

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0403-03

基于级联非线性性的 B 积分补偿实验研究

陈昊¹, 朱鹤元^{1*}, 王韬¹, 钱列加¹, 范滇元^{1,2}

(¹复旦大学光科学与工程系先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海 200433)

(²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 对 B 积分(自聚焦)的有效抑制和控制是高能激光系统发展过程中的一个焦点问题。传统的 B 积分控制技术(空间滤波器)在一定程度上提高了光束质量,但是随着激光功率的不断增大,空间滤波技术受到诸多因素限制,已经不能满足要求,因此还需发展新的 B 积分控制技术。基于非线性倍频过程的二阶级联非线性可等效于三阶非线性,它的符号可控(允许为负),量值可变且很大,并可消除双光子吸收。级联非线性实际上提供了一个新的自由度,它可以产生有用的非线性相移。初步实验表明,利用级联非线性产生的负非线性相移,在一定程度上可以补偿强激光束在非线形传输过程中积累的 B 积分,具有很好的应用前景。

关键词 级联非线性; 光束畸变; 补偿

中图分类号 O437.5

文献标识码 A

Experiments on B Integral Compensation Using Second-Order Cascaded Nonlinearity

CHEN Hao¹, ZHU He-yuan¹, Wang Tao¹, QIAN Lie-jia¹, FAN Dian-yuan^{1,2}

(¹Department of Optical Science and Engineering, State Key Lab for Advanced Photonic Materials and Devices, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract It is a crucial problem in the field of high energy lasers to control B integral (i.e. self-focusing) and to restrain it effectively. As conventional control techniques of B integral (e.g. spatial filtering) nonetheless are far from solving the problem, novel techniques need to be developed. Based on nonlinear frequency doubling the cascaded second order nonlinearity, virtually equivalent to the third order nonlinearity, has a controllable sign (allowing of negative values), variable values that can be very large, and can eliminate two-photon absorption. The cascade nonlinearity provides a new degree of freedom for short-pulse sources to produce serviceable nonlinear phase shifts. The preliminary experiments show that using these negative phase shifts can to a certain extent compensate for the cumulative B integral due to the nonlinear propagation of high power laser (pulse) beams.

Key words cascaded nonlinearity; beam aberrance; (B integral) compensation

1 引言

级联非线性可以产生有用的非线性相移,这相当于给短脉冲源提供了一个新的自由度。将级联非线性用于飞秒激光的 B 积分补偿的研究已经取得一定进展^[1],而对于皮秒激光的研究几乎没有。我们的工作利用商品化的锁模 Nd:YAG 激光器开展皮秒及亚皮秒激光系统中 B 积分补偿的一些前期可行性研究。

2 理论

源于光学克尔效应的 B 积分,

$$B = F_{\text{Kerr}}^{\text{NL}}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2(z) I(x, y, z) dz,$$

是指光束在非线形传输过程中积累的非线形相移;亦可指光束的最快增长调制场 $a_m(z)$ 的指数增益:

$\frac{a_m(L)}{a_m(0)} \sim e^B$ 。对于大多数材料 $n_2 > 0$, 即 $B > 0$ 。通常用

B 积分值衡量非线形效应的强弱,反映全光束的波

基金项目: 国家自然科学基金(10276012)资助课题。

作者简介: 陈昊(1976-),男,复旦大学光科学与工程系硕士研究生,主要从事光学非线性、激光材料与器件的研究。

E-mail: chen hao@hotmail.com

* 通信联系人, E-mail: hyzhu@fudan.edu.cn

前畸变程度和小尺度自聚焦的严重程度,当 $B > 3 \sim 5$ 时会发生严重的自聚焦和自相位调制效应。

二阶级联非线性是指接连两次利用二阶非线性相互作用,使光波能量在基波和谐波间不断交换,从而使光束位相特性发生变化。在级联过程中,部分基频光首先通过正过程转换为倍频光,所产生的倍频光再经过逆过程(由相位失配 $\Delta k \neq 0$ 导致)倒流回基频光,此时基频光会感应到非线性相移,相当于一个频率简并的三阶非线性过程。可表示为:

$$\chi^{(2)}(\omega; 2\omega, -\omega) : \chi^{(2)}(2\omega; \omega, \omega) \leftrightarrow \chi^{(3)}(\omega; \omega, \omega, -\omega).$$

级联非线性需要相位失配或准匹配的条件。由于它由两个连续的二阶非线性过程构成,故其所造成的有效非线性与 $|\chi^{(2)}|^2$ 成正比,而与波矢失配 Δk 成反比,DeSalvo 等证实对于大的相位失配(ΔkL)或低功率光波,级联非线性相移近似为^[2]:

$$\phi_{\text{casc}}^{\text{NL}} \cong -\frac{\Gamma^2 L^2}{\Delta k L}, \quad (1)$$

其中 $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_{\omega}$ 为波矢失配, $\Gamma \propto d_{\text{eff}}|E|$, $d_{\text{eff}} = |\chi^{(2)}(2\omega; \omega, \omega)|/2$ 为有效倍频系数。

补偿克尔介质中积累的 B 积分($B > 0$),需要使光束产生负的非线性相移 $\phi_{\text{comp}}^{\text{NL}}$ 。让光束通过具有实际或等效折射率 $n_2 < 0$ 的材料就可以达到这一目的。我们的工作正是基于这一简单的思想, $\phi_{\text{comp}}^{\text{NL}}$ 来自级联 $\phi_{\text{casc}}^{\text{NL}}$, 即要求 $B + \phi_{\text{casc}}^{\text{NL}} \rightarrow 0$, 实现补偿。

3 实验

本工作用 Nd:YAG 锁模调 Q 脉冲激光作光源(脉宽 40ps@40 mJ, 重复频率为 10 Hz), 通过干涉方法在激光光束上产生调制, 该光束经过一段钽玻璃激光棒传输后将发生畸变, 利用相位失配的常规晶体 BBO, 研究三种不同情形的畸变补偿, 包括直接位相补偿、预补偿和后补偿。

实验装置如图 1 所示。激光光束通过聚焦望远镜系统被缩束, 聚焦准直之后的直径约为 4 mm, 功率密度提高到约 2 GW/cm^2 。为了模拟实际激光系统中遇到的光束中的起伏和扰动等因素, 也为了产生明显的可参照的实验现象, 我们在光束上加入了较有规律的调制, 使得预期的补偿能得到更好的验证。图中的调制器为一反用的镀膜玻璃反射镜(前后两反射面双光干涉调制) 调制深度约 40%。调制光束经过一段 40 cm 长的钽玻璃激光棒, 玻璃棒的非线性折射率及剩余热畸变引起了波面畸变[图 2(e)]。波前中超过自聚焦临界功率的部分发生自聚焦, 使调制变得很不规则, 出现强度极大的亮区和极小的暗区。这时再让光

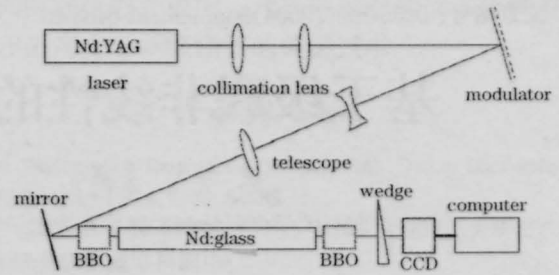


图 1 用 BBO 晶体产生的级联非线性对钽玻璃激光棒产生的 B 积分进行补偿的实验光路图(其中 BBO 晶体放在钽玻璃棒前或后分别对应前补偿和后补偿)

Fig.1 Experimental arrangement for B integral compensation by cascade nonlinearity produced in a BBO crystal radiated by high power Nd:YAG 40ps pulse laser (the BBO crystal is immediately inserted prior to or sequent to a Nd:glass laser bar, named pre- and post- compensating respectively)

束通过 BBO 晶体, 实现相位匹配。我们使用的补偿晶体 BBO 尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ($\theta = 26^\circ, \varphi = 0^\circ$), 据公式

$$\sin^2 \theta = \frac{n_o^2(\omega) - n_o^2(2\omega)}{n_e^2(2\omega) - n_e^2(\omega)} \quad (2)$$

算出负单轴晶体 BBO 在波长 1064 nm 处的倍频 I 类匹配角, 为 22.9° 。BBO 晶体置于特制的晶体架上, 用以精确地改变晶体的倾角, 在不同角度实现不同的位相失配, 得到不同效率的级联, 从而不同程度地补偿调制光束。我们的实验采用了三种“构型”(图 1), BBO 晶体放在调制器之后的称为“直接位相补偿”, 它还不是对 B 积分的补偿, 但可以作为参照光束用以衡量补偿的效果。加入钽玻璃棒作为增益介质时, 根据 BBO 晶体和钽玻璃棒的相对位置, 分为“预补偿”(BBO 在前)和“后补偿”(BBO 在后)两种构型。输出光经过镀膜尖劈衰减后由 CCD 接受光束并在计算机上清晰成像。图 2 是 CCD 相机拍摄的实验中各种光束的剖面图。Nd:YAG 皮秒激光器输出激光不是理想的高斯光束, 在中心位置有一暗区[图 2(a)], 但实验中我们发现, 这不会对相移补偿研究带来太大影响。加入调制后, 光束出现了亮暗相间的干涉条纹[图 2(b)], 这相当于实际高能激光器中可能出现的扰动。光束通过 BBO 晶体进行直接补偿的效果很好[图 2(c)], 光斑亮度均匀, 光束中纹波较少, 没有大的起伏, 光束质量大大改善。而调制光束经过钽玻璃棒后, 调制得到了显著加强[图 2(e)], 局部区域很亮, 甚至超过了 CCD 可以接受的饱和光强。在实际的高功率激光器中这种局部光强的显著增强很容易造成光学元件的损坏, 严重限制

激光器功率的提高。正如我们所料, 实验中后两种构型得到了不同的 B 积分补偿效果。在预补偿实验中, 调制光束先经过 BBO 晶体消除干涉条纹, 再通过铍玻璃棒, 出射[图 2(d)]光束亮度比较均匀, 光强变化平缓。后补偿实验中, 光束先通过铍玻璃棒再通过 BBO 晶体进行补偿, 与没有经过补偿的图 2e 相比, 光束质量有所改善[图 2(f)], 但是仍然存在局部亮度较大的区域。预补偿效果优于后补偿从理论上也是很容易理解的, 预补偿提前消除了扰动, 使光强分布比较均匀, 这样的光束经过铍玻璃棒不容易产生自聚焦效应, 实现了 B 积分补偿, 从而达到

大幅度提高激光器功率的目的。而在后补偿实验中, 经过调制后的光束局部光强较强, 通过铍玻璃棒后会变得更强, 此时 BBO 晶体不足以补偿非线性自聚焦引起的 B 积分。

从以上分析中可以看出: 2) 由 BBO 晶体产生的级联非线性确实补偿了高功率激光在非线性传输过程中产生的非线性自聚焦和光束的位相畸变。2) 调整 BBO 晶体的角度会使光束获得不同程度的补偿, 存在一个最优位置。可见, 级联可变的量值可以适应输入光束的较大动态范围。3) 不同构型的补偿效果也不一样, 预补偿的效果优于后补偿。

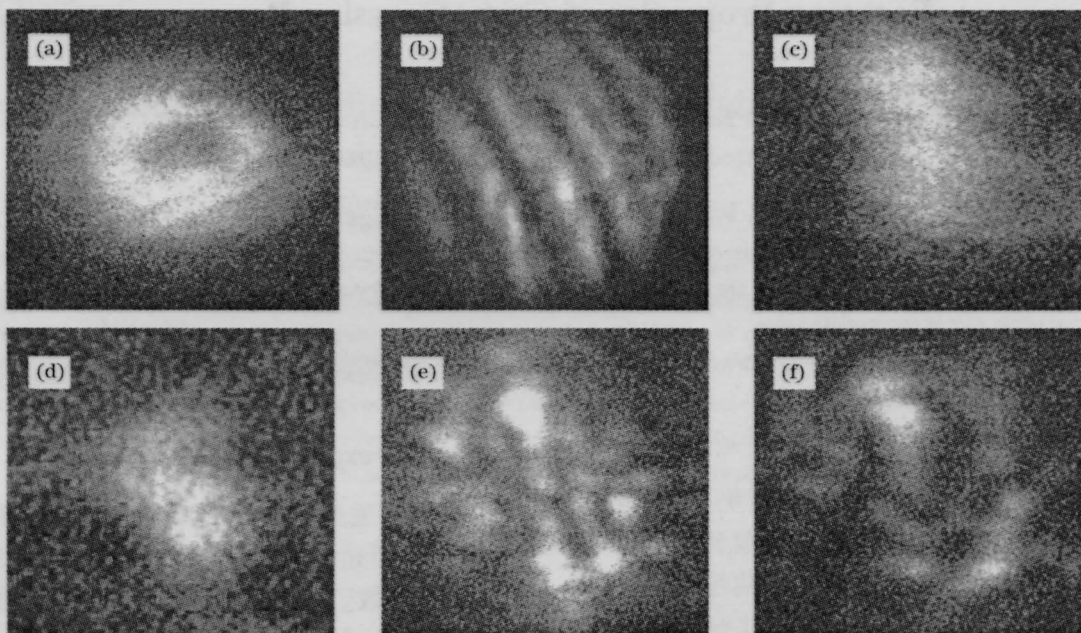


图 2 在(a)原始光中, 加入调制, 分别用 BBO 对(b)调制光进行(c)直接补偿, BBO 置于铍玻璃激光棒前的(d)预补偿, 及 (e)经铍玻璃激光棒, 再用 BBO 进行(f)后补偿, 由 CCD 相机得到强度衰减后的各种光束剖面

Fig.2 Intensity-attenuated beam profiles captured by a CCD camera (a)at the beginning, (b)modulated by an interference plate, (c)with a BBO Kerr phase shift only, (d) with cascade pre-compensating for B integral prior to a Nd:glass laser bar, and modulation amplified by the laser bar (e)without and (f)with post-compensating for B integral

4 结 论

初步实验结果表明, 基于级联非线性的位相补偿技术是有效的, 它可以在一定程度上消除 B 积分, 具有良好的应用前景。但是必须指出尽管初步实验结果非常诱人, 还需要进一步的理论和实验努力促进其应用, 比如如何实现对需要相移的精确调谐, 如何达到相关物理参数之间的匹配。而且这种 B 积分补偿技术存在一定的补偿能力范围, 如果能和传统的补偿技术联合起来, 可以有更好的效果。总之, 利用位相失配的级联非线性产生的负非线性相移可以在一定程度上补偿强激光束在非线性传输过程中积累的 B 积分。可以预见, 这种新型的 B 积

分补偿技术将为高功率激光驱动器的建造提供新的途径, 对于惯性约束聚变及武器物理等的研究具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 K. Beckwitt, F. Wise, L. Qian *et al.*. Compensation for self-focusing by use of cascade quadratic nonlinearity [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**:1696-1698
F. Wise, L. Qian, X. Liu. Application of cascaded quadratic nonlinearities to femtosecond pulse generation[J]. *J. Nonlin. Opt. Mat.*, 2002, **11**:317-338
- 2 R. DeSalvo, D. J. Hagan, M. Shiek-Bahae *et al.*. Self-focusing and self-defocusing by cascaded second-order effects in KTP [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**:28-30