

角状螺旋固体激光器偏振特性的理论分析*

陆璇辉 茹国云 林 强 王绍民

(杭州大学物理系, 杭州 310028)

提要 利用琼斯矢量和琼斯矩阵的形式对 ES 激光器的偏振特性作了分析, 得到光线在激光腔内往返一周的琼斯变换矩阵, 证明了 ES 激光器具有偏振态自再现性质, 同时研究了偏振损耗的变化规律, 给出了计算结果。

关键词 角状螺旋激光器, 偏振特性

1 引 言

角状螺旋固体激光器(Eckige-Schraube-Laser)由于激光介质的对称性, 实验上已得到较传统棒状、片状固体激光器光束质量更优的激光束^[1]。文献[2]应用张量光学方法对激光介质的内部光路作了具体分析, 得到光束通过激光介质的变换可用 4×4 阶单位矩阵描述, 证实此类激光器在 X, Y 两方向对激光介质热畸变有自补偿性质, 且 X, Y 两方向呈对称性。ES 激光器内光束在振荡过程中, 在激光介质端面产生折射, 四侧面产生全内反射, 这都影响着光的偏振态。所以光的偏振状况及由此带来的偏振损耗将成为设计此类激光器时所必须考虑的重要因素。

本文利用琼斯矩阵和琼斯矢量的形式描述 ES 激光器的偏振特性, 得到光线在激光腔内往返一周的琼斯矩阵, 证明了光线往返一周后具有偏振态自再现性质, 改变介质端面倾斜度, 将引起不同的偏振损耗和附加相移, 得出介质端面呈布儒斯特窗时偏振损耗并非最小。最后以 YAG 激光介质为例, 给出计算结果。

2 激光介质的琼斯传输矩阵

如图 1 所示, 已知入射光单位矢量为 a_i , 反射面(折射面)法线方向单位矢量为 f , 其方向指向入射光一侧, 则反射光 a_r 和折射光 a_t 的单位矢量分别为^[3]

$$a_r = a_i - 2(f \cdot a_i)f = \text{Refl}(f, a_i) \quad (1)$$

$$a_t = \left(-f + \frac{f + a_i}{|f + a_i|} \cdot k \right) / \left| -f + \frac{f + a_i}{|f + a_i|} \cdot k \right| = \text{Refr}(f, a_i) \quad (2)$$

用算符 $\text{Refl}()$, $\text{Refr}()$ 表示上两式。其中

$$k = \sin(i_2) / \cos(i_2 - 0.5i_1) \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 6 月 26 日; 收到修改稿日期: 1995 年 9 月 6 日

i_1, i_2 分别为入射角和折射角。

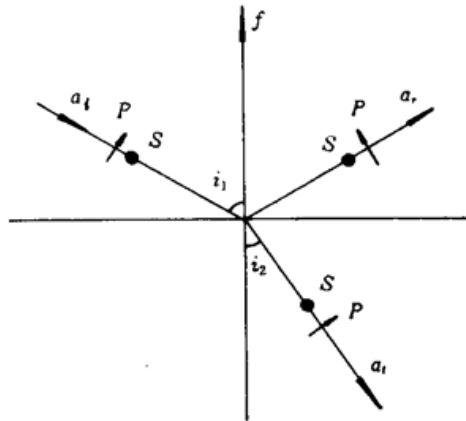


Fig. 1 Unit vectors of incidence, reflection, and refraction beams and of their polarization components p (parallel one) and s (perpendicular one)

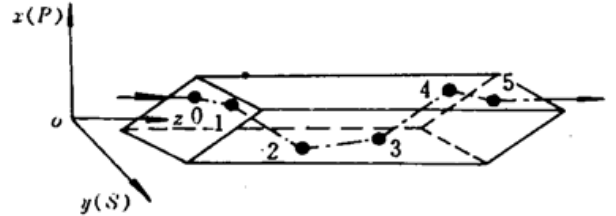


Fig. 2 Illustration of light path through the medium of ES laser. Faces 0 and 5 are end faces, and faces 1, 2, 3 and 4 are lateral surfaces of the medium

ES 激光器采用正方形截面晶体棒,棒四侧面抛光,端面做成倾斜面,呈棱形。光束从端面折射入介质后,依次经四侧面全内反射,以角状螺旋线通过该棒,最后经另一端面折射出介质,棒的长度选择使光束在四侧面经历的全内反射次数相等。如图 2 建立直角坐标系, Z 轴与介质棒平行, X, Y 轴分别与侧面垂直,坐标原点选在介质中心。先假定光在介质内每一侧面只经历一次全内反射,即在 XYZ 坐标系中单位矢量为 $a_0(0, 0, 1)$ 的入射光经端面 0 折射,依次经 1, 2, 3, 4 侧面全内反射,再由 5 面折射出介质。1 至 4 内反射面法向单位矢量分别为 $f_1(0, 1, 0)$, $f_2(1, 0, 0)$, $f_3(0, -1, 0)$, $f_4(-1, 0, 0)$, 端面法向单位矢量为 $f_0(\xi, \xi, \eta)$, $f_5(\xi, \xi, \eta)$, 其中 ξ, η 与光线在端面的入射角 i_1 , 折射角 i_2 之间的关系为

$$i_1 = \pi - \arccos(\eta), \quad i_2 = \arcsin[1/n_2 \sin(i_1)] \tag{4}$$

其中 n_2 为介质折射率,并假设外界折射率 n_1 为 1。所以端面折射的琼斯矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} T_p & 0 \\ 0 & T_s \end{pmatrix} \tag{5}$$

其中 T_p, T_s 由菲涅耳公式给出^[4]。

根据(1), (2) 两式, 光线在各段路径的方向矢量为

$$\begin{aligned} a'_0 = \text{Refr}(f_0, a_0) = a_1 & \quad a'_1 = \text{Refl}(f_1, a_1) = a_2 & \quad a'_2 = \text{Refl}(f_2, a_2) = a_3 \\ a'_3 = \text{Refl}(f_3, a_3) = a_4 & \quad a'_4 = \text{Refl}(f_4, a_4) = a_5 & \quad a'_5 = \text{Refr}(f_5, a_5) = a_0 \end{aligned} \tag{6}$$

式中 a_0, a'_0, a_5, a'_5 分别为光线被端面折射前后的单位方向矢量。 $a_i, a'_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别为每一次全内反射前后的单位方向矢量。从(6) 式可知光束在四侧面的入射角相等。若设端面 0 折射光方向 $a'_0(x_1, y_1, z_1)$, 则光线在侧面 1 的入射角为

$$\theta = \pi - \arccos(y_1) \tag{7}$$

所以侧面全内反射琼斯矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} e^{-i\delta_p} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta_s} \end{pmatrix} \tag{8}$$

其中 δ_p, δ_s 由菲涅耳公式给出^[4]。

根据入射、反射(折射)光方向和反射(折射)面法向矢量, 可得入射偏振光、反射(折射)偏

振光的垂直(s_i)、平行(p_i)偏振分量方向矢量为,

$$s_i = s'_i = (a_i \times f_i) / |(a_i \times f_i)| \quad (9)$$

$$p_i = s_i \times a_i \quad p'_i = s'_i \times a'_i \quad (10)$$

其中 i 表示第 i 次反射(折射), 这样由 $s_i p_i, s'_i p'_i (i = 0, 1, 2, 3, 4, 5)$ 形成 12 个坐标系, 用 c_{ij} 表示坐标系 $s'_i p'_i$ 到坐标系 $s_j p_j$ 的琼斯矩阵, 则有

$$c_{ij} = \begin{pmatrix} p'_i \cdot p_j & s'_i \cdot p_j \\ p'_i \cdot s_j & s'_i \cdot s_j \end{pmatrix} \quad (11)$$

用 C, C' 表示由 XYZ 坐标系(p, s 分量方向分别与 X, Y 方向一致)到 $s_0 p_0$ 坐标系和 $s'_5 p'_5$ 坐标系到 XYZ 坐标系的琼斯转换矩阵, 类似(11)式可同样得到。所以在 XYZ 坐标系中琼斯矢量为 E 的偏振光经介质棒后出射光的琼斯矢量 E' 为

$$E' = C' T_5 C_{45} R_4 C_{34} R_3 C_{23} R_2 C_{12} R_1 C_{01} T_0 C E \quad (12)$$

其中 $R_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 均为侧面全内反射琼斯矩阵, 具有相同形式, T_0, T_5 分别为两端面折射琼斯矩阵。所以介质棒的正向琼斯传输矩阵 J_M 为

$$J_M = C' T_5 C_{45} R_4 C_{34} R_3 C_{23} R_2 C_{12} R_1 C_{01} T_0 C \quad (13)$$

得到上式时, 我们忽略了光线在介质内直线传输的琼斯矩阵, 因为它并不改变光的偏振形式。如果光线在介质内经过 N 个周期的传输, 则其正向琼斯传输矩阵可描述为

$$J_M = C' T_5 C_{45} [R_4 C_{34} R_3 C_{23} R_2 C_{12} R_1 C_0]^{N-1} R_4 C_{34} R_3 C_{23} R_2 C_{12} R_1 C_{01} T_0 C \quad (14)$$

其中 C_0 实际是坐标系 $s'_1 p'_1$ 到坐标系 $s_1 p_1$ 的琼斯转换矩阵。

由于激光介质在 XOZ, YOZ 坐标面内呈奇对称, 通过坐标变换可以证明其逆向琼斯传输矩阵 J_M 与正向琼斯传输矩阵 J_M 一致。

3 偏振态自再现性质及偏振损耗

激光腔内光经一个周期传输后, 不仅要满足光场自再现方程, 还必须满足偏振态自再现方程, 即须满足^[5~7]

$$\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

其中 J 表示一周往返琼斯传输矩阵, λ 为复常数。

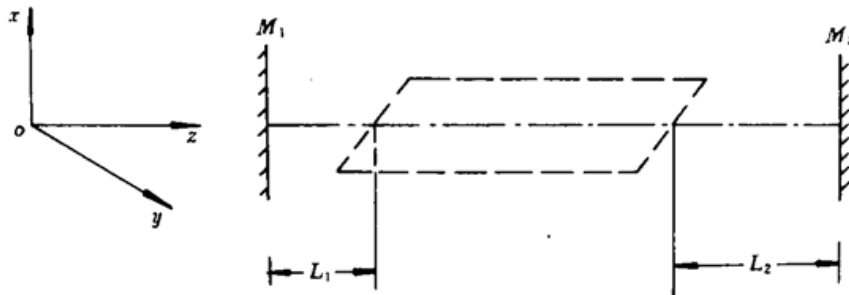


Fig. 3 Illustration of ES laser with two plane mirrors

以平-平腔为例, 如图 3 所示, 介质端面距镜分别为 L_1, L_2 , 若将输入输出参考面选在镜 M_1 上, 光线经一个周期的琼斯矩阵为

$$J = J_{M_1} J_{L_1} J_M J_{L_2} J_{M_2} J_{L_2} J_M J_{L_1} \quad (16)$$

其中 J_{L_1}, J_{L_2} 为介质端面与镜之间自由空间的琼斯传输矩阵。 J_{M_1}, J_{M_2} 为平面反射镜的琼斯矩阵,可表示为

$$J_{M_1} = J_{M_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

J_{M_1}, J_{M_2} 分别表示介质的正向、逆向琼斯传输矩阵。

从此我们得到激光腔内光线往返一周的琼斯传输矩阵 J 。对(16)式作具体计算后得到一周往返琼斯传输矩阵可表述为

$$J = Ae^{i\varphi} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

的形式。从中可知,光线在激光腔内振荡一周琼斯矢量只差一常数 $Ae^{i\varphi}$,其中振幅因子 A 反映偏振损耗 Loss,它们之间有

$$\text{Loss} = 1 - A^2 \quad (19)$$

φ 表示附加相移,当介质端面倾斜角不同,其振幅因子和相移因子均不同。从此我们可以清楚地看到,光线在激光腔内振荡一周后有偏振态自再现性质。

4 举例与讨论

以 YAG 激光介质(取 $n_2 = 1.73$)为例,对(16)式作数值计算,结果符合(18)式,图 4 显示了光线在介质端面的入射角不同(即改变端面倾斜度)时,振幅因子 A 和相移因子 φ 的变化规律。图 5 显示了偏振损耗随入射角的变化规律。从中可知随着入射角的增大偏振损耗也增大,当入射角较小时变化较缓慢,随后变化越来越剧烈,同时可知介质端面呈布儒斯特角时,偏振损耗并非最小。

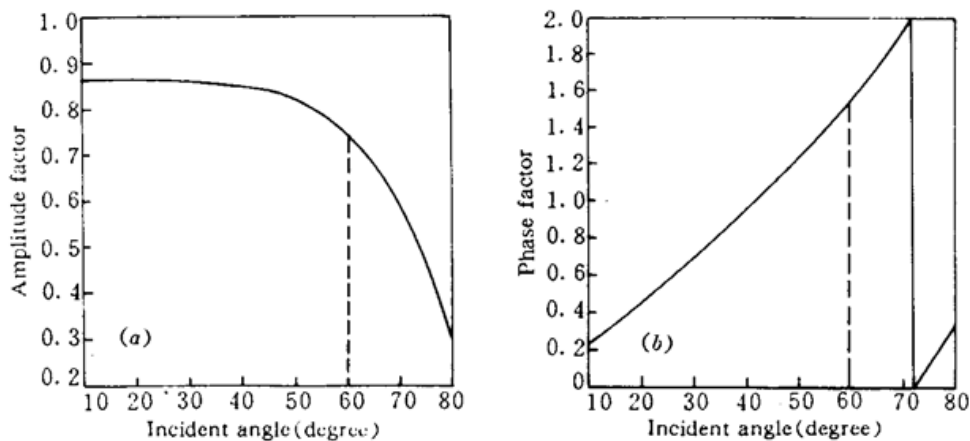


Fig. 4

(a) the amplitude factor as a function of the incidence angle to the end face. Dashed line denotes the Brewster angle;

(b) the phase factor as a function of the incidence angle to the end face. Dashed line denotes the Brewster angle

利用琼斯矢量和琼斯矩阵分析光的偏振态是一种有效的方法。通过上述分析,证明了 ES 激光器具有偏振态自再现特性,得到了偏振损耗的变化规律,对 ES 激光器优化设计具有重要指导意义。ES 激光器激光介质也可做成横截面呈正三角形的形式,对这种形式的激光器利用

上述方法也可作同样分析。

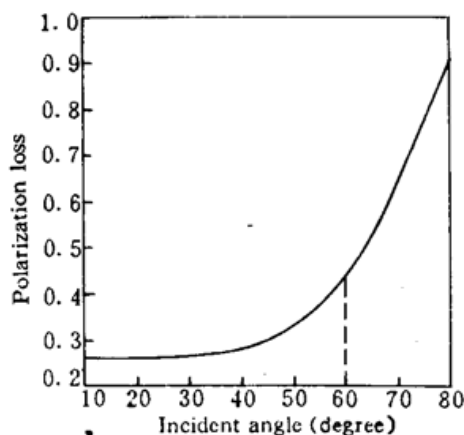


Fig. 5 The polarization loss as a function of the incidence angle to the end face.

Dashed line denotes the Brewster angle

参 考 文 献

- 1 Christian Kolmeder, Lutz Langhens. The New Concept for Solid-State Laser; ES-Laser. *Laser und Optoelektronik*, 1994, 26(1): 38
- 2 茹国云, 陆璇辉, 林 强 等. 角状螺旋固体激光器热畸变自补偿特性分析. *中国激光*, 1995, A22(1): 823
- 3 王春海, 吉贵军, 胡小唐 等. 角锥棱镜的偏振效应. *光学学报*, 1993, 13(6): 541
- 4 M. 玻恩, E. 沃尔夫. 光学原理. 北京: 科学出版社, 1978. 63
- 5 Edson R. Peck. Polarization Properties of Coner Reflectors and Cavities. *J. O. S. A.*, 1962, 52(3): 253
- 6 David L. Bobroff. Modes of Optical Maser Cavities with Roof-Top and Coner-cube Reflectors. *Appl. Opt.*, 1964, 3(12): 1485
- 7 方洪烈. 光学谐振腔理论. 北京: 科学出版社, 1981. 265

Theoretical Analysis of Properties of Polarization in Eckige-Schraube-Laser

Lu Xuanhui Ru Guoyun Lin Qiang Wang Shaoming

(Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou 310028)

Abstract The properties of polarization of ES-Laser are analysed through Jones vectors and Jones matrixes. The Jones transformation matrix representing a round trip of the ray in the laser cavity has been obtained. The properties of self-reproduction of polarization mode have been achieved. The variation regulation of polarization loss with the incidence angle to the end face of the laser medium is discussed, and the calculation results are presented.

Key words eckige-schraube-laser, properties of polarization