

文章编号: 0258-7025(2001)11-0966-05

利用腔内位相调制改善固体激光器的 光束质量*

王立刚 蔡阳健 江晓清 林强

(浙江大学物理系光学研究所 杭州 310028)

摘要 提出一种新的利用腔内位相调制的方法来改善激光器输出的光束质量。位相调制用铌酸锂(LiNbO₃)电光晶体实现,所用激光器为连续氪灯抽运的Nd:YAG激光器。实验结果表明,利用腔内位相调制的方法,可以有效地使多模激光变为具有均匀光强分布的近基模光束。

关键词 位相调制, 光束质量, 固体激光

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Beam Quality Improvement by Intracavity Phase Modulation in Solid-state Laser

WANG Li-gang CAI Yang-jian JIANG Xiao-qing LIN Qiang

(Institute of Optics, Department of Physics, Zhejiang University, HangZhou 310028)

Abstract A new method to improve laser beam quality by using intracavity phase modulation is presented. The phase modulation is fulfilled by LiNbO₃ electro-optic crystal driven by high voltage. The laser used is CW Nd:YAG solid-state laser pumped by Krypton lamps. The experimental results show that intracavity phase modulation can transfer effectively the laser oscillation mode from multi-mode to fundamental mode-like beam with smooth intensity profile.

Key words phase modulation, beam quality, solid state laser

1 引言

在激光的许多实际应用中,如在激光惯性约束核聚变(ICF)中靶场的辐照^[1,2]、激光材料表面热处理^[3]、激光涂敷^[4]等场合中,常对光斑强度分布的均匀性有一定要求。提高光束均匀性主要有两种途径。一是在腔外光束传输通道上插入适当的光学元件,如:二元光学元件^[5,6]、随机位相片(RPP)^[7,8]、随机偏振控制板^[9]等;另一种是在腔内置光学元件或改变腔镜结构,如渐变反射率镜^[10]、渐变位相镜^[11]、自适应光学反射镜^[12]等。最近我们提出一种时空域随机位相调制光学谐振腔,从理论上证明了输出均匀性较好的光束的可行性^[13,14]。本文提出一种

新的利用在腔内放置电光调制晶体的方法,来实现对腔内模式的时空位相调制,从而改善激光器输出光束的质量。实验中所用的激光器为连续Nd:YAG固体激光器,所用的电光晶体为LiNbO₃,采用交变高压电场横向调制。实验结果显示,腔内位相调制法是改善光束质量的简单而有效的途径。

2 实验装置与结果

激光器的输出模式是由腔内各个模式的相对损耗所决定的,每个增益超过振荡阈值的模式均有可能起振,但要受到模式之间竞争的制约^[15]。在一定的谐振腔结构和抽运条件下,各个模式的相对损耗是固定的。若要改变它,需要采取一定的措施,如在腔内加入Fresnel波带板^[16]来进行选模。

本文的方法是在腔内置入空间位相调制器,使腔内横向不同位置上的位相可以改变,以此来控制不同模式的损耗,从而改变输出光束的光强分布和

* 浙江省自然科学基金青年科技人才培养专项基金(RC98029)、霍英东教育基金会青年教师基金(71009)和浙江省教委科研基金资助项目。

收稿日期:2000-08-21;收到修改稿日期:2000-10-09

光束质量。实验装置如图 1 所示。激光介质为 Nd:YAG 棒, 尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 104 \text{ mm}$, 由二支连续氦灯抽运。所用谐振腔为平行平面腔, 腔长为 510 mm, 整个腔体用循环水冷却。位相调制晶体为 LiNbO_3 晶体, 尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 其主轴与光腔的光轴一致, 两端面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 的增透膜, 置于输出镜 M_1 与 YAG 棒之间。 LiNbO_3 晶体加横向电压来实现调制。

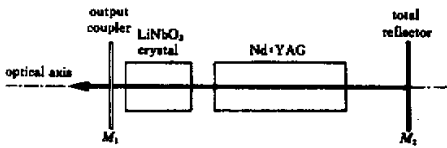


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

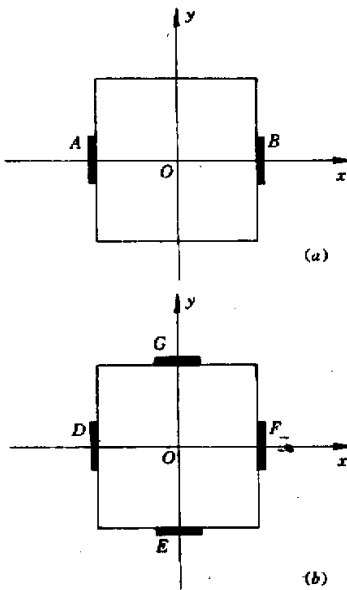


图 2 电极示意图

(a) 二电极法; (b) 四电极法

Fig.2 Schematic diagram of electrodes

(a) two electrodes; (b) four electrodes

实验中, 分别采用二电极法和四电极法对腔内模式进行调制。二电极法如图 2 (a) 所示, A, B 两极极性始终相反; 四电极法如图 2 (b) 所示, D, F 为等电压电极, 与另一对等电压 E, G 始终极性相反。图 3 给出了用二电极法调制前后的光强分布曲线, 图 3 (a) 为没有加电压时的输出光强分布, 图 3 (b)

为加 1500 V 50 Hz 高压交流电时的输出光强分布, 观测位置与图 3 (a) 相同, 均在腔外离输出镜 1.40 m 处。从图中可以看出, 原来输出光束中心是暗的, 经二电极法调制后已成为中心是亮的且呈类基模分布的光束。

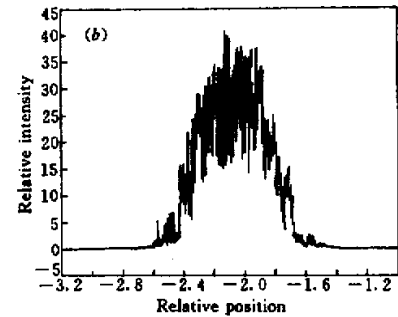
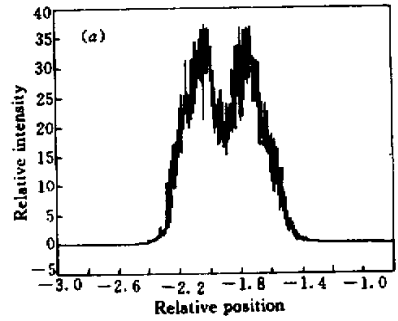


图 3 二电极法调制前后的输出光强分布曲线

(a) 调制前; (b) 调制后

Fig.3 Output beam intensity profile before (a) and after (b) phase modulation in the case of two electrodes

由于二电极法只在一个方向上进行调制, 故此法只对该方向上的光强分布有较大影响。为了对光束两个方向进行对称的调制, 我们进一步采用四电极法在两个相互垂直方向上加调制电压, 如图 2 (b) 所示。图 4 给出了四电极法调制前后的光强分布曲线, 图 4 (a) 为没有加电压时的输出光强分布, 图 4 (b) 为加 3000 V 50 Hz 高压交流电时的输出光强分布, 观测位置与图 4 (a) 相同, 均在腔外 40 cm 处。从图中可以看出, 原来输出光束中心是暗的, 经四电极法调制后已成为中心是亮的且明显均匀化的光束。另外, 调制后强度分布曲线在细节上变得更具起伏, 原因是调制的频率不高和电压不稳定所致。

加调制晶体后对激光工作效率有一定影响, 主要原因是调制晶体的插入损耗。而加调制电压本身

对激光器的输出功率影响很小。本文实验中加调制后的激光器效率约为 0.5%。图 3 和图 4 中横坐标给出的就是实际光斑尺寸, 单位为 cm。因此, 图 3

中光斑直径约为 10 mm, 图 4 中光斑直径约为 2 mm。测试光强分布曲线仪器的空间分辨率为 0.05 mm。

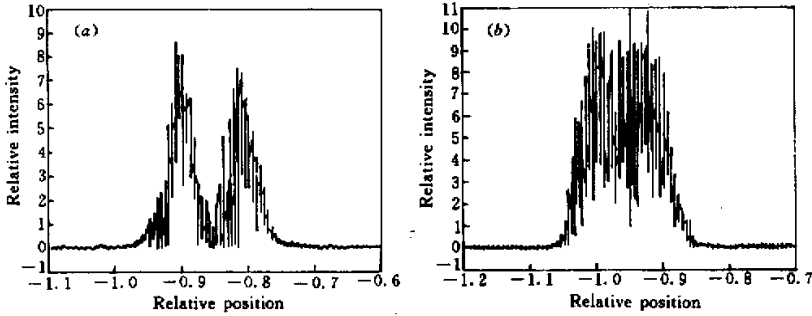


图 4 四电极法调制前后的输出光强分布曲线

(a) 调制前; (b) 调制后

Fig. 4 Output beam intensity profile before (a) and after (b) phase modulation in the case of four electrodes

3 理论分析

电光调制的原理是在电场作用下, 电光晶体的折射率发生改变, 折射率的改变引起经过晶体的光束的位相发生改变, 改变量正比于电场强度。在忽略边缘效应的条件下, 可以假设电场强度的方向垂

直于光轴, 即晶体内各点的电场方向均平行于 x - y 平面(如图 2 所示)。因此, 只需考虑横截面上的电场分布。二电极法时如图 2(a) 建立坐标, 坐标原点置于截面中心。根据电动力学知识可知, 晶体内横截面上电势分布为:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x, y) = & \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{C_1 U_1}{b} \left\{ \log \left[\left(\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x+a)^2 + \left(\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] - \right. \\ & \left. \log \left[\left(-\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x+a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] \right\} + \\ & \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{C_1 U_2}{b} \left\{ \log \left[\left(\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x-a)^2 + \left(\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] - \right. \\ & \left. \log \left[\left(-\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x-a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, C_1 为 A, B 两处电极间的截面电容, U_1, U_2 分别为电极 A, B 上的瞬时电压, a 为电极距中心点位置, b 为电极宽度, ϵ 为晶体介电常数。则电场强度可由公式 $E(x, y) = -\nabla\varphi$ 求得。实验中, 取 $a = 3.5$ mm, $b = 2.0$ mm, 因为使用频率 $f = 50$ Hz 的交流电, 所以可取 $U_1(t) = U_0 \cos(2\pi ft)$, $U_2(t) = U_0 \cos(2\pi ft + \pi)$, 其中 U_0 为峰值电压。图 5(a) 给

出了二电极法时, $t = 0.001$ s 时晶体截面内的电势分布, 其强弱随时间发生周期性变化。也就是说, 电场强度分布随时间变化。电光效应导致晶体内折射率分布随电压变化, 从而使腔内模式受到调制而改变。

对于四电极法时, 如图 2(b) 建立坐标, 同样可得其在晶体横截面内的电势分布为:

$$\begin{aligned} \varphi_2(x, y) = & \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{C_2 U_1}{b} \left\{ \log \left[\left(\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x+a)^2 + \left(\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] - \right. \\ & \left. \log \left[\left(-\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x+a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] \right\} + \\ & \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{C_2 U_1}{b} \left\{ \log \left[\left(\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x-a)^2 + \left(\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] - \right. \\ & \left. \log \left[\left(-\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x-a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \log \left[\left(-\frac{b}{2} + y \right) + \sqrt{(x-a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + y \right)^2} \right] + \\
 & \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{C_2 U_2}{b} \left\{ \log \left[\left(\frac{b}{2} + x \right) + \sqrt{(y+a)^2 + \left(\frac{b}{2} + x \right)^2} \right] - \right. \\
 & \log \left[\left(-\frac{b}{2} + x \right) + \sqrt{(y+a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + x \right)^2} \right] + \\
 & \left. \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{C_2 U_2}{b} \left\{ \log \left[\left(\frac{b}{2} + x \right) + \sqrt{(y-a)^2 + \left(\frac{b}{2} + x \right)^2} \right] - \right. \right. \\
 & \left. \left. \log \left[\left(-\frac{b}{2} + x \right) + \sqrt{(y-a)^2 + \left(-\frac{b}{2} + x \right)^2} \right] \right\} \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, C_2 为电极 D, F 和 E, G 之间的截面电容, 其他参数取值与(1)式相同。图 5(b) 给出了四电极法时, $t = 0.001$ s 时晶体截面内的电势分布, 其强弱也随时间发生周期性变化。结果导致晶体折射率分布随电压的调制发生变化, 或者说对腔内模式产生

了随时间变化的位相调制。与二电极法不同的是, 这种四电极法的调制效果主要是在边缘部分, 中央区域调制较弱且变化不明显, 所以对不同模式的作用效果是不同的, 但对整个光束的影响较为对称; 从而输出光束为形状较好的圆形光斑。

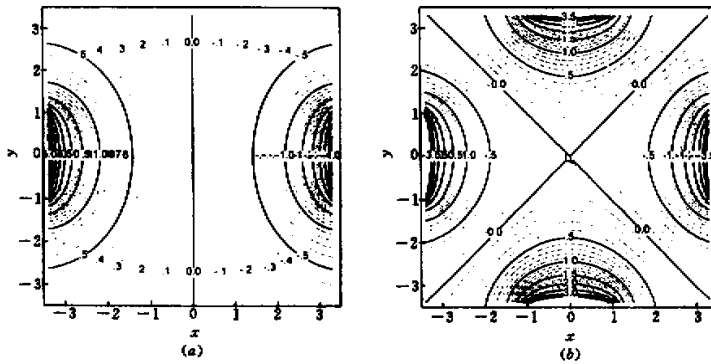


图 5 两种接法时晶体截面内的电势分布
(a) 二电极法; (b) 四电极法

Fig. 5 Electric potential distribution in the case of two electrodes (a) and four electrodes (b)

4 结果与讨论

本文利用在腔内放置电光调制晶体, 成功地实现了对腔内模式进行时空位相调制, 从而改善激光器输出模式的光束质量。同时对这种光腔调制的机理作了理论分析。实验结果表明, 腔内位相调制是一种控制输出模式的有效方法, 不同的调制电压对改善输出模式的效果是不同的, 在调制电压参数合适的条件下, 可以得到强度均匀分布的光束。用本文方法也可以对高阶模进行调制, 当然, 对高阶模进行调制时应增大晶体的孔径, 并且电极结构也更复杂。

利用腔内位相调制法改善光腔的模式, 不同于

阑孔选模。阑孔选模主要是通过在腔内插入适当的光阑, 通常是小孔, 以抑制高阶模式振荡, 实现单横模输出, 其结果是模体积减小, 输出功率大大下降。而位相调制法是对光腔内原来存在的所有模式进行调制。由于是纯位相调制, 除了调制器的插入损耗外, 原理上不会影响输出功率。这种调制的结果是改变了原有各模式之间的固定位相关系, 所以产生的光束是部分相干的。只要调制参数合适, 可以很好地改善光束质量。

致谢 作者感谢王绍民教授、陆璇辉教授对本项工作的支持和沈惠根师傅在实验中的帮助。

参 考 文 献

- 1 Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, 25(3):377~381
- 2 Deng Xuegong, Li Yongping, Qiu Yue *et al.*. Quantitative description of beam quality in uniform illumination experiments. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, A23(11):1021~1026 (in Chinese)
- 3 Qiu Junlin. The beam quality of high power lasers and its influences on the laser processing. *Laser Technology* (激光技术), 1994, 18(2):86~91 (in Chinese)
- 4 Wang Yunshan. Analysis for Laser beam pattern of wide-band scanning mirror. *Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 1997, 8(4):282~286 (in Chinese)
- 5 J. Cordingley. Application of a binary diffractive optic for beam shaping in semiconductor processing by lasers. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14):2538~2542
- 6 R. Bourouis, K. Ait Ameer, H. Ladjouze. Optimization of the Gaussian beam flattening using a phase-plate. *J. Modern Optics*, 1997, 44(7):1417~1427
- 7 S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14):2543~2554
- 8 Lin Qiang, Jiang Xiaoqing, Zhu Jingmin *et al.*. Laser beam smoothing by a rotating random phase plate. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, A25(10):901~904 (in Chinese)
- 9 Zhongyong Liu, Yu Zhao, Dianyuan Fan. Improvement of the illumination uniformity in ICF using a random polarization control plate. *Opt. Comm.*, 1998, 152(1, 3):1~5
- 10 M. S. Bowers. Diffractive analysis of unstable optical resonators with super-Gaussian mirrors. *Opt. Lett.*, 1992, 17(19):1319~1321
- 11 P. A. Bélanger, R. L. Lachance, C. Paré. Super-Gaussian output from a CO₂ laser by using a graded-phase mirror resonator. *Opt. Lett.*, 1992, 17(10):739~741
- 12 T. Y. Cherezova, S. S. Chesnokov, L. N. Kaptsov *et al.*. Super-Gaussian laser intensity output formation by means of adaptive optics. *Opt. Comm.*, 1998, 155(1, 3):99~106
- 13 Qiang Lin, Ligang Wang. Optical resonators producing partially coherent flat-top beams. *Opt. Comm.*, 2000, 175(4, 6):295~300
- 14 Wang Ligang, Lin Qiang, Wang Shaomin. Mode of resonators with spatial-temporal phase modulation. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, A27(11):997~1001 (in Chinese)
- 15 E. Louvergneaux, D. Henneguain, D. Dangoisse *et al.*. Transverse mode competition in a CO₂ laser. *Phys. Rev. A*, 1996, 53(6):4435~4438
- 16 S. Tanaka, H. Sato. Intracavity optical modulation using fresnel zone-plate type E-O lens. *SPIE*, 1999, 3620:38~44