

# 基于双光束耦合的多级相干光放大

刘劲松

西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071

1992年12月29日收到

基于双光束耦合的原理提出了两级相干光放大的方法,这不仅能使两块低质量晶体取得一块高质量晶体所能达到的效果,而且解决了单级放大难以大幅度提高放大倍数的问题,理论分析与实验演示均表明所提方法是可行的.

PACC: 4265;4270G

## 一、引 言

光折变晶体双光束耦合过程已广泛应用于相干光放大,环形振荡器和其他振荡器,光逻辑与开关器件,关联存贮等许多方面<sup>[1]</sup>.显然,晶体质量越高,越容易在这些应用中取得理想的结果,同时晶体的价格也越昂贵.对相干光放大而言,理想的结果是获得高的放大倍数.以往都采用一块晶体进行单级相干光放大,其中存在着两个问题.一是晶体质量不高时,虽可采用合理安排光路,恰当确定抽运信号比和调节晶温<sup>[2]</sup>等方法来提高放大倍数,但效果都有限;二是要想大幅度提高放大倍数,即使晶体质量很高,用单级放大也难以奏效.针对以上情况,本文提出一种基于双光束耦合、用两块晶体来进行两级相干光放大的方法.一方面,用这种方法可以使得用两块质量较差的晶体获得一块质量较好的晶体所能达到的结果,这往往是十分经济的.另一方面,解决了单级放大难以大幅度提高放大倍数的问题.本文给出了工作原理,进行了理论分析与实验演示,结果表明该方法是可行的.

## 二、基本原理与理论分析

双光束耦合对光信号的放大特点是小信号时放大倍数基本上由晶体参数确定.信号光越小,抽运光向信号光转移的能量就越小,亦即能量转换效率低.大信号时放大倍数较小信号而言大为下降,但能量转移效率却大大提高.如果晶体质量一般,小信号时不仅转换效率低同时放大倍数也不高.降低抽运光使过程满足大信号条件虽可提高转换效率但却降低了放大倍数.这种矛盾是用一块晶体所无法解决的.为此,本文提出一种用两块晶体进行两级放大的方法,如图1所示.适当安排光路,根据信号光  $I_s$  的大小,将总抽运光  $I_p$  合理分为两块晶体各自的抽运光  $I_{p_1}$  与  $I_{p_2}$ ,使每块晶体都接近大信号条件,即都具有高的转换效率.这时总的放大倍数  $\beta = I/I_s$ ,就应该比用这两块晶体中的任何一块在  $I_s$  与  $I_p$  相

同的条件下所得到的放大倍数要高得多. 这种设想可通过下面的理论分析得以证实.

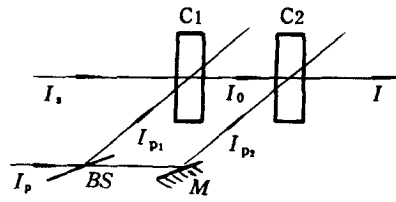


图1 原理示意图

设  $R$  是图1中分束镜  $BS$  的反射率, 则  $I_{p_1} = RT_p, I_{p_2} = (1-R)I_p$ . 由稳态双光束耦合的强度公式不难给出<sup>[1]</sup>

$$I_0 = \frac{I_s + RI_p}{I_s + RI_p \exp(-g_1)} I_s \exp(-\gamma_1), \quad (1)$$

$$I = \frac{I_0 + (1-R)I_p}{I_0 + (1-R)I_p \exp(-g_2)} I_0 \exp(-\gamma_2). \quad (2)$$

设  $\Gamma, \alpha, d$  分别为晶体双光束耦合指数增益系数、吸收系数和厚度, 式中  $g_j = \Gamma_j d_j, \gamma_j = \alpha_j d_j, j=1, 2$ . 设  $Q = g - \gamma$ , 称为晶体的品质因数.

当  $g, \gamma, I_s$  和  $I_p$  给定后,  $I$  为  $R$  的函数. 设两块晶体的质量不同, 一块为  $g=7, \gamma=2, Q=5$ , 另一块为  $g=4, \gamma=2, Q=2$ . 将较好的那块晶体 ( $Q$  较大) 分别放在较差的那块晶体 ( $Q$  较小) 的前面与后面, 取  $I_p = 10^4$  arb. units, 与此对应的以  $I_s$  为参数的  $I-R$  曲线分别如图2(a)和(b)所示. 可见,  $I$  关于  $R$  存在着一个最大值  $I_m$ , 即  $R$  存在一个最佳点  $R_m$ .  $R_m$  通常较小, 表明  $I_{p_1} < I_{p_2}$ , 这反映出使两块晶体都接近大信号条件才能使总放大倍数  $\beta = I_m / I_s$  得以提高. 将较好的一块晶体放在后面, 效果更好.

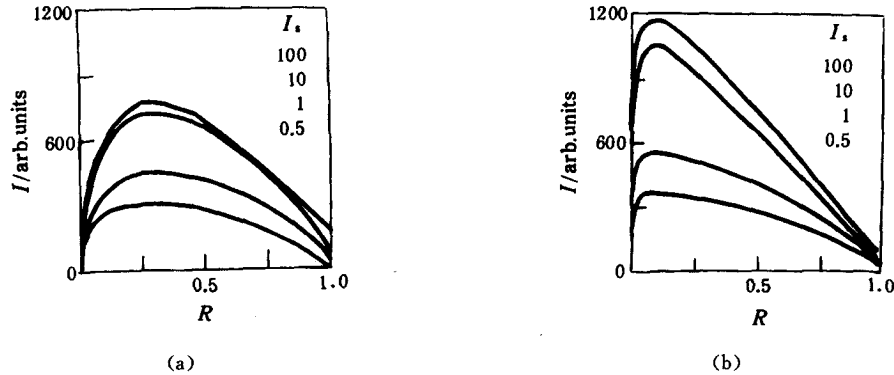


图2  $I-R$  理论曲线

(a)  $g_1=7, \gamma_1=2, g_2=4, \gamma_2=2$ ; (b)  $g_1=2, \gamma_1=2, g_2=7, \gamma_2=2$ ;  $I_p = 10^4, I_s, I_p$  和  $I$  均取同一 arb. units

为了说明问题, 引入4个放大倍数  $\beta_j (j=1-4)$ .  $\beta_1$  和  $\beta_2$  代表较差晶体和较好晶体分别单独使用时的放大倍数, 即单级放大的情况, 这时有<sup>[1]</sup>

$$\beta_j = \frac{I_s + I_p}{I_s + I_p \exp(-g_j)} \exp(-\gamma_j) \quad j = 1, 2. \quad (3)$$

$\beta_3$  和  $\beta_4$  分别对应将较好晶体分别放在较差的那块晶体 ( $Q$  较小) 的前面和后面时两级放大中  $I$  的最大值  $I_m$  与  $I_s$  的比. 图3给出在相同的  $I_p$  下, 这4个  $\beta$  随  $I_s$  的变化情况. 可见,  $\beta_3$  和  $\beta_4$  比  $\beta_1$  和  $\beta_2$  大得多.  $I_s$  越小, 这种差别越明显. 在  $I_s < 1$  后,  $\beta_4$  或者  $\beta_3$  比  $\beta_1$  或  $\beta_2$  大了近10到100倍. 所以, 用两块晶体进行两级放大, 只要将两块晶体各自抽运光的比选在最佳点, 所得放大倍数就高于在相同条件下 ( $I_p, I_s$  相同) 用这两块晶体中的任一块进行单级放大的放大倍数.  $I_s$  越小, 这种差别越明显. 所以, 两级放大方式对极弱光信号的放大是极为有效的. 信号光变大后, 上述差别逐渐减小, 此时宁可采用单级放大, 因为光路相对简单些.

从图3还可看出,  $\beta_4 > \beta_3$ , 说明将较好的晶体放在后面更为有利. 此外,  $I_s < 1$  后,  $\beta_4$  接近

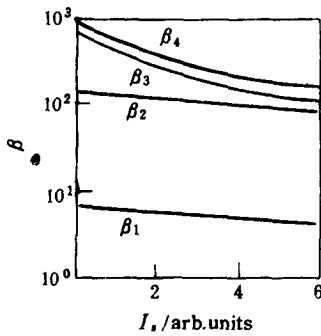


图3  $\beta$ - $I_s$  理论曲线

$I_p = 10^4$  arb. units;  $\beta_1: g = 4, \gamma = 2$ ;  
 $\beta_2: g = 7, \gamma = 2$ ;  $\beta_3: g_1 = 7, g_2 = 4, \gamma_1 = \gamma_2 = 2$ ;  
 $\beta_4: g_1 = 4, g_2 = 7, \gamma_1 = \gamma_2 = 2$

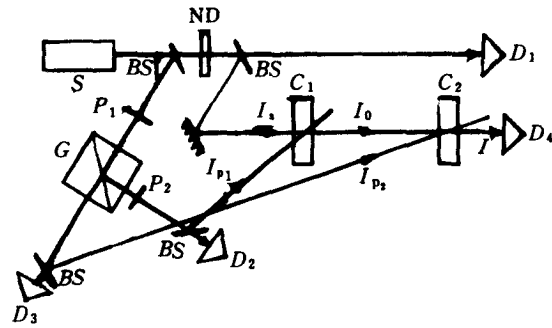


图4 实验装置与光路

$10^3$ , 这相当于  $Q=7$  的晶体单级放大时的效果。所以, 在小信号下,  $Q=5$  和  $2$  的两块较差晶体的两级放大与  $Q=7$  的一块晶体单级放大的效果相同。

### 三、实验演示

实验光路与装置如图4所示。图中  $S$  为  $Ar^+$  激光器,  $TEM_{00}$  模,  $488\text{ nm}$  波段;  $p_1$  和  $p_2$  为  $\lambda/2$  波片;  $G$  为格兰棱镜;  $BS$  为反射率为  $90\%$  的分束镜;  $ND$  为中性密度衰减器, 用以调整信号光  $I_s$  的大小, 通过  $p_1$  和  $G$  可以有效地改变  $u = I_{p_2}/I_{p_1}$ ; 光路的设计保证  $I_s$  与  $I_{p_1}$  以及  $I_0$  与  $I_{p_2}$  分别在晶体  $C_1$  和  $C_2$  处相干;  $D_1 - D_4$  为功率计, 分别用来测量  $I_s, I_{p_1}, I_{p_2}$  与  $I, I_p = I_{p_1} + I_{p_2}$ 。一块晶体为  $Ce:SBN, d = 0.2\text{ cm}$ , 在  $488\text{ nm}$  处测得  $\alpha = 11.5\text{ cm}^{-1}, \Gamma = 19.5\text{ cm}^{-1}$ , 故  $Q = 1.6$ , 最大单级放大倍数为  $\beta = 5$ 。另一块为  $BaTiO_3, d = 0.5\text{ cm}$ ,  $488\text{ nm}$  处测得  $\alpha = 5.1\text{ cm}^{-1}, \Gamma = 10.6\text{ cm}^{-1}$ , 故  $Q = 2.75$ 。所以,  $BaTiO_3$  是较好的一块, 最大单级放大倍数  $\beta = 15.6$ 。前面理论分析中的  $R$  与  $u$  的关系为  $R = 1/(1+u)$ 。适当选择  $u$  即可得到所需的  $R$  值。实验结果如图5所示, 图5(a)与(b)分别对应将  $BaTiO_3$  晶体放在前面和后面时

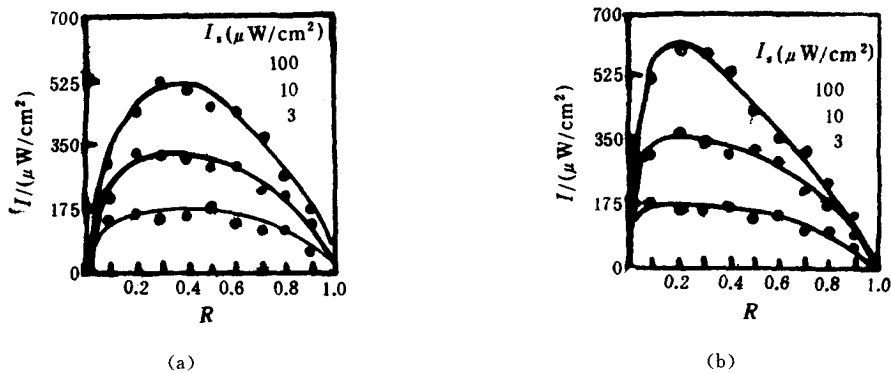


图5  $I$ - $R$  实验曲线

$I_p = 12000\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ; (a)  $BaTiO_3$  在前; (b)  $BaTiO_3$  在后

的情况. 实验结果证实了所提方案的可行性与理论分析的正确性. 将  $\text{BaTiO}_3$  放在后面时, 以  $I_s = 3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  对应的  $R$  最佳值大约为  $R_m = 0.1$ , 此时  $\beta$  大约为 200, 比  $\text{BaTiO}_3$  单级放大的最大放大倍数大了十余倍.

光折变非线性光学正处在日新月异的发展之中, 许多新原理、新思想不断提出. 但光折变材料的发展状况还没能跟得上这种形势的需要. 目前的材料除响应时间偏长, 效率较低外, 质量较好的晶体其价格十分昂贵. 本文提出的多极相干光放大方法, 一方面降低了对材料的要求, 使得用两块质量较差的晶体在合理安排光路后可以取得一块质量较好的晶体所能达到的效果, 这是十分经济的. 另一方面, 这也是一种对极弱光信号进行高倍相干光放大的行之有效的办法. 其缺点是比单级放大的光路要复杂一些. 在实际应用时, 应根据具体情况首先从理论上确定两块晶体抽运光强的最佳比值, 然后再确定光路中相应元件的参数, 就可采取比图 4 简单得多的光路进行工作.

[1] Pochi Yeh, *IEEE. J. Quan. Elec.*, **25**(1989), 484.

[2] 刘劲松等, *科学通报*, **36**(1991), 1536.

## MULTI-STAGE COHERENT OPTICAL AMPLIFICATION BASED ON TWO-BEAM COUPLING

LIU JIN-SONG

*Department of Technical Physics Xidian University, Xian 710071*

(Received 29 December 1992)

### ABSTRACT

The method of two-stage coherent optical amplification was put forward based on the principle of two-beam coupling. This not only makes it possible that two pieces of low quality crystals can yield the result that one piece of high quality crystal reaches, but also solves the problem that the amplification coefficient can not be greatly increased by means of one-stage amplification. The feasibility of the method was proved by theoretical analysis and experimental demonstration.

PACC: 4265; 4270G