

角锥棱镜腔 Nd:YAG 固体激光器特性的理论分析

高伟清^{1,2}, 姚功民²

(1. 特种显示技术教育部重点实验室 合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要:理论分析了角锥棱镜腔 Nd:YAG 固体激光器的特性, 通过数值模拟得出结论, 角锥棱镜谐振腔对角锥棱镜的平移失调有一定的敏感性, 而对输出镜的角度失调是不敏感的。利用菲涅耳-基尔霍夫衍射方程, 模拟出角锥棱镜腔近场模式, 该模式由六个瓣状结构组成, 与实际光斑相吻合。根据斯托克斯参量分析出, 角锥棱镜出射光的偏振态随角锥棱镜转动发生改变, 出射的椭圆偏振光的椭圆率和方位角随着角锥棱镜的转动发生改变。

关键词:角锥棱镜; 免调试; 模场分布; 偏振态

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Theoretical Analyses of the Characteristics of Nd:YAG Solid Laser with Corner Cube

GAO Wei-qing^{1,2}, YAO Gong-min²

(1. Key Laboratory of Special Display Technology of Ministry of Education, Academy of Opto Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The characteristics of Nd:YAG solid laser with corner cube are analyzed. According to simulation results we conclude that the cavity with corner cube is little sensitive to displacement maladjustment of corner cube and is not sensitive to the angle maladjustment of output mirror. By Fresnel-Kirchhoff equation, we simulate the near field facula of the cavity with corner cube, which is composed of six petals and the results correspond with experiment. According to Stokes parameter, the polarization state of output light changes with the rotation of corner cube, and the ellipticity and azimuth angle are varied with the rotation angle.

Key words: corner cube; adjust-free; Mode distribution; polarization

1 引言

长期以来,改善和提高激光器的机械稳定性、热稳定性和光束质量,一直是激光器研究与发展过程中重要的课题之一。传统激光器的谐振腔,通常由两块平行放置的腔镜构成,要形成激光振荡,这两块腔镜平行度必须控制在秒级精度,无论是在生产装配还是在使用中,调试都非常困难。免调试激光器是指在遇有振动、冲击、温度突变等情况下,具有装

配后不经调试就能稳定输出高质量光束的一种激光装置^[1-3]。

武汉军械士官学校光电技术研究所于1998年研制出了免调试固体激光器,采用角锥棱镜作为谐振腔的一种特殊全反射镜,具有极其优良的抗失

作者简介:高伟清(1979-),男,博士,助理研究员,主要从事激光器和光电显示方面的研究工作。E-mail:weikin@mail.ustc.edu.cn
收稿日期:2008-07-15

调性能,且改善光束质量^[4]。本文对角锥棱镜腔 Nd:YAG固体激光器的抗失调特性、模场特性和偏振特性进行理论分析,为实验工作提供理论依据。

2 抗失调特性

角锥棱镜谐振腔失调导致激光输出能量下降的根本原因是模体积的减小。设增益介质为圆柱形,根据角锥棱镜的光学特性,得到无失调情况下的最大输出能量 E_0 为:

$$E_0 = \frac{1}{8} \pi D^2 L t E_s \left(\frac{2G}{\alpha + t} - \frac{1}{L} \right) \quad (1)$$

式中, E_s 为饱和参量; G 为增益系数; t 为输出镜透过率; α 为腔内损耗率; L 为工作物质的长度; D 为工作物质横截面直径。当角锥棱镜角顶沿垂直工作物质的方向偏离腔轴距离 Δ 时,可推导出模体积 V 与平移失调量的关系为:

$$V = \frac{LD^2}{2} \left[\arccos\left(\frac{|\Delta|}{D}\right) - \frac{|\Delta|}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{|\Delta|}{D}\right)^2} \right] \quad (2)$$

由式(1)和式(2),得到输出能量与平移失调量的关系为:

$$E_{\Delta} = \frac{2}{\pi} E_0 \left[\arccos\left(\frac{|\Delta|}{D}\right) - \frac{|\Delta|}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{|\Delta|}{D}\right)^2} \right] \quad (3)$$

根据式(3)对角锥棱镜平移失调量与输出能量的关系做数值模拟,如图1所示。激光输出能量下降10%时,角锥棱镜允许平移失调量为 $0.08D$ 。在固体激光器中,激光棒直径一般为 $4 \sim 8\text{mm}$,若允许激光输出能量下降10%,则允许角锥棱镜平移失调量为 $0.3 \sim 0.6\text{mm}$ 。这一结果说明,角锥棱镜谐振腔对角锥棱镜的平移失调有一定的敏感性。

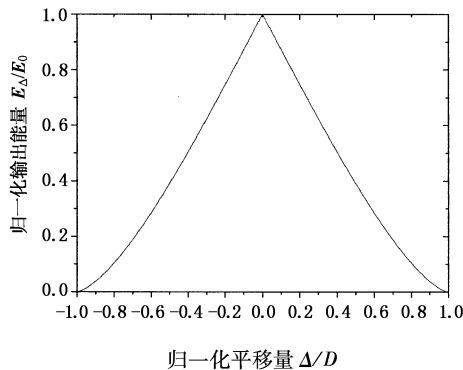


图1 角锥棱镜平移失调量与输出能量的关系曲线

在角锥棱镜谐振腔中,输出镜失调 α 角度,振荡光轴也随之倾斜 α 角度,输出镜失调角 α 与输出能量 E_{α} 的关系为:

$$E_{\alpha} = \frac{2}{\pi} E_0 \left[\arccos\left(\frac{2(L+d)\tan|\alpha|}{D}\right) - \frac{2(L+d)\tan|\alpha|}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{2(L+d)\tan|\alpha|}{D}\right)^2} \right] \quad (4)$$

式中, d 为角锥棱镜角顶与增益介质端面之间的距离。

根据式(4)对输出镜失调量与输出能量的关系做数值模拟,如图2所示,其中 $L = 80\text{mm}$, $d = 200\text{mm}$, $D = 8\text{mm}$ 。激光输出能量下降10%时,输出镜允许失调量为 $\pm 234''$ 。因此,角锥棱镜谐振腔对输出镜的倾斜是不敏感的。

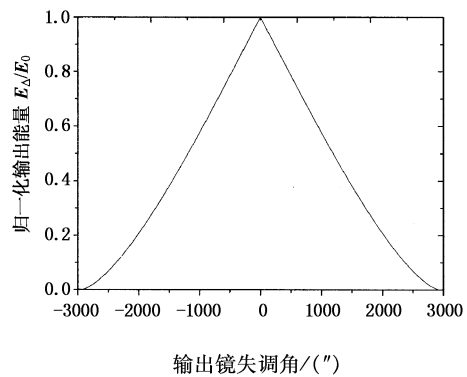


图2 输出镜失调角与输出能量的关系曲线

3 模场特性

根据菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程和福克斯-厉迭代方法,对角锥棱镜谐振腔基本结构的近场和远场模式进行数值模拟^[5-6]。角锥棱镜腔的简化模型如图3所示, z 轴为激光器的光轴,取坐标系原点在光轴上,平面镜和角锥棱镜分别在 x_1y_1 平面和 x_2y_2 平面上。初始光场 $E_1(x_1, y_1)$ 从平面镜出发,向右传播到角锥棱镜后形成光场 $E_2(x_2, y_2)$,被角锥棱镜反射后向左传输至平面镜,再次被平面镜反射后完成一个往返过程,经过多次循环后形成稳定场分布。根据菲涅耳-基尔霍夫积分方程,这一过程表示如下:

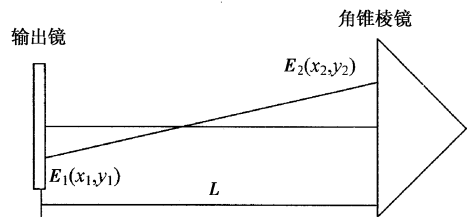


图3 角锥棱镜腔的简化模型

$$E_2(x_2, y_2) = \frac{i}{2\lambda} \iint E_1(x_1, y_1) \frac{e^{-ik\rho}(1 + \cos\theta)}{\rho} ds_1 \quad (5)$$

$$E_{q+1}(x_2, y_2) = \frac{i}{2\lambda} \iint E_q(x_1, y_1) \frac{e^{-ik\rho}(1 + \cos\theta)}{\rho} ds_1$$

$$(q \text{ 为正整数}) \quad (6)$$

其中, ρ 为 E_1 和 E_2 之间的距离。因光学谐振腔的长度远大于反射镜的线度, 可将被积函数中的因子 $\frac{1 + \cos\theta}{\rho}$ 用 $2/L$ 代替, 但是因为反射镜的线度远大于波长, 所以指数因子中的 ρ 不能用 L 代替, 于是式(6)改写为:

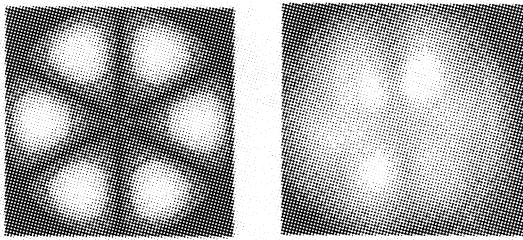
$$E_{q+1}(x_2, y_2) = \frac{i}{\lambda L} \iint E_q(x_1, y_1) e^{ik\rho} ds_1 \quad (7)$$

当光波在腔内往返传播次数足够大时, 除了一个表示振幅衰减和相位移的复常数因子 γ 外, 两腔镜上的光场在往返一周后能够自再现, 即:

$$E_{1,q+2} = \gamma E_{1,q} \quad (8)$$

$$E_{2,q+3} = \gamma E_{2,q+1} \quad (9)$$

从平面镜输出端得到模场的近场分布, 经透镜聚焦后, 在后焦面上得到模场的远场分布。根据式(5)~式(9)数值模拟的近场模式分布如图4(a)所示, 由于角锥棱镜三个棱边的衍射, 最终得到的近场模式由六个瓣状结构组成。图4(b)所示为由武汉军械士官学校光电技术研究所提供的实验测得模场, 模拟结果与实验结果相符合。



(a) 数值模拟近场模式 (b) 实验测得近场光斑

图4 数值模拟和实验的近场模式比较

4 偏振特性

角锥棱镜是一种退偏元件, 作为腔镜, 其偏振特性会影响到谐振腔的输出特性。如果入射的是线偏振光, 则反射回来变成椭圆偏振光; 如果入射为椭圆偏振光, 则反射回来仍为椭圆偏振光, 但其椭圆度和方位角都发生改变^[7-8]。假设入射光为一线偏光, 则出射光为:

$$\vec{E}_i = \begin{bmatrix} E'_p \\ E'_s \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于光在角锥棱镜三个面上有六种反射次序, 因此从角锥出射的光有六种:

$$\vec{E}_{01} = \begin{bmatrix} E_{p1} \\ E_{s1} \end{bmatrix} = J_{123} E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_{02} = \begin{bmatrix} E_{p2} \\ E_{s2} \end{bmatrix} = J_{321} E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_{03} = \begin{bmatrix} E_{p3} \\ E_{s3} \end{bmatrix} = J_{231} E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_{04} = \begin{bmatrix} E_{p4} \\ E_{s4} \end{bmatrix} = J_{132} E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_{05} = \begin{bmatrix} E_{p5} \\ E_{s5} \end{bmatrix} = J_{312} E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_{06} = \begin{bmatrix} E_{p6} \\ E_{s6} \end{bmatrix} = J_{213} E_0 \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

$J_{123} \sim J_{213}$ 为与六种反射次序对应的 Jones 矩阵, 由 J. Liu 和 R. M. A. Azzam 分析得到^[9]。定义偏振光的斯托克斯参量为:

$$S_0 = |E_s|^2 + |E_p|^2$$

$$S_1 = |E_s|^2 - |E_p|^2$$

$$S_2 = 2|E_p| \cdot |E_s| \cos\delta$$

$$S_3 = 2|E_p| \cdot |E_s| \sin\delta \quad (12)$$

其中, δ 为 p 和 s 偏振光的相位差。因此可用一个四维矢量来表示一个偏振光, 称为斯托克斯矢量, 即 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 。定义 β 和 θ 分别为椭圆偏振光的椭圆率和长轴方位角。根据推导, 有以下关系:

$$S_1 = S_0 \cos 2\beta \cos 2\theta$$

$$S_2 = S_0 \cos 2\beta \sin 2\theta$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\beta \quad (13)$$

假设入射光为式(10)所示的线偏光, 只考虑一种角锥棱镜的反射次序 123, 则根据式(11)可得出 E_p 和 E_s 。由于角锥棱镜的旋转导致 α 变化时, E_p 和 E_s 也发生改变, 由式(12)得到斯托克斯参量 S_1 , S_2 和 S_3 随 α 的变化, 如图5所示。根据式(13)得到椭圆偏振光的椭圆率 β 和方位角 θ 随 α 的变化, 如图6所示。

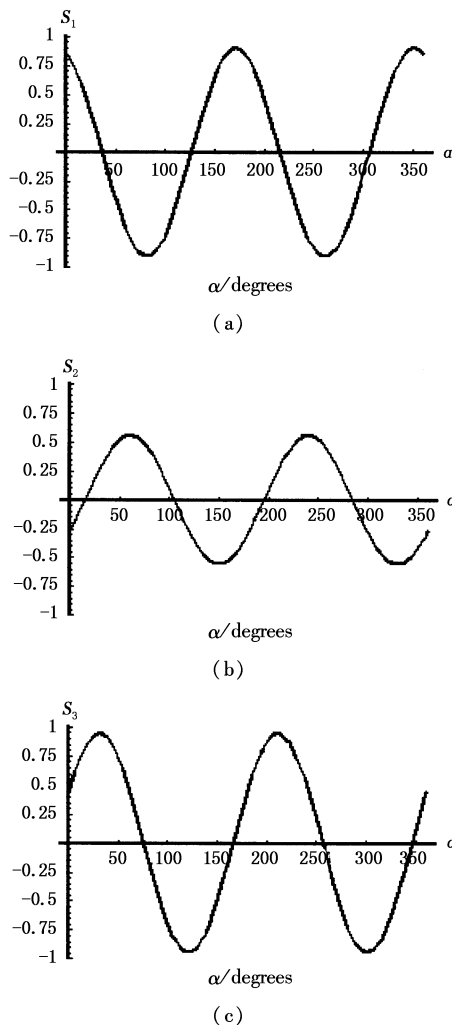


图5 斯托克斯参量随角锥棱镜转动的变化

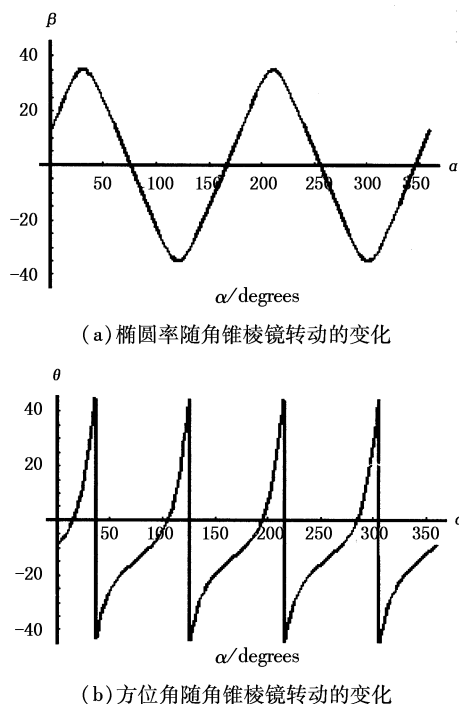


图6 椭圆偏振光的椭圆率和方位角随角锥棱镜转动的变化

由图5和图6可知,当角锥棱镜转动时,斯托克斯参量发生改变,表明从角锥棱镜出射光的偏振态发生改变,由入射的线偏振光变为出射的椭圆偏振光,并且随着角锥棱镜的转动角度不同,出射的椭圆偏振光的椭圆率和方位角也发生改变。

5 结论

分析了角锥棱镜腔 Nd:YAG 固体激光器的抗失调特性,结果表明角锥棱镜腔 Nd:YAG 固体激光器对角锥棱镜的平移失调有一定的敏感性,对输出镜的倾斜不敏感。根据菲涅尔-基尔霍夫衍射积分方程和福克斯-厉迭代方法,对角锥棱镜谐振腔的近场模式进行数值模拟,该模式由六个瓣状结构组成,与实验结果相一致。最后利用斯托克斯参量分析角锥棱镜腔的偏振特性,出射的椭圆偏振光的椭圆率和方位角随角锥棱镜发生改变。本文的分析结果将为角锥棱镜腔固体激光器的实验工作提供理论依据。

参考文献:

- [1] 刘旭,卢常勇,王小兵,等.角锥棱镜腔 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 内腔式光参量振荡器[J].中国激光,2007,34(4):485-490.
- [2] 程勇.免调试固体激光器研究与进展[J].红外与激光工程,2006,35(3):297-301.
- [3] W Q Gao, G M Yao, L X Xu, et al. Passively Q -switched $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ laser with corner cube[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(6): 332-335.
- [4] 程勇,毛少卿,王志怀,等.免调试固体激光器的研究[J].激光技术,1999,23(2):68-70.
- [5] 吕百达.强激光的传输与控制[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [6] G S Zhou, A J Alfrey, L W Casperson. Modes of a laser resonator with a retroreflecting corner cube mirror[J]. Appl. Opt., 1982, 21(9): 1670-1674.
- [7] S E Segre, V Zanza. Mueller calculus of polarization change in the cube-corner retroreflector[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2003, 20(9): 1804-1811.
- [8] M A Player. Polarization properties of a cube-corner reflector[J]. J. Mod. Opt., 1988, 35(11): 1813-1820.
- [9] Jian Liu, R M A Azzam. Polarization properties of corner-cube retroreflectors: theory and experiment[J]. Appl. Opt., 1997, 36(7): 1553-1559.