

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА РАМАНОВСКОГО САМОПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ НА ДИНАМИКУ УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ

В.В. Афанасьев, Е.М. Дианов, В.Н. Серкин

Предложена математическая модель для описания усиления солитонов в активных волокнах и исследован эффект подавления ВКР-сдвига частоты солитона за счет ограниченной полосы усиления. Показано, что полное подавление частотного сдвига возможно только при балансе усиления и поглощения.

Проблема передачи информации оптическими солитонами на большие расстояния выдвинула в число актуальных задачу их усиления. Одним из самых впечатляющих достижений в этой области стало создание лабораторных макетов линий связи с эрбиевыми усилителями и передача последовательности солитонов в таком макете на расстояние порядка 10000 км /1/. В данной работе предложена математическая модель усиления солитонов в активных волоконных световодах, учитывающая такие эффекты, как спектральную ограниченность усиления, изменение дисперсии под линией усиления, сложную форму линии усиления (несколько пиков). Основное внимание уделено эффекту подавления ВКР-саморассеяния солитонов за счет ограниченности полосы усиления /2/. Показано, что для эрбиевых усилителей этот эффект носит нестационарный характер — возможно лишь относительное уменьшение сдвига частоты солитона на конечных длинах.

Распространение импульса субпикосекундной длительности в волоконном усилителе с резонансными двухуровневыми примесями может быть описано в рамках системы уравнений для электрического поля u , нелинейной добавки к показателю преломления δn_{eff} за счет керровской (δn_K) и рамановской (δn_R) нелинейностей в стекле и двухуровневой поляризации частиц активной среды P /3, 4/:

$$\begin{aligned} i\partial u/\partial z &= (1/2)\partial^2 u/\partial t^2 + i\Gamma P + \delta n_{\text{eff}}u, \\ \mu^2 \partial^2 \delta n_R/\partial t^2 + 2\gamma\mu \partial \delta n_R/\partial t + \delta n_R &= \beta_R |u|^2, \\ \beta_i \partial P_i/\partial t + P_i (1 + i \Delta\Omega_i \beta_i) &= u, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P = \sum P_i$, $\delta n_{\text{eff}} = \delta n_K + \delta n_R$, $\delta n_K = (1 - \beta_R) |u|^2$. Система (1) записана в стандартных солитонных переменных,¹ подробно описанных, например, в /3/. Линия усиления моделируется как суперпозиция лоренцевских линий, каждая со своей шириной β_i и расстройкой $\Delta\Omega_i$ между частотой i -го пика линии усиления и центральной частотой солитона. От системы (1) можно перейти к модифицированному нелинейному уравнению Шредингера, записав по-иному члены, описывающие ВКР-саморассеяние и усиление:

$$i\partial u/\partial z = (1/2)\partial^2 u/\partial t^2 + i\Gamma \left[u + \beta^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right] + u |u|^2 - t_d u \partial |u|^2/\partial t, \quad (2)$$

где $t_d = 2\gamma\mu\beta_R / 3$. В (2) усиление описывается членом в квадратных скобках. При такой замене спектральный контур линии усиления, в системе (1) имеющий лоренцевскую форму (положительную для всех значений частоты), аппроксимируется параболой $1 - \beta^2 \omega^2$, имеющей отрицательные "хвосты" при $|\omega| > 1/\beta$, т.е. поглощение. Предполагается, что входной солитон имеет форму $\text{sech } t$, его спектр соответственно имеет форму $\text{sech } \omega$, и какая-то доля спектра всегда попадает в область отрицательного усиления. ВКР-саморассеяние приводит к смещению центральной частоты солитона ω в стоксову область

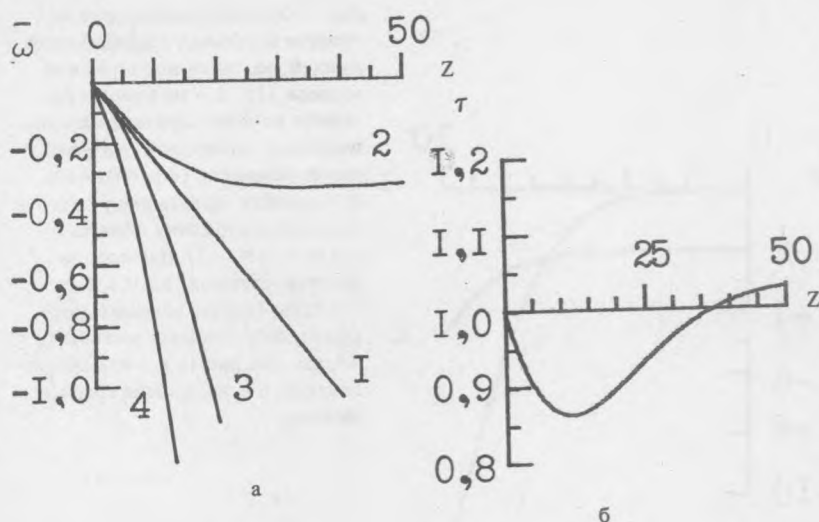


Рис. 1. а) Изменение средней частоты солитона при распространении в слабоусиливающем волокне (параметры взяты из работы /2/: $\beta = 1,5$, $t_d = 0,05$, $\Gamma = 0,025$). Кривые 1–3 рассчитаны в модели (2); 1 – без усиления, 2 – с усилением, 3 – с "обрезанной" параболой, кривая 4 – расчет в рамках модели (1). Параметры рамановского самопреобразования частоты (обозначения см. в /3/): $\tilde{\gamma} = \gamma k_1$, $\tilde{\beta}_R = \beta_R k_2$, $\mu = 75/(2\pi\tau_0)$, $\gamma = 0,28$, $\beta_R = 0,095$, $k_1 = 0,85$, $k_2 = 2,5$, где $\tau_0 = \tau_{FWHM}/1,76$, τ_{FWHM} – полная длительность импульса по полувысоте, измеренная в фемтосекундах, $\tau_0 = 237,5$ фс. б) Изменение длительности солитона по длине волокна для случая 2, рассчитанное в рамках системы (5), (6) из /2/.

спектра, при этом все большая часть спектра попадает в область поглощения. Поэтому пользоваться заменой (2) можно при $\beta \ll 1$ и $\beta\omega < 1$. Кроме того, переход от осцилляторной модели рамановского самопреобразования частоты (второе уравнение системы (1)) к дебаевской модели релаксации нелинейного отклика (2) требует, чтобы эффективный параметр релаксации t_d был также достаточно мал.

В /2/ найдено стационарное решение уравнения (2), описывающее эффект подавления ВКР-самопреобразования частоты солитона. Под "подавлением" подразумевается такая ситуация, когда по мере распространения импульса его средняя частота смещается от начального значения в стоксову область (ВКР-саморасcеяние), однако на определенной длине частота стабилизируется, и при дальнейшем распространении остается практически неизменной.

Нами проведено численное решение уравнения (2) при параметрах из /2/, а также рассчитан вариант с "обрезанной" параболой усиления (рис. 1а). В последнем случае слагаемое в квадратных скобках в (2) полагалось равным нулю, если оно становилось отрицательным. При этом эффекта подавления не было обнаружено. Расчет в рамках системы (1) дает лишь количественные отличия от "обрезанной" параболы, в то время как кривые для "полной" и "обрезанной" парабол отличаются качественно. Было также проанализировано изменение длительности солитона по длине световода. Приведенную на рис. 1б зависимость $\tau(z)$ можно объяснить тем, что в начале трассы импульс усиливается, при этом его длительность уменьшается, спектр смещается в стоксову область и одновременно уширяется, большая часть спектра импульса оказывается в области "отрицательного" усиления, поглощается, и длительность вновь возвращается к значению, близкому к исходному. Формулы (9) и (10) из /2/ дают для установившихся значений длительности $\tau_f = 1,013$ и $\omega_f = -0,346$.

Таким образом, показано, что стационарное состояние для испытывающих ВКР-саморасcеяние солитонов возможно только при балансе усиления и поглощения различных спектральных компонент. В этом случае благодаря способности солитона к самоорганизации происходит перераспределение энергии между частями спектра, а интегральные характеристики солитона (длительность, средняя частота) остаются неизменными. Отметим, что для объяснения эксперимента /5/ видимо следует учитывать эффект кросс-модуляции, как это сделано в /6/.

Одним из основных результатов численных расчетов, выполненных в рамках более общей модели (1), является обнаружение возможности уменьшения ВКР-сдвига частоты солитона при размещении его спектра в стоксовой области относительно центра линии усиления (рис. 2). Из сравнения хода кривых видно, что, например, для усиления (по энергии) в 3 раза расстояние в случае нулевой расстройки составит 6,2 дисперсионной длины и 7,7 дисперсионной длины при смещении $\omega(z=0) = -2$. Но при этом удается уменьшить частотный сдвиг с 1,71 до 0,597.

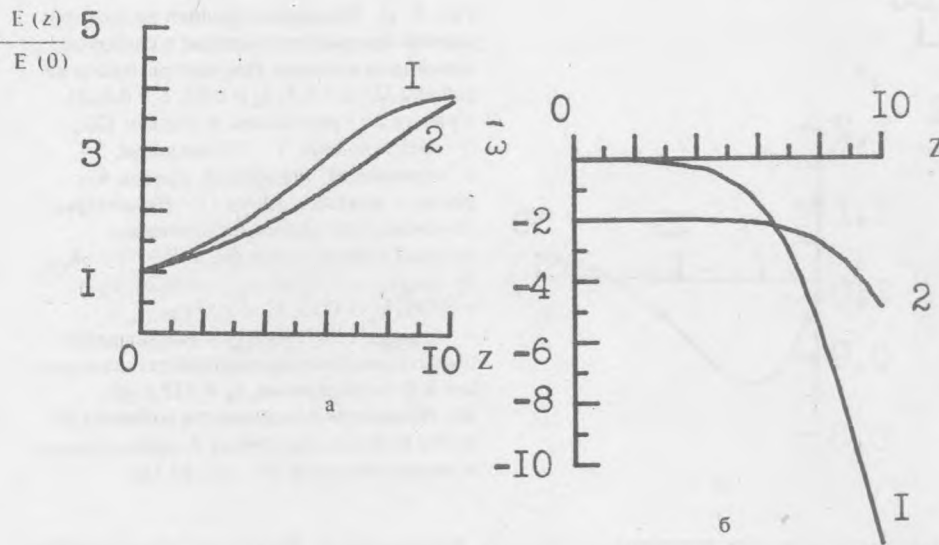


Рис. 2. Усиление солитона в активном волокне с лоренцевской линией, рассчитанное в рамках модели (1): 1 – на входе в активное волокно средняя частота импульса совпадает с центром линии усиления ($\omega(z=0) = 0$); 2 – средняя частота импульса смещена в стоксову область ($\omega(z=0) = -2$). Параметры расчета усиления: $\beta = 0,3$, $\Gamma = 0,1$; параметры рамановского самопреобразования частоты те же, что для рис.1; а – изменение энергии, б – изменение средней частоты.

Возможность частичного подавления ВКР-сдвига частоты оптического солитона в процессе его усиления в активном световоде может быть использована при разработке солитонных систем передачи и хранения информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mollenauer L.F. et al. CLEO'90, PDP 17-1, p. 633.
2. Blow K.J. et al. J. Opt. Soc. Am. B, 5, 1301 (1988).
3. Afanasyev V.V. et al. Opt. Lett., 15, 489 (1990).
4. Blow K.J., Wood D. IEEE J. of Quantum Electron., 25, 2665 (1989).
5. Gouveia - Neto A.S. et al. Opt. Lett., 14, 514 (1989).
6. Schadt D., Jaskorzynska B. J. Opt. Soc. Am. B, 5, 2374 (1988).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 25 августа 1990 г.