

板条固体激光器用新型棱镜腔的偏振特性*

吕百达 冯国英 蔡邦维 张 彬

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

摘 要 从对正三棱锥和其它偏振元件的分析出发, 对板条固体激光器用两类新型棱镜腔, 即共轴复式全内反射棱镜-半反/全反阴阳镜腔和复式全内反射棱镜-正三棱锥-阴阳镜折迭腔的偏振特性作了详细的理论和实验研究.

关键词 偏振特性, 新型棱镜腔, 正三棱锥, 复式全内反射棱镜.

1 引 言

近年来, 为改善板条固体激光器的输出特性和提高光腔的能量提取效率, 发展了多种棱镜腔. 例如, 柏林固体激光所提出的共轴直角棱镜——阴阳镜腔和折迭离轴棱镜腔^[1,2], 使板条激光器宽度方向上的光束质量得以显著改善而保持激光器效率几乎不变. 作者使用了非稳共焦型交叉球面棱镜腔来改善板条激光器的光束质量和失调特性^[3], 用改进的折迭棱镜腔来压缩宽度方向上光束参数乘积, 取得了明显效果^[4]. 由于布儒斯特角端面的板条介质和各类棱镜都是典型的偏振元件, 棱镜腔的使用, 可能引起板条激光器输出光束偏振特性的变化. 实验亦表明, 高功率板条固体激光器的退偏损耗, 是引起输出功率降低的主要原因之一, 应予深入研究^[5]. 本文在实验中使用的两类新型棱镜腔, 即共轴复式全内反射棱镜——阴阳镜腔和复式全内反射棱镜——正三棱锥——阴阳镜折迭腔为典型例, 用琼斯矩阵法首次对这类腔的偏振特性作了系统的分析, 并与实验结果比较. 在此基础上, 还提出了进行偏振匹配的方法.

2 复式棱镜、正三棱锥和板条介质的琼斯矩阵

2.1 复式棱镜

文献[6]对复式全内反射棱镜的特性作了详细分析和实验研究. 它共有四个平表面, 其中三个面相互成 90° , 第四个面与其它三个面所成的屋脊之一成 45° , 先由A面入射, 经四次全内反射后出射, 如图1所示. 分析表明^[6], 从偏振观点来看, 复式棱镜对入射光的作用与 $\lambda/2$ 波片相同, 当 $\lambda/2$ 波片快轴平行于 x 轴时, 其琼斯矩阵为

* 国家教委博士点基金资助项目.

收稿日期: 1993年10月9日; 收到修改稿日期: 1994年1月4日

$$M_P = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.2 正三棱锥

在实验中，正三棱锥是用以折迭光路的，如图 2 所示。

光由底面正入射，依次在三个斜面上经全反射(入射角分别为 φ_1 、 φ_2 、 φ_3)后，平行于入射光方向反向出射，其琼斯矩阵为图 2(a)。

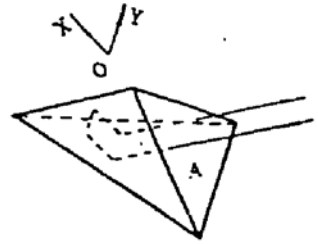


Fig. 1 A compound TIR prism

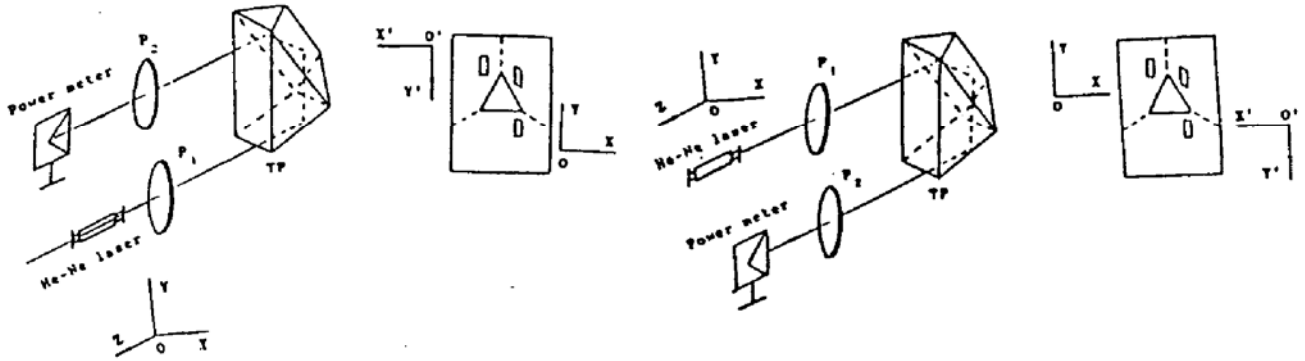


Fig. 2 (a), (b) Experimental setup for studying the polarization properties of a normal triple prism, P_1 , P_2 - polarizers

$$M_{TP} = M(\varphi_3) M_{\delta_3} M(-\varphi_3) M(\varphi_2) M_{\delta_2} M(-\varphi_2) M(\varphi_1) M_{\delta_1} M(-\varphi_1) \quad (2)$$

$$M_{\delta_j} = \begin{bmatrix} \exp(i\delta_j/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta_j/2) \end{bmatrix}, \quad (j = 1, 2, 3)$$

$$M(\pm \varphi_j) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_j & \mp \sin \varphi_j \\ \pm \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\delta_j = \pi + 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{[\sin^2 \varphi_j - (1/n^2)]^{1/2}}{\sin^2 \varphi_j} \cos \varphi_j, \quad (j = 1, 2, 3)$$

式中 φ_j 分别为三个全反射面上的起偏方向相对于固定坐标系 x 轴夹角， δ_j 为第 j 次全反射的位相推迟角， n 为介质折射率，对 K_9 玻璃 $n = 1.51$ 。对反向行进光线(图 2(b))，

$$M'_{TP} = M(\varphi_1) M_{\delta_1} M(-\varphi_1) M(\varphi_2) M_{\delta_2} M(-\varphi_2) M(\varphi_3) M_{\delta_3} M(-\varphi_3) \quad (4)$$

值得注意的是，因矩阵乘法有不可易性，故一般情况下 $M_{TP} \neq M'_{TP}$ ，这意味着，正三棱锥对正向和反向行进光线偏振特性变换有不可逆性质。实验所用正三棱锥，每条棱线与底面夹角均为 35.26° ，正入射时，由光线追迹计算程序得出 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 54.7^\circ$ ， $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 224.94^\circ$ ， $\varphi'_1 = 0^\circ$ ， $\varphi'_2 = 60^\circ$ ， $\varphi'_3 = 120^\circ$ ，代入(2)、(4)式，得

$$M_{TP} = \begin{pmatrix} -0.5454 + 0.3945i & -0.2826 - 0.6834i \\ 0.2826 - 0.6834i & -0.5454 - 0.3945i \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M'_{TP} = \begin{pmatrix} -0.5454 + 0.3945i & -0.2826 - 0.6834i \\ -0.2826 - 0.6834i & -0.5454 - 0.3945i \end{pmatrix} \quad (6)$$

为证实其特性，作了图 2 所示实验。He-Ne 激光沿 Z 方向垂直入射于正三棱锥 TP 底面， P_1 、 P_2 分别为起偏和检偏器，设其偏振方向与 x 轴交角为 θ_1 、 θ_2 。起偏方向为 θ_1 的线偏振光经正三棱锥反射后，一般变为椭圆偏振光，转动 P_2 ，则(激光功率计上接收到的)功率随 θ_2 变化，所得

实验结果如图 3(a) 所示, 图中还给出了利用(5) 和琼斯矩阵标准算法^[7]得到的理论曲线, 对应于图 3(a) 作出从正三棱锥出射的偏振光的矢量终端轨迹示于图 4(a). 类似地, 按图 2(b) 所作反向入射光偏振特性实验和理论计算结果如图 3(b), 图 4(b) 所示. 由图可见: (1) 理论与实验结果一致, 证实了正三棱锥对正向和反向入射光有不同的偏振变换特性; (2) 在一般情况下, 入射于正三棱锥的线偏振光将被变换为椭圆偏振光. 但当 θ_1 等于某些特殊值时(例如, 对应于图 2(a) 实验, $\theta_1 = 16^\circ, -74^\circ$), 图 3(a), 图 4(a) 说明正三棱锥仍有保持线偏振特性, 但偏振方向要旋转一个角度($\theta_2 = 44^\circ, -16^\circ$).

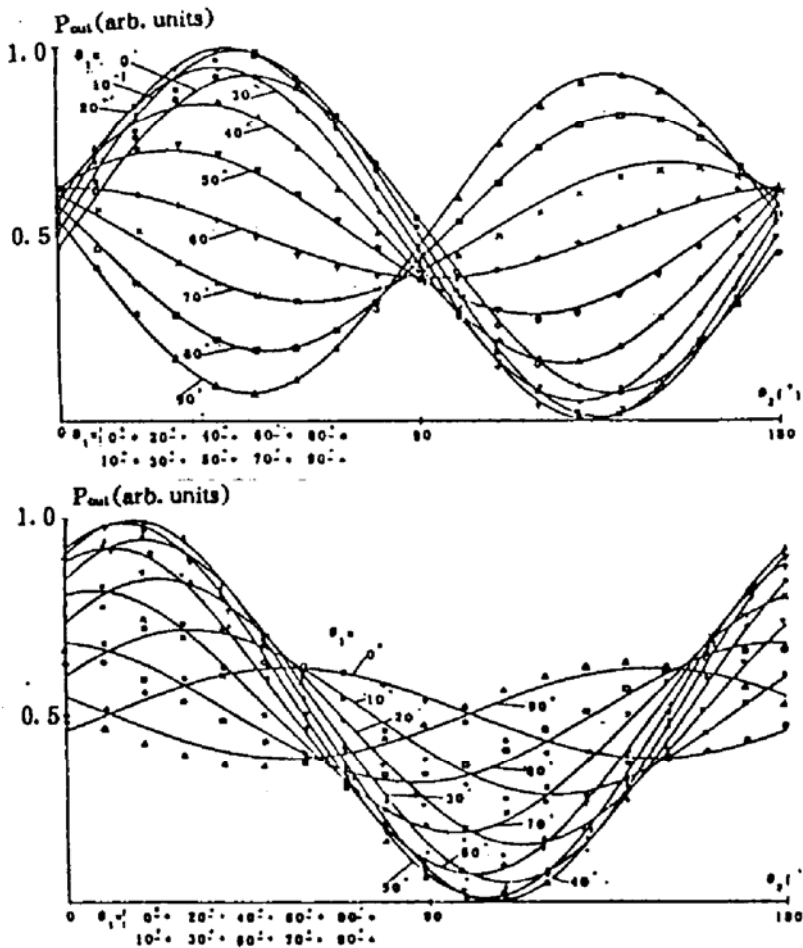


Fig. 3 (a), (b) Normalized laser output power P_{out} vs. angle θ_2 , Parameter is the angle θ_1 , “—” Theory “○, ▼, ▲, +, □, ●, ·, ▽, ×, △” — Experiment

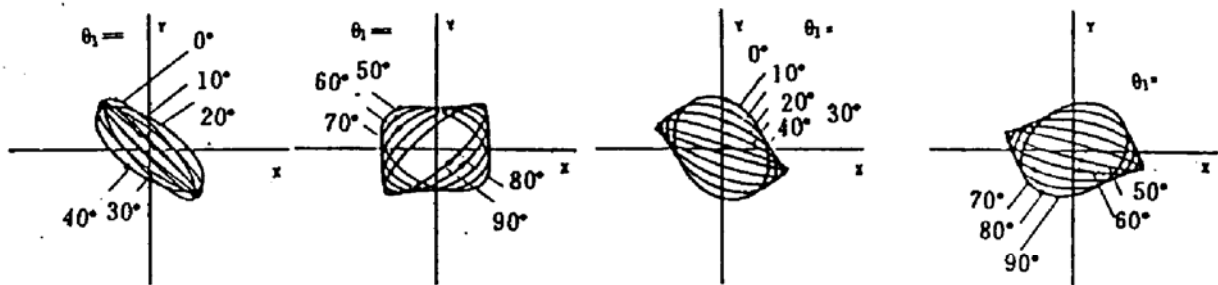


Fig. 4 (a), (b) Endpoint loci of the polarization light vector emerging from the triple prism

2.3 板条激光介质

对布儒斯特角端面的板条激光介质, 若设计使全内反射点为偶数, 琼斯矩阵为^[7]

$$M_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \left(\frac{2n}{n^2 + 1}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 n 为板条介质折射率, 对(Nd, Ce):YAG, $n = 1.82$.

3 两类新型棱镜腔的偏振特性

3.1 共轴复式棱镜——阴阳镜腔

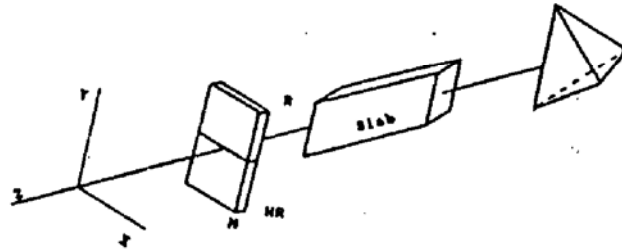


Fig. 5 A co-axis resonator with a compound TIR prism P and a R/HR mirror M

图 5 所示的板条固体激光腔由复式全内反射棱镜 P 和一半全反射、一半部分反射的阴阳镜 M 组成, 衍射积分的理论计算和实验研究都表明, 这类光腔比之于平面镜——阴阳镜或小孔限模的显著优点是可在几乎不降低效率情况下, 主要通过压缩宽度方向上的光斑尺寸来提高光束质量. 并且, 由于复式棱镜的使用, 还具有损耗小, 对失调不灵敏和便于电光调 Q 等优点^[6]. 以阴阳镜 M 为参考, 腔内往返一周琼斯矩阵为

$$M = M_s M_P M_s = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \left(\frac{2n}{n^2 + 1}\right)^4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由(8)式知, 当不计板条介质的退偏效应时, 输出为 p 方向(x 轴方向)的线偏振光, 这亦为实验所证实.

3.2 复式棱镜——正三棱锥——阴阳镜折迭腔

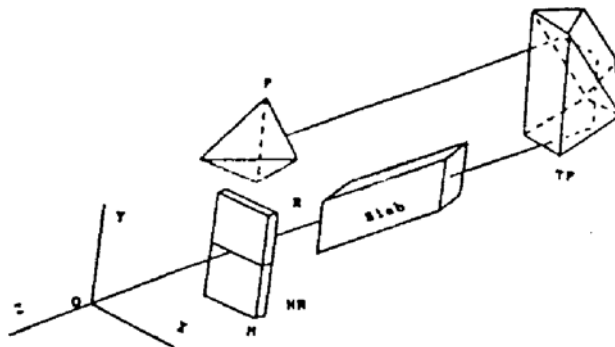


Fig. 6 A folded resonator with a compound TIR prism P, a triple prism TP and a R/HR mirror M

光腔结构如图 6 所示, 比之于图 5, 这类光腔还通过增加腔长来压缩光束参数乘积, 并且腔内有较大空间可插入其它光学元件. 以阴阳镜 M 为参考, 腔内往返一周琼斯矩阵

$$M = M_s M_{TP} M_P M_{TP} M_s = \begin{bmatrix} 0.044 + 0.5289i & 0.6038i \\ 0.6038i & 0.022 - 0.2685i \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可求出偏振态本征值 $\gamma = -0.039 - 0.8537i$ 和本征偏振矢 $\begin{bmatrix} 0.8805 - 0.0132i \\ 0.4738 \end{bmatrix}$ 对应的偏振损耗 $V = 1 - |\gamma|^2 = 26.95\%$ 。

因此，偏振失配将引起较大损耗。改进的办法之一是绕 Z 轴旋转正三棱锥，使实现偏振匹配，设转角为 α ，光腔往返一周琼斯矩阵变为

$$M = M_s M(\alpha) M_{TP} M(-\alpha) M_p M(\alpha) M_{TP} M(-\alpha) M_s \quad (10)$$

$$M(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

理论与实验结果见图 7。当 $\alpha = 22.5^\circ, 52.5^\circ$ 时，偏振损耗为零，输出最大。实验中还用了分别在腔内板条介质和正三棱锥间插入 $\lambda/4$ 或 $\lambda/2$ 波片方法来实现偏振匹配，所得结果如图 8(a)，图 8(b) 所示。图中 α 为波片快轴与 x 轴夹角。由图可知，使用 $\lambda/4$ 波片时，当 $\alpha = 28.8^\circ$ ， E_{out} (归一化值) = 0.92，输出最大，使用 $\lambda/2$ 波片时，当 $\alpha = 22.5^\circ, 52.5^\circ$ 时， $E_{out} = 1$ ，实现了偏振匹配，理论计算与实验结果一致。

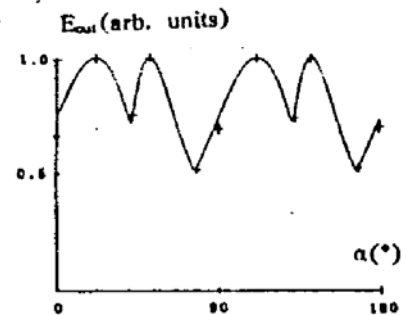


Fig. 7 Normalized output energy E_{out} as a function of angle α “—” Theory, “+” — Experiment

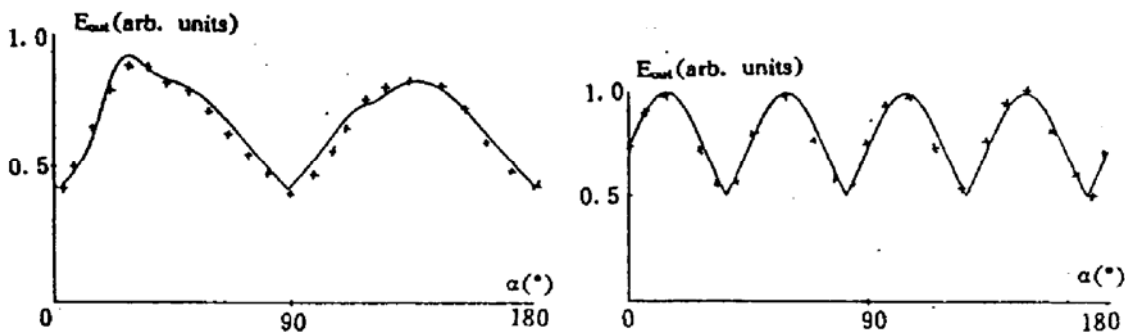


Fig. 8 Normalized output energy E_{out} as a function of angle α , (a) when a $\lambda/4$ plate is inserted; (b) when a $\lambda/2$ plate is inserted, “—” Theory, “+” — Experiment

小结 本文的工作表明，对布儒斯特角端面的板条固体激光器，光束偏振特性对输出的影响是重要的。各类偏光元件的使用有可能引起偏振失配，应考虑补偿。对高功率板条固体激光器有关热效应问题国内外已进行广泛研究^[5,8]，其中退偏效应是一个值得注意的问题。各类棱镜腔的一个优点是可在不明显降低效率前提下，提高光束质量^[1~4]。本文的理论分析和原理性实验则进一步说明新型棱镜腔可改善板条激光器的偏振特性，其模式结构可用衍射积分方程数值计算来说明^[9]。最后，应当指出，合理设计的棱镜腔还有多次折迭光路，并在一个结构紧凑的器件中，形成振荡——多程放大系统的优点。最近，已在 500 W Nd:YAG 板条激光器实验中得以证实^[10]。

本文作者之一(吕百达)感谢与 H. Weber 教授、董沙雷先生、吕启涛博士、张世文教授对各类棱镜腔在板条激光器中的应用所作的十分有益讨论。实验中所用棱镜由范琦康教授、陆祖康教授和孙年春工程师提供,特此致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Q. Lü, J. Eicher, Off-axis prism resonator for improved beam quality of slab lasers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23): 1357~1359
- [2] S. Dong, Q. Lü *et al.*, Folded prism resonators for slab lasers with high beam quality. *Opt. Commun.*, 1991, **82**(5/6): 514~516
- [3] B. Lü, B. Cai *et al.*, Slab Nd:YAG lasers with crossed-prism resonators. *Chin. Phys.*, 1991, **11**(3): 651~658
- [4] B. Lü, G. Feng *et al.*, Beam quality improvement of slab lasers. *Proc. SPIE.*, OCCC' 92, 1992
- [5] B. Lü, S. Dong, Thermal effects of a 600 W Nd:YAG slab lasers. 柏林固体激光所研究报告, 1993, (8):
- [6] J. Richards, An improved prism for use in laser resonators. *AD-A 112178*, 1981
- [7] 吕百达, 激光光学, 四川大学出版社, 第二版, 1992, 301~306
- [8] 廖 严, Nd:YAG 板条激光器的热稳定性和多板串接的研究. 中科院上光所博士论文, 1992, 23~74
- [9] 吕百达, 冯国英, 蔡邦维, 板条激光器用光腔的模式计算: 快速傅里叶变换法. *激光技术*, 1993, **17**(6): 335~339
- [10] Q. Lü, S. Dong, H. Weber, A compact resonator design for high power slab lasers. *Opt. Commun.*, 1993, **99**(3/4): 201~206

Polarization Properties of Novel Prism Resonators for Use in Slab Lasers

Lü Baida Feng Guoying Cai Bangwei Zhang Bin

(Department of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 9 October 1993; revised 4 January 1994)

Abstract In this paper, starting from analyzing the normal triple prism and other polarizing elements, we have studied both theoretically and experimentally the polarization properties of two novel prism resonators used for slab lasers, i. e., the co-axis resonator with a compound total internal reflection (TIR) prism and a mirror, half of which has reflectivity R and the other half has a high-reflection coating (R/HR mirror), and the folded resonator with a compound TIR prism, a normal triple prism and a R/HR mirror.

Key words polarization property, novel prism resonator, normal triple prism, compound total internal reflection (TIR) prism.