

# 角状螺旋固体激光器热畸变自补偿特性分析\*

茹国云 陆璇辉 林强 王绍民

(杭州大学物理系, 杭州 310028)

**提要** 利用张量方法对角状螺旋光路固体激光器作了分析, 证实其在  $x, y$  两方向对激光介质的热畸变有自补偿作用, 且  $x, y$  两方向呈对称性。

**关键词** 角状螺旋激光器, 张量光学

## 1 引言

棒状固体激光器结构及输出光束具有轴对称性, 但介质棒的热畸变大大地限制了其输出功率和光束质量。片状固体激光器光束在介质内沿之字形光路传输, 在  $y$  方向上下两表面产生全内反射, 在  $y$  方向具有热畸变自补偿特性<sup>[1,2]</sup>, 但由于  $x$  方向不存在全内反射, 热畸变依然影响光束的传播, 且  $x, y$  两方向不对称性又限制了光束质量的进一步提高。为了综合上述两类激光器的优点, 同时克服各自缺点, 提出了新方案: 角状螺旋激光器 (Eckige-Schraube-Laser, 简称 ES-L)。光束在介质内沿立体三角形前进,  $x, y$  两方向都经历全内反射, 在实验上已得到了较棒状、片状固体激光器更优的激光束<sup>[3]</sup>, 并且提高了输出功率。但对其热畸变自补偿特性的理论分析还未见报道, 本文用张量光学方法, 对新型固体激光器进行光路分析, 从理论上得出其具有热畸变自补偿特性, 且  $x, y$  两方向具有对称性。

## 2 ES-L 的热畸变自补偿特性分析

激光器采用正方形截面晶体棒, 棒四侧面抛光, 端面往往做成倾斜, 呈棱形。光束从  $P_1$  入射经端面折射后, 依次经四侧面全内反射, 反射点分别为  $P_2, P_4, P_6, P_8$ , 以角状螺旋线通过该棒, 最后经另一端面在  $P_9$  处折射出介质棒,  $P_3, P_5, P_7$  分别是  $P_2P_4, P_4P_6, P_6P_8$  的中点, 如图 1(a) 所示。在横向看到光路的投影呈正方形,  $P_1, P_2, P_3$  分别是  $P_1, P_2, P_3$  的投影, 如图 1(b) 所示, 棒的尺寸选择使光束在四侧面反射次数相等。

根据介质的对称性和泵浦条件分别关于  $x, y$  方向的对称性, 光线在介质内完成  $P_1$  到  $P_9$  的整个周期, 实际是由具有相似性质的  $P_1$  到  $P_3$  的四个过程所组成, 所以下面具体分析  $P_1$  到  $P_3$  的传输矩阵。

如图 2 建立  $xyz$  直角坐标系,  $z$  轴与棒的棱平行, 坐标原点选在介质中心,  $x, y$  轴分别与介质侧面垂直。光线由  $P_1$  到  $P_3$  被平行于  $xoz$  坐标面的介质表面全内反射, 可用  $4 \times 4$  阶光线变换矩

\* 国家自然科学基金资助项目。

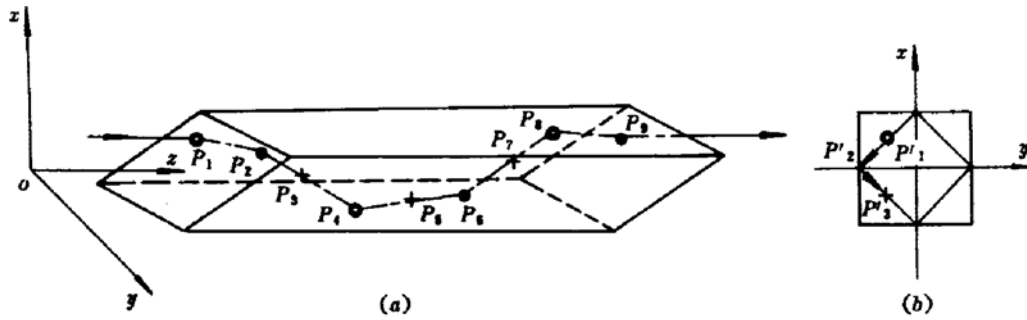


Fig. 1

(a) The spatial ray path in the laser medium.  $P_1, P_2, P_4, P_6, P_8$  and  $P_9$ , denoted by  $\circ, \bullet$  alternately are input and output points on the end slope and reflection points on four lateral surfaces respectively,  $P_3, P_5$  and  $P_7$  denoted by  $+$  are mid-points of  $P_2P_4, P_4P_6$  and  $P_6P_8$  respectively; (b) The profile of the ray path from the end.  $P'_1, P'_2$  and  $P'_3$  are corresponding points in transverse view of spatial points of  $P_1, P_2$  and  $P_3$

阵表示如下:

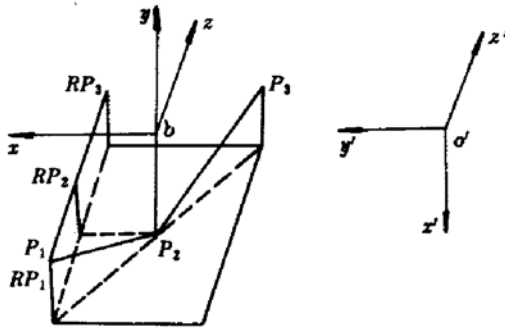


Fig. 2 The typical ray path in  $xyz$  cartesian coordinate.

$RP_1, RP_2$  and  $RP_3$  denote reference planes

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

选取  $P_1, P_2, P_3$  所在并与  $xoy$  坐标面平行平面作参考面  $RP_1, RP_2, RP_3$ , 根据对称性, 光线由  $RP_1$  沿到  $RP_2$  的变换矩阵可设为:

$$\begin{pmatrix} a_x & 0 & b_x & 0 \\ 0 & a_y & 0 & b_y \\ c_x & 0 & d_x & 0 \\ 0 & c_y & 0 & d_y \end{pmatrix}$$

根据反射对称性和介质对称性, 光线由  $RP_2$  到  $RP_3$  的传输矩阵可写为:

$$\begin{pmatrix} d_x & 0 & b_x & 0 \\ 0 & d_y & 0 & b_y \\ c_x & 0 & a_x & 0 \\ 0 & c_y & 0 & a_y \end{pmatrix}$$

所以光线从  $RP_1$  到  $RP_3$  的变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} d_x & 0 & b_x & 0 \\ 0 & d_y & 0 & b_y \\ c_x & 0 & a_x & 0 \\ 0 & c_y & 0 & a_y \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_x & 0 & b_x & 0 \\ 0 & a_y & 0 & b_y \\ c_x & 0 & d_x & 0 \\ 0 & c_y & 0 & d_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x d_x + b_x c_x & 0 & 2b_x d_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2a_x c_x & 0 & b_x c_x + a_x d_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

记为

$$\begin{pmatrix} ad + bc & 0 & 2bd & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2ac & 0 & ad + bc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

从矩阵元看, 光线由  $RP_1$  到  $RP_3$ , 在  $y$  方向发生了全内反射, 所以  $y$  方向有准相位共轭性质<sup>[4]</sup>, 补

偿了  $y$  方向的热效应, 而  $x$  方向仍存在热效应。

用同样方法, 建立相应的坐标系  $x'y'z'$ , 即将  $xyz$  坐标系绕  $z$  轴旋转  $90^\circ$ , 可分析得到  $P_3$  到  $P_5$  的传输矩阵, 且结果与(1)相同, 若在统一的  $xyz$  坐标系中分析, 则相当于把  $x'y'z'$  上表示的矩阵作旋转变换, 根据旋转变换矩阵<sup>[5]</sup>:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a'_x & 0 & b'_x & 0 \\ 0 & a'_y & 0 & b'_y \\ c'_x & 0 & d'_x & 0 \\ 0 & c'_y & 0 & d'_y \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}$$

其中  $\varphi$  是旋转角。通过  $90^\circ$  旋转后, 在  $xyz$  坐标系中得到  $P_3$  到  $P_5$  的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ad + bc & 0 & 2bd \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2ac & 0 & ad + bc \end{pmatrix} \quad (2)$$

从矩阵元看, 光线由  $P_3$  到  $P_5$ , 在  $x$  方向发生了全内反射, 所以在  $x$  方向有准相位共轭性质, 补偿了  $x$  方向的热畸变。同时矩阵(2)还可从矩阵(1)将表示  $x, y$  两方向各元素对应交换得到, 这也是对称性的结果。

同理可得  $P_5$  到  $P_7, P_7$  到  $P_9$  的变换矩阵, 故光线由  $P_1$  经过一个周期到  $P_9$  的总变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ad + bc & 0 & 2bd \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2ac & 0 & ad + bc \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} ad + bc & 0 & 2bd & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2ac & 0 & ad + bc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ad + bc & 0 & 2bd \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2ac & 0 & ad + bc \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} ad + bc & 0 & 2bd & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2ac & 0 & ad + bc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I$$

有时光线在介质内经过几个周期的传输, 则经过  $N$  个周期的传输矩阵为

$$I^N = I$$

实际中, 介质端面往往做成倾斜(如布儒斯特角), 且光线与端面在  $x, y$  两方向的入射角相等, 设为  $\theta_1$ , 折射角均为  $\theta_2$ , 用  $n_1$  表示外界折射率,  $n_2$  表示介质折射率, 利用倾斜面变换矩阵<sup>[6]</sup>, 光线由介质一端入射到另一端出射的总变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_2\cos\theta_2}{n_1\cos\theta_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{n_2\cos\theta_2}{n_1\cos\theta_1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_1\cos\theta_1}{n_2\cos\theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{n_1\cos\theta_1}{n_2\cos\theta_2} \end{pmatrix} = I$$

由此可见, 光线从介质一端入射到另一端出射, 其传输可用一单位矩阵描述, 与介质的热畸变

无关,有效地补偿了两方向的热效应。同时光线在介质外始终具有  $x$ 、 $y$  两方向的对称性,这均优于棒状、片状固体激光器。

### 3 讨 论

固体激光器的发展由棒状、到片状、到多角螺旋状,对热畸变补偿作用由无、到一维、二维,在此过程中充分利用了全内反射的准相位共轭性质。实验表明<sup>[3]</sup>,不论是连续式还是脉冲式激光器,两方向热透镜效应都减小到约棒状激光器的 1/10,或相当于片状激光器  $y$  轴上的值。由于 ES 激光器还解决了片状激光器的不对称性,使泵浦条件有所放宽,可用普通棒状激光器所用泵浦布局,而光束质量却得到有效改善,简化了 ES 激光器的实用化。同时光线在介质内曲折前进,实际穿过介质的长度都大于片状或棒状激光器,增加了介质的有效长度,提高了输出功率,如脉冲式运转时,输出脉冲能量提高到同类片状激光器的两倍,或同类棒状激光器的四倍。

ES 激光器还可做成三角状或其它多角状,对其也可用张量光学方法作同样分析。最后必须指出,在上述分析中我们都忽略偏振态的变化,对此我们将作进一步分析。

### 参 考 文 献

- 1 陆璇辉,王绍民. 片状固体激光器的基模. 中国激光, 1988, 15(6):371
- 2 Lu Xuanhui, Wang Shaomin. The Properties and Modes of Slab Lasers. *Atti della Fondazione Giorgio Ronchi*, 1990, XIV(2):235
- 3 Christian Kolmeder, Lutz Langhans. The New Concept for Solid—State Laser; ES-Laser. *Laser and Optoelektronik*, 1994, 26(1):38
- 4 王绍民. 片状固体激光器内在的准相位共轭性质. 应用激光, 1984, 4(3):109
- 5 王绍民, 林 强, E. Bernabeu *et al.*. 激光光学导论. 杭州: 杭州大学出版社, 1991. 18
- 6 林 强, 王绍民. 张量光学. 杭州: 杭州大学出版社, 1994. 131

## Analysis of Properties of Self Compensation for the Thermal Distortion in Eckige-schraube-laser

Ru Guoyun Lu Xuanhui Lin Qiang Wang Shaomin

(Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou 310028)

**Abstract** In this paper, the ray path in a solid state eckige-schraube-laser is analyzed by a tensor method. The properties of self compensation for the thermal distortion and of symmetry in  $x$ 、 $y$  directions are achieved.

**Key words** eckige-schraube-laser, tensor optics