

УДК 621.373

СПЕКТРАЛЬНОЕ САМОСЖАТИЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Г.Л. ЕСАЯН

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 19 марта 2012 г.)

На основе численных исследований показано, что в оптических волокнах с отрицательной дисперсией может происходить спектральное самосжатие первоначально спектрально-ограниченных импульсов. Выявлены особенности процесса для гауссовских и секанс-гиперболических импульсов.

Распространение спектрально-ограниченных лазерных импульсов в волокнах с отрицательной дисперсией происходит под влиянием двух основных физических факторов – дисперсии групповых скоростей и фазовой самомодуляции (ФСМ). Совместное воздействие этих факторов может приводить к таким хорошо известным явлениям, как образование солитонов [1,2] и самосжатие временной огибающей импульсов [3]. Солитонный режим распространения реализуется для импульсов секанс-гиперболической формы в случае, когда влияние дисперсии в волокне уравнивается фазовой самомодуляцией импульса. Преобладание фазовой самомодуляции над дисперсией приводит к уширению спектра и уменьшению длительности начального спектрально-ограниченного импульса, т.е. происходит самосжатие импульса. По существу, самосжатие импульса является временным аналогом самофокусировки светового пучка.

В данной работе показано, что в обратном самосжатию импульса случае, когда влияние дисперсии в волокне сильнее влияния фазовой самомодуляции, имеет место эффект самосжатия спектра импульса. Интерес к спектральной компрессии сверхкоротких лазерных импульсов обусловлен рядом перспективных практических применений этого явления [4]. В частности, следует отметить спектрально-временное отображение, позволяющее проводить прямую регистрацию временной огибающей субпикосекундных и фемтосекундных импульсов [5], тонкую частотную перестройку излучения для задач резонансной спектроскопии [6], генерацию темных солитонов [7] и передачу фемтосекундных импульсов без искажений на относительно большие расстояния [8].

Сжатие спектра сверхкоротких импульсов обычно осуществляется в спектральном компрессоре, состоящем из дисперсионной линии задержки, в которой импульс удлиняется, и одномодового волокна с нормальной дисперсией, в котором происходит гашение приобретенного чирпа и сжатие спектра им-

пульса [9]. Несколько другая схема спектральной компрессии, состоящая из дисперсионной линии задержки, одномодового волокна и нелинейного кристалла осуществлена в [5]. Рассмотренный в данной работе эффект самосжатия спектра позволяет осуществить спектральную компрессию спектрально-ограниченного импульса непосредственно в одномодовом волокне с отрицательной дисперсией.

Для математического описания распространения оптических импульсов в волокне с отрицательной дисперсией использовалось нелинейное уравнение Шредингера в безразмерных переменных [10]

$$i \frac{\partial \psi}{\partial \zeta} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + R |\psi|^2 \psi, \quad (1)$$

где ψ – это медленно меняющаяся комплексная амплитуда поля, нормированная на свое пиковое значение на входе в волокно; $\eta = (t - z/u)/\tau_0$ – время в бегущей системе координат (u – групповая скорость), нормированное на начальную длительность импульса τ_0 (полудлительность на уровне $1/e$ от максимальной интенсивности); $\zeta = z/L_D$ – расстояние в единицах дисперсионных длин $L_D = \tau_0^2/|k_2|$; k_2 – коэффициент дисперсии второго порядка; $R = L_D/L_{NL}$ – параметр нелинейности; $L_{NL} = (k_0 n_2 I_0)^{-1}$ – длина ФСМ, n_2 – коэффициент нелинейности; I_0 – пиковое значение интенсивности на входе. Первый член в правой части уравнения (1) описывает дисперсионные эффекты второго порядка, а второй – нелинейные эффекты самовоздействия. Для численного решения уравнения (1) использовался Фурье-метод расщепления по физическим факторам [11,12].

В случае, когда $L_D = L_{NL}$ ($R=1$), может реализоваться солитонный режим распространения. Если уширение спектра импульса, обусловленное ФСМ, проявляется на более коротком расстоянии в волокне, чем дисперсионные эффекты, то $L_D > L_{NL}$ или $R > 1$. В этом случае импульс сначала при уширении спектра получает положительный чирп, который при дальнейшем распространении частично компенсируется отрицательной дисперсией. Вследствие этого длина импульса уменьшается и происходит самосжатие импульса [6].

В данной работе исследовался случай, когда дисперсионная длина в волокне меньше длины ФСМ ($L_D < L_{NL}$) и, соответственно, $R < 1$. В этом случае можно ожидать, что на начальном этапе распространения дисперсия второго порядка будет приводить к удлинению импульса. Полученный отрицательный чирп при дальнейшем распространении будет гаситься фазовой самомодуляцией, что приведет к сжатию спектра импульса. При помощи численного решения уравнения (1) было показано, что в волокнах с отрицательной дисперсией действительно может происходить самосжатие спектра. На рис.1 показан процесс распространения спектрально-ограниченного гауссовского импульса при $R = 0.6$, где безразмерная частота $\Omega \equiv (\omega - \omega_0)/\Delta\omega_0$ (ω – текущая частота, ω_0 – центральная частота, $\Delta\omega_0$ – начальная полуширина спектра на уровне $1/e$ от максимальной интенсивности). Видно, что по мере распространения происхо-

дит удлинение импульса и сжатие его спектра. При этом форма импульса практически не меняется, а в спектре импульса наряду с центральным пиком появляются сателлиты. Это объясняется неполным соответствием функционального вида фаз, получаемых импульсом вследствие дисперсии второго порядка и ФСМ. В то время как дисперсионная фаза имеет практически параболическую форму, нелинейная фаза имеет форму импульса [10], которую можно считать параболической лишь в центральной части. Постепенно все большая часть энергии импульса переходит в спектральные сателлиты, и говорить о ширине спектра по ширине его центрального пика теряет смысл.

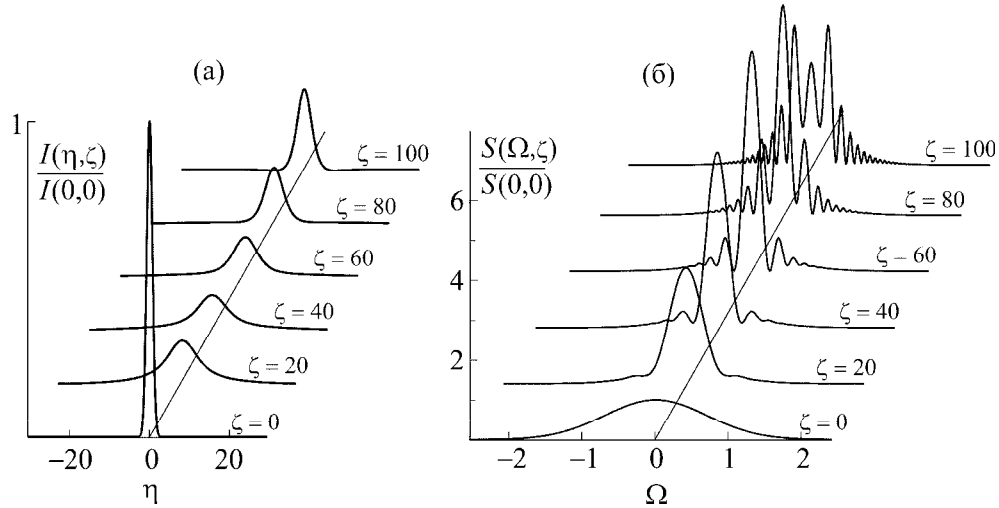


Рис.1. Изменение формы гауссовского импульса (а) и его спектра (б) с расстоянием при $R = 0.6$.

На рис.2 показаны временной профиль (а), спектр (б) и чирп (в) первоначально гауссовского импульса при $R = 0.6$ и $\zeta = 60$, а также уже фактически распавшийся на отдельные компоненты спектр при $\zeta = 100$ (г). Численные исследования показали, что существует оптимальное значение параметра нелинейности $R = 0.6$, при котором достигается наиболее эффективное сжатие спектра. Так, при $\zeta = 60$, если считать по ширине центрального пика в спектре, полная ширина спектра импульса на полувысоте равна $\Delta\Omega = 0.2435$ и, соответственно, степень сжатия $\Delta\Omega_0 / \Delta\Omega = 6.82$ (полная ширина на полувысоте начального спектра $\Delta\Omega_0 = 1.67$). При этом из рис.2в видно, что чирп импульса практически равен нулю и импульс является спектрально-ограниченным. Следует отметить, что описание процесса в безразмерных координатах очень удобно для выявления общих закономерностей, так как один набор безразмерных параметров соответствует множеству практических реализаций. Так, например, для начального спектрально-ограниченного гауссовского импульса с полной длительностью на полувысоте $\Delta t_{1/2} = 100$ фс ($\Delta\lambda_{1/2} \approx 10$ нм) и с центральной длиной волны $\lambda_0 \approx 1550$ нм в обычных кварцевых волоконных световодах коэффици-

ент дисперсии второго порядка $k_2 \approx -20$ фс²/мм. В этом случае значение $\zeta \equiv z/L_D = z|k_2|/\tau_0^2 = 60$ соответствует длине световода $z \approx 10.8$ м.

Для начальных импульсов секанс-гиперболической формы были получены аналогичные результаты. В этом случае максимальная степень сжатия спектра при условии, что относительно малая часть энергии перешла в сателлиты, также составляла величину ≈ 7 при значениях $R = 0.4$ и $\zeta \approx 120$.

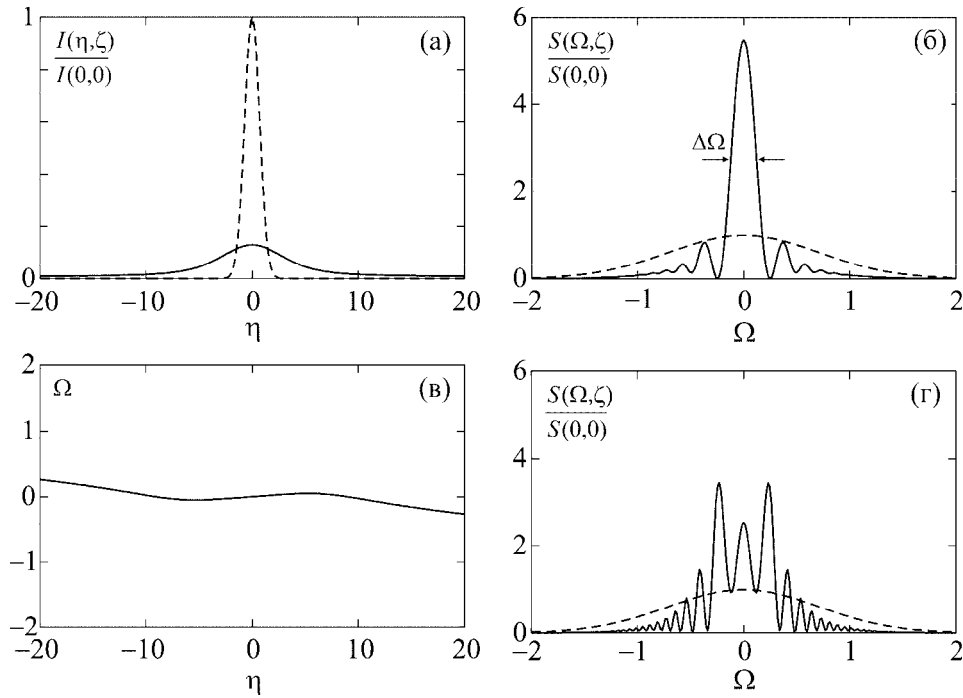


Рис.2. Временной профиль (а), спектр (б) и чирп (в) первоначального гауссовского импульса при $R = 0.6$ и $\zeta = 60$, а также спектр при $R = 0.6$ и $\zeta = 60$ (г). Пунктирные линии соответствуют импульсу на входе в волокно, сплошные – на выходе.

Таким образом, показано, что при распространении спектрально-ограниченных оптических импульсов в волокнах с отрицательной дисперсией происходит спектральное самосжатие импульса в случае, когда дисперсионное расплывание импульса происходит быстрее, чем изменение его спектра из-за ФСМ. Численные исследования показали, что максимально достижимая степень сжатия как для гауссовских, так и для секанс-гиперболических импульсов приблизительно равна 7. При дальнейшем распространении все большая часть энергии импульса переходит в спектральные сателлиты и его спектр практически распадается на отдельные компоненты.

Автор выражает благодарность Л. Мурадян и К. Паланджян за полезные обсуждения. Данная работа выполнена в рамках гранта ANSEF PS-opt-2903.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.Hasegawa, F.Tappert.** Appl. Phys. Lett., **23**, 142 (1973).
2. **L.F.Mollenauer, R.H.Stolen, J.P.Gordon.** Phys. Rev. Lett., **45**, 1045 (1980).
3. **L.F.Mollenauer, R.H.Stolen, J.P.Gordon.** Optics Lett., **11**, 289 (1986).
4. **L.Kh.Mouradian, A.V.Zohrabyan, A.Villeneuve, A.Yavrian, G.Rousseau, M.Piche, C.Froehly, F.Louradour, A.Barthélémy.** CLEO-Europe-2000, Conf. Digest **39** (OSA, 2000), paper CTuH6.
5. **T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy.** J. Opt. Soc. Am. B, **25**, 101 (2008).
6. **T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian.** Proc. of CAOL2008 4th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, 2008, p.149.
7. **A.A.Kutuzyan, T.G.Mansuryan, A.A.Kirakosyan, L.Kh.Mouradian.** Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **5135**, 156 (2003).
8. **S.W.Clark, F.Ö.Ilday, F.W.Wise.** Opt. Lett., **26**, 1320 (2001).
9. **Н.Л.Маркарян, Л.Х.Мурадян, Т.А. Папазян.** Квант. электрон., **18**, 865 (1991).
10. **С.А.Ахманов, В.А.Выслоух, А.С.Чиркин.** Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М., Наука, 1988.
11. **R.H.Hardin, F.D. Tappert.** SIAM Rev. Cronicle, **15**, 423 (1973).
12. **R.A.Fisher, W.K. Bischel.** Appl. Phys. Lett., **23**, 661 (1973).

ԳԵՐԿԱՐՃ ԻՍՊՈՒԼՍԵՐԻ ՍՊԵԿՏՐԱՅԻՆ ԻՆՔՆԱՍԵՂՄՈՒՄԸ

Գ.Լ. ԵՍԱՅԱՆ

Թվային հետազոտությունների արդյունքում ցույց է տրված, որ բացասական դիսպերսիայով օպտիկական մանրաթելերում կարող է իրականանալ սպեկտրալ սահմանափակ իմպուլսների սպեկտրային ինքնասեղմում: Բացահայտված են երևույթի առանձնահատկությունները զառույյան և սեկանս-հիպերբոլական իմպուլսների համար:

SPECTRAL SELF-COMPRESSION OF ULTRASHORT PULSES

G.L. YESAYAN

Spectral self-compression of initially bandwidth limited pulses in the optical fibers is shown on the basis of numerical studies. The peculiarities of the process for the Gaussian and secant-hyperbolic pulses are revealed.