

用简并的四波混频补偿激光 放大器相位畸变的方案

吴存恺 王志英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文提出和实验论证了两种用简并的四波混频补偿激光放大器相位畸变的方案。在第一种方案中,混频介质饱和吸收体 BDN 染料二氯乙烷液体置于激光振荡器腔外,用偏振隔离技术,相位补偿的激光辐射从 Nd:YAG 激光振荡放大系统中耦合出来。实验得到了放大约四倍的后向波输出。在第二种方案中,相位共轭镜置于激光振荡器腔内,BDN 染料溶液既作为简并的四波混频介质,又作为调 Q 介质,获得了补偿放大器相位畸变的调 Q 激光输出,研究了相位补偿特性。测量了激光输出与染料溶液浓度的关系。

一、引 言

近几年来,相位复共轭光学在许多领域展示出应用前景。使用相位共轭后向波可以补偿各种相位畸变,对目标实现自动瞄准以及用于信息储存和信息实时处理等方面^[1]。

在激光系统中,特别是在高功率激光放大器中,热效应及各种非线性效应,严重降低了激光光束质量。长期以来,人们一直在寻求各种途径来减小和补偿激光放大器中折射指数静态和动态分布不均匀,即相位畸变,以便提高激光输出的有效亮度^[2]。N. Basov 等人^[3]及 V. F. Efimkov 等人^[4]提出和论证了利用受激布里渊后向散射的波前反演特性来补偿激光放大器相位畸变的方案。对于低功率激光放大器,特别是 Nd:YAG 激光放大器,石榴石棒的光学质量是一个严重问题,如果能补偿其折射指数分布的空间不均匀性,从而降低对石榴石棒的质量要求,将对 Nd:YAG 激光系统的价值,输出光束质量的提高有巨大影响。本文提出和实验演示了两种利用简并的四波混频相位共轭后向波补偿激光放大器相位畸变方案。在第一种方案中,BDN 有机染料二氯乙烷溶液作为四波混频介质,调 Q Nd:YAG 激光振荡器输出作为泵浦光,激光放大器的输出作为物波,后向共轭波再次通过放大器,从而达到相位畸变补偿。采用偏振隔离方法,把物波与后向波分离开。实验得到了放大约四倍的波面修正的后向波激光输出。在第二种方案中,激光系统由 Nd:YAG 振荡器和放大器组成,四波混频介质 BDN 有机染料二氯乙烷溶液置于振荡器腔中,它也作为调 Q 介质,从而得到了能补偿放大器相位畸变的调 Q 激光输出。染料溶液有效长度为 8mm 时,实验测得最佳浓度约为 6×10^{-5} mol。

二、腔外共轭镜补偿方案

用腔外简并的四波混频共轭镜补偿激光放大器相位畸变方案如图 1 所示。这是一个调 Q Nd:YAG 激光系统。反射镜 M_1 和 M_2 构成激光振荡器谐振腔, 用辐照过的 LiF 晶体作调 Q 元件。在振荡器中插入偏振膜片 PF , 此偏振膜片对 S 偏振分量部分反射, 对 P 偏振分量全透射。因此该振荡器的输出辐射是 P 偏振的。此输出光束经菲涅耳菱体 FR_1 后, 其偏振态变为圆偏振的。投射到混频介质中, 此光束记为 E_1 ; 从混频介质透射的光束, 经全反射镜 M_3 反射沿原光路返回, 也投射到介质上, 此光束记为 E_2 。这两束光作为简并四波混频泵浦光束。 E_2 光束透过介质后再经菲涅耳菱体 FR_1 , 又变成线偏振光, 它反馈到振荡器中被放大, 此时光辐射已是 S 偏振, 从而从偏振膜片 PF 反射耦合出来。它经激光放大器放大, 其输出辐射又经第二个菲涅耳菱体 FR_2 , 再变成圆偏振光, 此光束记为 E_3 , 作为简并的四波混频物光束投射到介质中。经四波混频产生的 E_3 波的后向共轭波, 再经 FR_2 , 又恢复成线偏振光, 由于简并器波混频后向波偏振态反演特性, 此时的线偏振光仍是 S 偏振, 通过放大器再次放大, 其输出从偏振膜片 PF 透射出来。

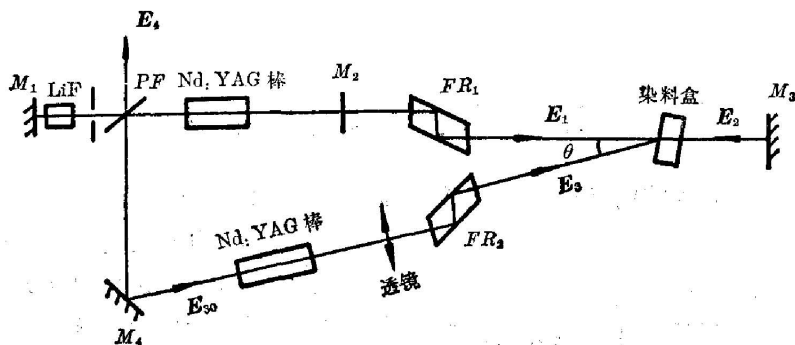


图 1 用腔外共轭镜补偿放大器的相位畸变的激光系统

Fig. 1 Experimental scheme of compensation for phase distortions in a laser amplifier using an extracavity phase conjugate mirror

在我们的实验中, 混频介质是 BDN 有机染料二氯乙烷溶液, 浓度为 2×10^{-5} mol, 有效长度为 8 mm。BDN 染料分子在 $1.06 \mu\text{m}$ 处有一吸收峰。因此我们可以利用共振增强效应提高非线性反射率。为了使入射到染料盒中的三束光的光斑尺寸相近, 在放大器输出端置一长焦距透镜。

图 2(a)、(b) 和 (c) 分别给出 E_3 、 E_4 及放大器入射波 E_{30} 的近场(上图)和远场(下图)照片。

由图可以明显看出, 激光放大器的输出辐射 E_3 波, 由于各种相位畸变(静态及动态)效应, 光束质量降低。经相位补偿后的后向波辐射 E_4 的光束质量有明显改善。在 E_{30} 和 E_3 波场的近场图中的条纹是由于反射光相干涉造成的。在我们的实验中, 光束 E_1 和 E_3 的夹角约为 11° 。激光放大器输入(即 E_{30} 波)能量约为 10 mJ, 激光放大器输出(即 E_3 波)能量约为 54 mJ, 经相位补偿后的后向波的能量约为 46 mJ。因此, 我们得到了放大四倍多的波面修正的后向波。

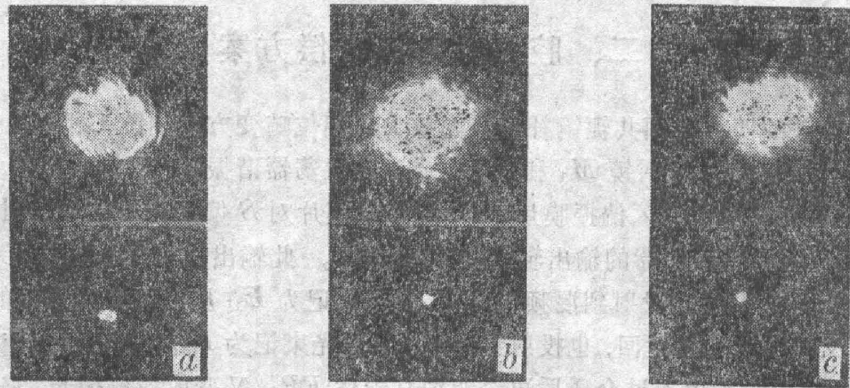


图2 图1所示各个波场的近场(上)和远场(下)图样

Fig. 2 Near-field (upper) and far-field (below) patterns of the waves shown in Fig. 1

(a) E_3 wave; (b) E_4 wave; (c) E_{30} wave

这种方案的缺点在于,在简并的四波混频中,后向波的偏振状态也发生反演,因此不能把后向波输出充分耦合出来,再加上反射镜及Nd:YAG棒都有一定程度的退偏振特性,故妨碍得到更有效的输出。

三、腔内共轭镜补偿方案

用简并的四波混频腔内共轭镜补偿放大器相位畸变的方案如图3所示。反射镜 M_1 和

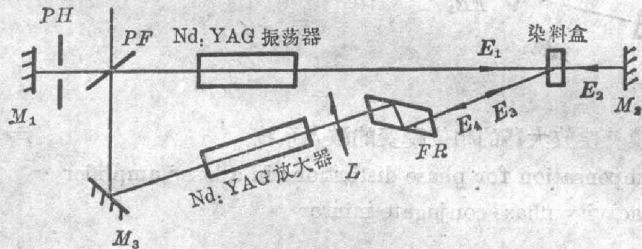


图3 用腔内共轭镜补偿放大器相位畸变激光系统

Fig. 3 Experimental scheme of compensation for phase distortions in a laser amplifier using an intracavity phase conjugate mirror

M_2 构成激光振荡器谐振腔,腔内置一 $\phi 2\text{mm}$ 光阑PH选横模,偏振膜板PF作为输出耦合器。混频介质仍为BDN染料二氯乙烷溶液,它也是振荡器的调Q介质。在振荡器中建立起来的激光驻波场作为四波混频泵浦波 E_1 和 E_2 。它们是P偏振的。由于偏振片PF当入射角约为 50° 时,对P偏振光的反射率约为20%,因此在腔中建立起来的激

光振荡场,由偏振片PF反射把这部分激光耦合到放大器中。放大器的输出辐射经菲涅耳菱体后,线偏振光变为圆偏振光,此光束为简并的四波混频的物波 E_3 。它投射到染料盒中与 E_1 和 E_2 波相交。在我们的实验中,光束的交角约 10° 。这样,在染料溶液中产生四波混频作用,形成一相位共轭后向波 $E_4 \propto E_3$ 。 E_4 波再经过菲涅耳菱体,又变成线偏振光,再次经放大器放大。这时放大器的输出辐射仍是P偏振光,从而由偏振片PF耦合输出。染料盒的有效长度仍为8mm。改变BDN二氯乙烷溶液的浓度,激光输出能量随之改变。实验测量了激光输出与染料溶液浓度的关系,如图4所示。由图可知,在 $6 \times 10^{-5}\text{mol}$ 浓度附近可得到最大激光输出。输出能量约68mJ。移动染料盒位置,使得 E_3 束不在染料盒内与

E_1 和 E_2 束相交, 此时测量激光放大器的输出能量约为 65 mJ。若放大器的增益为 g , 简并的四波混频非线性反射率为 R , 则此时 $gR \approx 1$ 。正如下面所指出的, 此时可对激光放大器的静态和动态相位畸变进行较理想的补偿。

频率为 ω_i , 波矢量为 k_i 的单色平面波可表示为

$$\begin{aligned} E_i(\mathbf{r}_i, t) &= \frac{1}{2} A_i(\mathbf{r}_i) \exp[i(\omega_i t - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i)] \\ &+ \text{c.c.o.} \end{aligned}$$

有效长度为 L 的非线性介质在场 E_1 、 E_2 和 E_3 作用下, 诱导的三阶非线性极化强度为

$$P_i^{(3)}(t) = \frac{3}{4} \sum_{j,k,l} \chi_{ijk}^{(3)}(-\omega; \omega, \omega, -\omega) E_{1j} E_{2k} E_{3l}^*$$

式中脚标 i, j, k 和 l 表示偏振方向。若场的偏振态表示为

$$E_i = E_{ix} \mathbf{i} + E_{iy} \mathbf{j},$$

则在我们的情况下有

$$P_i^{(3)}(t) = \frac{3}{4} \sum_{j,k,l} \chi_{ijk}^{(3)}(-\omega; \omega, \omega, -\omega) E_{1x} E_{2x} (E_{3x} \mathbf{i} + E_{3y} \mathbf{j}),$$

从而得

$$\begin{aligned} P_i^{(3)}(t) &= \frac{3\sqrt{2}}{8} [\chi_{1111}^{(3)}(-\omega; \omega, \omega, -\omega) E_1 E_2 E_3^* \mathbf{i} \\ &+ \chi_{1221}^{(3)}(-\omega; \omega, \omega, -\omega) E_1 E_2 E_3^* \mathbf{j}]. \end{aligned}$$

对于大多数非线性介质 $\chi_{1111}^{(3)} > \chi_{1221}^{(3)}$ 。因此, 对于圆偏振的物波 E_3 , 其后向波 E_4 并不是严格的圆偏振光, 这就影响了输出耦合。为了得到完全耦合, 应当调解 E_3 波的偏振状态, 以保证 $P^{(3)}$ 的两个分量相等。这是不难达到的, 只需将菲涅耳菱体换成合适的波长片, 旋转此波长片至最大激光输出。

此外, 我们用检偏器检验了各光束的偏振状态, 与上述的偏振特性分析一致。

四、讨 论

在激光放大器中的相位畸变有静态畸变和动态畸变两种。静态相位畸变主要来自激光材料本身折射指数分布的空间不均匀性; 动态相位畸变主要来自闪光灯泵浦过程中的热畸变及高功率激光传输过程引起的非线性效应。若频率为 ω 的单色电磁波沿 $+z$ 方向传播, 其电场可表示为

$$E_3(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) \exp[i(\omega t - kz)] + \text{c.c.o.}, \quad (1)$$

式中 $\psi(\mathbf{r})$ 为前向物波的复振幅, 表示通过相位畸变介质后, 使复振幅有一空间分布。类似

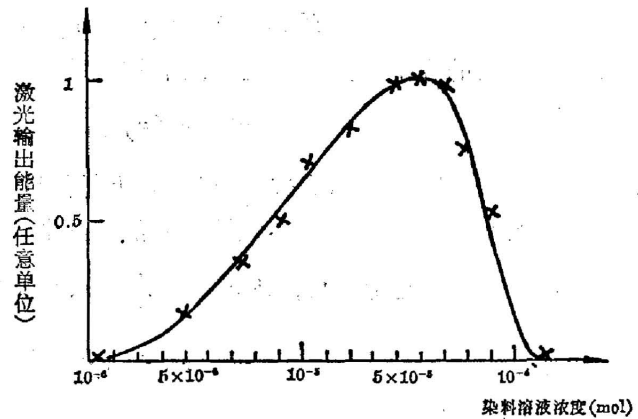


图 4 激光输出能量与 BDN 二氯乙烷染料溶液浓度的关系曲线

Fig. 4 Laser output as a function of the concentration of BDN dye solution in dichloride ethane

地,后向波表示为

$$\mathbf{E}_4(\mathbf{r}, t) = \varphi(\mathbf{r}) \exp[i(\omega t + kz)] + \text{c.c.}, \quad (2)$$

相位畸变介质的介电常数 ε 应是空间非均匀的并且与局域场有关,可以表示为

$$\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_0(\mathbf{r}) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_{2n}(\mathbf{r}) |E|^{2n}, \quad (3)$$

式中第一项仅与空间坐标有关,描述介质折射指数线性空间分布不均匀性;其余项描述介质折射指数与激光强度有关的非线性效应的空间非均匀性。可以只考虑一阶非线性效应。若

ε 是空间坐标的慢变化函数,满足 $\varepsilon \gg \left| \frac{d\varepsilon}{dx} \right| \lambda$, 波动方程可表示为

$$\nabla^2 E - \frac{\mu}{c^2} [\varepsilon_0(\mathbf{r}) + \varepsilon_2(\mathbf{r}) |E|^2] \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0. \quad (4)$$

将(1)式代入方程(4)中得

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) + \left[\frac{\omega^2 \mu}{c^2} \varepsilon_0(\mathbf{r}) - k^2 \right] \psi(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2 \mu}{c^2} \varepsilon_2(\mathbf{r}) |E_3|^2 \psi(\mathbf{r}) - 2ik \frac{\partial \psi(\mathbf{r})}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

将(2)式代入方程(4)中,类似可得

$$\nabla^2 \varphi(\mathbf{r}) + \left[\frac{\omega^2 \mu}{c^2} \varepsilon_0(\mathbf{r}) - k^2 \right] \varphi(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2 \mu}{c^2} \varepsilon_2(\mathbf{r}) |E_4|^2 \varphi(\mathbf{r}) + 2ik \frac{\partial \varphi(\mathbf{r})}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

取(5)式的复共轭得

$$\nabla^2 \psi^*(\mathbf{r}) + \left[\frac{\omega^2 \mu}{c^2} \varepsilon_0(\mathbf{r}) - k^2 \right] \psi^*(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2 \mu}{c^2} \varepsilon_2(\mathbf{r}) |E_3|^2 \psi^*(\mathbf{r}) + 2ik \frac{\partial \psi^*(\mathbf{r})}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

由(6)式和(7)式可以看出,如果 $|E_3|^2 = |E_4|^2$, 前向共轭波与后向波的复振幅满足相同的传播方程。这表明,若在某平面 z_0 处有 $\psi^*(z_0) = \varphi(z_0)$, 那么在畸变介质任何处都有 $\psi^*(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r})$, 于是可使相位畸变得完全补偿。显然上述条件 $|E_3|^2 = |E_4|^2$ 是来源于折射指数与激光强度有关的非线性项。当此条件不满足时,只能对激光放大器介质的线性相位畸变进行完全补偿,而对与激光强度有关的非线性动态畸变只能部分补偿。

若激光放大器的增益为 g , 简并的四波混频非线性反射率为 R , 则经激光放大器放大后的后向波强度 $|E_4|^2$ 与入射物波强度 $|E_3|^2$ 的关系为 $|E_4|^2 = gR |E_3|^2$ 。如果满足

$$gR = 1, \quad (8)$$

则有

$$|E_4|^2 = |E_3|^2. \quad (9)$$

在这种情况下,利用后向波相位复共轭特性,激光放大器的静态和动态相位畸变都可得到完全补偿。选择合适的混频介质并合理设计混频室,以及适当控制激光放大器的增益,条件(8)是不难达到的。

在我们的实验条件下,放大器的放大倍数约 4.6, 若后向波第二次通过放大器时,放大器的增益保持不变,则非线性反射率 $R \approx 26\%$, 于是得 $gR \approx 1.2$, 接近满足完全补偿条件。

参 考 文 献

- [1] D. M. Pepper; *Opt. Engng*, 1982, 21, No. 2 (Mar/Apr), 156.
C. R. Giuliano; *Phys. Today*, 1981, 34, No. 4 (Apr), 27.
- [2] T. R. O'Meara; *Opt. Engng*, 1982, 21, No. 2 (Mar/Apr), 243.
C. R. Giuliano, R. Lind et al.; *Laser Focus*, 1983, 19, No. 2 (Feb), 55.

- 3] N. Basov, I. Zubarev; *Appl. Phys.*, 1979, **20**, No. 3 (Nov), 261.
[4] V. F. Efimkov, I. G. Zubarev *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1980, **10**, No. 2 (Feb), 211.

Proposed schemes of compensation for phase distortions in laser amplifier by using degenerate four-wave mixing

WU CUNKAI AND WANG ZHIYING

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 16 November 1983; revised 7 February 1984)

Abstract

Two schemes of compensation for phase distortions in the laser amplifier have been proposed and experimentally demonstrated by using degenerate four-wave mixing. In the first scheme, BDN dye solution in dichloride ethane was used as the nonlinear medium, the saturable absorber was put outside of the laser oscillator. Using polarization discrimination, phase compensated output was coupled from Nd:YAG laser system. The backward wave output amplified about four times was experimentally obtained. In the other scheme, a phase conjugate mirror was put inside the oscillator cavity. The BDN dye solution was used as the degenerate four-wave mixing and the Q-switching medium as well. Q-switched output compensated for phase distortions in the amplifier was obtained. The property of compensating for phase distortions was investigated. The laser output as a function of the concentration of BDN dye solution was measured.