

【文章编号】 1004-1540(2006)02-0142-04

双环光束在 CS_2 中传输的研究

沈常宇

(中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

【摘要】 双环光束在 CS_2 中传输时, 当入射光功率密度超过 140 kW/cm^2 时, 光束产生丝状自聚焦现象, 传输过程中光斑出现分裂现象; 建立双环光束模型, 通过数值求解非线性 Schrödinger 方程, 得出光束在一定功率之上会产生丝状自聚焦和光斑分裂现象, 并详细讨论了环形斑激光束在非线性的克尔介质中的传输特性.

【关键词】 双环光束; 丝状自聚焦; 光斑分裂

【中图分类号】 O437

【文献标识码】 A

Experimental and theoretical study of the propagation of the double-circle laser beam in CS_2

SHEN Chang-yu

(College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The filamentary self-focusing and spot-splitting effects are observed during the transmission of the double-ring laser beam in CS_2 . By solving nonlinear Schrödinger equation numerically, the filamentary self-focusing and spot-splitting are observed in the transmission process when the input laser beam's power density is over 140 kW/cm^2 . The characteristics of the double-ring laser beam's propagation in CS_2 are also discovered.

Key words: double-ring laser beam; filamentary self-focusing; spot-splitting

在非线性的克尔介质中, 介质的折射率与光强度有关. 如果传输激光束的功率密度超过临界功率密度, 将出现许多与自聚焦有关的非线性光学效应, 包括自聚焦、多焦点效应^[1,2], 同时也会出现非线性折射率饱和效应^[3], 非线性吸收、非近轴衍射^[4]等非线性现象. 对于纳秒量级的长脉冲的自聚焦, 理论上通常采用稳态近轴模型进行处理,

在这种研究中, 大多数都是把光束看成是圆形高斯光束^[5,6]. 虽然对非圆形高斯光束在介质中的传输问题也有一些研究^[7,8], 但从整体看来, 非近轴、非圆形高斯光束在非线性的克尔介质中的传输远没有近轴圆形高斯光束研究的深入. 由于自由空间光通信等领域的飞速发展, 横向空间调制的非高斯光束的传输显得越来越重要, 因此, 从理论

【收稿日期】 2006-01-21

【作者简介】 沈常宇(1977—), 男, 讲师, 湖南湘潭人. 主要研究方向为强激光和光学设计等.

上研究清楚非近轴非高斯光束的传输是十分必要的^[9-11].

实验中,让双环结构的激光束入射到克尔介质(CS₂)中,观察其传输情况.实验结果表明:当初始入射光束达到一定功率密度阈值时,由于环上光强度分布不是十分均匀和初始输入的光强度不同,双环都要产生自聚焦现象,但各环自聚焦的焦距、焦点亮度及焦斑面积都不一样.当入射激光功率密度超过 140 kW/cm² 时,光束产生丝状自聚焦现象,传输过程中光斑出现分裂现象.理论上,针对双环形激光束,进行横向一维模拟,考虑介质的非线性克尔效应和衍射效应,通过数值求解非线性 Schrödinger 方程,可以很好地论证和解释了这一实验结果.

1 实验装置及结果

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,激光器为 Nd:YAG,从激光器出射的激光经倍频后输出波长为 532 nm,脉宽为 5 ns,盛 CS₂ 的样品池为一透明圆柱形玻璃管,直径为 0.6 cm,制作了不同长度的样品池便于观察激光的传输;透明玻璃管两端用均匀的圆形石英片作为入射窗和出射窗,石英片厚度约为 0.1 cm;样品池到接收屏之间的距离为 50 cm.激光器输出光束经过小孔入射到克尔介质中,出射光束由 CCD 接收并传输到计算机进行存储和处理.实验中所用的克尔介质为分析纯为 99.9% 的 CS₂ 液体,其线性折射率为 $n_0 = 1.62$,非线性折射率为 $n_2 = 1.3 \times 10^{-11}$ esu.

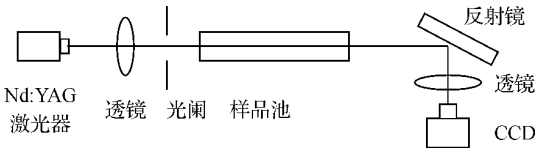


图 1 实验装置图

1.2 结果

实验中所使用的激光束的空间线型与一般高斯光束不同,为双环结构.如图 2(a)所示,双环的半径、半宽度及强度均不同,对于同一环上,强度分布是一种近连续状态.取不同长度盛满 CS₂ 的样品池,当光束经过这些样品池后,我们分别得到了如图 2(b)、(c)、(d)、(e)所示的输出光斑.他们

分别代表了激光经过长度为 10 cm, 15.5 cm, 21.5 cm 和 27.5 cm 的样品池后的输出光斑.

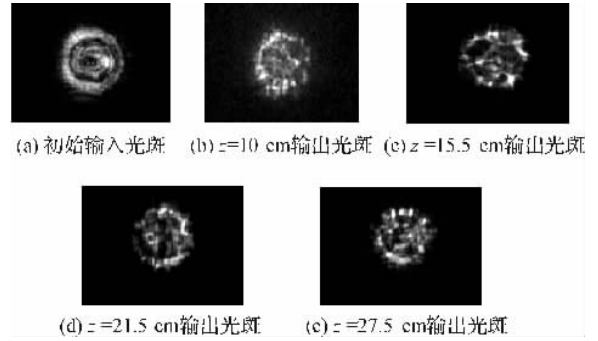


图 2 实验结果

对比图 2(a),从图 2(b)可以看出,当光束在 CS₂ 中传输 10 cm 时,已经开始出现有自聚焦现象,近连续光环开始变成分立的小焦斑.这是由于初始激光功率密度超过一定阈值时,双环在传输过程中,内外环都要发生自聚焦,由于克尔效应,光向光强度强的地方聚焦;因此,双环分裂成许多小焦斑;原来环上光强度大的地方聚焦成小光斑,且小光斑分布比较密集;而光强度小的地方则变暗或光斑分布稀疏.这说明衍射效应和克尔效应在竞争的过程中克尔效应占据优势,光继续朝着自聚焦方向发展.这从图 2(c)、(d)和(e)可以看出.当传输距离为 27.5 cm 时,光束自聚焦效应最为明显;继续传输过程中,克尔效应和衍射效应在一定情况下达到平衡,将出现丝状自聚焦现象.实验测得双环都产生自聚焦效应且外环产生丝状聚焦时的功率密度阈值为 140 kW/cm².

2 数值分析计算

2.1 基本方程

假定介质中激光电场的形式为: $\vec{E} = \vec{A}(x, y, z) \exp(i\vec{k}z)$,在慢变化包络近似条件下,非线性克尔介质中光束的传播可以用非线性 Schrödinger 方程来描述:

$$-2i\vec{k} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} + \frac{2n_2 k^2}{n_0} |\vec{A}|^2 \vec{A} = 0 \quad (1)$$

式(1)中 \vec{A} 表示规范化电场强度,与光强度的关系为 $I_0 = |\vec{A}|^2$, \vec{k} 为波矢量,其方向与传播方向 z 的正方向相同.本文中我们讨论的是双环形非高

斯光束,为了方便起见,横向仅考虑 x 方向上的一维情况. 非线性介质的折射率满足:

$$n = n_0 + n_2 |\vec{A}|^2 \quad (2)$$

此处 n_0 表示介质的线性折射率, n_2 表示介质的 Kerr 系数.

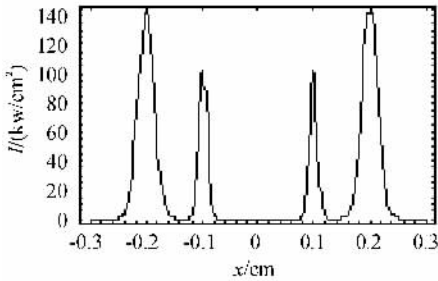
由方程式(1),假设 \vec{E} 沿 z 方向慢变化并且介质是瞬时响应的,仅考虑 x 方向上的衍射效应和介质中的克尔效应,忽略群速度弥散及高阶色散效应和高阶衍射效应. 实验中,使用的激光束与普通的高斯光束不同,为双环光束,因此理论上,可建立一个二维光束模型作为入射光束,入射面上初始光束的横向分布可描述为:

$$\vec{A}(x,0) = A_1 \left[\exp \frac{-(x-x_1)^2}{2\omega_1^2} + \exp \frac{-(x+x_1)^2}{2\omega_1^2} \right] + A_2 \left[\exp \frac{-(x-x_2)^2}{2\omega_2^2} + \exp \frac{-(x+x_2)^2}{2\omega_2^2} \right] \quad (3)$$

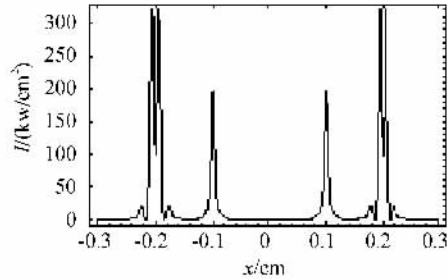
式(3)中 A_1, A_2 为环形斑光束双环的振幅, x_1, x_2 为常数,表示环形光斑峰值位置的坐标, ω_1, ω_2 为光束强度下降为 e^{-1} 时环形光斑峰值强度的半宽度,此处入射面上的光波的初位相为零. 将方程式(3)带入方程式(1),采用 CS_2 作为传输介质,进行数值计算.

2.2 结果及分析

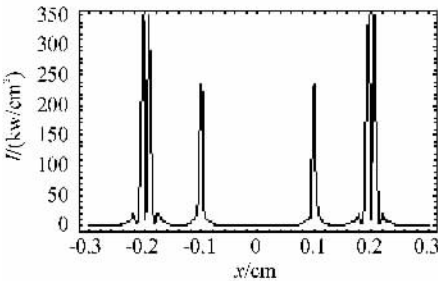
数值计算所使用的参数值分别为: $n_0 = 1.62, n_2 = 1.3 \times 10^{-11} \text{ esu}$, 入射光波长为 532 nm, 取 $x_1 = 1 \text{ mm}, x_2 = 2 \text{ mm}, \omega_1 = 0.1 \text{ mm}, \omega_2 = 0.2 \text{ mm}, I_1 = 100 \text{ kW/cm}^2, I_2 = 140 \text{ Kw/cm}^2$, 图 3(a) 表示的是初始入射光束模型,内峰表示内环在 x 方向上的强度分布,外峰表示外环在 x 方向上的强度分布. 图 3(b)、(c)、(d)、(e) 分别表示的是光束在介质中传



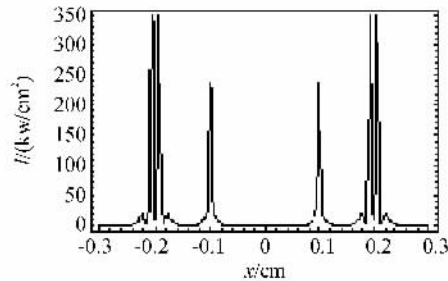
(a) 激光输入初始输入横向分布



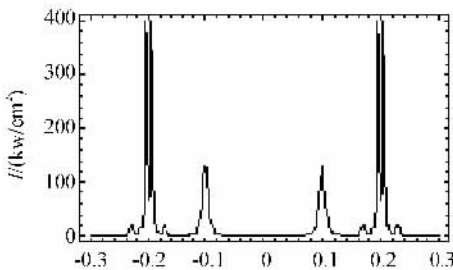
(b) 在 $z = 10 \text{ cm}$ 处激光束横向分布



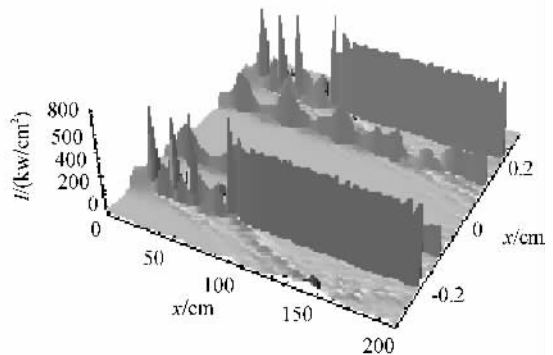
(c) 在 $z = 15.5 \text{ cm}$ 处激光束横向分布



(d) 在 $z = 21.5 \text{ cm}$ 处激光束横向分布



(e) 在 $z = 27.5 \text{ cm}$ 处激光束横向分布



(f) 激光束三维传输图

输了10 cm、15.5 cm、21.5 cm和27.5 cm后的光斑横向分布图,可以看出光斑发生了明显的自聚焦和光斑分裂现象,且自聚焦焦点出光强度随着自聚焦的明显而逐渐加强,其外环自聚焦焦点处峰值强度分别达到320 kw/cm²、350 kw/cm²、380 kw/cm²和400 kw/cm².图3(f)表示的是光束在克尔介质中传输的三维图.从图中可以看出,在整个传输过程中,双环发生了明显的自聚焦现象,并且光斑发生了明显的分裂现象,且各环自聚焦焦点的强度,以及焦斑的半径、焦距各不相同.这主要是光束在传输过程中,由于存在非线性效应和衍射效应之间的竞争,从而首先导致光束要产生自聚焦现象,在这个过程中,由于入射光束内外环的初始输入强度、环半径及半宽度不同,以及由于环与环之间的耦合效应,从而导致双环在自聚焦过程中不能保持同步,从而在三维图以及实验中可以看到光斑产生了分裂现象.同时,从三维图上可看出,从70 cm处开始,衍射效应和克尔效应达到平衡,外环光束开始出现丝状聚焦现象.

3 结 语

实验中,双环激光束在CS₂中存在丝状自聚焦和光斑分裂现象;理论上,建立一双环模型,考虑介质的非线性克尔效应和衍射效应,通过数值求解非线性薛定谔方程,得出:双环型激光束在克尔介质中传输时,在激光功率超过140 kw/cm²的情况下,激光在传输了70 cm后,外环将发生丝状自聚焦现象,并且光斑发生了明显的分裂现象,各分裂光斑自聚焦焦点的强度,以及焦斑的半径、

焦距各不相同,外环自聚焦焦点的强度明显强于内环,焦距小于内环.

【参 考 文 献】

- [1] CHIAO R Y, GARMIRE E, TOWNES C H. Theoretical of the self-trapping [J]. *Phys Rev Lett*, 1964, 13:479.
- [2] CAMPILLO A J, SHAPIRO S L, SUYDAM B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing [J]. *Appl Phys Lett*, 1973, 23:628.
- [3] WANG C C. Nonlinear susceptibility constants and self-focusing of optical beams in liquids [J]. *Phys Rev*, 1966, 152:149.
- [4] FIBICH G, PAPANICOLAOU G C. Self-focusing in the presence of small time dispersion and nonparaxiality [J]. *Optics Lett*, 1997, 22:1379.
- [5] FEIT M D, FLECK J A. Beam nonparaxiality filament formation and beam breakup in the self-focusing of optical beams [J]. *J Opt Soc Am B*, 1988, 3:633.
- [6] ZOZULY A, ALEX A. Propagation dynamics of intense femtosecond pulse: Multiple splittings, coalescence and continuum generation [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 7:1430.
- [7] MAMAIEV A V, SAFFMAN M. Propagation of light beams in anisotropic nonlinear media: From symmetry breaking to spatial turbulence [J]. *Phys Rev A*, 1996, 54:870.
- [8] AIKENS D. Derivation of preliminary specifications for transmitted wavefront and surface roughness for large optics used in inertial confinement fusion [J]. *Proc SPIE*, 1996, 2633:350.
- [9] 苗润才,沈常宇,叶青,等. 环形斑激光束在非线性克尔介质中的自聚焦效应[J]. *光子学报*, 2003, 32:204.
- [10] 沈常宇. 环形斑激光束在非线性克尔介质中的光束分裂效应[J]. *中国计量学院学报*, 2003, 14:271.
- [11] 苗润才,叶青,沈常宇,等. 环形斑激光束在非线性克尔介质中的分束现象[J]. *物理学报*, 2002, 51(9):1927-1932.