

07

© 1990

УСИЛЕНИЕ И КОМПРЕССИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ В АКТИВНЫХ ВОЛОКНАХВ.В. Афанасьев, Е.М. Дианов,  
А.М. Прохоров, В.Н. Серкин

Стекланные волоконные световоды, активированные редкоземельными ионами и накачиваемые полупроводниковыми лазерами, сыграли не только ключевую роль в разработке и создании лабораторных макетов солитонных волоконно-оптических систем передачи и хранения информации (см., например, [1, 2]), но и предоставили уникальные возможности для развития новых методов генерации и усиления оптических солитонов [3]. Целью настоящей работы является анализ предельных возможностей активных световодов как усилителей и компрессоров оптических солитонов фемтосекундного диапазона длительностей. Рассмотрены качественно различные динамические режимы усиления солитонов и установлены зависимости коэффициентов усиления и максимальных степеней сжатия солитонов от параметров волоконных световодов и входных импульсов.

Математическая модель процесса распространения фемтосекундных импульсов в стекланных волоконных световодах с резонансно-усиливающими примесями требует корректного учета эффектов, связанных как с безинерционным керровским, так и с существенно инерционным рамановским вкладом в нелинейность стекла. Причем, так как период молекулярных колебаний в кварцевых стеклах составляет величину порядка 75 фс, то применение метода медленно меняющихся амплитуд (ММА) в теории ВКР фемтосекундных импульсов оказывается принципиально невозможным [4, 5]. В то же время, как показано в [6], ММА хорошо „работает“ в теории резонансного усиления фемтосекундных импульсов вплоть до длительностей порядка нескольких периодов колебаний поля. Обобщение подходов, развитых в [4-6], приводит к системе динамических уравнений, описывающих процесс усиления фемтосекундных импульсов в активных световодах:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} + i \frac{G}{2} \rho + \delta n_{\text{eff}} \psi + O(T_0/\tau_0); \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{amp}} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho (1 + i(\omega - \delta \Omega_0)) = \psi; \quad (2)$$

$$\mu^2 \frac{\partial \delta n_{\text{Ram}}}{\partial \tau^2} + 2 \gamma_{\text{Ram}} \mu \frac{\partial \delta n_{\text{Ram}}}{\partial \tau} + \delta n_{\text{Ram}} = \beta |\psi|^2; \quad (3)$$

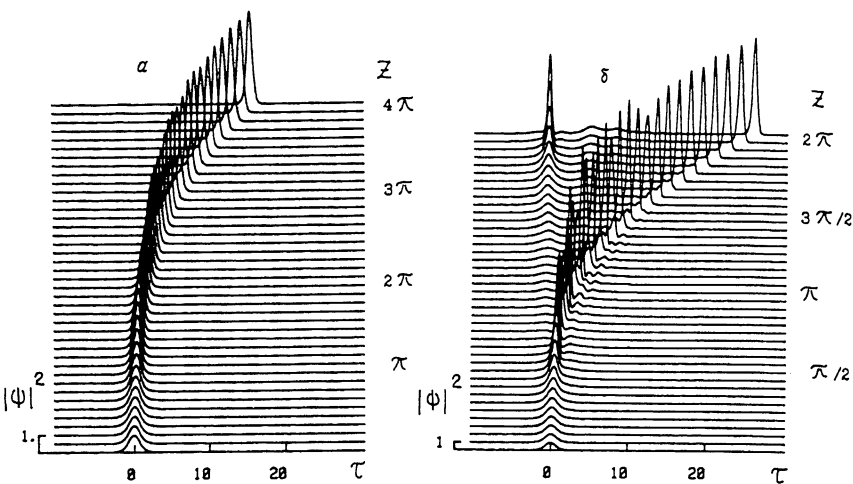


Рис. 1. Адиабатический (а) и неадиабатический (б) режимы усиления солитонов. Параметры  $\tau_0 = 100$  фс,  $T_2 = 100$  фс,  $G = 0.2$  (а),  $G = 1.0$  (б).

$$\delta n_{eff} = \delta n_{Kerr} + \delta n_{Ram}; \quad \delta n_{Kerr} = (1 - \beta) |\psi|^2;$$

$$O(T_0/\tau_0) = \frac{T_0}{\pi \tau_0} \left( i \delta \frac{\partial^3 \psi}{\partial \tau^3} - i \frac{\partial}{\partial \tau} (\delta n_{eff} \psi) - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial \tau} \right).$$

Система (1-3) записана в стандартных „солитонных“ переменных [5], где  $\rho$  – поляризация активных частиц,  $G$  – безразмерный коэффициент усиления,  $\gamma_{amp} = T_2/\tau_0$  – параметр, характеризующий соотношение ширин спектра импульса и линии усиления,  $\tau_0$  – начальная длительность импульса,  $T$  – период оптических колебаний поля. Остальные параметры подробно описаны в [5]. Модель (1-3) без труда обобщается на случай неоднородного уширения активного и комбинационного резонансов.

Анализ данных численного эксперимента, выполненного в рамках модели (1-3), позволяет классифицировать основные возможные режимы усиления солитонов в активных световодах. В режиме, близком к адиабатическому ( $G \leq 1$ ), энергия солитона экспоненциально нарастает, форма его временной и спектральной огибающих близка к  $\text{sech}^2$  (рис. 1, а). Совместное действие рамановского самопреобразования частоты и аномальной дисперсии групповой скорости вблизи резонансного перехода приводят к выходу спектра солитона из-под линии усиления. Результатом этого процесса является распад спектральной плотности мощности на солитонную компоненту, непрерывно сдвигающуюся в стоксову область спектра и несолитон-

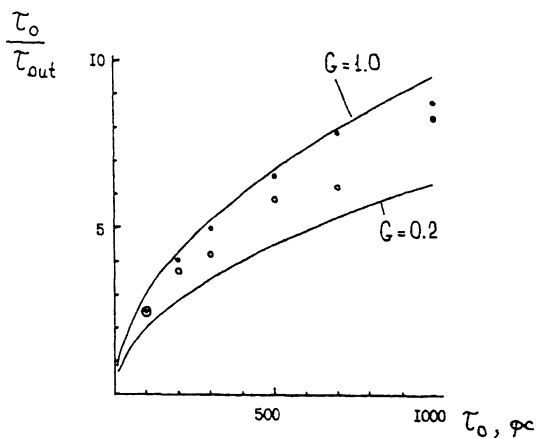


Рис. 2. Зависимость степени компрессии солитонов от начальной длительности  $\tau_0$  при  $G = 0.2$  (а),  $G = 1.0$  (б), вычисленная по формуле (4). Точки - данные численного эксперимента.

ную, остающуюся на частоте начального импульса. В пространственно-временном представлении это соответствует формированию „окрашенного“ ВКР-солитона, частота которого смещается в „красную область спектра“. Процесс усиления и компрессии солитона заканчивается, когда его спектр выходит из-под линии усиления. Из условия перекрытия спектра солитона со спектральной полосой усиления нетрудно получить оценку предельных степеней усиления и компрессии солитонов в активных волокнах:

$$I_{out}/I_0 \approx (15\tau_{0g}^4 / T_{Ram} k'' \omega'' T_2)^{1/2}; \quad (4)$$

$$\tau_0 / \tau_{out} \approx (I_{out} / I_{inp})^{1/2}.$$

Для удобства анализа соотношения (4) записаны в размерных физических переменных в стандартных обозначениях, где  $T_{Ram} = 6$  фс - характерное время нелинейного отклика [5]. Предельная длительность формируемых солитонов определяется простым соотношением параметров:

$$\tau_{min} \approx (T_{Ram} k'' \omega'' T_2 / 15g)^{1/4}. \quad (5)$$

При типичных значениях:  $k'' \omega'' = 2 \cdot 10^{-28}$  с<sup>2</sup>/см,  $T_2 = 100$  фс и усилении на единицу длины  $g = 10^{-2}$  см<sup>-1</sup> следует ожидать формирования солитонов длительностью  $\tau_{min} = \tau_{out} = 30$  фс, а уже при  $g = 16 \cdot 10^{-2}$  см<sup>-1</sup> возможна генерация солитонов  $\tau_{min} = \tau_{out} = 15$  фс, содержащих всего три оптических периода колебаний поля.

При увеличении коэффициента усиления ( $G \geq 1$ ) существенную роль начинает играть рост энергии несолитонной составляющей поля,

сопровождающийся формированием новых импульсов (см. рис. 1, б). Как показывает численный эксперимент, начиная со значений  $G = 2-5$ , результатом усиления одиночного солитона является формирование „вспышки солитонного шума” — последовательности сильно взаимодействующих солитонных импульсов [3].

Численный эксперимент позволяет оценить предельные степени компрессии и усиления фемтосекундных солитонов в активных световодах как функции их первоначальной длительности (рис. 2). Из анализа полученных результатов вытекают следующие рекомендации по генерации в активных световодах солитонов предельной длительности. Для достижения максимальных пиковых интенсивностей и минимальных длительностей усиливаемых солитонов целесообразно использовать режим усиления, близкий к адиабатическому, а длину световода подбирать в соответствии с условием выхода на стационарный режим (см. рис. 1, а). Предельные параметры формируемых импульсов и их зависимости от условий эксперимента достаточно хорошо описываются формулами (4-5). Однако полученный таким образом солитон оказывается смещенным по частоте в стоксову область спектра. Подчеркнем, что, согласно (5), предельная длительность формируемого солитона  $\tau_{min}$  не зависит от параметров начального импульса, а является функцией только основных параметров световода. Это позволяет предложить процесс каскадного ВКР в активных световодах для генерации солитонов предельной длительности  $\tau_{min}$  при накачке излучением широко распространенных лазеров на гранате и неодимовом стекле аналогично методам ВКР-генерации солитонов в пассивных световодах [7]. В том случае, когда требуется многократное усиление, например в солитонных информационных системах [1, 2], необходимо обеспечить сохранение центральной частоты импульса. Рамановский сдвиг частоты солитона можно компенсировать за счет аномальной дисперсии резонансного перехода, смещая частоту усиливаемого солитона в стоксову область по отношению к центру линии усиления [8]. Подробное рассмотрение этой возможности будет представлено в отдельной работе.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] M a s a t a k a N a k a z a w a. Ultrafast Phenomena Topical Meeting. Monterey, CA, (USA), May 14-17, 1990. Technical Digest Series. V. 6. Washington, D.C. P. 232-233.
- [2] M o l l e n a u e r L.F., N e u b e l t M.J., E v a n g e l i d e s S.G., G o r d o n G.P., S i m p s o n J.R., C o h e n L.G. Conference on Lasers and Electro-Optics. Anaheim, CA (USA), May 21-25, 1990. Postdeadline papers. Washington, D.C. P. 633-635.
- [3] Г р у д и н и н А.Б., Д и а н о в Е.М., К о р о б к и н Д.В., М а к а р е н к о А.Ю., П р о х о р о в А.М., Х р у щ е в И.Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51, В. 3, С. 121-124.

- [4] В ы с п о у х В.А., П е т р о в а И.Ю., М а т в о е в А.Н. // Вестник МГУ, сер. 3 (физика, астрономия). 1990. Т. 31. № 1. С. 40-44.
- [5] А ф а н а с у е в V.V., В у с л и с к и х V.A., S e r k i n V.N. // Opt. Lett. 1990. V. 15. N 9. P. 489-491.
- [6] А з а р е н к о в А.Н., А л ь т ш у л л е р Г.Б. // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 67. В. 5. С. 1099-1104.
- [7] Г р у д и н и н А.Б., Д и а н о в Е.М., К о р о б к и н Д.В., Х а й д а р о в Д.В. // Тр. ИОФАН. 1990. Т. 23. С. 3-26.
- [8] B l o w K. J., D o r a n N. J., W o o d D. // J. Opt. Soc. Am. B. 1988. V. 5. N 6. P. 1301-1304.

Поступило в Редакцию  
18 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 18

28 сентября 1990 г.

02; 12

© 1990

## НЕПРЕРЫВНЫЙ СТРУЙНЫЙ ГЕНЕРАТОР СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА

М.В. З а г и д у л л и н, А.Ю. К у р о в,  
В.Д. Н и к о л а е в, В.М. П и ч к а с о в,  
М.И. С в и с т у н

В качестве энергоносителя, осуществляющего накачку атома йода, в химическом кислородно-йодном лазере ХКЛ, используется синглетный кислород  $O_2(^1\Delta)$ , получаемый в газожидкостной реакции хлорирования щелочного раствора перекиси водорода. В получивших наибольшее распространение барботажных [1] и пленочных [2] генераторах  $O_2(^1\Delta)$  давление синглетного кислорода, как правило, не превышает нескольких мм рт. ст. Для создания компактных высокорасходных генераторов  $O_2(^1\Delta)$  с давлением  $> 10$  мм рт.ст. предложено использовать струйные генераторы синглетного кислорода (ГСК) [3].

Первые исследования струйного ГСК проводились для импульсного режима, когда струи щелочного раствора  $H_2O_2$  простреливаются через объем с неподвижным газообразным хлором [4]. В данной работе сообщаются результаты исследований непрерывного струйного ГСК, в котором поток хлора прокачивается навстречу струям рабочего раствора.

Экспериментальная установка состоит из струйного генератора, вакуумного насоса с азотной ловушкой, системы для измерения концентраций  $O_2(^1\Delta)$ ,  $Cl_2$ , массового расхода  $Cl_2$ , давления газовой смеси, температуры рабочего раствора.