

基于 Fox-Li 迭代法的偏振敏感谐振腔

胡友友, 何小凤, 唐霞辉, 李 波*

华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程中心, 湖北 武汉 430074

摘要 矢量偏振光束的发展对偏振敏感谐振腔的模式计算提出了新的要求, 基于 Fox-Li 迭代法和琼斯矢量理论, 提出了用于偏振敏感谐振腔的矢量 Fox-Li 迭代法。该方法可以计算偏振敏感谐振腔内的矢量偏振模式, 包括角向偏振 TE_{01} 模和径向偏振 TM_{01} 模。通过 Matlab 编程对球面偏振敏感谐振腔内的矢量偏振模式进行数值计算, 计算结果与理论一致, 证明了该方法的正确性。然后基于轴快流 (FAF) CO_2 激光器平台, 采用组合轴锥镜作为谐振腔的尾镜, 得到了 2.17 kW 的角向偏振模式输出, 与矢量 Fox-Li 迭代法仿真结果吻合, 实验证明了该方法的有效性和准确性。矢量 Fox-Li 迭代法对于偏振敏感谐振腔的分析和设计具有重要的指导意义。

关键词 物理光学; 激光谐振腔; 矢量偏振光; Fox-Li 迭代法; 角向偏振光; 径向偏振光

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0826001

Polarization-Sensitive Resonator Based on Fox-Li Iterative Method

Hu Youyou, He Xiaofeng, Tang Xiahui, Li Bo

National Engineering Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The development of the vector polarized beam presents a new requirement for the mode calculation of the polarization-sensitive resonator. Derived from Fox-Li iterative method and Jones vector theory, a vector Fox-Li iterative method for polarization-sensitive resonator is presented, which can calculate the vector polarization mode in the polarization-sensitive resonator, including the azimuthally polarized TE_{01} mode and the radially polarized TM_{01} mode. The vector polarization modes of a spherical polarization-sensitive resonator are obtained by Matlab numerical calculation with this method. The result is coincident with the theory. Then, the 2.17 kW azimuthally polarized beam is obtained based on a fast axial flow (FAF) CO_2 laser platform using the combined axicon as the rear mirror of the resonator. And it is consistent with the simulated results with vector Fox-Li iterative method, which experimentally corroborates the validity and accuracy of the vector Fox-Li iterative method. The vector Fox-Li iterative method is of great significance for the analysis and design of polarization-sensitive resonator.

Key words physical optics; laser resonator; vector polarization beam; Fox-Li iterative method; azimuthal polarization beam; radial polarization beam

OCIS codes 260.5430; 140.3470; 200.4860

1 引 言

近十年来, 以径向偏振光和角向偏振光为代表的圆柱矢量光束受到了越来越多的关注。与常见的标量光束(线偏振、圆偏振)相比, 圆柱矢量光束的偏振分布呈现轴对称结构。因光束中心存在偏振奇点, 所以角向偏振光和径向偏振光是中心光强为零的环状光束。圆柱矢量光束特殊的偏振分布, 使其可以广泛地应用于激光加工^[1-3]、粒子捕获^[4]、粒子加速^[5]、光学存储^[6]、光学显微^[7]和等离子体激发^[8]等领域。例如, 在激光切割、焊接等激光加工领域, 激光的偏振态是影响吸收率的重要因素。实验证明, 采用径向偏振光可以提高

收稿日期: 2017-03-03; **收到修改稿日期:** 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61308045)

作者简介: 胡友友(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事矢量偏振光学方面的研究。E-mail: yyhu@hust.edu.cn

导师简介: 唐霞辉(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事工业激光器方面的研究。E-mail: txh1116@hust.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: libohust@126.com

激光切割的效率和质量,而采用角向偏振光可以避免激光焊接过程中的熔质飞溅,提高焊接质量^[1-3]。

目前,产生圆柱矢量光束的方法主要有相干合成^[9]、偏振旋转^[10]、双折射效应^[11]、衍射光栅^[12-15]、轴锥镜^[16]和超材料光栅^[17]等,这些方法大致可以分为腔外法(无源法)和腔内法(有源法)两种。腔外法是借助腔外偏振转换器件将激光器出射的圆偏振光或线偏振光转换为圆柱矢量光束。但是,腔外法的转换效率较低,且偏振转换器件的热损伤阈值较低,不适用于高功率场合。腔内法即是在激光谐振腔内采用偏振选择元件对谐振腔内谐振的激光偏振态进行选择,直接输出圆柱矢量光束。衍射光栅镜和轴锥镜,因其较好的偏振选择性和较高的热损伤阈值,成为产生高功率矢量偏振光束的首选器件^[12-16]。

偏振敏感谐振腔内的模式和能量分布对于圆柱矢量光束的产生和应用具有重要的意义。在求解谐振腔模式中,Fox-Li 迭代法因其普遍的适用性,几乎可以计算任意开腔中的自再现模。但是,其仅仅求解出谐振腔内的标量场,忽略了激光模式的偏振特性,无法应用于偏振敏感谐振腔的研究和分析。因此,本文进一步地发展了 Fox-Li 迭代法,使其适用于偏振敏感谐振腔的求解,并利用矢量 Fox-Li 迭代法研究了偏振敏感谐振腔的模式特性。

2 矢量 Fox-Li 迭代法

因激光谐振腔内的模式满足自再现的条件,所以一般采用 Fox-Li 迭代法求解激光谐振腔内的模式。Fox-Li 迭代法认为谐振腔腔镜 1 上的初始场为 u_1 ,通过衍射积分公式,可以得到腔镜 2 上的场分布 u_2 ,然后通过衍射积分公式可以再次得到腔镜 1 上的场分布 u_3 。经过足够多次的往返渡越,可以得到:

$$u_{j+1} = \frac{1}{\gamma} u_j, \quad (1)$$

$$u_{j+2} = \frac{1}{\gamma} u_{j+1}, \quad (2)$$

式中 γ 是复常数, j 是常数。通过数值计算,可以求得谐振腔内的激光输出模式。但是,此方法只能求得谐振腔内的标量场。

对于偏振敏感谐振腔,光场的矢量特性不能被忽略,可以用矢量 Fox-Li 迭代法求解谐振腔中的圆柱矢量模式。如图 1 所示,偏振敏感元件等效为附着在腔镜 2 上的一层薄膜。根据琼斯矢量理论,一束任意偏振矢量光束可以分解为一组正交的偏振光,如一组正交的线偏振光或一组正交的左旋和右旋圆偏振光^[18]。

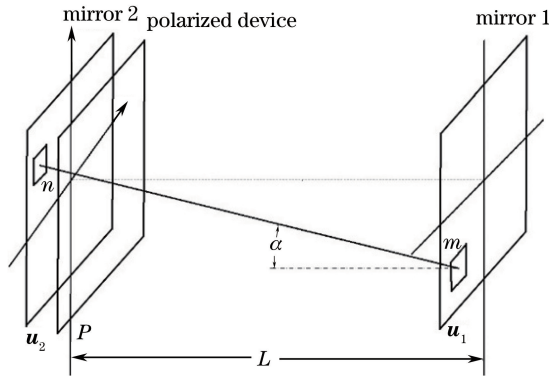


图 1 激光谐振腔

Fig. 1 Laser resonator

所以,腔镜 1 上的场分布 u_1 可以分解为

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_{1,x} \\ u_{1,y} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

通过衍射积分,可以求得腔镜 2 上的场分布 u_2 及再次求得腔镜 1 上的场分布 u_3 :

$$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{2,x} \\ u_{2,y} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_3 = \begin{bmatrix} u_{3,x} \\ u_{3,y} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

以此类推,经过足够多的次数,便可得到:

$$u_{j+1,x} = \frac{1}{\gamma} u_{j,x}, \quad (6)$$

$$u_{j+1,y} = \frac{1}{\gamma} u_{j,y}, \quad (7)$$

$$u_{j+2,x} = \frac{1}{\gamma} u_{j+1,x}, \quad (8)$$

$$u_{j+2,y} = \frac{1}{\gamma} u_{j+1,y}, \quad (9)$$

式中 γ 是复常数, j 是常数。通过数值计算,可以求得谐振腔内的矢量场分布,即 E_x , E_y 和 E_z 。

矢量瑞利-索末菲衍射积分作为一种描述矢量衍射的常用方法已被广泛地应用于矢量偏振光束传输领域。对于上述偏振敏感谐振腔内矢量场的衍射积分,瑞利-索末菲衍射积分同样适用。当激光谐振腔的菲涅耳数较小时,在傍轴近似下的矢量瑞利-索末菲衍射积分可以表示为^[19-20]

$$E_x(x, y, z) = -i \frac{\exp(ikz)}{\lambda z} \iint_{-\infty}^{+\infty} E_x(x_0, y_0, 0) \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (10)$$

$$E_y(x, y, z) = -i \frac{\exp(ikz)}{\lambda z} \iint_{-\infty}^{+\infty} E_y(x_0, y_0, 0) \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (11)$$

$$E_z(x, y, z) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp(ikz)}{z^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} [(x-x_0)E_x(x_0, y_0, 0) + (y-y_0)E_y(x_0, y_0, 0)] \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (12)$$

式中 k 为波矢, λ 为波长, $E_x(x, y, z)$, $E_y(x, y, z)$ 和 $E_z(x, y, z)$ 分别为目标平面上某点 (x, y, z) 处的电场分量,该电场分量可由初始平面 $z_0=0$ 内所有点的电场分量 $E_x(x_0, y_0, 0)$ 和 $E_y(x_0, y_0, 0)$ 通过衍射积分得到。在傍轴情况下,不管是自由空间的衍射,还是通过小孔衍射, $E_z(x, y, z)$ 项可以忽略^[21]。因此,在傍轴开腔模式计算中,可以仅考虑 $E_x(x, y, z)$ 和 $E_y(x, y, z)$ 。

基于上述的矢量 Fox-Li 迭代法的基本原理和(10)、(11)式,在数值计算软件 Matlab 中通过有限元法进行编程,便可求得偏振敏感谐振腔内激光模式的数值解。

3 球面偏振相关谐振腔的分析

假设轴快流(FAF)CO₂ 激光器的谐振腔为偏振敏感球面双凹稳定腔,如不作特殊说明默认参数如下:输出镜 1 为 ZnSe 窗口镜,曲率半径为 15 m,直径为 20 mm,透射率为 50%;尾镜 2 为带偏振选择的衍射光栅镜,曲率半径为 15 m,直径为 20 mm,TE 偏振的反射率 R_{te} 为 0.99, TM 偏振的反射率 R_{tm} 为 0.95;腔长 L 为 5.2 m,波长 λ 为 10.6 μm 。偏振度的定义为^[1]

$$V_{\text{DP}} = \frac{(I_r - I_\phi)}{(I_r + I_\phi)}, \quad (13)$$

式中 I_r, I_ϕ 分别为光场强度的径向分量和角向分量, $V_{\text{DP}} = 1$ 和 $V_{\text{DP}} = -1$ 分别代表径向偏振光和角向偏振光。

为了验证矢量 Fox-Li 迭代法的正确性,令 $R_{tm} = R_{te} = 1$,则上述的偏振敏感谐振腔退化成普通的球面双凹稳定腔,谐振腔内的输出模式如图 2(a)所示,可以发现谐振腔的输出模式为基模 TEM₀₀,与传统 Fox-Li 迭代法以及解析解一致,证明了本方法是合理可行的。

然后对上述的偏振选择谐振腔进行数值计算,如图 2(b)所示,谐振腔的输出模式为角向偏振($V_{\text{DP}} = -1$)环状光束 TE_{01*},光斑的中心光强为零,与理论上光斑中心存在偏振奇点吻合。如图 3 所示,经过 600 次的数值迭代计算,谐振腔传输常数 $|\gamma|$ 收敛于 0.9846,则 TE_{01*} 模在腔内往返一次的损耗为 $1 - |\gamma|^2 =$

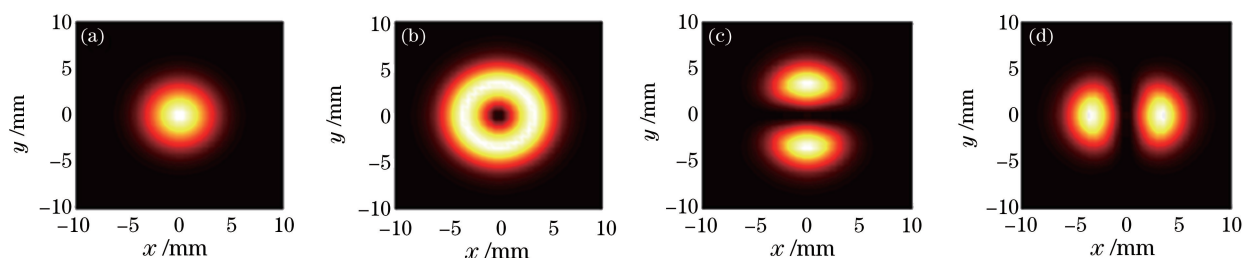


图 2 输出模式。(a) $R_{te}=1, R_{tm}=1$ 时, TE_{00} , (b) TE_{01*} ; $R_{te}=0.99, R_{tm}=0.95$ 时, TE_{01*} 的 (c) E_x 分量和 (d) E_y 分量
 Fig. 2 Output mode. (a) TE_{00} when $R_{te}=1$ and $R_{tm}=1$, (b) TE_{01*} ; (c) E_x component and (d) E_y component of TE_{01*} when $R_{te}=0.99$ and $R_{tm}=0.95$

3.06%。图 2(c)、(d) 分别为 TE_{01*} 模式的 X 和 Y 方向的光场分量, 这与琼斯矢量理论一致, 证实了角向(或径向)偏振光可以由一组正交偏振的线偏振光相干合成。

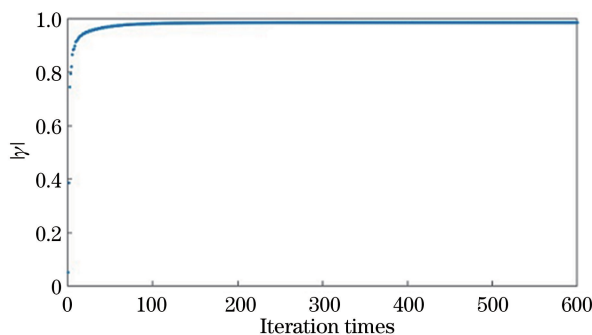


图 3 谐振腔传输常数 $|\gamma|$ 与迭代次数关系图
 Fig. 3 Relationship between resonator transmission constant $|\gamma|$ and the number of iterations

4 角向偏振光的产生实验

为了进一步验证矢量 Fox-Li 迭代法的有效性和准确性, 在轴快流 CO_2 激光器平台上, 采用组合轴锥镜作为偏振选择的尾镜实现角向偏振光的输出。图 4 为 L 形激光谐振腔结构图。输出镜采用曲率半径为 15 m、透射率为 50% 的 ZnSe 镜片, 谐振腔腔长为 5.2 m。尾镜采用等效曲率半径为 15 m 的组合轴锥镜作为角向偏振选择器件, 图 5 为采用金刚石车削工艺加工的组合轴锥镜实物图。正入射到复合轴锥镜的激光在复合锥镜中各个面上以 45° 的入射角反射, 反射 6 次后, 组合轴锥镜对 TE 偏振和 TM 偏振的反射率分别为 0.964 和 0.930, 该反射率差足以选择出角向偏振光。

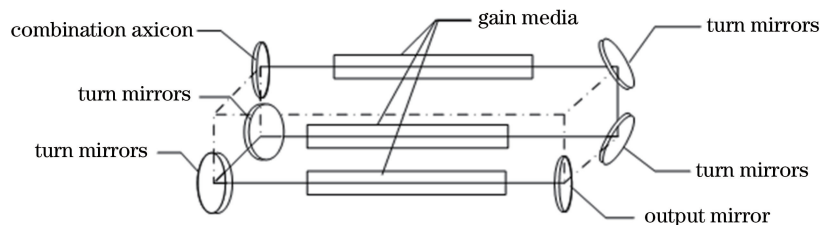


图 4 L 形激光谐振腔结构图
 Fig. 4 Structure chart of L-shaped laser resonator

如图 6 所示, 基于轴快流 CO_2 激光器平台, 采用该组合轴锥镜谐振腔, 得到了 2.17 kW 的角向偏振光输出。采用距输出窗口 2.2 m 的有机玻璃记录光斑的模式, 得到的烧斑如图 7 所示。其中, 图 7(a) 为环状偏振烧蚀光斑, 中心光强为 0。然后采用 II-VI 红外激光公司的偏振器 (PAZ-35-WC-2) 对输出光斑的偏振分布进行检测, 图 6(b)~(e) 分别为偏振器偏振方向为 $90^\circ, 0^\circ, 135^\circ$ 和 45° 时, 通过偏振器后的光斑形状, 可以看到, 光斑以偏振片的偏振方向为对称轴相应地分成了“两瓣”, 证实了该输出模式为角向偏振模式 TE_{01*} 。

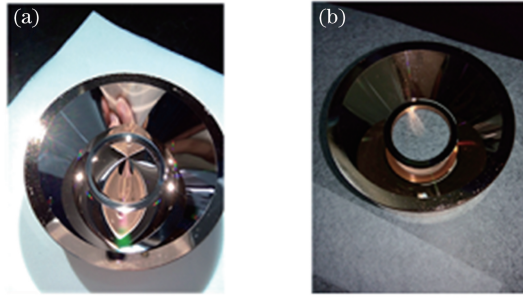


图 5 复合锥镜实物图。(a) W 锥;(b)内锥

Fig. 5 Physical map of combination axicon. (a) W cone; (b) inner cone

但是,可以发现输出光束的偏振纯度不高,且在光斑图样上存在一些衍射条纹,对此进行分析,认为这一现象可能是由组合轴锥镜的加工误差较大及轴锥镜冷却不均匀的热畸变造成的。



图 6 (a)轴快流 CO₂ 激光器实验平台外观图和(b)功率检测结果

Fig. 6 (a) Outside view of FAF CO₂ laser experimental platform and (b) power detection result

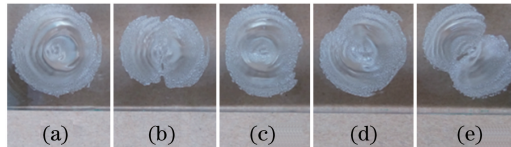


图 7 有机玻璃烧斑图。(a)组合轴锥镜谐振腔的激光烧斑;通过偏振器之后的激光烧斑,偏振器偏振方向分别为(b)垂直、(c)水平、(d) 135°方向和(e) 45°方向

Fig. 7 Burned patterns of acrylic. (a) Laser burned pattern of resonator of combined axicon; laser burned pattern with a polarizer, the polarization directions of the resonator are (b) vertical, (c) horizontal, (d) at 135° direction and (e) at 45° direction, respectively

5 结 论

基于 Fox-Li 迭代法,提出了用于偏振敏感谐振腔的矢量 Fox-Li 迭代法,它可以计算偏振敏感谐振腔内的矢量偏振模式,包括角向偏振 TE_{01} 模和径向偏振 TM_{01} 模。采用矢量 Fox-Li 迭代法计算了球面偏振敏感谐振腔的输出模式,结果验证了本方法的有效性和正确性。然后基于轴快流 CO₂ 激光器平台,采用组合轴锥镜作为尾镜,得到了 2.17 kW 的角向偏振光输出,实验验证了计算结果的正确性。

参 考 文 献

- [1] Niziev V G, Nesterov A V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(13): 1455-1461.
- [2] Meier M, Romano V, Feuer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. Appl Phys A, 2007, 86(3): 329-334.
- [3] Weber R, Michalowski A, Abdou-Ahmed M, *et al.* Effects of radial and tangential polarization in laser material processing[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 21-30.
- [4] Kawauchi H, Yonezawa K, Kozawa Y, *et al.* Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam[J]. Opt Lett, 2007, 32(13): 1839-1841.

- [5] Gupta D N, Kantb N. Electron acceleration to GeV energy by a radially polarized laser[J]. Phys Lett A, 2007, 368(5): 402-407.
- [6] Li X, Cao Y, Tian N, *et al.* Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate[J]. Optica, 2015, 2(6): 567-570.
- [7] Chen W, Zhan Q. Numerical study of an apertureless near field scanning optical microscope probe under radial polarization illumination[J]. Opt Express, 2007, 15(7): 4106-4111.
- [8] Zhang X, Yan L. Enhanced far-field focusing by plasmonic lens under radially polarized beam illumination [J]. Plasmonics, 2016, 11(1): 109-115.
- [9] Yi X, Ling X, Zhang Z, *et al.* Generation of cylindrical vector vortex beams by two cascaded metasurfaces[J]. Opt Express, 2014, 22(14): 17207-17215.
- [10] Stadler M, Schadt M. Linearly polarized light with axial symmetry generated by liquid-crystal polarization converters [J]. Opt Lett, 1996, 21(23): 1948-1950.
- [11] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, *et al.* Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3304-3310.
- [12] Nesterov A V, NizieV V G, Yakunin V P. Generation of high power radially polarized beam[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(22): 2871-2875.
- [13] Moser T, Balmer J, Delbeke D, *et al.* Polarization selective grating mirrors used in the generation of radial polarization [J]. Appl Phys B, 2005, 80(6): 707-713.
- [14] Kämpfe T, Tonchev S, Tishchenko V. Azimuthally polarized laser mode generation by multilayer mirror with wideband grating-induced TM leakage in the TE stopband[J]. Opt Express, 2011, 20(5): 5392-5401.
- [15] Tang Xinchun, Gao Jiancun, Wang Kun, *et al.* Generation of radially polarized light and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030001.
唐新春, 高健存, 王 坤, 等. 径向偏振光的产生方法及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030001.
- [16] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism[J]. Opt Lett, 2005, 30(22): 3063-3065.
- [17] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, *et al.* Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. Opt Lett, 2002, 27(5): 285-287.
- [18] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2009, 27(5): 899-910.
- [19] Deng D. Non-paraxial propagation of radially polarized light beams[J]. J Opt Soc Am B, 2006, 23(6): 1228-1234.
- [20] Jia X, Wang Y, Li B. On-paraxial analyses of radially polarized beams diffracted at a circular aperture [J]. Opt Express, 2010, 18(7): 7064-7075.
- [21] Wünsche A. Transition from the paraxial approximation to exact solutions of the wave equation and application to Gaussian beams[J]. J Opt Soc Am A, 1992, 9(5): 765-774.