

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0045-04

应力双折射对 Nd:YAG 组合式片状激光振荡器 转换效率和光强分布的影响

蒋新颖¹, 袁晓东¹, 徐美健¹, 刘建国¹, 贺少勃¹, 曹丁象^{1,2}, 魏晓峰¹

(¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
(²国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 采用光弹性应力分析的理论, 对大口径 Nd:YAG 介质由于生长缺陷产生的应力双折射效应进行了检测和理论分析。结合检测结果计算了应力双折射对大口径组合式片状 Nd:YAG 激光器转换效率的影响, 计算表明在存在应力的区域会引起 36.3% 的平均损耗, 并且损耗是一个空间调制函数, 变化范围是 0~0.9997。实验测量了激光器的静态透过率和近场光斑分布, 验证了计算结果。

关键词 激光技术; 应力双折射; 退偏损耗; 转换效率

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Effect of Stress-Birefringence in Nd:YAG on Conversion Efficiency and Beam Profile in Combined Disks Laser

JIANG Xin-ying¹, YUAN Xiao-dong¹, XU Mei-jian¹, LIU Jian-guo¹, HE Shao-bo¹,
CAO Ding-xiang^{1,2}, WEI Xiao-feng¹

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² College of Optoelectronic Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Stress birefringence resulted from the growth defect of YAG crystal is tested and analyzed using the photoelastic stress theory. Combined with the test result, the effect of the stress birefringence on the conversion efficiency of large aperture multi-disks YAG laser is calculated. The result indicates that it causes 36.3% wasting in average where stress exists, which is a spatial modulated function, in the range of 0~0.9997. The static transmission rate and the near field spot distribution are measured in the experiment and validate the calculation.

Key words laser technique; stress birefringence; dissipation loss; conversion efficiency

1 引 言

Nd:YAG 激光介质由于良好的热导性能和极大的受激发射截面, 在高平均功率固体激光器中被广泛采用。YAG 晶体属立方晶系, 理想情况下各向同性, 但在生长过程中晶体会出现一些缺陷。晶体中的缺陷对激光材料的光学均匀性、光损耗、激光输出功率、光束质量以及光损伤均有影响^[1]。

目前大多数高功率 YAG 激光器采用棒状介质, 在近几年发展起来的薄片激光器中, 采用的 YAG 片状介质一般都不超过 $\phi 30$ mm。这些介质

由于表面积较小, 一般采用垂直于生长方向切割, 避免沿生长方向内部应力的影响, 从而获得均匀性非常好的介质。所以传统的应用方式对沿晶体生长方向的应力分布要求并不严格。但要获得更高功率的激光输出, 必然要求更大面积的 YAG 片, 在目前的条件下, 只能平行于晶体的生长方向切割, 但这样沿晶体生长方向的应力就会明显地影响激光输出。本文对晶体缺陷引起的应力双折射效应进行了理论分析和测量, 并计算了应力双折射组合式片状激光器转换效率的影响, 实验验证了理论计算结果。

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金(Z0405)和高技术 863-802-8 专题资助课题。

作者简介: 蒋新颖(1979—), 女, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心硕士研究生, 主要从事高功率固体激光技术的研究。E-mail: noveltymm@126.com

2 基本理论

2.1 应力双折射理论

YAG 晶体属于立方晶系, $m3m$ 点群。它的弹光系数的独立分量数为 3 个, 采用普克尔斯表示方法, 弹光效应引起的光学性质的变化由 $\Delta\beta$ 决定^[2]

$$\Delta\beta = \pi_{MN} T_N, \quad (1)$$

晶体光学性质的变化表现为逆介电张量 β 的变化, 折射率椭球就是 β 张量的二阶示性面, 在一般的坐标系中, 示性面方程为 $\sum \beta_{ij} x_i x_j = 1$ 。 π_{MN} 为压光张量, T_N 为应力张量。对 YAG 晶体, 以 $[100]$ 方向为参考方向, π_{MN} 的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix},$$

当 YAG 内部不存在应力时, 折射率椭球表示为

$$\beta_0 x_1^2 + \beta_0 x_2^2 + \beta_0 x_3^2 = 1, \quad (2)$$

当 YAG 内部存在应力时, 折射率椭球方程变为

$$\beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3^2 + 2\beta_4 x_2 x_3 + 2\beta_5 x_1 x_3 + 2\beta_6 x_1 x_2 = 1, \quad (3)$$

2.2 应力双折射对组合式片状激光器转换效率的影响

图 1 为组合式片状激光器构型, 采用 6 片 Nd:YAG 片作为激光介质, 每两片组成一组, 互相平行。三组介质放置成“之”字型, 激光方向与 YAG 片成布儒斯特角。

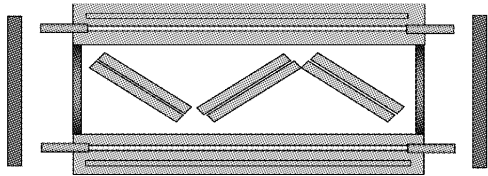


图 1 组合式片状激光振荡器构型

Fig. 1 Structure of the combined disks laser

激光器的脉冲长度为纳秒级, 输出功率可以计算为^[3]

$$\begin{cases} P_{pt} = \frac{h\nu_p \delta V}{\eta_F \sigma_{21} \tau_s l}, \\ P_o = \frac{\nu_0 A}{\nu_p S} \eta_0 \eta_l P_{pt} \left(\frac{P_p}{P_{pt}} - 1 \right), \end{cases} \quad (4)$$

其中 P_{pt} 为阈值功率, ν_p 为抽运光频率, ν_0 为激光中心频率, V 为激光介质体积, P_p 为抽运功率, P_o 为输

出功率, δ 为损耗系数, S 为工作物质横截面积, σ_{21} 为受激发射截面, τ_s 为激发态自发辐射跃迁寿命, $\eta_0 = T/(2\delta)$, T 为输出镜透射率, η_l 为无辐射跃迁的量子效率, η_F 为总量子效率。

应力双折射引起退偏损耗, 使激光器的腔内损耗增大。将(2)式化为标准式, 即

$$\beta'_1 x'_1{}^2 + \beta'_2 x'_2{}^2 + \beta'_3 x'_3{}^2 = 1, \quad (5)$$

其中

$$\beta' = \begin{bmatrix} \beta'_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta'_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta'_3 \end{bmatrix} = \mathbf{V} \boldsymbol{\beta} \mathbf{V}^{-1},$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_6 & \beta_5 \\ \beta_6 & \beta_2 & \beta_4 \\ \beta_5 & \beta_4 & \beta_3 \end{bmatrix},$$

于是 $\beta'_1 = 1/n_{x_1}^2$, $\beta'_2 = 1/n_{x_2}^2$, $\beta'_3 = 1/n_{x_3}^2$ 。

考虑一束线偏振光, 偏振方向为 p 方向, 以布儒斯特角入射到晶体上。以晶体表面水平方向为 x_1 轴, 垂直方向为 x_2 轴, 设入射光的电场为

$$E_1 = E_{1x} \hat{x}_1 + E_{1y} \hat{x}_2 + E_{1z} \hat{x}_3, \quad (6)$$

其中 $E_{1x_2} = 0$ 。在新坐标系中表示为

$$E_1 = E_{1x_1} \hat{x}_1 + E_{1x_2} \hat{x}_2 + E_{1x_3} \hat{x}_3, \quad (7)$$

经过晶体后电场变为

$$\begin{aligned} E'_2 = & E'_{1x} \hat{x}'_1 \exp(i\Delta n'_{x_1} kl) + \\ & E'_{1y} \hat{x}'_2 \exp(i\Delta n'_{x_2} kl) + \\ & E'_{1z} \hat{x}'_3 \exp(i\Delta n'_{x_3} kl), \end{aligned} \quad (8)$$

一般情况下 E'_{2x_1} , E'_{2x_2} , E'_{2x_3} 均不为 0, 且相位不一致。再以相对入射面的 s, p 分量作为参考系, 则 s 方向上的能量将由于反射而损耗掉。

3 数值模拟与实验研究

3.1 晶体检测实验

用应力仪对晶体的应力双折射进行了检测, 应力仪的两个偏振片为正交偏振态, 光源为白光。实验结果显示, 在两个偏振镜之间加入晶体后, 视场中出现了颜色各异的亮条纹, 如图 2 所示。这说明晶体存在比较严重的应力双折射^[4]。

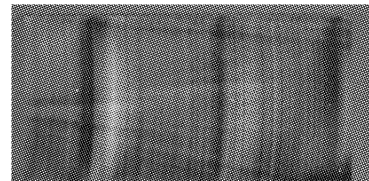


图 2 应力仪下 YAG 片的照片

Fig. 2 Photograph of the YAG disk in the stress meter

3.2 模拟计算结果

在应力分布完全随机的情况下,损耗 δ 的波动范围为 $0\sim 0.9997$,分布也完全随机,对于整个存在应力的区域内,由应力双折射引起的平均光强损耗

为 36.3% 。根据实际情况,模拟了图 1 所示构型的激光器在激光介质存在应力双折射时的输出光斑强度分布,如图 3 所示。

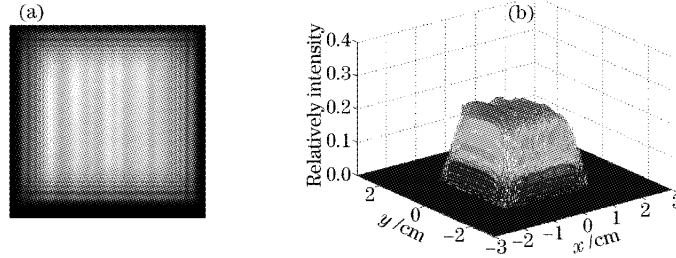


图 3 光斑强度分布模拟结果。(a)近场光斑;(b)相对强度

Fig. 3 Calculation results of the intensity of the laser spot. (a) Near field beam profile; (b)relativity intensity

3.3 应力双折射对激光器输出光斑的影响

首先测量了组装好的激光器对偏振光的静态透过率,测量结果如图 4 所示。图 4(a)是探测光的光强分布,图 4(b)是 p 偏振光经过激光器后的光强分布,图 4(c)是将激光器转 90° ,使 p 偏振光变为 s 偏振光经过激光器得到的光强分布(注:因为探测光来自于脉冲激光器,3 张照片所用的是不同时刻的激光,所以不是精确对应,只能定性说明问题)。由图 4 可见,应力分布使晶体产生了双折射,影响了透过

率。采用图 1 所示的激光器构型,用黑相纸记录了激光输出光斑的强度分布,实验结果如图 5 所示,与模拟计算的结果基本一致。

通过测量斜率效率对激光器的转换效率做了测量。采用平行平面谐振腔,输出镜的透过率为 70% 时,得到的效率如图 6 所示。对实验结果的简单计算表明,阈值为 311J 。可见应力双折射引起的损耗使激光器的阈值偏高,转换效率偏低。

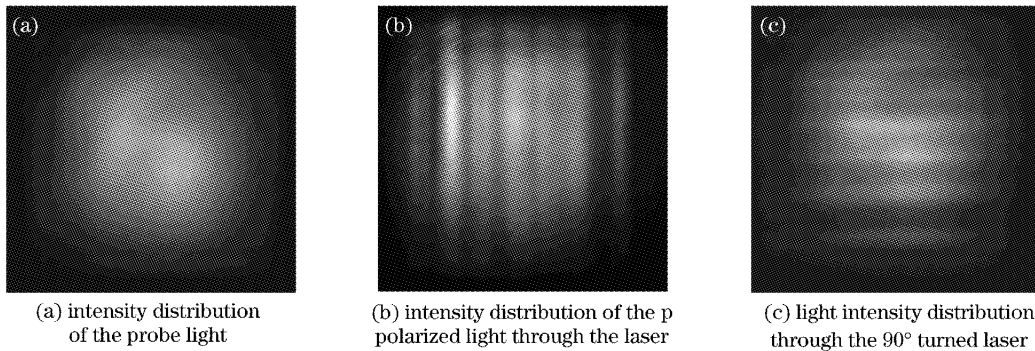


图 4 静态透过率测量结果

Fig. 4 Measurement results of static state transmission

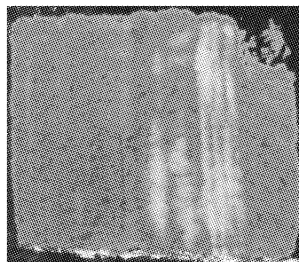


图 5 激光器的近场光斑

Fig. 5 Near field profile of the laser

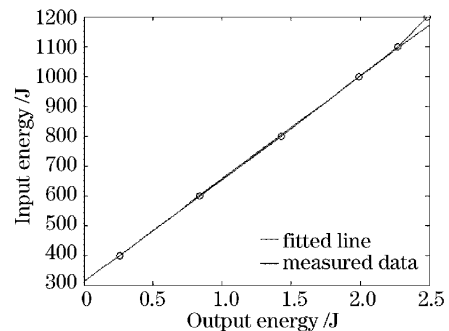


图 6 转换效率实验结果

Fig. 6 Measurement result of the conversion efficiency

4 结 论

通过理论分析,给出了由于晶体生长缺陷导致的应力双折射的理论模型,计算了应力双折射对激光转换效率的影响。结果表明,这种缺陷对激光器输出光斑的均匀性和效率都有非常严重的影响。对输出特性进行的实验研究表明由于存在严重的应力双折射效应,激光器的输出效率严重降低,输出能量的空间分布不均匀。

参 考 文 献

- 1 Gan Fuxi, Deng Peizhen. Laser Material [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1996. 187~233
 - 2 Chen Gang, Liao Liji. Crystal Physics Principle [M]. Beijing: Science Press, 1992. 442~445
 - 3 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Chourong *et al.*. Laser Theory [M]. 4th edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 168
 - 4 Albrecht Kuske, George Robertson. Photoelastic Stress Analysis [M]. Transl. Wang Xieshan, Huang Jiefan, Jin Yan *et al.*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1979. 90~97
- 干福熹, 邓佩珍. 激光材料 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996. 187~233
- 陈 刚, 廖理几. 晶体物理学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 442~445
- 周炳琨, 高以智 陈侗嵘 等. 激光原理 [M]. 第 4 版, 北京: 国防工业出版社, 2000. 168
- A. 柯斯克, G. 罗伯逊. 光弹性应力分析 [M]. 王燮山, 黄杰藩, 金 炎 等译. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 90~97