

(1+2) 维热非局域介质中的双光束远程相互作用 数值模拟研究*

陆大全[†] 祁玲敏 杨振军 张超 胡巍

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州 510631)

(2011年12月29日收到; 2012年10月24日收到修改稿)

从非线性薛定谔方程和热扩散的泊松方程出发, 采用分步傅里叶算法以及多重网格法, 对两束光在(1+2)维热非局域介质中的相互作用规律进行了研究. 结果表明, 在传输过程中, 两束光以互相缠绕的方式前进. 如果选择适当的入射功率、光束间距和倾斜参量, 两束光的传输轨迹在 (X, Y) 平面上的投影近似为圆形; 而在保持入射功率和倾斜参量的大小不变的情况下, 如果仅改变光束入射时的间距, 两束光中心的轨迹在 (X, Y) 平面上的投影依然近似成圆形. 由于在热非局域介质中存在特殊的非线性折射率形成机制, 所以尽管两束光离边界很远, 但是仍然能够感受到边界的影响; 在输入光整体偏离介质中心或两光束倾斜参量的绝对值不相等时, 它们整体做振荡传输.

关键词: 双光束, 热非局域介质, 相互作用

PACS: 42.65.Tg, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.62.064213

1 引言

非局域介质中的光传输问题是近十几年来受到强烈关注的研究领域. 非局域介质是指: 当光束在非局域介质中传输时, 若介质对光场的非线性响应不仅与该点的光场有关, 而且与空间其他点处的光场有关, 则称此介质为空间非局域非线性介质. 非线性响应的空间范围越大, 介质的非局域性就越强. 1997年 Snyder 和 Mitchell^[1] 提出了在强非局域条件下的非局域非线性模型(S-M模型), 从而使复杂的非线性问题转化为简单的线性问题, 引起了人们对非局域介质中的光传输(特别是空间光孤子)问题的研究热潮^[2-10]. 热非局域介质是非局域介质中的一种, 比如铅玻璃就是一种热致强非局域介质^[11-13], 其非线性主要来自于激光的热效应. 在这种介质中, 激光作为热源通过热扩散, 形成一定梯度分布的稳定温度场, 其热效应的响应函数与边界的热扩散有关. 近几年, Segev 等^[14-17] 对有界非局

域介质中光束的传输进行了研究, 他们发现了在有界的铅玻璃中, 由于边界的影响所形成的椭圆孤子以及单孤子偏转振荡的现象. 研究了双孤子的远程相互作用, 同时还发现了非局域表面孤子和非相干表面孤子. 我们则研究了不同阶数的厄米-高斯光束在不同边界条件下的铅玻璃中的传输性质^[18].

由于在全光开关和光逻辑门方面有潜在的应用价值, 非局域非线性介质中的光束或孤子相互作用是一个重要的研究内容. 之前的研究结果主要包括理论和实验两方面: 在理论方面, 对于用于粗略描述相互作用现象的线性化 S-M 模型而言, 可用解析的方法对孤子相互作用的轨迹、光斑图样演化规律进行解析求解^[9]. 但对于精确的模型如热非局域非线性介质, 由于数学上的复杂性不能解析求解. 在实验方面, Segev 小组得到了(1+1)维条件下热非局域孤子间的相互吸引导致的孤子偏转, 还得到了(1+2)维条件下热非局域孤子间的相互缠绕行为的实验结果^[15].

本文用数值模拟的方法对(1+2)维条件下热

* 国家自然科学基金(批准号: 10804033, 11174090, 11174091)、广东省高等学校科技创新团队计划(批准号: 06CXTD005)和教育部高等学校博士点专项科研基金(批准号: 200805740002)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ludq@snu.edu.cn

非局域介质中的双光束远程相互作用进行研究, 弥补热非局域非线性介质模型中的光束相互作用不能解析求解的不足. 我们从非线性薛定谔方程和热扩散的泊松方程出发, 采用分步傅里叶算法以及多重网格法, 一方面要在数值上重现 Segev 等得到的实验现象, 另一方面还要寻找光束功率、倾斜参量、光束间距与传输性质之间的相互关系, 并探讨远边界以及初始横向动量对两束光整体传输规律的影响.

2 热非局域非线性介质中的光传输模型

当光束在热非局域非线性介质中传输时, 光束成为热源. 铅玻璃会吸收微弱的光能量, 形成稳定梯度分布的温度场, 且温度场分布可用泊松方程表示 [19]:

$$\kappa \nabla^2 T(x, y, z) = -\alpha I(x, y, z), \quad (1)$$

其中, κ 为热传导系数, α 为热吸收系数, $I(x, y, z)$ 为光束的光强分布, $T(x, y, z)$ 为温度分布. 折射率的变化可以表示为 $\Delta n = \beta \Delta T = \beta(T - T_0)$, β 为非线性热光系数, T_0 为 $I = 0$ 时的温度, 也是样品的边界条件 (即边界恒温). 在傍轴条件下, I 和 T 沿 Z 轴变化很缓慢, 可以忽略, 所以方程 (1) 可简化为

$$\kappa \nabla^2 T(x, y) = -\alpha I(x, y). \quad (2)$$

傍轴近似条件下, 光束在铅玻璃中传输时, 其振幅 A 满足非线性薛定谔方程 [13]:

$$2ik\partial_z A + (\partial_x^2 + \partial_y^2)A + 2k^2 \frac{\Delta n}{n_0} A = 0, \quad (3)$$

其中 $k = \frac{\omega n_0}{c}$ 为仅考虑线性折射率时的波数, n_0 为线性折射率, c 为真空中的光速, Δn 为折射率的改变量.

对方程 (3) 和 (2) 做归一化可得:

$$i\partial_z \psi + \frac{1}{2} \nabla_{XY}^2 \psi + Q\psi = 0, \quad (4)$$

$$\nabla_{XY}^2 Q = -|\psi|^2, \quad (5)$$

其中 $X = \frac{x}{W_0}$, $Y = \frac{y}{W_0}$, $Z = \frac{z}{kW_0^2}$, $Q = \frac{k^2 W_0^2 \Delta n}{n_0}$, $\psi = \frac{A}{A_0}$, $A_0^2 = \frac{n_0 \kappa}{\alpha \beta k^2 W_0^4}$, W_0 是光束的束宽, A_0 是振幅归一化系数, ψ 是归一化后的波函数. 后续讨论将基于方程 (4) 和方程 (5) 的数值计算结果. 在数值计算过程中, 采用分步傅里叶算法 [20] 和多重网格法 [21] 分别对方程 (4) 和方程 (5) 进行模拟.

3 双光束远程相互作用模拟结果分析

在数值模拟过程中, 主要讨论两束基模高斯光束的远程相互作用, 所谓远程是指在相互作用过程中光束间没有能量交叠, 或者说二者没有发生碰撞. 为了达到远程的物理条件, 我们假设两光束在 Y 方向有间距, 并且在 X 方向上有反向倾斜, 即

$$\psi_1(X, Y, 0) = \phi(X, Y - Y_{10}, 0) \exp(ih_1 X), \quad (6)$$

$$\psi_2(X, Y, 0) = \phi(X, Y + Y_{20}, 0) \exp(-ih_2 X), \quad (7)$$

其中 $\phi(X, Y, 0) = \phi_0 \exp[-(X^2 + Y^2)/2]$, ϕ_0 是与功率有关的常数. 后面将会看到: 在此入射条件下, 光束将不发生碰撞, 而是互相缠绕向前传输, 从而实现远程相互作用. 在数值模拟中, 我们取的样品截面是正方形的, 其归一化边长 $L = 160$.

3.1 基本相互作用规律

为探索双高斯光束的基本相互作用规律, 我们对输入条件进行了以下限制: 1) 两束光的功率和空间强度分布均相同; 2) 两束光的入射位置关于样品是中心对称的, 即 $Y_{10} = Y_{20}$; 3) 两束光具有大小相等、方向相反的倾斜参量, 即 $h_1 = h_2$. 在此条件下, 考察光束功率、倾斜参量、光束间距与传输性质的关系.

首先考察轨迹的演化规律. 数值结果显示: 在传输过程中, 两束光以互相缠绕的方式前进. 而如果选择适当的入射功率、光束间距和倾斜参量, 两光束的传输轨迹在 (X, Y) 平面上的投影会近似成为闭合的圆形 (我们称这种情况是参数匹配的情况, 如图 1 所示).

当保持两束光的入射位置不变而改变入射功率时, 需要不同的倾斜参量来匹配, 才能使两束光中心的轨迹在 (X, Y) 平面上的投影重合, 形成一个闭合的近似圆, 并且功率越大需要的倾斜参量也越大 (如图 1(a)). 而更为有趣的是, 在保持入射功率和倾斜参量的大小不变的情况下, 如果仅改变光束入射时的间距, 两束光中心的轨迹在 (X, Y) 平面上的投影依然保持近似圆的闭合形状. 这说明形成近似圆形螺旋轨迹只需要倾斜参量的大小和功率相匹配, 而与光束间距无关; 光束间距影响的只是近似圆形的大小 (图 1(b)).

上述性质可用文献 [15] 提出的等价法做定性解释: 因为在铅玻璃中光束间的相互作用由折射率

分布决定, 而由方程 (1) 可知, 折射率分布可用泊松方程来描述. 在电磁学中, 泊松方程同样可以用来描述电荷的静电场. 因此可将光束与电荷相类比、将光功率与电荷电量相类比, 光束间的相互作用就相当于电荷间的相互作用. 根据上述等价性, 光束之间的相互作用“力”

$$F = \sigma \frac{P_1 P_2}{2r} \quad (8)$$

与两束光的功率成正比, 与它们之间的距离 $r = Y_{10} + Y_{20}$ 成反比, σ 为常数. 在参数匹配情况

下, 这个“力”可近似看作圆周运动的向心力, 它与线速度之间的关系为 $F = v^2/r$. 而线速度 v 为光速在 (X, Y) 平面内的投影的速度, 正比于倾斜参量 h , 则有

$$\frac{P_1 P_2}{2r} \propto \frac{h^2}{r}, \quad (9)$$

由此可知, 当功率 P 确定时, 与之匹配的倾斜参量 h_P 的值也就确定了, 它与半径 r 无关; 而当近似圆大小一定时, 匹配倾斜参量 h_P 是随着功率 P 的增大而增大的 (见图 1(a)).

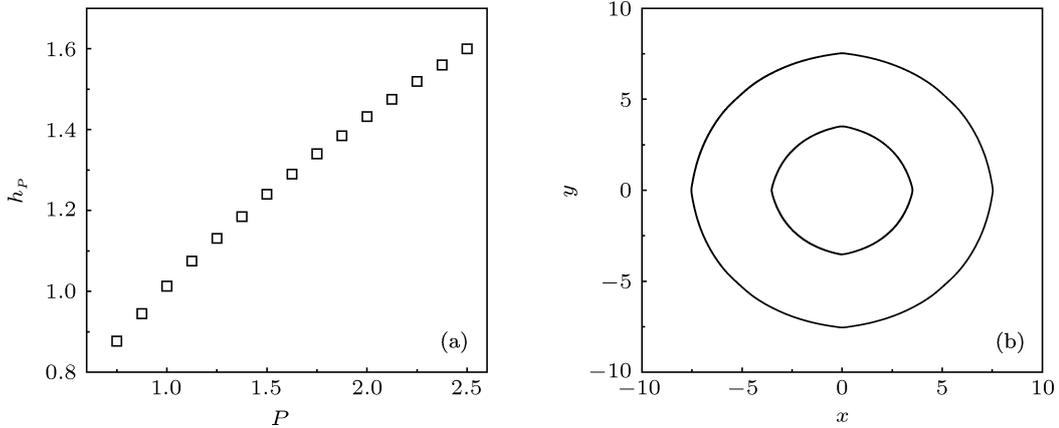


图 1 (a) 当参数匹配时, 即两束光中心轨迹近似形成圆时, 不同功率需要不同的倾斜参量来匹配, 横坐标是入射功率 $P_1 = P_2 = P$, 纵坐标是匹配倾斜参量 h_P ; (b) 临界功率下, 参数匹配时, 在传输过程中光束中心在截面内的投影轨迹; 模拟参数为 $L = 160$, 入射倾斜参量 $h_1 = h_2 = 1.013$, 入射功率 $P = P_c$; 小圆表示两束光的入射位置分别为 $(0, 4, 0), (0, -4, 0)$; 大圆表示两束光的入射位置分别为 $(0, 8, 0), (0, -8, 0)$

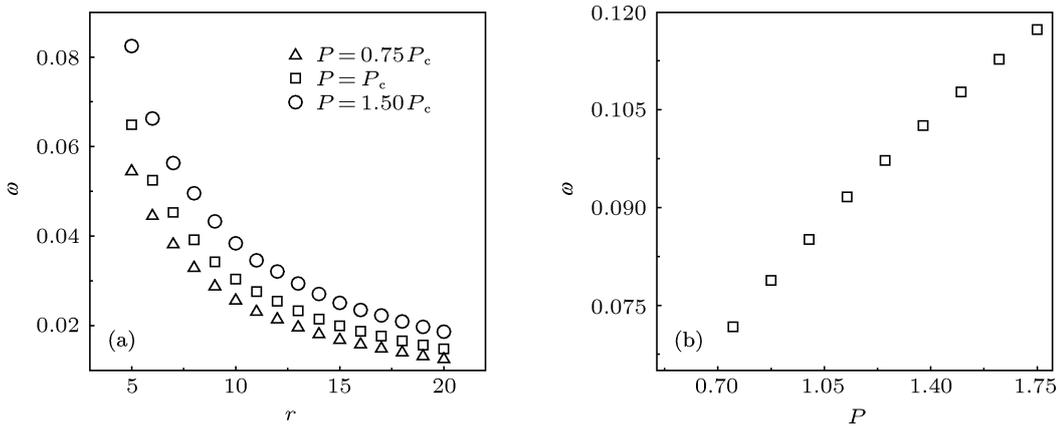


图 2 当参数 h, r, P 匹配时, P, r, ω 的关系 (a) P 一定时, r 和 ω 的关系曲线; (b) $r = 4$ 时, P 和 ω 的关系

而对于角频率 ω 与功率、半径之间的关系, 因为 $\omega = \frac{v}{r}$, 所以近似有 $F = \sigma \frac{P_1 P_2}{2r} \propto \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$. 这通过数值模拟得到了证实: 在保持功率 P 不变的情况下, ω 随 r 增大而减小 (见图 2(a)), 这与文献 [15] 的实验结果是一致的; 在保持 r 不变的情况下, P 和 ω 近似成正比 (见图 2(b)).

为了更直观地理解两束光的传输过程, 我们模拟了在参数匹配情况下光束在不同传输距离时的强度分布 (见图 3). 为了说明光束的运动方向, 在图 3 的每个图中都加了一个圆环和两个箭头, 圆环代表光束中心的传输轨迹在截面的投影, 箭头代表光束的运动方向. 同时还模拟了光束束宽的变化,

在热非局域介质中, 当以高斯光束入射时, 并不能形成光束宽度一直保持不变的严格孤子. 不管入射功率如何变化, 都会存在束宽的变化, 这和文献 [18] 所报道的在铅玻璃中不存在严格的孤子是一致的. 在数值模拟过程中, 我们通过改变输入功率寻找束宽变化最小时所对应的光束功率, 称此功率

为临界功率. 在临界功率下光束的束宽仍然会有微小的变化 (见图 4(a)); 而当输入功率相对此临界功率有较大偏离时 (比如入射功率为临界功率的两倍或二分之一倍时), 相互作用的光束将表现出明显的呼吸效应并以准周期呼吸子的形式向前传输 (见图 4(b)).

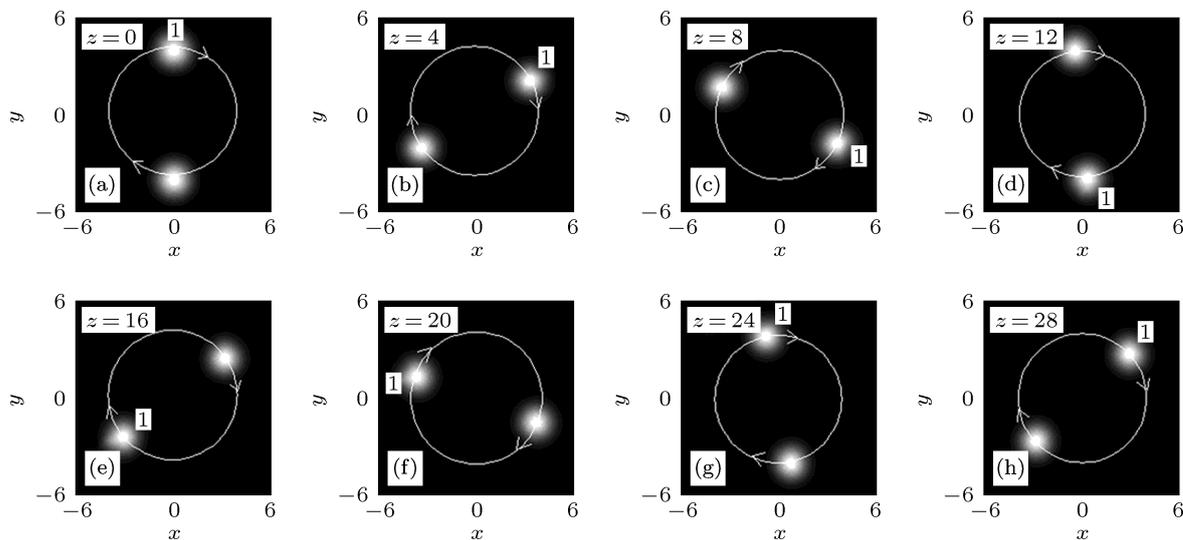


图 3 在临界功率下, 参数匹配时, 两束光在传输过程中的光强分布图 模拟参数为: $L = 160, h_1 = h_2 = 1.013$, 两束光入射位置分别是 $(0, 4, 0), (0, -4, 0)$, 为了区别两束光, 在其中一束光旁边加了注释 1

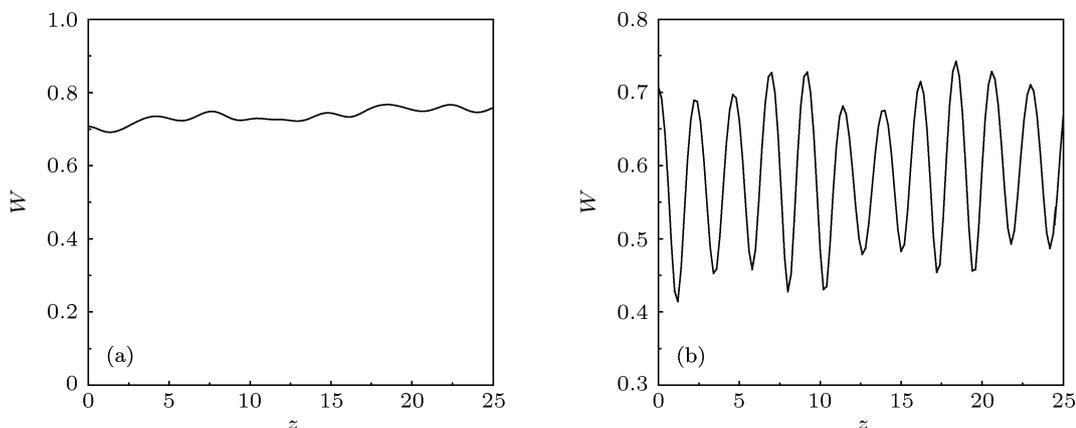


图 4 (a) 临界功率下光束的束宽变化, 模拟参数为 $L = 160, h_1 = h_2 = 1.013$, 两束光入射位置分别是 $(0, 4, 0), (0, -4, 0)$; (b) 非临界功率下 ($P = 2P_c$) 光束的束宽变化, 其模拟参数为 $L = 160, h_1 = h_2 = 1.432$, 两束光入射位置分别是 $(0, 4, 0), (0, -4, 0)$

另外, 我们还模拟了参数不匹配情况下双高斯光束的相互作用情况. 模拟结果表明: 当参数不匹配时, 光束中心的轨迹在传输截面的投影并不能形成闭合的椭圆, 而是一个不重合的复杂图形; 这与双光束在高斯响应强非局域介质中传输时的情况有明显的不同 (在该情况下, 光束轨迹的投影是闭合的椭圆型轨迹 [9]). 同时我们发现在光束的功率一定、倾斜参量小于需要匹配的倾斜参量情况下 (即 $h < h_p$, 其中 h_p 是匹配时的倾斜参量), 两束光

刚开始运动时光束中心的传输轨迹在截面的投影呈逼近中心趋势 (如图 5, a, b 线), 并且倾斜参量越小越向中心靠近, 这是因为两束光之间的作用力大于光束的所需的向心力, 因此开始传输时光束做向心运动; 在倾斜参量匹配的情况下, 两束光的光束中心的传输轨迹在截面上的投影近似成圆形 (如图 5 c 线); 而在倾斜参量大于需要匹配的倾斜参量的情况下 (即 $h > h_p$), 两束光刚开始运动时光束中心的传输轨迹在截面的投影呈远离中心趋势 (如图 5,

d, e 线), 并且倾斜参量越大趋势越明显. 这是因为两束光之间的作用力小于光束所需的向心力, 因此开始传输时光束做离心运动.

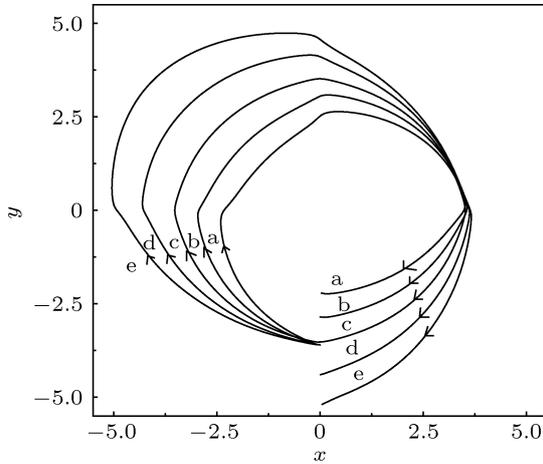


图 5 临界功率下, 其中一束光的中心的轨迹在传输截面的投影 a, b, c, d, e 线的光束的倾斜参量分别是 $0.8h_p, 0.9h_p, h_p, 1.1h_p, 1.2h_p$

3.2 远边界效应及初始横向动量的影响

为了研究远边界效应对光束相互作用的影响, 我们仍使光束远离样品边界, 但改变两束光入射位置, 使两束光关于热非局域介质样品中心不对称 (即 $Y_{10} \neq Y_{20}$). 经过大量的数值模拟发现, 在此情况下边界将会影响到两束光整体的运动 (如图 6 所示). 当光束入射位置连线中点在 Y 轴正 (负) 方向时, 两束光在开始时将一边相互旋转, 一边整体向 Y 轴负 (正) 方向移动, 继而向 Y 轴正 (负) 方向返回, 从而在 Y 方向形成周期性的振荡. 这和其他形式非局域条件下的相互作用有明显的区别 (如在高斯响应非局域介质中, 光束并不会受到远边界的影响). 我们可以从热非局域非线性的形成机制来理解这种特殊的性质: 在热非局域介质中, 非线性折射率是由温度的梯度分布引起的; 而非中心对称的激光产生的热量在扩散过程中必然形成非对称的温度分布, 并进而形成非对称的折射率. 而相互作用的光束整体上总是从低折射率一边往高折射率的另一边运动的, 因此在传输过程中, 尽管边界离得很远, 仍然能感受到边界及其引起的折射率不对称并振荡传输.

另外, 我们还研究了光束初始横向动量的影响, 光束在 X, Y 方向的横向初始动量分别为

$$M_x = \frac{i}{2k} \iint (\psi_1 + \psi_2) \partial_x (\psi_1 + \psi_2)^* - (\psi_1 + \psi_2)^* \partial_x (\psi_1 + \psi_2) dx dy$$

$$= \frac{\pi}{k} \Phi_0^2 \left\{ 1 + \exp \left[- \frac{(Y_{10} + Y_{20})^2 + (h_1 + h_2)^2}{4} \right] \right\} \times (h_1 - h_2), \quad (10)$$

$$M_y = \frac{i}{2k} \iint (\psi_1 + \psi_2) \partial_y (\psi_1 + \psi_2)^* - (\psi_1 + \psi_2)^* \partial_y (\psi_1 + \psi_2) dx dy = 0. \quad (11)$$

由 (10) 和 (11) 式可知, 当两束光倾斜参量的绝对值不相等时 (即 $h_1 \neq h_2$), 光束具有 X 方向的横向初始动量. 因此, 当两束光的倾斜参量大小不相等 (即初始动量不为零) 时, 我们发现这两束光在相互旋转的同时, 其整体还有一个振荡 (见图 7). 这是因为当 $h_1 > h_2$ ($h_1 < h_2$) 时, 光束初始动量为正 (负), 从而向 X 轴正 (负) 方向移动, 而当移动到正 (负) 方向时, 光束整体上会感受到远边界的影响, 从而向负 (正) 方向返回, 如此往复即形成整体振荡.

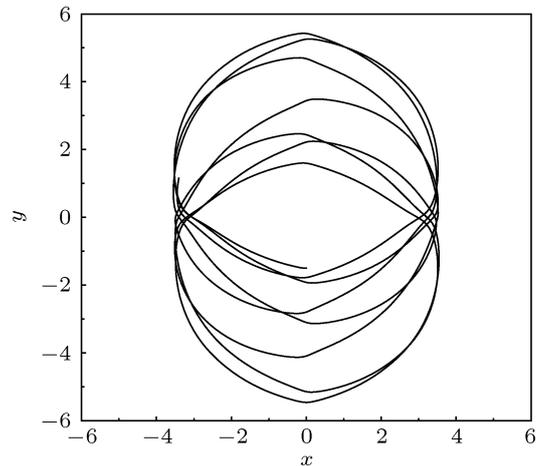


图 6 受边界影响时, 传输过程中光束中心在截面上的投影轨迹 模拟参数为 $P_1 = P_2 = P_c, h_1 = h_2 = 1.013, L = 50$, 初始位置分别是 $(0, 6, 0), (0, -2, 0)$

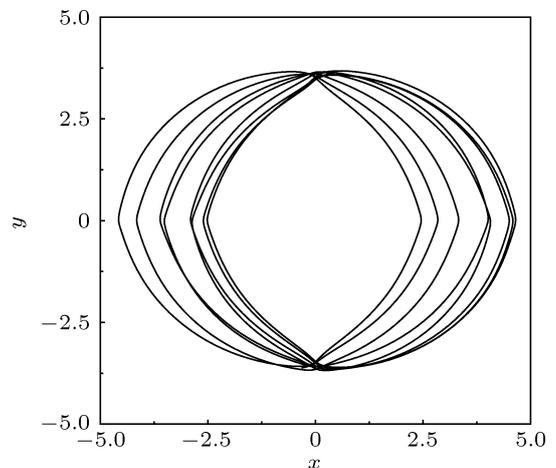


图 7 在临界功率下两束光的倾斜参量不同时, 传输过程中光束中心在截面上的投影轨迹 其模拟参数为 $P_1 = P_2 = P_c, c_1 = 1.05, c_2 = 1, L = 160W_0$, 两束光的入射位置分别为 $(0, 4, 0), (0, -4, 0)$

4 结论

本文用数值模拟的方法对两束光在 (1+2) 维热非局域介质中的相互作用进行了研究. 结果表明, 在传输过程中, 两束光以互相缠绕的方式前进. 如果选择适当的功率、光束间距和倾斜参量, 两束光的传输轨迹在 (X, Y) 平面上的投影会近似成为闭合的圆形; 在保持入射功率和倾斜参量的大小不变的情况下, 如果仅改变光束入射时的间距, 两束光

中心的轨迹在 (X, Y) 平面上的投影依然保持近似圆的闭合形状; 我们通过将光束相互作用与电荷相互作用相类比解释了这种现象. 另外, 我们还研究了远边界效应及初始横向动量的影响, 由于热非局域介质特殊的非线性折射率形成机制, 尽管边界离得很远, 仍然能感受到边界及初始横向动量的影响; 在输入光整体偏离介质中心或两束光倾斜参量的绝对值不相等时整体做振荡传输.

- [1] Snyder A W, Mitchell D J 1997 *Science* **276** 1538
- [2] Guo Q, Luo B, Yi F H, Chi S, Xie Y Q 2004 *Phys. Rev. E* **69** 016602
- [3] Yang Z J, Li S H, Lu D Q, Hu W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4707 (in Chinese) [杨振军, 李少华, 陆大全, 胡巍 2010 物理学报 **59** 4707]
- [4] Yang Z J, Lu D Q, Hu W, Zheng Y Z, Gao X H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124212
- [5] Zheng Y J, Xuan W T, Lu D Q, Ouyang S G, Hu W, Guo Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1075 (in Chinese) [郑亚建, 宣文涛, 陆大全, 欧阳世根, 胡巍, 郭旗 2010 物理学报 **59** 1075]
- [6] Chen L X, Lu D Q, Hu W, Yang Z J, Cao W W, Zheng R, Guo Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 327 (in Chinese) [陈利霞, 陆大全, 胡巍, 杨振军, 曹伟文, 郑睿, 郭旗 2010 物理学报 **59** 327]
- [7] Liang Y B, Zheng Y J, Yang P B, Cao L G, Lu D Q, Hu W, Guo Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5690 (in Chinese) [梁炎斌, 郑亚建, 杨平保, 曹龙贵, 陆大全, 胡巍, 郭旗 2008 物理学报 **57** 5690]
- [8] Jiang Q, Shou Q, Zheng Y J, Liang Y B, Hu W, Guo Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 329 (in Chinese) [江群, 寿倩, 郑亚建, 梁炎斌, 胡巍, 郭旗 2010 物理学报 **59** 329]
- [9] Lu D Q, Hu W 2009 *Phys. Rev. A* **80** 053818
- [10] Lu K Q, Li K H, Zhao W, Zhang Y Q, Zhang M Z, Zhang Y H, Cheng G H, Li K H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024211
- [11] Rotschild C, Segev M, Xu Z, Kartashov Y V, Torner L, Cohen O 2006 *Opt. Lett.* **31** 3312
- [12] Dreischuh A, Neshev D N, Petersen D E, Bang O, Krolikowski W 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 043901
- [13] Rotschild C, Cohen O, Manela O, Segev M, Carmon T 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 213904
- [14] Alfassi B, Cohen O, Manela O, Segev M 2007 *Opt. Lett.* **32** 154
- [15] Rotschild C, Alfassi B, Cohen O, Segev M 2006 *Nature Phys.* **2** 769
- [16] Alfassi B, Rotschild C, Manela O, Segev M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 213901
- [17] Barak A, Rotschild C, Alfassi B, Segev M, Christodoulides D N 2007 *Opt. Lett.* **32** 2450
- [18] Li S H, Yang Z J, Lu D Q, Hu W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024214 (in Chinese) [李少华, 杨振军, 陆大全, 胡巍 2011 物理学报 **60** 024214]
- [19] Iturbe Castillo M D, Stepanov S, Sanchez-Mondragon J J 1996 *Opt. Lett.* **21** 1622
- [20] Agrawal G P (Translated by Jia D F, Yu Z H, Tan B, Hu Z Y) 2002 *Non-linear Fiber Optics and Application of Nonlinear Fiber Optic* (Beijing: Electronic Industry Press) pp34, 35 (in Chinese) [Agrawal G P 著, 贾东方, 余震虹, 谈斌, 胡智勇 译 2002 非线性光纤光学原理及应用 (北京: 电子工业出版社) 第 34, 35 页]
- [21] Teukolsky S A, Vetterling W T, Flannery B P (Translated by Fu Z Y, Zhao M N, Ding Y) 1995 *Numerical Recips in C: The Art of Scientific Computing* (Beijing: Electronic Industry Press) pp734–749 (in Chinese) [Teukosky S A, Vetterling W T, Flannery B P 著, 傅祖芸, 赵梅娜, 丁岩 译 1995 C 语言数值算法程序大全 (北京: 电子工业出版社) 第 734—749 页]

Numerical study of long-range interaction between two beams in (1+2)-dimensional thermal nonlocal media^{*}

Lu Da-Quan[†] Qi Ling-Min Yang Zhen-Jun Zhang Chao Hu Wei

(Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

(Received 29 December 2011; revised manuscript received 24 October 2012)

Abstract

According to the nonlinear Schrödinger equation and Poisson equation of thermal diffusion, we investigate the interaction of double beams in (1+2)-dimension thermal nonlocal medium, using the slip-step Fourier algorithm and multi-grid method. The results show that the two beams intertwine with each other during propagation. If the power and the tilt parameter are appropriate, the projections of the trajectories of the beams in (X, Y) plane are approximately circle, even if the incident distance between the beams is changed. Because of the strongly nonlocal property of thermal medium, the influences of boundaries and initial transverse momentum can be felt when beams are far from the boundaries; there will be an oscillatory propagation when the mass center of the input field deviates from sample center or the initial transverse momentum is unequal to zero.

Keywords: double beams, thermal nonlocal media, interaction

PACS: 42.65.Tg, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.62.064213

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804033, 11174090, 1174091), the Innovative Research Program of Institution of Higher Education of Guangdong Province of China (Grant No. 06CXTD005), and the Specialized Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200805740002).

[†] Corresponding author. E-mail: ludq@scnu.edu.cn