

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ СОЛИТОНОВ В ТУННЕЛЬНО-СВЯЗАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

Е. М. Дианов, З.С. Никонова, В. Н. Серкин

Рассчитаны режимы переключения фемтосекундных солитонов в туннельно-связанных световодах. На основе расчетов сделан вывод о возможности использования фемтосекундных солитонов в оптических бистабильных элементах.

Интерес к нелинейным режимам работы туннельно-связанных волноводов связан с возможностью создания оптических бистабильных элементов (/1-3/ цитируемая в них литература). Представляется важным также исследовать переключение света в каналах нелинейных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Использование фемтосекундных импульсов света в бистабильных элементах позволит существенно сократить протяженность этих устройств. Применение фемтосекундных солитонов в ВОЛС позволит увеличить скорость передачи информации вплоть до предельной, определяемой спектральной полосой пропускания волоконных световодов (ВС). До настоящего времени теоретический анализ режимов работы связанных ВС был ограничен рамками модели кубического нелинейного уравнения Шредингера, дополненного учетом связи мод /2, 3/. Однако данная модель неадекватно описывает динамику фемтосекундных солитонов в ВС.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование динамики распространения фемтосекундных солитонов в ВОЛС и оптических бистабильных элементах.

Распространение фемтосекундных солитонов в связанных ВС описывается системой уравнений для комплексных амплитуд огибающей световых волн в первом и во втором каналах $\Psi_{1,2}(z, \tau)$:

$$i \frac{\partial \Psi_1}{\partial z} = \frac{D}{2} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial \tau^2} + R |\Psi_1|^2 \Psi_1 - i\gamma R \frac{\partial}{\partial \tau} (|\Psi_1|^2 \Psi_1) + i\beta\gamma \frac{\partial^3 \Psi_1}{\partial \tau^3} - \sigma R \Psi_1 \frac{\partial |\Psi_1|^2}{\partial \tau} + a\Psi_2, \quad (1)$$

$$i \frac{\partial \Psi_2}{\partial z} = \frac{D}{2} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial \tau^2} + R |\Psi_2|^2 \Psi_2 - i\gamma R \frac{\partial}{\partial \tau} (|\Psi_2|^2 \Psi_2) + i\beta\gamma \frac{\partial^3 \Psi_2}{\partial \tau^3} - \sigma R \Psi_2 \frac{\partial |\Psi_2|^2}{\partial \tau} + a\Psi_1, \quad (2)$$

$$\Psi_{1,2} = E_{1,2}(z, \tau) / E_0, \quad z = z' / z_d, \quad z_d = t_0^2 / |\partial^2 k / \partial \omega^2|, \quad \tau = \frac{t - z' / v_g}{t_0}, \quad R = z_d / z_{ne}, \quad z_{ne} = (kn_2 \xi E_0^2)^{-1},$$

$$\gamma = T / \pi t_0, \quad T = 2\pi / \omega_0, \quad \beta = -(\pi / 2Tk) \partial k / \partial \omega + k''' \pi / 6 |k'''| T, \quad \sigma = T_1 / t_0, \quad T_1 \approx 5 \text{ фс}, \quad D = 0; 1,$$

где E_0 и t_0 — соответственно начальная амплитуда и длительность солитона, $\Psi_{1,2}$ — амплитуды поля в первом и втором каналах, z_d — дисперсионная длина, $a = z_d / z_p$ — коэффициент межканальной связи, z_p — длина перекачки, D, R — дисперсионный и нелинейный коэффициенты. Нелинейные и дисперсионные эффекты высших порядков и комбинационное самопреобразование частоты и модели (1), (2) описываются аналогично /4-6/. В работах /7, 8/ комбинационное самопреобразование частоты солитона описывается в рамках более точной модели. Детальное исследование областей применимости (1), (2) проведено в /8/.

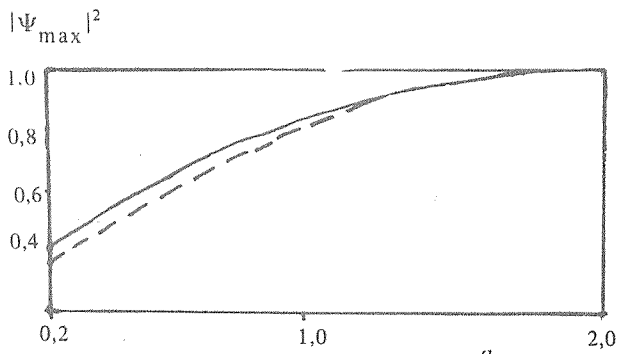


Рис. 1. Зависимости максимальной интенсивности солитона на выходе второго канала в момент полного переключения из первого канала от коэффициента межканальной связи α , рассчитанные при $R = D = 1$; сплошная кривая: $\gamma = \beta = \sigma = 0$, штриховая: $\gamma = 0,04, \beta = 0,25, \sigma = 0,2$.

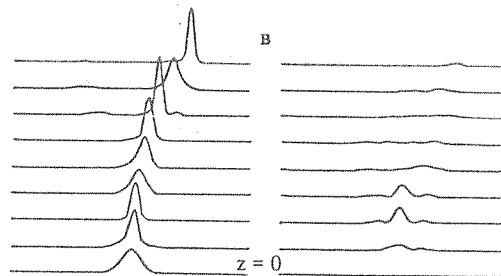
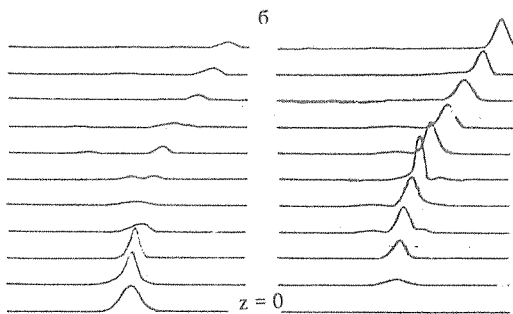
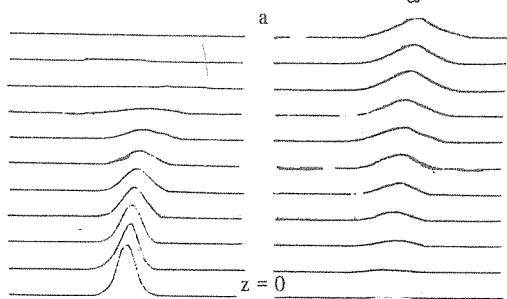


Рис. 2. а) Процесс переключения фемтосекундных солитонов, рассчитанный при шаге вывода $\Delta z = 1$ и $R = D = 1, \gamma = 0,04, \beta = 0,25, \sigma = 0,2, \alpha = 0,2$.

б, в) Процесс бистабильного переключения фемтосекундных солитонов, рассчитанный при $\gamma = 0,01, \beta = 0,25, \Delta z = 0,4, \sigma = 0,05, \alpha = 1$ для $R = 3,9$ (а) и $R = 4,0$ (б).

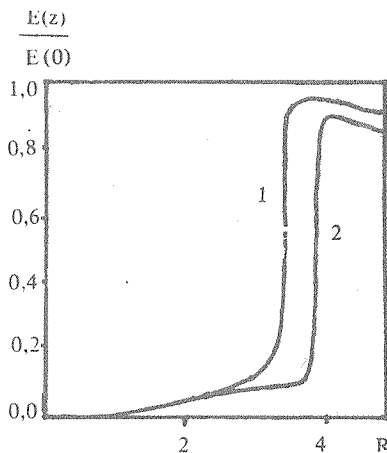


Рис. 3. Зависимости энергии импульса в первом канале $E(z)/E(0)$ от параметра нелинейности R , рассчитанные при $z = 4, \alpha = 1$ для $\sigma = \beta = \gamma = 0$ (1) и $\sigma = 0,05, \beta = 0,25, \gamma = 0,01$ (2).

Как показали численные расчеты, при $a \geq 0,5$ перекачка солитона осуществляется полностью, а режим переключения близок к линейному. Нелинейность начинает влиять на перераспределение энергии между каналами при $a < 0,5$. В нелинейном, бездисперсионном режиме скорость перекачки энергии из центральной части импульса выше, чем из крыльев, полной перекачки не наблюдается вследствие неоднородности фазового профиля импульса. При этих же значениях $a < 0,5$ солитон переключается полностью вследствие однородности фазы солитона. Однако, так как $z_p > z_d$, то перекачка идет медленно и процессы самодействия на трассах, когда половина энергии импульса уже перекачалась во второй канал, приводят к расплыванию импульса. Расчеты показали, что амплитуда и длительность солитона на выходе второго канала будут не более чем на 5% отличаться от амплитуды и длительности на входе первого канала при $a \geq 2$. На рис. 1 приведены результаты численного определения оптимальных значений a .

Обсудим роль нелинейных и дисперсионных эффектов высших порядков и комбинационного смещения частоты солитона в переключении импульсов. В первом порядке малости по параметру γ эти эффекты возмущают лишь скорость солитона [6]. Как следует из результатов численных расчетов, представленных на рис. 1 и 2а, для солитонов длительностью $2t_0 \geq 50$ фс эффект комбинационного смещения частоты и нелинейные и дисперсионные эффекты высших порядков слабо влияют на динамику перекачки энергии между каналами, приводя лишь к смещению несущей частоты солитона при $a \geq 2$.

Рассмотрим переключение фемтосекундных солитонных импульсов вида $\Psi_0 = \text{sech } \tau$, $R = A^2$, $A > 1$. Процессы переключения таких волновых пакетов резко зависят от параметра R , что открывает возможности создания бистабильных оптических устройств на основе связанных световодов [3]. Однако проведенный в [3] анализ был ограничен рамками модели нелинейного уравнения Шредингера, что не позволяет оценить перспективы использования фемтосекундных импульсов в бистабильных устройствах. Для пикосекундных импульсов длина перекачки $z_p \approx z_d$, т.е. десятки км, и, таким образом, процессы затухания сигнала будут осложнять работу переключателей. Для фемтосекундных солитонов z_p — несколько см. В настоящей работе на основе численного решения системы (1), (2) рассчитана динамика переключения фемтосекундных импульсов вида $\Psi_0 = \text{sech } \tau$, $R = A^2$. Результаты численного расчета приведены на рис. 2 б, в. Они свидетельствуют о возможности создания бистабильных элементов с использованием фемтосекундных солитонов. Особенностью переключения фемтосекундных солитонов является непрерывное смещение частоты солитона в процессе переключения. В фемтосекундном диапазоне начальных длительностей параметр R , при котором солитон остается в первом канале, больше, чем в пикосекундном (рис. 3).

Таким образом, в настоящей работе рассчитаны режимы переключения фемтосекундных солитонов в туннельно-связанных световодах. Показано, что переключение солитона без искажений достигается при коэффициентах межканальной связи $a \geq 2$. На основе численных расчетов динамики распространения фемтосекундных солитонов в туннельно-связанных ВС можно сделать вывод о возможности использования фемтосекундных солитонов в оптических бистабильных элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майер А. А. Квантовая электроника, 13, 1360 (1986).
2. Азимов Б. С., Сухоруков А. П., Трухов Д. В. Изв. АН СССР, сер. физ., 52, 587 (1988).
3. Cagliotti E. et al. Topical Meeting on Nonlinear Guided Wave Phenomena: Physics and Applications. Technical Digest Series., 2, 124 (1989).
4. Gordon J. P. Opt. Lett., 11, 662 (1986).
5. Серкин В. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 6, 33 (1987).
6. Hasegawa A., Kodama J. IEEE Journ. of Quant. Electron., QE-23, 510 (1987).
7. Выслоух В. А., Матвеев А. Н., Петрова И. Ю. Препринт физ. фак. МГУ № 14, М., 1989.
8. Tomlinson W. J. et al. Topical Meeting on Nonlinear Guided Wave Phenomena: Physics and Applications. Technical Digest Series., 2, 32 (1989).