

электронов от ионов и разделению зарядов на расстояниях порядка длины волны  $k^{-1} \gg d$ , поскольку сила кулоновского взаимодействия в среде с отрицательной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon(\omega) < 0$  изменяет знак. В результате ионный фон выталкивает резонансные электроны к центру ямы, что приводит к усилению начального возмущения.

В заключение подчеркнем, что многомодовый механизм неустойчивости проявляется в неоднородной плазме лишь при наличии надтепловых электронов и сопровождается коллективным преобразованием энергии горячей компоненты плазмы в энергию холодной через посредство поля ленгмюровских колебаний при отрицательном наклоне функции распределения электронов, т.е. в отсутствие направленных потоков электронов в плазме.

Авторы благодарны В.Г. Дорофеенко за полезное замечание.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Ландау Л.Д. - ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 574-586.
- [2] Bohm D., Gross E.P. - Phys. Rev., 1949, v. 75, P. 1864-1871.
- [3] Ахиезер А.И., Файнберг Я.Б. - ДАН СССР, 1949, т. 69, с. 555-562.
- [4] Красовицкий В.Б., Красовицкий Д.В., Моисеев С.С. - Труды международной конференции по физике плазмы, Киев, апрель 1987, с. 41-45. - Красовицкий В.Б., Красовицкий Д.В., Моисеев С.С. Затухание Ландау в неоднородной плазме. ИКИАН, Препринт № 1138, 1986. 13 с.
- [5] Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика, М.: Наука, 1979. 528 с.

Институт космических  
исследований АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
5 марта 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 10

26 мая 1988 г.

### ЭВОЛЮЦИЯ ШУМОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА СОЛИТОНАХ

В.В. Афанасьев, В.Н. Серкин,  
С.А. Шленов

Эффекты самоорганизации оптических волновых пакетов в нелинейных солитонных режимах распространения по волоконным световодам позволяют предложить оптические солитоны огибающей для

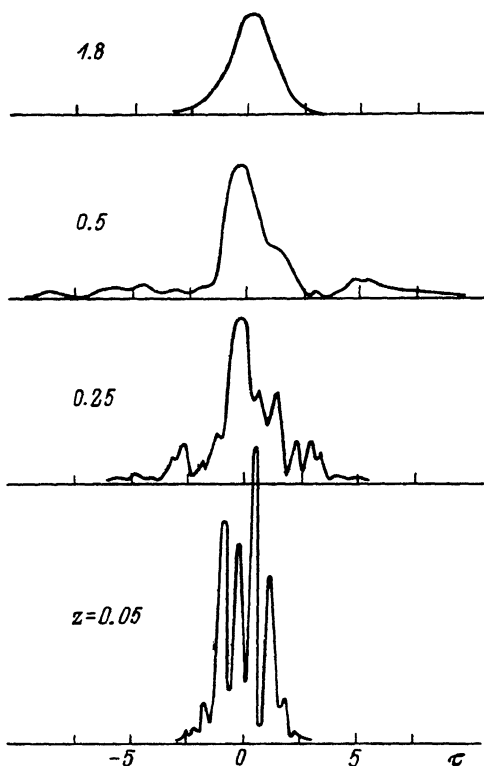


Рис. 1. Эволюция солитонного импульса с шумом при самовоздействии в волоконном световоде с оптическими потерями  $\sigma = 0.5$ ,  $\tau_k = 0.08$ ,  $\gamma_c = 0.06$ .

передачи и хранения информации. Основной проблемой создания волоконно-оптических информационных систем является необходимость компенсации линейных оптических потерь, а также обеспечение высокого значения отношения сигнал-шум. Один из наиболее перспективных методов компенсации потерь энергии сигнала в световоде заключается в использовании ВКР-подкачки [1]. Объединение в волоконном световоде функций передающей среды и усилителя с распределенным по длине коэффициентом усиления позволяет восстановить энергию солитонов чисто оптическими методами, не прибегая к использованию радиотехнических методов ретрансляции сигнала и приступить к созданию динамической оптической памяти на солитонах [2-5].

Предметом настоящего письма является анализ основных закономерностей эволюции шумов в динамической системе с ВКР-усилением оптических солитонов. Показана возможность нелинейной фильтрации солитонной составляющей импульса при его ВКР-усилении в световоде с линейной диссипацией энергии.

Математическое моделирование динамики усиления солитона при наличии шума было выполнено методом Монте-Карло в рамках системы нелинейных уравнений Шредингера для комплексных огибающих импульса накачки  $\Psi_H$  и солитонного импульса  $\Psi_C$  на комбинационной частоте [3]:

$$i \left( \frac{\partial \Psi_C}{\partial z} + v \frac{\partial \Psi_C}{\partial \tau} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Psi_C}{\partial \tau^2} + |\Psi_C|^2 \Psi_C + 2 |\Psi_H|^2 \Psi_C + i g |\Psi_H|^2 \Psi_C - i \gamma_C \Psi_C, \quad (1)$$

$$i \frac{\partial \Psi_H}{\partial z} = - \frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 \Psi_H}{\partial \tau^2} + \beta |\Psi_H|^2 \Psi_H + 2 \beta |\Psi_C|^2 \Psi_H - i g \frac{\omega_H}{\omega_C} |\Psi_C|^2 \Psi_H - i \gamma_H \Psi_H. \quad (2)$$

Здесь  $\Psi_{H,C} = (z_d / z_{H1})^{1/2} E(z, \tau) / E_{C0}$ ,  $z = z / z_d$ ,  $\tau = (t - z/v_H) / \tau_{C0}$ ,  $E_{C0}$  и  $\tau_{C0}$  — начальная амплитуда и длительность солитонного импульса;

$$z_d = \tau_{C0}^2 / |k_C''|, \quad z_{H1} = 2 n_0 / k n_2 E_{C0}^2, \quad \mu_H = |k_H''| / |k_C''|, \\ \beta = |k_H| / |k_C|, \quad v = z_d (v_C^{-1} - v_H^{-1}) / \tau_{C0}.$$

Шумы в рассматриваемой физической системе можно подразделить на привносимые сигналом, связанные, например, с флуктуациями источников, и присущие самой системе — спонтанное рассеяние в световоде.

Рассмотрим динамику ВКР-усиления солитонного импульса со случайной фазовой модуляцией в поле гипергауссова импульса накачки:

$$\Psi_C(z=0, \tau) = \text{sech}(\tau) e^{i\varphi_0(\tau)}, \\ \Psi_H(z=0, \tau) = \varepsilon \exp[-(\tau/\tau_H)^2],$$

где  $\varphi_0(\tau)$  — стационарный гауссовский процесс с нулевым средним значением, дисперсией  $\sigma^2$  и гауссовской корреляционной функцией со временем корреляции  $\tau_k$ .

Рис. 1 иллюстрирует типичную картину эволюции солитонной и шумовой составляющих поля в световоде с линейной диссипацией энергии в отсутствие накачки. На начальном этапе фазовые флуктуации преобразуются в амплитудные. Принципиальной особенностью нелинейной динамики самовоздействия импульсов частично когерентного излучения, имеющих наряду с солитонной и случайную состав-

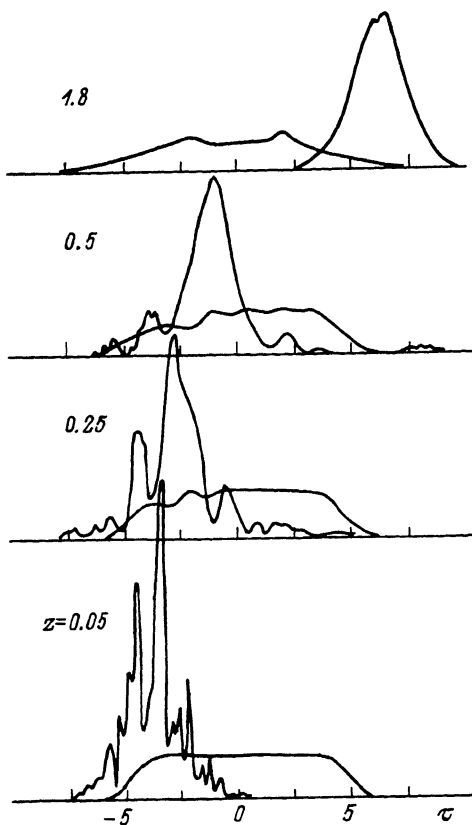


Рис. 2. Эволюция солитонного импульса с шумом при ВКР-усилении в волоконном световоде с оптическими потерями.  $\beta = 0.5$ ,  $\tau_k = 0.08$ ,  $\delta_{с,н} = 0.06$ ,  $\tau_H = 9\tau_{с0}$ ,  $\nu = 4.2$ ,  $\varepsilon = 0.5$ .

ляющую поля, является возникновение эффекта «очистения» солитона от шума [6]. Эффект «сбрасывания шумовой шубы» солитонном объясняется качественно различной динамикой спектральных компонент, соответствующих солитонной и шумовой составляющим поля. В спектре солитона все частотные компоненты поля сфазированы и «распространяются» с одинаковой групповой скоростью. Компоненты шумовой составляющей поля имеют случайное распределение фаз, спектр шума достаточно широк и основная доля его энергии не попадает в область солитонного спектра. Это и приводит к «разбеганию» шумовых спектральных компонент в импульсе. Часть энергии шумовой составляющей захватывается формирующимся солитоном и изменяет его статистические характеристики [7].

Отметим, что процесс фильтрации сопровождается ухудшением энергетических характеристик сигнала вследствие поглощения. Поэтому основным вопросом является выяснение характера эволюции шумов и сигнала при ВКР-усилении солитона.

Из результатов численных экспериментов следует, что при ВКР-усилении солитонных импульсов со случайной амплитудно-фазовой модуляцией обеспечивается как сохранение энергетических параметров солитона, так и его очищение от шума (рис. 2). Тем самым в рассматриваемой системе может быть решена двуединая задача: компенсация линейных потерь и сохранение высокого значения отношения сигнал/шум. Приведем оценку параметров, при которых можно экспериментально наблюдать рассмотренные эффекты. При использовании световодов со смещенной дисперсией ( $\lambda_0 = 1.5$  мкм) для солитона длительностью  $\tau_{co} = 10$  пс, временем корреляции шума  $\tau_k \approx 1$  пс, длиной волны 1.55 мкм и параметрами  $k_c'' =$

$$= 2 \cdot 10^{-29} \text{ с}^2/\text{см}, \quad Z_d = \tau_{co}^2 / k_c'' = 5 \cdot 10^6 \text{ см}, \quad I_c = \frac{2n_0 k_c''}{\tau_{co}^2 k_c n_2} \approx$$

$$\approx 3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2 \text{ при } S_{эфф} = 30 \text{ мкм}^2 \text{ мощность солитона составит}$$

$$P_c = I_c S_{эфф} = 9 \text{ мВт}, \text{ а мощность накачки } P_H \approx 2 \text{ мВт. Восстановление солитона происходит на длине } L \approx 100 \text{ км.}$$

Следует также отметить, что рассматриваемый эффект „сбрасывания шумовой шубы” солитоном будет иметь место и в солитонных лазерах, приводя к формированию малоинтенсивных импульсов-предвестников, в которых сосредоточена основная доля энергии шумов. Поэтому для снижения уровня шумов в солитонных лазерах целесообразно использовать спектральный фильтр для подавления высокочастотных крыльев спектра.

Авторы выражают глубокую благодарность М.В. Беловолу и Е.М. Дианову за стимулирующие дискуссии.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Р и в л и н Л.А. – Квантовая электроника, 1976, т. 3, с. 1611.
- [2] H a s e g a w a A. – Appl. Opt., 1984, v. 23, p. 3302.
- [3] Д и а н о в Е.М., Н и к о н о в а З.С., П р о х о р о в А.М., С е р к и н В.Н. – ДАН СССР, 1985, т. 283, с. 1342.
- [4] M o l l e n a u e r L.F., G o r d o n J.P., I s l a m M.N. – IEEE J. of Quantum Elect., 1986, QE-22, p. 157.
- [5] Б е л о в о л о в М.И., Д и а н о в Е.М., П р о х о р о в А.М. – Тез. докл. Ш Всесоюзной конференции по вычислительной оптоэлектронике „Проблемы оптической памяти”, Ереван, 1–3 ноября 1987 г., ч. 1, с. 9.
- [6] Ш л е н о в С.А. – Автореф. канд. дисс., М.: МГУ, 1986, 186 с.

[7] В ы с л о у х В.А., И в а н о в А.В., Ч е р е д н и к И.В.-  
Изв. вузов, Радиофизика, 1987, т. 30, с. 980.

Институт общей физики  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
5 января 1988 г.