

УДК 621.373.826

СПЕКТРАЛЬНАЯ КОМПРЕССИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ФАЗОВОЙ КРОСС-МОДУЛЯЦИИ

А. В. ЗОГРАБЯН, В. Ж. НИНОЯН, А. А. КУТУЗЯН, Л. Х. МУРАДЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 3 ноября 1997г.)

Предложен и апробирован усовершенствованный спектральный компрессор, основанный на процессе фазовой кросс-модуляции. Для импульсов пикосекундного YAG:Nd лазера в предложенном устройстве реализован нелинейно-оптический процесс Фурье-преобразования, в результате которого временная огибающая интенсивности входного излучения воспроизводится спектральным распределением выхода.

Переход в фемтосекундный временной диапазон стимулирует интенсивные исследования по фазовой само- и кросс-модуляции излучения (ФСМ/ФКМ), направленные на решение задач управления и регистрации параметров сверхкороткого излучения [1-5]. Техника спектральной компрессии, основанная на процессах ФСМ/ФКМ предварительно фазомодулированных (чирпированных) импульсов, имеет определенные перспективы в этом аспекте [6-11]. Предложенный в [6-9] спектральный компрессор (СК) состоит из дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) и одномодового волоконного световода (ОВС): в ДЛЗ импульсы удлиняются, получая отрицательный линейный чирп, а в ОВС их ФСМ приводит к гашению чирпа и сжатию спектра.

В данной работе представлены теоретические и экспериментальные исследования усовершенствованного ФКМ-СК, в котором гашение наведенного в ДЛЗ чирпа осуществляется в процессе ФКМ в ОВС. В отличие от обычного ФСМ-СК [6-9], в новой системе гашение чирпа, наведенного в ДЛЗ, достигается с помощью опорной волны, параметры которой независимы от параметров исследуемого излучения. Это обстоятельство является принципиальным для реализации нелинейно-оптического процесса Фурье-преобразования для произвольных СКИ.

Нелинейно-оптический процесс Фурье-преобразования

Рассмотрим последовательное прохождение сверхкороткого импульса (СКИ) через дисперсионную и нелинейную (керровского типа) среды с длинами d и f соответственно. Во втором приближении теории дисперсии [1] для медленно меняющейся комплексной амплитуды СКИ, прошедшего через ДЛЗ, имеем

$$A(t, d, 0) = (-i\alpha)^{1/2} \exp(i\Phi_A) (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} A(t_1, 0, 0) \exp(i\alpha t_1^2 / 2) \exp(-i\alpha t t_1) dt_1, \quad (1)$$

где t — бегущее время, $\Phi_A \equiv \alpha^2 / 2 = t^2 (2k_2 d)^{-1}$ — наведенная в ДЛЗ параболическая фаза, $\alpha \equiv d\omega / dt = (k_2 d)^{-1}$ — чирп-фактор, k — волновое число, ω — частота излучения, $k_2 \equiv d^2 k / d\omega^2$.

Взаимодействие в керровской среде приводит к добавочной фазовой модуляции излучения:

$$A(t, d, f) = A(t_1, d, 0) \exp(i\Phi_{нл}), \quad (2)$$

где $\Phi_{нл} \equiv -k_0 n_2 f I(t, d, 0)$ — фаза, наведенная в нелинейной среде, n_2 — нелинейный керровский коэффициент, $I(t) \equiv |A(t)|^2$ — интенсивность излучения. Для комплексной временной огибающей СКИ на выходе системы имеем

$$\begin{aligned} A(t, d, f) &= (-i\alpha)^{1/2} \exp(i\Phi) (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} A(t_1, 0, 0) \exp(i\alpha t_1^2 / 2) \exp(-i\alpha t t_1) dt_1 = \\ &= (-i\alpha)^{1/2} \exp(i\Phi) \mathcal{F}_\omega [A(t_1, 0, 0) \exp(i\alpha t_1^2 / 2)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Phi(t) \equiv \Phi_A(t) + \Phi_{нл}(t)$ — наведенная в СК фаза волны, $\mathcal{F}$ — оператор Фурье-преобразования:

$$\mathcal{F}[A(t)] \equiv (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} A(t) \exp(i\omega t) dt. \quad (4)$$

При условии $|\Phi(t)| \ll 1$ в центральной энергонесущей части импульса $|t| \leq \tau$ (τ — длительность импульса), для Фурье-образа $F(\omega) = \mathcal{F}[A(t)]$ в $\omega = \alpha t$ имеем

$$F(\omega, d, f) = (-i\alpha)^{1/2} A(t_1, 0, 0) \exp(i\alpha t_1^2 / 2). \quad (5)$$

В дальней зоне ДЛЗ, когда $d \rightarrow \infty$, $\tau \rightarrow \infty$ и $\alpha \rightarrow (\tau \tau_0)^{-1}$, имеем

$$A(t, d, f) = (-i\alpha)^{1/2} F(\omega, 0, 0)|_{\omega=\alpha t}, \quad (6)$$

$$F(\omega, d, f) = (-i\alpha)^{1/2} A(t, 0, 0)|_{t=\omega/\alpha}. \quad (7)$$

Рассмотрим ФКМ-СК. Пусть амплитуда опорных СКИ намного больше амплитуды сигнальных СКИ: $|B(t)|^2 \gg |A(t)|^2$. Тогда для фазы сигнальной волны, наведенной опорной волной, имеем $\Phi_{нл} = -k_0 n_2 f |B(t)|^2$. Предположим, что опорный импульс имеет гауссовскую форму и смещен по отношению к сигнальному на T . Тогда в области $|t| \leq \tau_B$, где τ_B — длительность опорного СКИ, имеем

$$|B(t)|^2 \equiv I_0 \exp[-(t+T)^2 / \tau_B^2] \approx I_0 [1 - (t+T)^2 / \tau_B^2],$$

и для фазы на выходе:

$$\Phi(t) = \alpha^2 / 2 + k_0 n_2 f I_0 t^2 / \tau_B^2 + 2k_0 n_2 f I_0 t T / \tau_B^2 - \Phi_{нл}^0, \quad (8)$$

где $\Phi_{нл}^0 = \text{const}$. В этом случае условие гашения чирпа приобретает следующий вид:

$$d^2 \Phi(t) / dt^2 = \alpha / 2 + k_0 n_2 f I_0 / \tau_B^2 = 0.$$

Для Фурье-образа выходного излучения имеем

$$F(\omega + \Delta\omega, d, f) = (-i\alpha)^{1/2} A(t, 0, 0) \exp(i\alpha^2 / 2), \quad (9)$$

где $\Delta\omega = 2k_0 n_2 f l_0 T / \tau_B^2$. В дальней зоне ДЛЗ $\alpha = (\tau\tau_0)^{-1}$ и $\Delta\omega = T / (\tau\tau_0)$.

Таким образом, как следует из (9), ФКМ-СК является нелинейно-оптическим Фурье-преобразователем, который сводит задачу сверхтонких временных измерений к традиционной спектрометрии. Кроме того, сдвиг исследуемого излучения из-за временной задержки между взаимодействующими импульсами (9) может применяться в задачах резонансной спектроскопии для тонкой частотной перестройки излучения.

Измерение временного профиля пикосекундного СКИ

Экспериментальные исследования проводились на установке, состоящей из источника СКИ, ФКМ-СК и системы регистрации (рис.1). В качестве источника СКИ использовался пикосекундный YAG:Nd лазер 1 со следующими параметрами излучения: длительность СКИ $\Delta t = 33$ пс, длина волны $\lambda_0 = 1064$ нм, энергия в импульсе $W = 1,5$ мДж, частота повторения — 50 Гц. В качестве сигнальных СКИ использовалась вторая гармоника лазера. Длительность сигнальных СКИ составляла $\Delta t = 23$ пс,

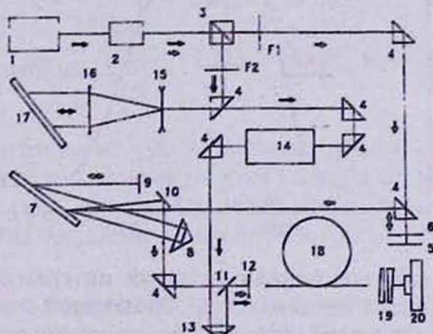


Рис.1. Схема экспериментальной установки для апробации ФКМ спектрального компрессора: 1 — задающий генератор; 2 — нелинейный кристалл КДР; 3 — призма Глана; 4 — призмы; 5, 6 — зеркала формирователя сигнальных СКИ; 7 — дифракционная решетка с периодом $d^{-1} = 1200$ мм⁻¹; 8, 13 — возвращающие призмы; 9 — возвращающее зеркало; 10 — зеркало; 11 — селективное зеркало; 12 — микрообъектив; 14 — оптический усилитель; 15 и 16 — цилиндрические линзы телескопической системы; 17 — дифракционная решетка с периодом $d^{-1} = 600$ мм⁻¹; 18 — ОВС; 19 — интерферометр Фабри-Перо; 20 — фотоаппарат; F1, F2 — оптические фильтры.

спектральная ширина $\Delta\lambda = 0,2$ Å. Для достоверного эксперимента по выявлению эффекта воспроизведения исследования проводились с сигнальными СКИ с заданным временным профилем. Для этого с помощью параллельно расположенных зеркал 5 и 6 формировались двухпиковые сигнальные СКИ. Перестройка временного расстояния между пиками осуществлялась изменением расстояния между зеркалами. Спектральные измерения проводились интерферометром Фабри-Перо 19, временные — двухлучевым коррелятором.

ФКМ спектральный компрессор состоит из ДЛЗ 7, 8, 9 для сигнальных СКИ, одномодового на длине волны $\lambda = 1064$ нм кварцевого

световода 18 и системы формирования опорных СКИ 15, 16, 17. ДЛЗ сконструирован на базе четырехпроходного компрессора Трейси [12] с дифракционной решеткой 7 с $d^{-1} = 1200 \text{ мм}^{-1}$, возвращающей призмой 8 и возвращающим зеркалом 9. Для формирования опорных СКИ использовались упиритель пучка (линзы 15 и 16) и дифракционная решетка 17 с $d^{-1} = 600 \text{ мм}^{-1}$. В такой системе, в автоколлимационном режиме дифракционной решетки длительность опорных СКИ увеличивается до значения $\Delta t \approx 100 \text{ пс}$, за счет наклона амплитудного фронта излучения. На рис.2 представлена кросс-корреляционная функция интенсивности сформированных опорных СКИ, полученная в процессе неколлинеарной генерации второй гармоники в нелинейном кристалле KDP двухлучевого коррелятора. После усиления опорных СКИ в однопроходном усилителе 14 и их наложения с импульсами сигнального излучения с помощью селективного зеркала 11, опорные и сигнальные СКИ вводились в ОВС 18 с помощью $10^{\times}$ микрообъектива 12. Длина ОВС выбрана с учетом разности групповых скоростей двух волн в нелинейной среде и составляет 4 м.

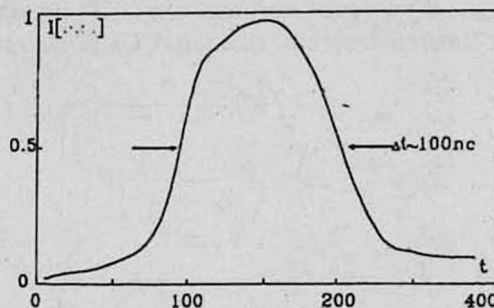


Рис.2. Кросс-корреляционная функция интенсивности опорных СКИ, полученная в процессе неколлинеарной генерации второй гармоники: "опорным" импульсом кросс-коррелятора служит СКИ лазера длительностью $\Delta t = 33 \text{ пс}$.

Спектральные измерения сигнального излучения проводились на выходе из системы. На рис.3 представлены выходные спектральные распределения сигнальных СКИ после их взаимодействия (б, в, г, а — пунктир), а также без взаимодействия (а — сплошная кривая) с сильной опорной волной. Рисунки (б, в, г, а — пунктир) соответствуют временным интервалам между пиками сигнальных СКИ, равным $T = 42, 37, 70$ и 0 пс . На рис.2 (б, в, г, а — пунктир) переход со спектральной шкалы к временной производится, согласно уравнению (7), соотношением $\Delta\lambda/\Delta t = 2,175 \cdot 10^{-3} \text{ Å/пс}$.

В случае $\Delta T = 42 \text{ пс}$ точность воспроизведения временной формы начальных сигнальных СКИ составляет $\sigma = 3\%$ ($1,2 \text{ пс}$), в предположении о гауссовской форме исходных СКИ. В случае $\Delta T = 37 \text{ пс}$ точность воспроизведения составляет $\sigma = 15\%$, что объясняется отклонением интенсивности опорных СКИ от их оптимального значения. В случае $\Delta T = 70 \text{ пс}$ наблюдается существенное искажение выходного спектра СКИ. Это связано с выходом из поля действия опорной волны части сформированного СКИ из-за разницы групповых скоростей между опорной и сигнальной волнами. Рис.3 (а-пунктир) представлен для комментария ри-

сунков (б, в, г) и представляет спектральное смещение одиночного сигнального СКИ на значение $\Delta\lambda = 0,14 \text{ \AA}$ из-за временной задержки между опорным и сигнальным СКИ.

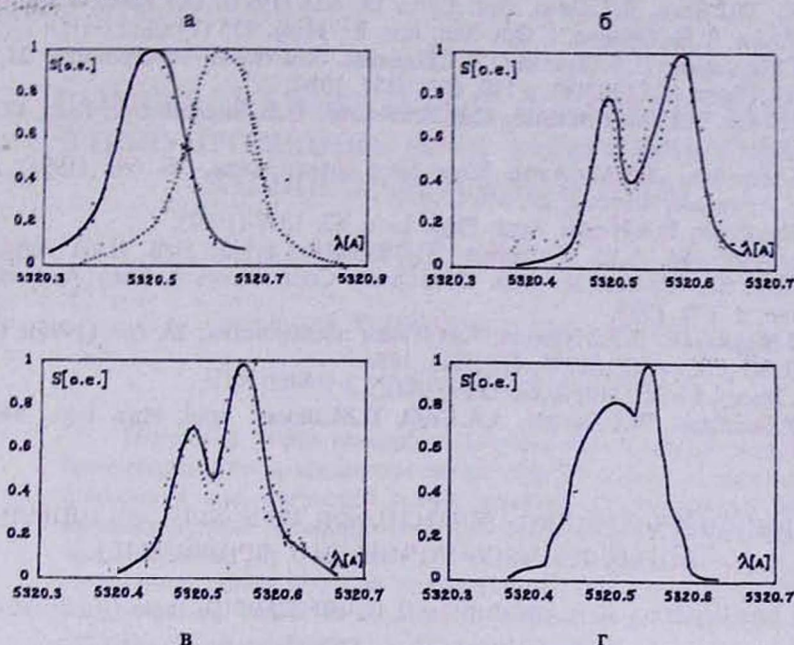


Рис.3. Выходные спектральные распределения двухпиковых сигнальных СКИ после взаимодействия с сильной опорной волной (б, в, г, а — пунктир) и без взаимодействия (а — сплошная кривая). Временной интервал между пиками сигнальных СКИ составляет $T=42; 37; 70$ и 0 пс соответственно.

Таким образом, выявлен специальный режим спектральной компрессии, когда выходное спектральное распределение повторяет временную форму огибающей входного излучения, создавая тем самым возможность для временных измерений высокого разрешения. Временная задержка между взаимодействующими в ОВС СКИ приводит к частотному смещению сигнальных СКИ, позволяя осуществить его тонкую частотную перестройку.

Следует отметить, что аналогичные исследования проводились авторами [13]. В отличие от [13], где гашение чирпа, наведенного в ДЛЗ, осуществляется в электрооптическом модуляторе и, следовательно, разрешающая способность определяется достижениями электрооптики (~ 1 пс), в нашем случае метод практически не имеет ограничений по времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.A.Akhmanov, V.A.Vysloukh, A.S.Chirkin. Optics of Femtosecond Laser Pulses. N.Y., 1992.
2. M.Vampouille, J.Marty, C.Froehly. IEEE J. Quant. Electron., 22, 192 (1986). M.Vampouille, A.Barthelemy, B.Colombeau, C.Froehly. J. Optics (Paris), 15, 385 (1984).
3. Q.Z.Wang, Q.D.Lui, D.Lui, P.P.Ho, R.R.Alfano. J. Opt. Soc. Am. B, 11, 1084 1994; Q.Z.Wang, Q.D.Lui, P.P.Ho, E.K.Walge, R.R.Alfano, Opt. Lett, 19, 1636 (1994).

4. G.R.Boyer, M.A.Franco, M.Lachgar, et al. J. Opt. Soc. Am. B, 11, 1451 (1994); P.S.Spencer, K.A.Score. J. Opt. Soc. Am. B, 12, 67 (1995).
5. E.T.J.Niberring, M.A.Franco, B.S.Prade, et al. J. Opt. Soc. Am. B., 13(2), 317 (1996); D.J.Kane, R.Trebino. Opt. Lett., 18, 823 (1993); D.J.Kane, G.Rodriguez, A.J.Taylor, T.Sh.Clement. J. Opt. Soc. Am. B., 14(4), 935 (1997).
6. Н.Л.Маркарян, Л.Х.Мурадян, Т.А.Папазян. Квантовая электроника, 21, 783 (1991); Digest of CLEO'90, p.120, CTUH32, 1990.
7. S.A.Planas, N.L.Pires Mansur, C.H.Brito-Cruz, H.L.Fraguito. Opt. Lett., 18, 699 (1993).
8. А.В.Зограбян, Л.Х.Мурадян. Квантовая электроника, 25, 695 (1995); Изв. НАН Армении, Физика, 29, 246 (1994).
9. M.Oberthaler, R.A.Hopfel. Appl. Phys. Lett., 63, 1017 (1993).
10. N.L.Margarian, L.Kh.Mouradian, T.A.Papazian, et al. Изв. НАН Армении, Физика, 27, 128 (1992); Proc. II Internat. Conf. Lasers & Their Applications, Tehran, p. 170, 1993.
11. Н.Л.Маркарян, Л.Х.Мурадян. Квантовая электроника, 25, 668 (1995); Digest of CLEO-Europe/EQEC'96, CTuK45, 1996.
12. E.V.Treacy. Phys. Lett., A 28, 112 (1968).
13. M.F.Kauffman, W.C.Banyai, A.A.Godil, D.M.Bloom. Appl. Phys. Lett., 64, 270 (1994).

ՊԻԿՈՎԱՅՐԿՅԱՆԱՅԻՆ ԻՍՊԻԼՄՆԵՐԻ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ՍԵՂՍՈՒՄԸ ՓՈՒԼՍԱՅԻՆ ԿՐՈՍ-ՍՈՂՈՒԼՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՈՒՄ

Ա. Վ. ՋՈՀՐԱԲՅԱՆ, Վ. Ժ. ՆԻՆՈՅԱՆ, Ա. Ա. ԿՈՒՏՈՒԶՅԱՆ, Լ. Խ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

Առաջարկված և փորձարկված է կատարելագործված սպեկտրալ սեղմիչ՝ հիմնված փուլային կրոս-մոդուլման պրոցեսի վրա: Առաջարկված սարքավորման մեջ պիկովայրկյանային YAG:Nd լազերի իմպուլսների համար իրականացված է ոչ գծային օպտիկական Ֆուրյե-ձևափոխություն, որի արդյունքում մուտքային ճառագայթման ինտենսիվության ժամանակային պարուրիչը վերարտադրվում է ելքային ճառագայթման սպեկտրալ բաշխմամբ:

SPECTRAL COMPRESSION OF PICOSECOND PULSES BY MEANS OF CROSS-PHASE MODULATION

A. V. ZOHRABYAN, V. J. NINOYAN, A. A. KUTUZYAN, L. Kh. MOURADIAN

A modified spectral compressor on the base of cross-phase modulation is developed and probated. The nonlinear-optic process of Fourier transformation is realized for the picosecond pulses of YAG:Nd laser. It is shown that the temporal shape of input radiation is reproduced by the spectral distribution of the output.