

克尔介质中调制激光束传输的实验和理论研究^{*}

叶青, 沈常宇, 苗润才

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 710062, 西安)

[摘要] 介绍了在实验中观察到的类双环状结构调制激光束在克尔介质中的自聚焦现象, 并在理论上, 通过建立一个调制光束模型, 运用数值求解非线性 Schrödinger 方程, 详细描述和解释了这种调制光束自聚焦形成的过程及其特点, 最后还对双环间的耦合效应进行了研究, 给出了耦合效应的特点。

[关键词] 调制激光束, 克尔介质, 数值计算, 耦合效应

[中图分类号] 426.5J; 0340K; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002)03-0030-04

0 引言

自聚焦是一种很重要的非线性光学现象, 过强的自聚焦效应会影响高功率激光束的传输, 造成强烈的波前畸变和它的非线性现象, 如受激喇曼散射、受激布里渊散射、双光子吸收、超连续辐射、脉冲的时域分裂和丝状聚焦等效应^[1~4], 同时还有可能造成介质的不可逆损伤。自 Chiao R Y^[5] 等人首次发现了激光脉冲在克尔介质中的自聚焦现象以来, 已有许多实验和理论文章报道了液体、固体中激光束传输的自聚焦现象。但据我们掌握的资料来看, 这些理论和实验研究^[6,7] 大多数是应用了傍轴近似的波动方程和圆形的高斯光束。而对非傍轴、双环状结构的调制激光束在克尔介质中传输的自聚焦现象的研究还比较少。在实验中, 作者让一束具有类双环状结构的调制激光束入射到克尔介质(CS_2) 中, 观测其传输情况。实验结果表明: 在一定的能量阈值以上, 由于环上光强度分布不均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。为了研究这种调制光束的传输特点, 在理论上, 我们建立了一个双环状调制光束模型, 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 Schrödinger 方程, 很好地论证和解释了这一实验结果。文中我们还对具有不同半径和不同峰值能量环与环之间的耦合效应也进行了研究, 并给出了耦合效应的特点。

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, 经倍频后输出波长为 532 nm, 脉宽为 5 ns 的光束, 盛 CS_2 的样品池长 27.5 cm, 孔径 0.5 cm, 样品池

为一透明玻璃管, 玻璃管两端用均匀的圆形石英片作为入射光瞳和出射光瞳, 石英片的厚度约为 0.1 cm, 样品池到接收屏之间的距离约 50 cm, 连接如图1所示。激光器输出光束经倍频和调制后, 通过小孔, 入射到克尔介质中, 出射光束由接收屏接收, 经 CCD 传输到计算机中存储和处理。(实验中所用的克尔介质的分析纯为 99.9% 的 CS_2 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.^[8])

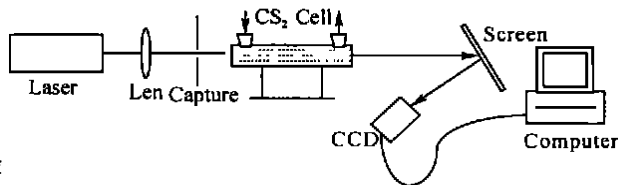


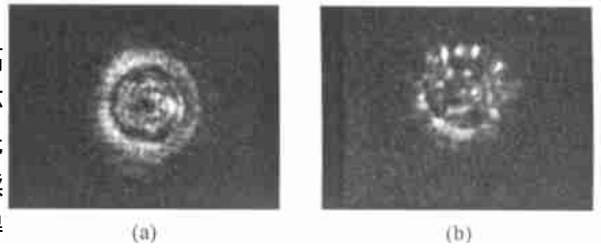
图1 实验装置简图

^{*} 收稿日期: 2002-05-25。

作者简介: 叶青, 1977-, 陕西师范大学物理学与信息技术学院硕士研究生, 主要从事非线性光学学习与研究。

1.2 实验结果

实验中所使用的调制光束的空间线型与一般高斯光束不同, 为类双环状结构. 如图 2(a) 所示, 双环的半径、半高宽及强度均不相同, 对于同一环形光束, 其光强度的分布也不均匀, 而是处于一种近连续状态. 当调制光束经盛满 CS_2 的样品池以后, 我们得到了如图 2(b) 所示的实验结果. 对比图 2(a) 可以看出, 调制光束通过克尔介质 (CS_2) 后, 环状光束发生



(a) 调制光束的初始输入; (b) 调制光束经克尔介质 (CS_2) 后的输出

图 2 实验结果

了明显的分裂, 由原来近连续环变成了一组分立的焦斑, 环上原来强度大的地方焦斑比较密集, 而强度小的地方焦斑比较稀疏, 这主要是由于各环上初始输入强度的不同和强度分布的不均造成的, 因此得到的是一组焦斑, 而不是一环状的细丝; 从图上也可以看出: 外环的自聚焦现象明显强于内环, 焦斑强度也明显强于内环的焦斑强度. 这主要是由于内外环所处的空间位置、初始强度以及半高宽不同, 从而导致各环自聚焦情况不相同, 这一点我们将在下面理论计算中做出详细的分析.

2 数值计算及分析

2.1 基本方程

实验中, 我们使用的激光束与普通的高斯光束不同, 是一束类双环状光束. 为此, 在理论上, 我们建立一个二维环状调制光束模型, 从非线性薛定谔方程出发, 应用慢变化包络近似, 并忽略群速度弥散, 以及高阶色散和高阶衍射, 进行数值计算.

光束在克尔介质中沿 z 方向传输, 满足如下的非线性 Schrödinger 方程:

$$-2ik \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla^2 E + \frac{2n_2 k^2}{n_0} |E|^2 E = 0 \quad (1)$$

上式中 $k = 2\pi n_0 / \lambda$ 为光束在介质中波矢量, n_0 为介质线性折射率, n_2 为非线性折射率系数, λ 为光束在真空中波长, $\nabla^2 = \partial^2 / \partial^2 x + \partial^2 / \partial^2 y$. 为了简单起见, 我们仅考虑 x 方向上的情况, 在 $z = 0$ 处, 电场电矢量有如下形式:

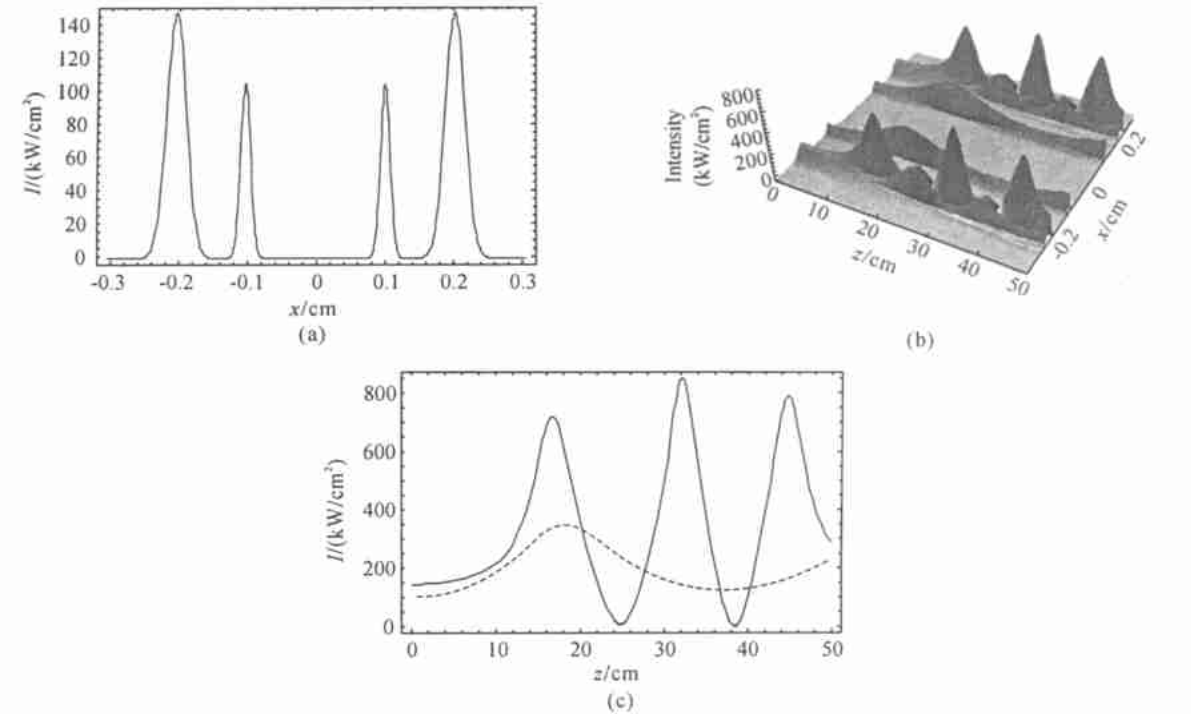
$$E(x, 0) = A_1 \exp \frac{-(x - x_1)^2}{2\omega_1^2} + A_1 \exp \frac{-(x + x_1)^2}{2\omega_1^2} + A_2 \exp \frac{-(x + x_2)^2}{2\omega_2^2} + A_2 \exp \frac{-(x - x_2)^2}{2\omega_2^2} \quad (2)$$

其中 $\omega_1 = 0.01 \text{ cm}$, $\omega_2 = 0.02 \text{ cm}$ 为光束峰值强度下降为 e^{-1} 时调制光束半宽度, x_1, x_2 为内外环的半径, A_1, A_2 为调制光束的幅度. (此处我们不考虑入射面上光波的初位相)

2.2 计算结果与分析

数值计算所使用的参数如下: $n_0 = 1.62$, $n_2 = 1.3 \times 10^{-11} \text{ esu}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$. 在取 $x_1 = 0.1 \text{ cm}$, $x_2 = 0.2 \text{ cm}$, $I_1 = 100 \text{ kW/cm}^2$, $I_2 = 144 \text{ kW/cm}^2$, 我们得到如图 3(a) 所示的二维初始调制光束模型, 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) 是调制光束在克尔介质 (CS_2) 中传输 50 cm 的三维传输图. 从图 3(b) 可以看出, 调制光束在整个传输过程中, 双环都发生了明显的自聚焦现象, 且为多级聚焦, 但各环自聚焦焦点的强度, 以及自聚焦的焦距却不尽相同. 与初始输入光强相比, 外环的自聚焦焦点的强度明显强于内环, 而焦距却小于内环, 如图 3(c) 所示. 这与上述的实验现象很好的吻合. 我们认为这主要是由于入射光束各环初始强度、环半径、半高宽的不同, 以及环与环之间耦合效应相互作用的效果不同, 导致该调制光束在传输过程中不能保持同步聚焦, 产生了环与环之

间聚焦的差异性; 同时我们从三维图上也注意到焦点与焦点之间发生了分裂, 我们认为这是非线性效应和衍射效应相互竞争的结果, 这一情况我们在前面所研究的分裂问题中进行了专门的讨论^[8,9].



(a) 调制光束初始输入的横向分布图; (b) 调制光束的三维传输图;
(c) 实线为外环($x = 0.2\text{ cm}$)的截面图, 虚线为内环($x = 0.1\text{ cm}$)的截面图

图 3 数值模拟

2.3 耦合效应

为了研究调制光束传输过程中环与环之间的耦合效应, 我们将输入光束构造为单环形式与上述情况对比来研究其传输的情况, 其初始输入的表达式为:

$$A(x, 0) = A_0 \left[\exp \frac{-(x - x_0)^2}{2\omega_0^2} + \exp \frac{-(x + x_0)^2}{2\omega_0^2} \right]$$

(3)

单环参数为: $I_{\max} = 144\text{ kW/cm}^2$; $x_0 = 0.2\text{ cm}$; $\omega_0 = 0.02\text{ cm}$. 我们用数值方法对单环输入和双环输入的传输情况进行了对比研究, 如图 4 所示.

与图 4 相对应我们得到了表 1 所示的数据, 可以看出: 对半径为 0.2 cm, 半高宽为 0.02 cm 的环形斑调制光束, 在传输的过程中, 二者均能出现自聚焦现象, 且都产生了多级焦点; 但相对于耦合输入, 独立输入时焦斑的强度明显的降低, 焦距也明显的增大, 这说明环形调制光束中的环与环之间具有耦合效应.

表 1 单环在单独输入和耦合输入时的数据对比

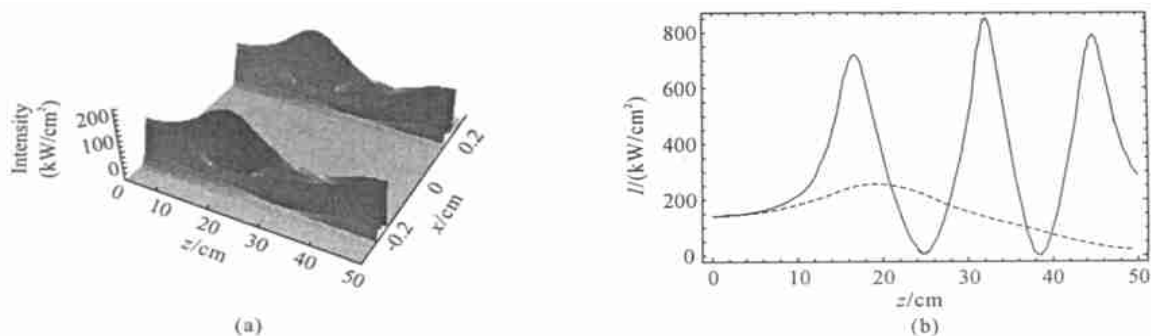
		焦距/ cm	强度/(kw/ cm ²)	半宽度/ cm
单独输入	第一个焦点	19. 01	270	0. 008 2
	第二个焦点	51. 42	185	0. 010 9
耦合输入	第一个焦点	16. 65	718	0. 004 0
	第二个焦点	32. 10	849	0. 003 8

耦合效应的结果由于初始输入强度、环半径、半高宽的不同, 对双环的影响也不相同, 在我们的实验中可以得到, 耦合效应使外环的自聚焦效应大大的增强, 焦距大大的减小.

3 结论

在实验中, 我们观察到了类双环状调制光束在克尔介质中的自聚焦现象, 并在理论上, 通过建立一个双环状调制光束模型, 考虑介质的非线性克尔效应和衍射效应, 运用非线性 Schrödinger 方程, 数值

求解表明: 环形调制光束在克尔介质的传输过程中, 发生了一系列自聚焦现象, 且为多级聚焦; 但由于各环的初始输入强度、环半径、半高宽的不同, 以及环与环之间的耦合效应的不同, 各环形成自聚焦的过程和特点也均不相同, 耦合效应使外环的自聚焦效应大大的增强, 焦距大大的减小.



(a) 初始输入强度和环半径保持不变时外环单独输入时三维传输图;
(b) 初始输入强度和环半径保持不变时外环单独输入时(虚线)和耦合输入时(实线)的对比

图4 数值结果比较

[参考文献]

- [1] Ranka J K, Schirmer R W, Gaeta A L. Observation of Pulse Splitting in Nonlinear Dispersive Media[J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(18), 3783~ 3786.
- [2] Trippenbach M, Band Y B. Dynamics of Short-pulse Splitting in Dispersive Media[J]. Phys Rev A, 1997, 56, 4242~ 4248.
- [3] Chervin P, Petrov V. Self-focusing of Light pulse in the presence of Normal Group-velocity Dispersion[J]. Opt Lett, 1992, 17, 172~ 174.
- [4] Rothenberg J E. Space-time focusing: Breakdown of the Slowly Varying Envelope Approximation in the Self-focusing of Femtosecond Pulses[J]. Opt Lett, 1992, 17, 583~ 585.
- [5] Chiao R Y, Garmire E, Townes C H. Self-trapping of Optical Beams[J]. Phys Rev Lett, 1964, 13: 479~ 482.
- [6] Singh T, Saini N S, Kaul S S. *Pramana* Dynamics of Self-focusing and Self-phase Modulation of Elliptic Gaussian Laser beam in Kerr medium[J]. J Phys, 2000, 55(3): 423~ 431.
- [7] 李忠东, 郭旗, 林为干. 光束自聚焦效应的数值研究[J]. 中国激光, 1999, 26(8): 711~ 716.
- [8] 苗润才, 叶青, 沈常宇, 等. 环形光斑激光束在非线性的克尔介质中的分束现象[J]. 物理学报, 2002, 51(9): 1927~ 1931.
- [9] 苗润才, 叶青, 沈常宇, 等. 环形光斑激光束在非线性的克尔介质中的环半径的偏移现象[J]. 光子学报, 2002, 31: 882~ 886.

Experimental and Theoretical Study of the Propagation of the Modulated Laser Beam in Kerr medium

Ye Qing, Shen Changyu, Miao Runcai

(College of Physics and Information technology, Shanxi Normal University, 710062, Xi'an, PRC)

Abstract The self-focusing effect of quasi-double-ring modulated laser beam propagating in the Kerr-medium CS_2 has been observed in the experiment. In theory, the nonlinear Schrödinger equation is solved by means of setting up a modulated laser beam model. The forming process and the characteristics of the self-focusing are described in detail. Finally, the coupling effect of the double-ring laser beam has been investigated and the characteristics are given.

Key words: modulated laser beam, Kerr medium, numerical solution, coupling effect

[责任编辑: 黎]