

饱和光纤中的各阶孤子及孤子相互作用

陈陆君 郭 耀 梁昌洪

(西安电子科技大学物理系, 西安 710071)

摘 要 首先研究了非线性饱和光纤中各阶孤子存在的幅值范围, 与标准非饱和情况的非线性薛定谔孤子非常不同, 即一阶孤子幅值范围是 $1.4 \leq N \leq 4.0$, 二阶孤子为 $4.0 \leq N \leq 7.0$, 三阶孤子为 $7.0 \leq N \leq 15.0$, 并分析了各阶孤子的传输特性, 最后研究了双一阶孤子相互作用的若干特点, 明确了五个方面的特性。

关键词 非线性饱和光纤, 孤子相互作用, 孤子传播。

1 引 言

半导体掺杂光纤的非线性特性是光纤开关及光波导领域的重要课题^[1,2], 众所周知, 一般包络用作光开关时, 因相移总与包络强度相关, 因而只能对脉冲作部分开关, Islam 等人^[3]指出, 若用孤子脉冲, 可达到整个脉冲的开关, 因为基本孤子的整个包络的相移是一致的, 因此, 分析半导体掺杂光纤中孤波的传输特性, 有着重要的实际意义。在半导体掺杂光纤中, 非线性是饱和的, 不是克尔(Kerr)型的^[4~5], Kumar 给出了饱和型光纤中脉冲传输方程^[6], 对此方程, Kumar 用不变量方法对高斯脉冲的传播演化作了分析^[7], 作者曾对这个方程的孤子解作了系统的行波分析, 包括暗孤子行波解[见《物理学报》1994, 43(4): 591], 由于对 Kumar 非线性薛定谔方程的高阶孤子及孤子相互作用(多孤子解)作解析分析是不可能的, 因此只能借助数值方法。

2 饱和光纤中各阶 Kumar 非线性薛定谔型孤子

所依据的数学模型是 Kumar 非线性薛定谔方程^[6]

$$\left. \begin{aligned} iu_{\xi} + \frac{1}{2} \sigma u_{\tau\tau} + u \left[1 - \frac{1}{|u|^2} + \frac{\exp(-|u|^2)}{|u|^2} \right] &= 0 \\ u &= A/A_0, \quad \chi = \varepsilon_2/\varepsilon_s \\ \xi &= (kn_2/\chi n_0)\chi, \quad \tau = [kn_2/n_0\chi(-k_{\text{non}})]^{1/2}(t - \chi/v_g) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

非线性电位移矢量 D^{NL} 对 E 的依赖关系是

$$D^{NL}(t) = N(|E|^2)E = \varepsilon_s [1 - \exp(-\chi|E|^2)]E$$

饱和值 ε_s 的选取使得 $\chi|E|^2$ 是无量纲的, 其它参量意义可详见文献[6]。指出一点, 不同饱和

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1993年6月14日; 收到修改稿日期: 1993年9月8日

光纤, 其非线性依赖关系是不同的, 如文献[8~9]分别用到

$$N(|E|^2) \sim 1 - \exp(-|E|^2)$$

和

$$N(|E|^2) \sim \frac{(k^2/2)|E|^2}{1 + [n_3^2/(n_1^2 - n_3^2)]|E|^2}$$

形式的非线性关系。上面的归一化尺度变换使得(1)式对于任意的 x 都适宜, 数值初值设为

$$u(0, \tau) = N \operatorname{sech} \tau \quad (2)$$

或对双孤子

$$u(0, \tau) = N_1 \operatorname{sech}(\tau + \Delta/2) + N_2 \operatorname{sech}(\tau - \Delta/2) \quad (3)$$

由于(1)式中饱和因子, 使非线性项受到很大程度的削弱, 对标准非线性薛定谔方程, (2)式中 $N = 1$ 时, 即可使非线性平衡色散, 使波形保持不变, 但(1)式中的非线性相对弱得多, 因此非线性与色散相平衡的 N 值必定是大于 1 的某一数值, 如果找到了这个值, 就找到了一阶孤子的定义值, 通过扫描搜索, 发现这个值大约在 1.4 左右, 如图 1 所示, $N = 1.2$ 时, 演化是不稳定的, 当 $N = 1.4$ 时, 基本趋于稳定, 但仍有微小起伏, 结合后面的分析可以看到, 所有图中波峰在大约前 2 倍周期 $[2 \times (\pi/2)]$ 范围内(因图中两演化波形的间距 = 3)突然下降, 宽度变宽, 以后便无大的变化, 这是由于这个系统的孤子不是 $N \operatorname{sech}$ 式的波形, 虽然 $N \operatorname{sech}$ 是标准非线性薛定谔方程的纯正孤子, 但不是 Kumar-非线性薛定谔方程的纯正孤子, 它包含了这个系统的非孤子成份, 经过大约 2 周期距离的演化, 非线性成份被抑制, 结果是适应该系统的孤子成份被保留下来, 图中较低而宽的波形才是系统较纯正的孤子脉冲, 用这种较低而宽的波形作为初始输入应该说更好一些, 但这一波形的解析式又难以确定, 然而, 用 sech 函数也不妨碍本文的分析, 因为孤子系统会自动演化成与自己相适应的波形, 这一点可以从图中看到。作者也计算了 $N = 1.0$ 的注入(图略), 结果是传输大约了倍归一化距离后完全消失。于是可以认为 $N < 1.4$ 对应标准非线性薛定谔方程 $N < 1.0$ 的情形, 那么 N 增到

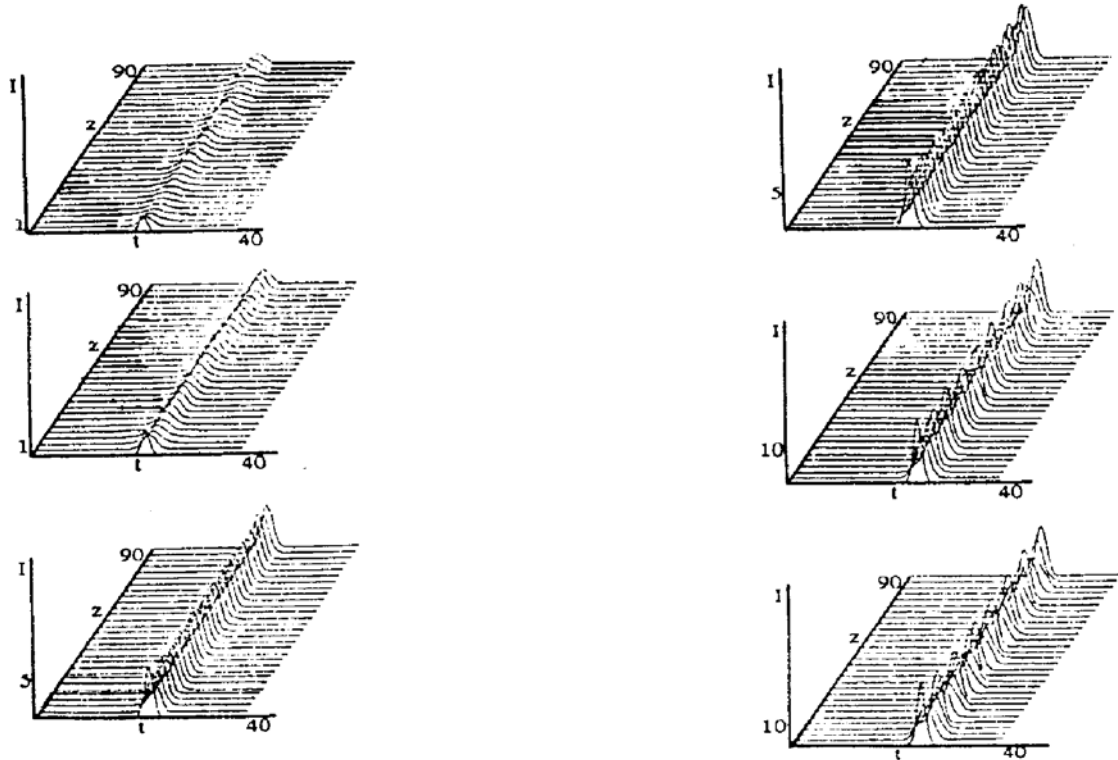


Fig. 1 Evolution of single soliton: (a) $N = 1.2$, (b) $N = 1.4$, (c) $N = 2.6$

Fig. 2 Evolution of single soliton: (a) $N = 3.0$, (b) $N = 4.0$, (c) $N = 5.0$

多少可以认为是二阶孤子呢? 图 2 给出了 $N = 3.0$, $N = 4.0$, $N = 5.0$ 时孤子演化, 可以看到, $N = 3.0$ 时, 还保持稳定传输, 但当 $N = 4.0$ 时开始出现周期性明显抖动, $N = 5.0$ 就更为明显, 因此一阶孤子值域范围是 $1.4 \leq N \leq 4.0$, 作者还模拟了其它 N 注入, 发现在 $2.0 \leq N \leq 2.6$ 范围抖动最小。图 3 给出了 $N = 7.0, 9.0, 12.0$ 时演化, 当 $N = 7.0$ 时基本保持着单个峰值, 而当 $N = 9.0$ 时出现双峰与单峰周期性交替现象, 因此可以说当 $N > 7.0$, 便进入三阶孤子, 或者说二阶孤子范围是 $4.0 \leq N \leq 7.0$ 。图 4 给出了 $N = 13.0, 15.0$ 和 $N = 12.0$ [即图 3(c) 的延长] 的演化, 当 $N = 15.0$ 时出现三个峰值, 可以认为此时进入四阶孤子状态, 因此三阶孤子范围是 $7.0 \leq N \leq 15.0$ 。三阶孤子及四阶孤子演化过程中, 双峰或三峰状态持续时间长, 而且第一次出现的多峰状态所持续的时间几乎是第二次及其以后出现的多峰状态的二倍, 如图 4(c) 所示, 第一次将近传输 90 倍归一化距离, 以后是周期性变化, 持续时间将近 45 倍归一化距离。

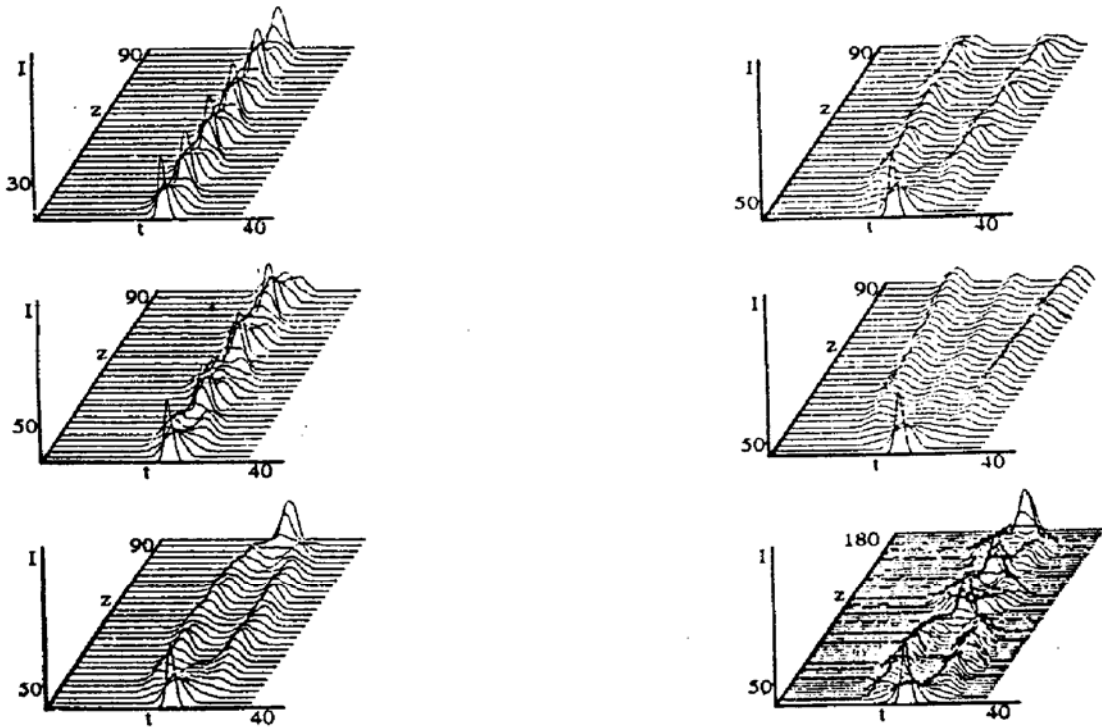


Fig. 3 Evolution of single soliton; (a) $N = 7.0$, (b) $N = 9.0$, (c) $N = 12.0$

Fig. 4 Evolution of single soliton; (a) $N = 13.0$, (b) $N = 15.0$, (c) $N = 12.0$

3 饱和光纤中 Kumar 非线性薛定谔型孤子相互作用

饱和光纤中孤子相互作用与标准非线性薛定谔方程的情况大不相同, 有下面几个特点, 1) 必须有足够的初始间距, 否则, 初始注入可能是上节描述三阶孤子的一个双峰状态, 这当然也要求 N_1, N_2 不很小, 如图 5 中 $N_1 = 2.0, N_2 = 2.0$ 时, 当 $\Delta = 8$ 和 $\Delta = 10$ 时, 都会合并, 再作周期性变化, 但当 $\Delta = 12$ 时, 才出现无相互作用传输。2) 非等幅注入仍能减小相互作用, 图 6 给出了 (a) $N_1 = 2.0, N_2 = 1.7, \Delta = 8$; (b) $N_1 = 2.0, N_2 = 2.3, \Delta = 8$; (c) $N_1 = 2.0, N_2 = 2.3, \Delta = 10$ 的情况, 图 6(a) 与图 5(a) 比较, 初始间距相同, 但其一是吸引合并, 另一个是排斥, 图 6(c) 与图 5(b) 比较, Δ 相同且为 10, 但图 6(c) 已消失相互作用。3) 在一阶等幅孤子的情况下, 可通过控制峰值(在一定范围内提高峰值)来抑制相互作用, 图 7(a),

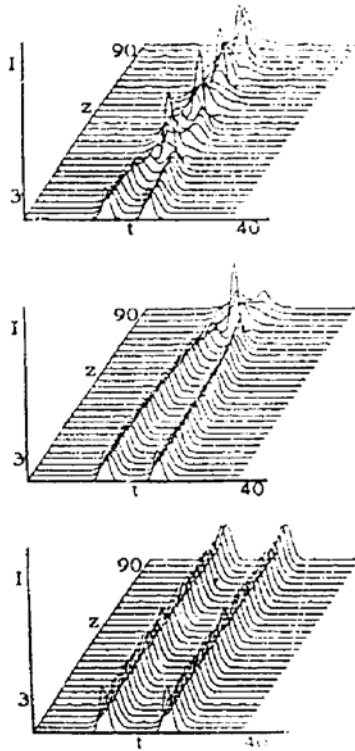


Fig. 5 Interaction of two solitons, $N_1 = N_2 = 2.0$; (a) $\Delta = 8$, (b) $\Delta = 10$, (c) $\Delta = 12.0$

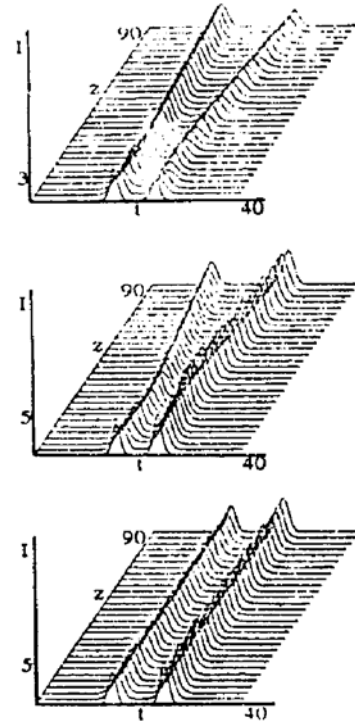


Fig. 6 Interaction of two solitons; $N_1 = 2.0$, (a) $N_2 = 1.7$, $\Delta = 8$, (b) $N_2 = 2.3$, $\Delta = 8$, (c) $N_2 = 2.3$, $\Delta = 10.0$

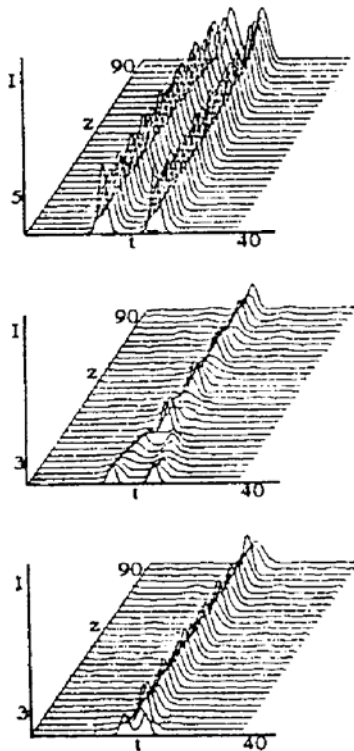


Fig. 7 Interaction of two solitons; (a) $N_1 = N_2 = 3.0$, $\Delta = 10$, (b) $N_1 = N_2 = 1.6$, $\Delta = 8$, (c) $N_1 = 1.6$, $N_2 = 1.6$, $\Delta = 4$

$N_1 = N_2 = 3.0, \Delta = 10$, 与图 5(b)相比 Δ 是相同的,但相互作用被削弱了。4) 峰值小到一定程度, 孤子合并后不再分开, 而且峰值越小, 并合越快, 比较图 5(a), 图 7(b) [$N_1 = N_2 = 1.6, \Delta = 8$], 即可容易看出。5) 通过小幅值近距离双孤子注入可实现单孤子(一阶孤子)稳定传输, 图 7(c) [$N_1 = 1.6, N_2 = 1.6, \Delta = 4$] 给出一例, 双孤子注入可采用双源耦合交替注入, 这样可减小对光源输出功率的要求, 这对实际应用有着重要意义, 尤其对饱和光纤, 从上面光纤已经看到, 产生一阶孤子所需功率比克尔非线性光纤大 2~9 倍。

结 论 本文通过数值模拟 Kumar-非线性薛定谔方程, 研究了各阶孤子存在的幅值区域, 对一阶孤子 $1.4 \leq N \leq 4.0$, 二阶孤子是 $4.0 \leq N \leq 7.0$, 三阶孤子是 $7.0 \leq N \leq 15.0$, 发现高阶孤子的多峰状态持续时间很长。然后研究双一阶孤子的相互作用, 明确了前述五个方面的特性。可以预计, 对于其他类型的非线性饱和光纤, 上述特性及规律也存在的, 只不过是幅值范围有所不同。

参 考 文 献

- [1] D. Cotter, Time-resolved picosecond optical nonlinearity in semiconductor-doped glass. *Electron. Lett.*, 1986, 22 (13): 693~694
- [2] S. Iraj Najafi, M. Belanger, R. Maciejko *et al.*, Switching in nonlinear optical waveguides on semiconductor-doped glasses. *Appl. Opt.*, 1988, 27(5): 806~809
- [3] M. N. Islam, E. R. Sunderman, R. H. Stolen *et al.*, Soliton switching in a fiber nonlinear loop mirror. *Opt. Lett.*, 1989, 14(15): 811~813
- [4] J. Ainslie, H. P. Girdelstone, D. Cotter, Semiconductor-doped fiber waveguides exhibiting picosecond optical nonlinearity. *Electron. Lett.*, 1987, 23(2): 405~406
- [5] D. Cotter, C. N. Ironside, B. J. Ainslie, *et al.*, Picosecond pump-probe interferometric measurement of optical nonlinearity in semiconductor-doped fibers. *Opt. Lett.*, 1989, 14(6): 317~319
- [6] A. Kumar, Dynamical equation for nonlinear pulse propagation in semiconductor-doped glass fibers. *J. Mod. Opt.*, 1991, 38(1): 11~13
- [7] A. Kumar, Invariant of motion method for nonlinear pulse propagation in optical fibers. *Phys. Rev. A.*, 1991, 44 (3): 2130~2134
- [8] Y. Chen, Dark spatial solitons in non-Kerr-law media. *Phys. Rev. A.*, 1992, 45(7): 5215~5219
- [9] M. Karlsson, Optical beam in saturable self-focusing media. *Phys. Rev. A.*, 1992, 46(5): 2726~2734

The Order-Classification and Interaction of Solitons in Nonlinearity-Saturation Optical Fibers

Chen Lujun Guo Yao Liang Changhong

(Physics Department, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 14 June 1993; revised 8 September 1993)

Abstract The amplitude regions for the first, second and third order solitons in nonlinearity-saturation optical fibers and soliton propagating properties are numerically investigated in this paper. Unlike that of the solitons of NLS equation, the amplitude regions for the first, second and third order solitons of the Kumar-NLS equation are $1.4 \leq N \leq 4.0$, $4.0 \leq N \leq 7.0$ and $7.0 \leq N \leq 15.0$, respectively. The interaction properties of the first order solitons are analyzed and five aspects of these properties are understood.

Key words nonlinearity-saturation optical fiber, soliton interaction, soliton propagating.