的时间谱图,此时参量转换效率最高,且信号光束质量很好,图6(c)表示三波相互作用超过增益饱和点时参量光脉冲时间谱图,此时信号光脉冲形状畸变不完整,光束质量和参量转换效率下降。图6(a)与OPA实验中观察到的图1相似,图6(c)与OPA实验中观察到的图2相似。同样,当注入信号光强、抽运光强和晶体长度中任意两个参数保持不变时,另一个参数变化时,都会出现如图6(a)(b)和(c)所示的三种情况。由于在非线性光学晶体中,光强越强,非线性相互作用也越强,能量转换过程就越快。呈高斯型分布的参量光入射OPA后,光脉冲的中心部分光强强,能量倒空快,参量光强度也增长得快,光脉冲的边缘部分光强弱,能量倒空慢,参量光

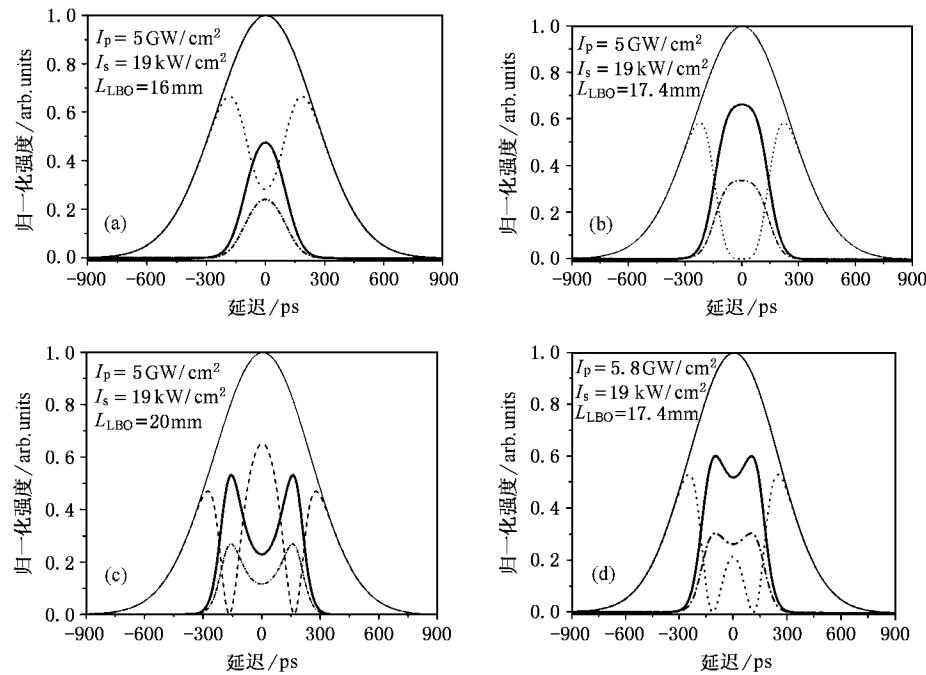
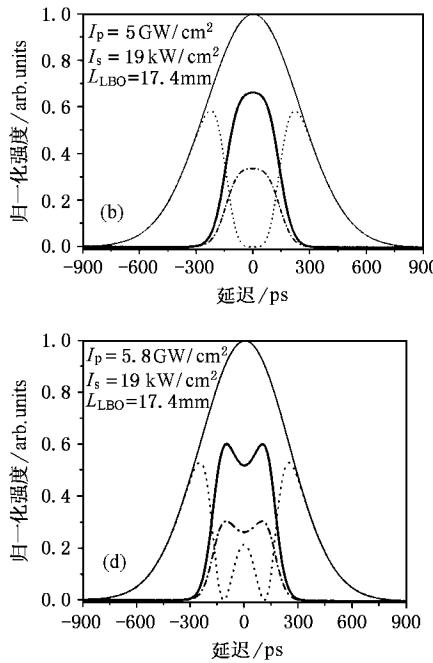


图6 在OPA中,输入和输出抽运光、输出信号光和输出闲频光的时间谱图 (a) $L_{\text{LBO}} = 16\text{ mm}$, $t_p = 580\text{ ps}$, $t_s = 350\text{ ps}$ (b) 和 (d) $L_{\text{LBO}} = 17.4\text{ mm}$, $t_p = 580\text{ ps}$, $t_s = 350\text{ ps}$ (c) $L_{\text{LBO}} = 20\text{ mm}$, $t_p = 580\text{ ps}$, $t_s = 350\text{ ps}$ (——为输入抽运光,……为输出抽运光,——为输出信号光,……为输出闲频光)

4. OPA的稳定性

在OPCPA系统中,一般都采用两级以上的OPA放大系统,而且各级OPA的抽运光都来自同一抽运光束,各级OPA的抽运光变化幅度相同,因此各级OPA之间的稳定性是相互影响的。在多级OPA系统中,一般第一级都是小信号注入放大,第二级以上由

的成长速度也慢,即抽运光强度的非均匀分布,引起了不同时间位置处参量光的成长速度不同。当三波相互作用继续传播超过增益饱和点时,参量放大过程的逆过程——和频过程产生,由于和频过程的存在,使得光脉冲在不同时间处的非线性过程不同(或者是参量过程,或者是和频过程),从而引起参量光在时域上的光强分布如图6(c)所示的不完整的多峰结构,使完整的高斯脉冲形状被破坏,从而使参量转换效率降低和光束质量变坏。因此在参量放大过程,当注入信号光强、抽运光强和晶体长度三个参数中任意两个参数首先确定时,另一个参数的选择十分关键,只有当三个参数的优化组合使OPA运行在增益饱和状态,才能获得高效率高质量的参量光输出。



于参量光斑尺寸的限制都是大信号注入放大,因此在下面分小信号和大信号两种情况进行讨论。

4.1. 注入信号光对OPA稳定性的影响

图7表示非饱和增益时,信号光的增益随注入信号光强度变化的情况。图7表明,在小信号增益($I_s \leq 5 \times 10^{-4} \text{ MW/cm}^2$)时,增益趋于饱和,增益基本不随注入信号光强变化;在大信号增益区($I_s > 5 \times$

10^{-4} MW/cm^2),当注入信号光强度变化幅度在 10% 范围内时,输出信号光强度最大变化幅度为 4.5%,因此注入信号光强度的变化对 OPA 的稳定性影响很小,可以不考虑.

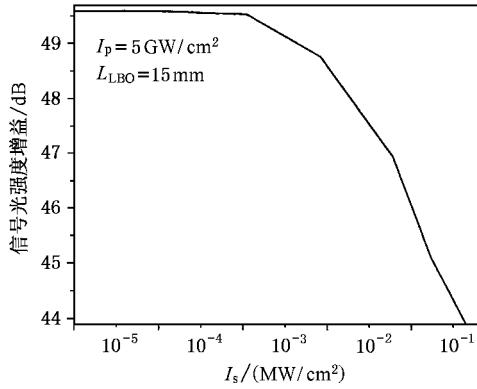


图 7 非增益饱和时,信号光强度增益与注入信号光强度的关系

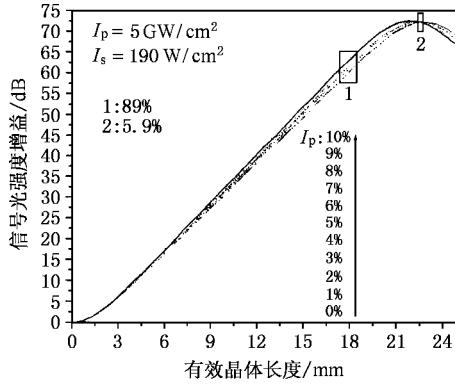


图 8 OPA 的输出稳定性与抽运光变化的关系, $I_p = 5 \text{ GW/cm}^2$, $I_s = 190 \text{ W/cm}^2$

4.2. 小信号下抽运光对 OPA 的稳定性的影响

由 2.2 和图 8 可知,随着晶体长度的增加,抽运光强越强,增益饱和出现越早,饱和点增益值越大,在饱和点后增益逐渐降低,因此所有的增益曲线在增益饱和后(即深度增益饱和)将趋向于交叉会聚,在会聚区输出信号光强度对抽运光强的变化不敏感.因此在增益饱和后的会聚区能获得高稳定性的参量放大输出光.图 8 表示小信号放大下,不同抽运光强下增益随晶体长度变化的一组曲线,其中抽运光强从 0%—10% 逐渐增加,注入信号光强不变.在抽运光变化 10% 的范围内,图 8 所示的区域 1 输出信号光强度变化幅度可达到 89%,而在深度增益饱

和的稳定区 2 输出信号光强度变化幅度最大约为 5.9%.图 9 表示抽运光强在变化 +10% 和 -10% 下信号光的增益曲线及输出信号光强的变化曲线.很显然,抽运光强的变化对 OPA 的稳定性影响较大,但是,通过优化选择相关参数,使 OPA 运行在深度增益饱和的稳定区,参量输出的稳定性会得到极大的改善.一般抽运光强的变化幅度都小于 10%,因此稳定区仅位于增益饱和点后的很小范围内,参量转换效率近似等于饱和点的最大值 $100\% \times \omega_s/\omega_p$,而且输出的光谱质量仍然能保持近似于如图 6(b) 所示的完好的高斯脉冲形状.所以,使 OPA 运行在深度增益饱和的稳定区,可以得到高质量高效率高稳定性的输出光.

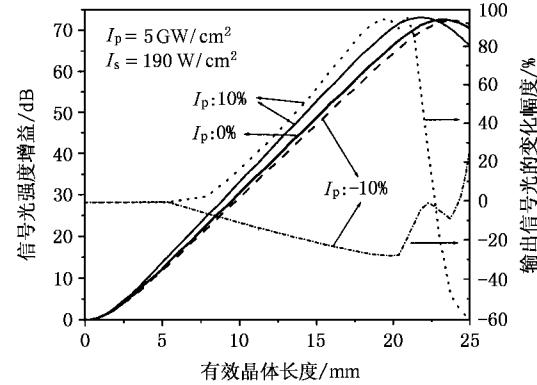


图 9 信号光强度增益的变化与抽运光强度变化的关系,抽运光强度的变化分别为 +10% 和 -10%

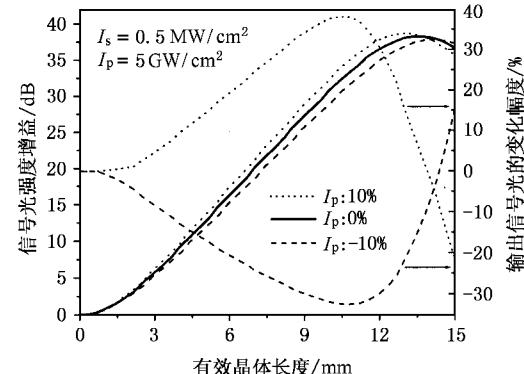


图 10 信号光强度增益的变化与抽运光强度变化的关系,抽运光强度的变化分别为 +10% 和 -10%

4.3. 大信号下抽运光对 OPA 稳定性的影响

图 10 表示在大信号放大下注入信号光强不变,抽运光变化 +10% 和 -10% 时,输出信号光强变化

的曲线.在多级 OPA 放大系统中,第二级以后都属于大信号放大,各级的抽运光强度变化相同,因此第二级 OPA 的稳定性受第一级 OPA 输出稳定性的影响.图 11 表示在相同抽运光强变化下,依据第一级 OPA 输出信号光强变化计算的第二级 OPA 的增益曲线.在图 11 的非稳定区 1,当抽运光强在 10% 的范围内变化时,输出信号光强的最大变化幅度为 44.5%,而在稳定区 2 输出信号光强的变化幅度最大为 2.3%.因此通过优化选择注入信号光强、抽运光强和晶体长度,使 OPA 运行在深度增益饱和的稳定区,完全可以获得高质量高效率高稳定性的参量放大输出光.

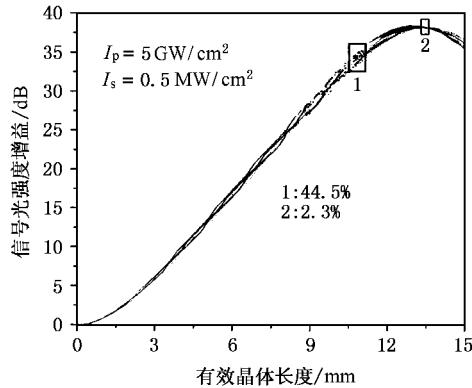


图 11 OPA 的稳定性与抽运光变化的关系 $I_p = 5 \text{ GW/cm}^2$, $I_s = 0.5 \text{ MW/cm}^2$, 计算中抽运光和注入信号光的变
化幅度依据图 8

OPA 系统的稳定性强烈依赖于注入信号光强度、抽运光强度和晶体长度等重要参数的选择,其中抽运光强度的变化对参量输出光的变化影响最大,通过优化选择它们合适的参数,使 OPA 运行在深度增益饱和的稳定区,系统的稳定性将会得到很大的

改善.但在具体的 OPA 过程中,可能会有几种影响因数同时起作用.在实际应用中,晶体长度的选择受限于参量光的时间走离长度($l_j = \tau (1/v_j - 1/v_p) j$),
 $= i s, \tau$ 为抽运光脉宽, v 是光波在晶体中的群速, p 为抽运光, s 为信号光, i 为闲置光), 空间走离长度($l_{\text{walk-off}} = D/\beta$, D 为光斑直径).对于宽带超短脉冲的放大还需考虑参量放大过程的参量带宽^[12],晶体长度越长,参量允许的带宽越窄,因此应综合考虑上述因素先选择合适的晶体长度,然后在晶体的损伤阈值范围内确定最大抽运光强度,最后再优化确定注入信号光强,确保输出级 OPA 运行在深度增益饱和状态稳定区,才能获得理想的参量放大光输出.

5. 实验和结果

在以上理论研究的基础上,进行了两级光学参量放大的实验研究,其中第一级放大属于小信号放大过程,第二级放大属于大信号放大过程。整个实验装置的结构如图12所示。实验中采用钛宝石激光器输出的连续激光(波长800nm,光谱FWHM约1nm)作为种子信号光,抽运光来自一台倍频Nd:YAG调Q激光器输出的激光(波长532nm,脉宽5ns,最大输出能量900mJ,重复率10Hz,光束发散角<1mrad)。实验中两级放大器都采用类型K(X-Y主平面内:e \rightarrow o+o)非共线相位匹配的LBO(尺寸4mm \times 4mm \times 15mm, $\theta=90^\circ$, $\varphi=12.6^\circ$)光学参量放大器^[5]。为了使信号光束和抽运光束能很好地重叠,并且减小实验光路调整的难度,使抽运光束直径大于信号光束直径。实验中使抽运光沿竖直方向偏振,并通过一个6:1的缩束镜将光束缩至1.5mm的光斑直径后垂直入射到LBO晶体的前端面上,使信号光沿水平方向

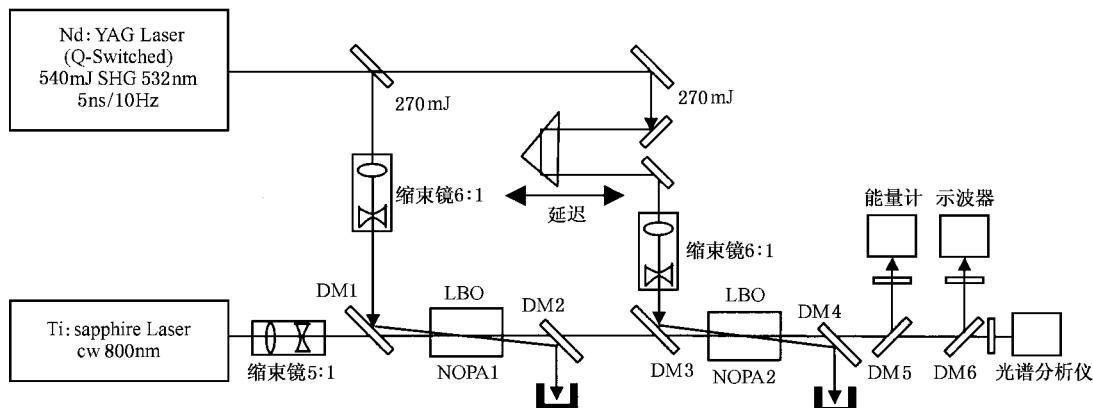


图 12 实验装置示意图(DM 双色镜; NOPA 非共线相位匹配光学参量放大器)

偏振,并用一个5:1的缩束镜将光束缩至500 μm 的光斑直径后入射到LBO晶体上,并使信号光与抽运光在竖直面内的夹角为1.12°。由于采用了非共线抽运方式,在参量放大器后信号光束与剩余抽运光束将完全分离,有利于信号光的探测。实验中分别用示波器、能量计和光谱分析仪监测放大信号光的输出波形、能量和光谱。表1是依据上述本文的理论研究结论对系统进行优化选择的有关实验参数。

表1 实验参数

	NOPA1 LBO, 类型I(xy ooe)	NOPA2 LBO, 类型I(xy ooe)
抽运光脉宽/ns	5	5
信号光脉宽/ns	—	~2
抽运光脉冲能量/J	0.27	0.27
抽运光束直径/mm	1.5	1.5
抽运光能流密度/J·cm ⁻²	15	15
抽运光强/GW·cm ⁻²	3	3
注入信号光能量/J	0.8×10 ⁻⁹	5.8×10 ⁻⁶
信号光束直径/mm	0.5	0.5
注入信号光强/W·cm ⁻²	204	1.48×10 ⁶
净抽运光能量/J	30×10 ⁻³	30×10 ⁻³
晶体长度/mm	15	15
非共线角 α (°)	1.12	1.12
相位匹配角($\theta=90^\circ$) φ (°)	12.6	12.6
净增益	$\sim 7.3 \times 10^3$	$\sim 1.5 \times 10^3$

实验中为了防止LBO晶体光致损伤,选择两级放大器的抽运光强均为3GW/cm²,注入到NOPA1上的800nm连续信号光的平均功率约400mW,光强约为204W/cm²,因此第一级放大属于小信号放大过程。实验测量得到经NOPA1放大后的信号光呈现如图13所示的~2ns的脉冲,这等价于注入信号光脉冲能量约为0.8nJ,测量到NOPA1输出的平均信号光脉冲能量为5.8μJ(50次测量的平均值),对应参量增益达到 7.3×10^3 倍,测量到第一级放大输出信号光的脉冲能量稳定度为±20%(50次测量值得到的结果)。这一结果与本文的第四部分的理论研究得出的结论是一致的,系统输出稳定性差主要是因为NOPA1运行在小信号放大的非增益饱和的非稳定区,但可以通过增加NOPA1的晶体长度来使放大器运行在深度增益饱和的稳定区,从而使NOPA1的输出稳定性得到极大改善,但对于宽带超短脉冲的放大而言,增加晶体长度就会减小放大系统的参量带

宽,从而减小系统可支持放大的光谱带宽^[12]。

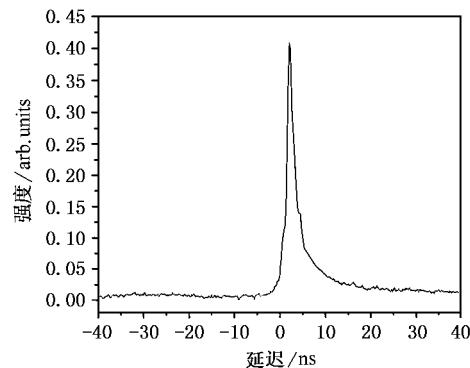


图13 测量的 NOPA1 输出的信号光脉冲时间形状

由 NOPA1 放大输出的 ~2ns 信号光脉冲再注入到 NOPA2 进行放大,通过调节光路延迟线来实现信号光脉冲和抽运光脉冲的时间同步。选择注入到 NOPA2 的信号光束直径为 0.5mm,注入到 NOPA2 的信号光强约为 1.48MW/cm²,使 NOPA2 工作在深度增益饱和的稳定状态。实验测量得到 NOPA2 输出信号光脉冲的形状如图 14 所示,实验测量结果与本文第三部分的理论分析结果符合得比较好。由图 14 和本文的第三部分可知,第二级放大过程已运行在深度增益饱和状态,并且输出信号光脉冲的时间分布形状完整。此时抽运光脉冲的中心部分能量已耗尽,放大过程已处于最佳参量增益状态,参量转换效率也达到最大。实验测量得到 NOPA2 输出的信号光平均脉冲能量为 8.75mJ(50 次测量值的平均值),对应参量增益达到 1.5×10^3 倍,系统最后输出信号光脉冲能量稳定度达到了 ±5.7%(50 次测量值得到的结果)。这一实验值比理论值略大,主要原因是由于系统输出的稳定性不仅受注入信号光和抽运光变化的影响,而且还受系统运行的外界环境变化的影响,例如温度的变化也会给系统的输出稳定性带来一定的影响。在实验中,将注入到 NOPA2 的信号光束直径增加到 ~1mm,使第二级放大过程运行在非增益饱和状态的非稳定区,实验测量到系统最后输出信号光脉冲的能量稳定度为 ±27%(50 次测量值得到的结果)。对比上述两种情况下的实验结果可见,使第二级放大器运行在深度增益饱和的稳定状态,系统输出稳定性得到了很大的改善,这从实验上充分验证了本文的第四部分理论研究结论的正确性。实验得到系统总的能量转换(抽运光到信号光)效率达到了 14.7%,其中第二级放大过程中抽运光到信号光的能量转换效率达到了 29%。上述实验测量结果

与依据表 1 的参数对系统的理论预言结果基本一致。总之,我们在理论研究的基础上,进行了两级光学参量放大的实验研究,实验研究结论与理论研究结论基本一致,因此用本文的理论研究结论去指导参量放大的实验是完全可行的。

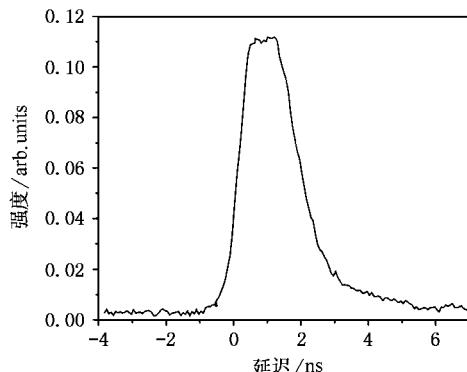


图 14 测量的 NOPA2 输出的信号光脉冲时间形状

6. 结 论

本文针对 OPA 实验中存在的几个问题,通过三波耦合方程的数值计算解对 OPA 过程进行了详细而深入的研究,对影响 OPA 过程的参量转换效率、光束质量和稳定性的主要因素进行了理论分析讨论,并依据理论研究结论进行了光学参量放大的实验研究。理论和实验研究结果都表明通过选择合适的注入信号光强度、抽运光强度和晶体长度等参数,使参量放大过程运行在深度饱和增益状态的稳定区,完全可以得到高效率高质量高稳定性的参量放大光输出,这对进一步改进 OPCPA 的实验系统具有十分重要的意义。

- [1] Ross I N ,Trentelman M ,Danson C N 1997 *Appl. Opt.* **36** 9348
- [2] Liu H J , Chen G F , Zhao W *et al* 2001 *Opt. Com.* **197** 507
- [3] Ross I N ,Matousek P ,Towrie M *et al* 1997 *Opt. Comm.* **144** 125
- [4] Liu H J *et al* 2001 *Acta Phot. Sin.* **30** 688 (in Chinese) 刘红军等 2001 *光子学报* **30** 688]
- [5] Liu H J *et al* 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 1195 (in Chinese) 刘红军等 2002 *光学学报* **22** 1195]
- [6] Xia J F *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 256 (in Chinese) 夏江帆等 2000 *物理学报* **49** 256]

- [7] Liu H J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1717 (in Chinese) 刘红军等 2001 *物理学报* **50** 1717]
- [8] Baumgartner R A ,Byer R L 1979 *IEEE J. Quantum Electron.* **15** 432
- [9] Huang J Y ,Shen Y R 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 1579
- [10] Xu Z Y ,Liu X ,Deng D Q *et al* 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2222
- [11] Zheng J Y ,Huang J Y ,Shen Y R 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 213
- [12] Armstrong J A *et al* 1962 *Phys. Rev.* **127** 1918
- [13] Liu H J *et al* 2002 *Chinese Laser* **8** 21 (in Chinese) 刘红军等 2002 *中国激光* **8** 21]

The generation of high efficiency and high quality and high stability parametric amplified light^{*}

Liu Hong-Jun Chen Guo-Fu Zhao Wei Wang Yi-Shan

(State key Laboratory of Transient Optics and Technology ,Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics ,

Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710068 ,China)

(Received 2 September 2002 ; revised manuscript received 18 March 2003)

Abstract

The effects of a series of parameters such as injected signal intensity , pump intensity , crystal length have been analyzed in Optical parametric amplification(OPA). The gain saturation and pump depletion were taken into account. The stability of an OPA system was investigated in both the small signal injection and the large signal injection. Experimental investigations of OPA based on two noncollinear phase-matched LBO OPA under the small signal injection and the large signal injection have been carried out and the experimental data are in agreement with the theoretical results. The theoretical and experimental results all demonstrated that there exists a strong gain saturation region where parametric light with high efficiency and high quality and high stability can be obtained by properly choosing relevant system parameters.

Keywords : optical parametric amplification , gain saturation , pump depletion , stability.

PACC : 4265K , 4280W

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China.