

ЭФФЕКТ КОМБИНАЦИОННОГО САМОПРЕОБРАЗОВАНИЯ СПЕКТРА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ И ЕГО ПОДАВЛЕНИЕ В СВЕТОВОДАХ И СОЛИТОННЫХ ЛАЗЕРАХ

А.Г.Булушев, Е.М.Дианов, О.Г.Охотников, В.Н.Серкин

Институт общей физики АН СССР
117942, Москва

Поступила в редакцию 31 октября 1991 г.

Показано, что инверсия знака дисперсии групповой скорости в комбинационно-активной нелинейной диспергирующей среде приводит к "гашению" молекулярных колебаний и эффективному подавлению эффекта комбинационного саморассеяния фемтосекундных солитонов.

В работах ^{1,2} был открыт новый нелинейно-оптический эффект, получивший название ВКР - самопреобразование спектра оптических солитонов - Soliton Raman self-frequency shift. Этот эффект часто называют также вынужденным комбинационным саморассеянием солитона, (ВКС) подчеркивая тем самым необычность режима ВКР фемтосекундного импульса, спектр которого захватывает полосу колебательных резонансов среды, так что сдвинутая на частоту молекулярных колебаний стоксова спектральная компонента поля уже содержится в самом импульсе накачки. Усиление низкочастотных (стоксовых) компонент в поле более высокочастотных (антискосовых) спектральных компонент одного и того же солитонного импульса приводит к непрерывному смещению его спектра, величина которого при типичных условиях эксперимента составляет $\frac{df}{dz} = 0,082/\tau_0^4$ ТГц/км, где τ_0 - длительность солитона, измеряемая в пикосекундах ³.

Создание лабораторных макетов солитонных волоконно-оптических линий связи с дальностью передачи оптических солитонов от 10 тыс.км до 1 млн.км и скоростью передачи информации от единиц до десятков Гбит/с (см. ⁴ и приведенную в ней литературу) выдвинуло проблему подавления эффекта ВКС солитона в число наиболее актуальных, т.к. именно этот эффект препятствует освоению терабитного диапазона скоростей передачи информации и ограничивает длительность генерируемых импульсов в солитонных фемтосекундных лазерах. До настоящего времени в литературе предложен только один метод подавления ВКС, основанный на введении в передающую среду (волоконный световод) резонансных оптических потерь излучения ⁵ в стоксовой области.

В данной работе предложен метод подавления эффекта ВКР - саморассеяния оптического солитона, заключающийся в такой трансформации фазовых соотношений его частотных компонент, которая препятствует эффективному возбуждению волны молекулярных колебаний. Показано, что условия необходимые для подавления ВКС, могут быть реализованы в средах с инверсией знака на спектральной зависимости дисперсии групповой скорости.

Распространение интенсивного волнового пакета в нелинейной комбинационно-активной диспергирующей среде будем рассматривать в рамках квазиклассического приближения теории ВКР ^{6,7}

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{lin}}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{Kerr}}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} N \frac{\partial \alpha}{\partial Q} \frac{\partial^2 (QE)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \frac{2}{T_{2Ram}} \frac{\partial Q}{\partial t} + \Omega_R^2 Q = \frac{1}{2m} \frac{\partial \alpha}{\partial Q} n_v E^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_v}{\partial t} + \frac{n_v - 1}{T_{1Ram}} = \frac{1}{2\hbar\Omega_R} \frac{\partial \alpha}{\partial Q} E^2 \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (3)$$

Система (1-3) записана в стандартных переменных. Здесь E - электрическое поле световой волны, P_{lin} и P_{Kerr} - линейный нерезонансный и электронный нелинейный (керровский) вклад в поляризацию среды. Молекулярный (рамановский) вклад в нелинейную поляризацию пропорционален амплитуде молекулярных колебаний Q . Динамика волны вынужденных молекулярных колебаний определяется из системы уравнений (2-3), в которой m - эффективная масса молекул, Ω_R - резонансная рамановская частота, время T_{2Ram} связано с шириной линии спонтанного комбинационного рассеяния соотношением $T_{2Ram} = \frac{1}{\pi c \Delta \nu_{Ram}}$. Уравнение (3) описывает кинетику населенностей n_v , основного и первого возбужденного колебательного уровня молекулы, T_{1Ram} - характерное время релаксации колебательного возбуждения.

Традиционный подход в теории ВКР базируется на методе медленно меняющихся амплитуд и предположении, что спектры взаимодействующих волн достаточно далеко разнесены по частоте и не перекрываются. В рассматриваемой задаче саморассеяния фемтосекундного импульса этот подход в принципе не применим.

В нестационарном случае без инверсии населенностей $n_v = 1$ амплитуды фурье-компонент нелинейной поляризации на частоте $\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ согласно (1, 2) можно найти из выражения:

$$P_{Ram}(\omega, z) = N \left(\frac{\partial \alpha}{\partial Q} \right)^2 \frac{1}{8\pi^2 m} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E(\omega_1) E(\omega_2) E(\omega_3) d\omega_1 d\omega_2 e^{i\Delta k z}}{\Omega_R^2 - (\omega_1 + \omega_2)^2 + \frac{2i}{T_{2Ram}} (\omega_1 + \omega_2)}, \quad (4)$$

где $\Delta k = k(\omega) - k(\omega_1) - k(\omega_2) - k(\omega_3)$.

Вклад в нелинейную поляризацию (4) определяется конкуренцией двухфотонных процессов ВКР ($\omega_1 = \omega - \omega_2 + \omega_3$; $\omega_2 = \omega - \omega_1 + \omega_3$) и вынужденных четырехфотонных параметрических процессов ($\omega_a = 2\omega_1 - \omega_2$; $\omega_s = 2\omega_2 - \omega_1$) при $\omega_1 - \omega_2 = \Omega \approx \Omega_R$. Как следует из (4) для эффективного резонансного возбуждения волны молекулярных колебаний в поле одного и того же импульса накачки, содержащего спектральные компоненты $\omega_1, \omega_2, \omega_a$ и ω_s , необходимо выполнение двух условий:

1. Спектр возбуждающего импульса захватывает полосу колебательных резонансов среды. Это означает, что длительность возбуждающего импульса должна быть сравнима с периодом молекулярных колебаний среды.
2. Фазы спектральных компонент в импульсе должны быть синхронизованы. Противофазные спектральные компоненты приводят к "гашению" молекулярных колебаний.

Синхронизация фаз отдельных спектральных компонент в импульсе реализуется при солитонном режиме его распространения в нелинейной диспергирующей среде с отрицательной дисперсией групповой скорости. Именно в солитонном режиме, дисперсионная расстройка фаз спектральных компонент импульса в точности компенсируется нелинейными эффектами, так что фаза солитона постоянна для всей его временной огибающей и линейно зависит от длины среды. Наоборот, в области положительной дисперсии групповой скорости фазовая самомодуляция излучения и дисперсия приводят к дополнительному рассогласованию фаз спектральных компонент в импульсе и ВКС эффективно подавляется.

Таким образом, в качестве эффективного метода подавления ВКС может быть предложен метод, основанный на инверсии знака дисперсии групповой скорости. Практическая реализация метода не вызывает затруднений для волоконных световодов, т.к. комбинируя вклады материальной и волноводной дисперсий (за счет изменения профиля показателя преломления по сечению световода) можно управлять видом его спектральной зависимости суммарной дисперсии групповой скорости от частоты.

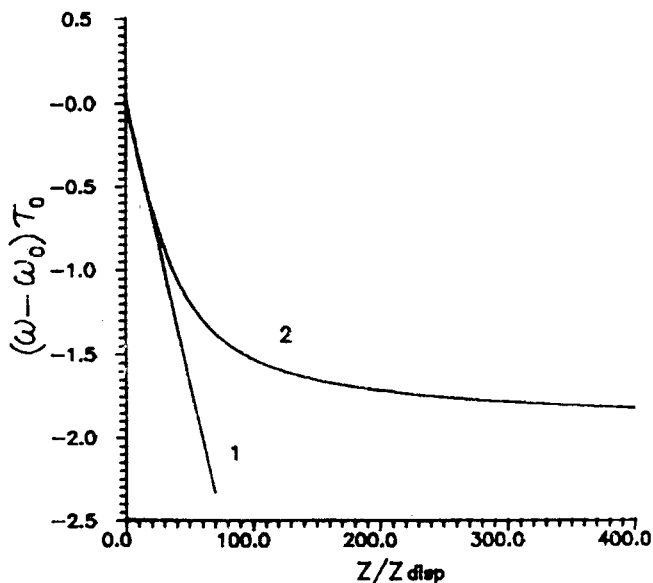


Рис. 1.

Идея предлагаемого метода иллюстрируется на рисунке результатами расчета ВКС солитона длительностью $\tau_0 = 50$ фс и длиной волны $\lambda = 1,5$ мкм в кварцевом волоконном световоде с инверсией знака дисперсии групповой скорости. Здесь представлены зависимости средней частоты спектра оптического солитона от длины световода, рассчитанные для двух случаев: 1) световод без инверсии дисперсии групповой скорости и 2) световод с инверсией дисперсии групповой скорости (координата инверсии для примера выбрана $\omega_{inv} = -2$). Безразмерная длина выражена в единицах дисперсионной длины, $z_{disp} = \tau_0^2 / (\partial^2 k / \partial \omega^2)$. Сравнение кривых на рисунке наглядно иллюстрирует возможность полного подавления частотного сдвига солитона за счет ВКС в световоде с инверсией знака дисперсии групповой скорости.

Эффекты, аналогичные описанным выше, могут иметь место и при генерации коротких импульсов в волоконных лазерах с синхронизацией мод. Детальные расчеты будут представлены в ⁸, здесь же мы суммируем основные результаты анализа динамики генерации солитонных лазеров. Применение сред с инверсией знака дисперсии групповой скорости на спектральной зависимости дисперсии, имеющей форму параболы (хорошее приближение для реальных световодов с уплощенной дисперсией), позволяет эффективно подавить прогрессирующий частотный сдвиг частоты генерации в стоксову область и добиться стационарной самосинхронизации мод. Подавление ВКС сопровождается формированием двух связанных оптических импульсов, распространяющихся один в отрицательной, другой в положительной области дисперсии и имеющих одинаковую групповую скорость.

Таким образом, проведенный анализ показывает принципиально новую возможность управления динамикой генерации и параметрами фемтосекундных

оптических солитонов в световодах с инверсией знака дисперсии групповой скорости.

-
1. Дианов Е.М., Карасик А.Я., Мамышев П.В. и др., Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 242.
 2. Mitchke F.M., Mollenauer L.F., Opt., Lett., 1986, 11, 659.
 3. Akira Hasegawa., Opt. Solit. in Fibers, 1989, Berlin: Springer-Verlag.
 4. Nakazawa M., Yamada E., Kubota H., Suzuki K., Electron. Lett., 1991, 27, 1270.
 5. Blow K.J., Doran N.J., Wood D.J., Opt. Soc. Am., 1988, B5, 1301.
 6. Сухоруков А.П., Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике. М.: Наука, 1988.
 7. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С., Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.
 8. Bulushev A.G., Okhotnikov O.G., Serkin V.N., Sov. Lightwave. Comm., 1991, 1, N4.