

УДК 621.373

ДИАГНОСТИКА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАЦИИ НЕЛИНЕЙНО-ДИСПЕРСИОННОГО СИМИЛЯРИТОНА

А.С. ЗЕЙТУНЯН, А.Р. МАДАТЯН, Г.Л. ЕСАЯН, Л.Х. МУРАДЯН

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 5 марта 2010 г.)

Предложен и экспериментально апробирован альтернативный к автокорреляционному метод определения длительности фемтосекундных лазерных импульсов. Метод основан на генерации нелинейно-дисперсионного симиляритона в пассивном волоконном световоде (без усиления) и измерении его спектральной ширины (или длительности), заданной мощностью исходного импульса.

Освоение фемтосекундного диапазона длительностей, вместе с развитием многих областей науки и техники, породило новые отрасли, такие как фемтобиология, фемтохимия и др., задействовав практически весь арсенал современной оптики и лазерной физики. В частности, для решения проблемы анализа сигнала в фемтосекундном масштабе времен используются методы нелинейной и адаптивной оптики, Фурье-оптики и голографии, спектральной интерферометрии и т.д. Нелинейно-оптические методы типа FROG [1] обеспечивают полную характеристику комплексного поля излучения определением временной огибающей амплитуды и фазы с фемтосекундным разрешением, путем регистрации спектрограмм высокого разрешения и их расшифровки с помощью итеративных фазовосстанавливающих процедур. В спектрально-интерферометрических методах SPIDER [2], SPIRIT [3,4] и SORBETS [5] фазовосстанавливающие процедуры безытеративны. Метод MIIPS [6] основан на измерении спектральной фазы при её адаптивной компенсации до формирования спектрально-ограниченного импульса с использованием обратной связи в процессе генерации второй гармоники. Прямая регистрация временной огибающей интенсивности в пикосекундном [7] и фемтосекундном [8] масштабах времен, без математических и оптических фазовосстанавливающих процедур, осуществляется переводом временной модуляции излучения в спектральную область во временной линзе, наведенной симиляритоном [8] или в силиконовом чипе [7], и измерением временного сигнала с помощью обычного спектрометра, как в осциллографе. Несмотря на разработку вышеперечисленных методов, обеспечивающих полную характеристику фемтосекундного излучения,

наиболее распространенным устройством диагностики фемтосекундных импульсов остается традиционный автокоррелятор [9], так как для многих задач вполне удовлетворительна информация лишь о длительности импульсов. В работе [10] предложен альтернативный к автокорреляционному метод, позволяющий определить длительность пикосекундных импульсов на основе измерения уширения спектра излучения при его фазовой самомодуляции в одномодовом волоконном световоде (ОВС) как в среде с кубической нелинейностью. При переходе к фемтосекундному диапазону длительностей фазовая самомодуляция сопровождается дисперсионным расплыванием импульса, что приводит к формированию нелинейно-дисперсионного симиляритона [11-13].

Интерес к симиляритонам, т.е. к импульсам, сохраняющим форму при распространении в среде, возрос в последнее время в связи с перспективами их применений в сверхбыстрой оптике. Исследования, в основном, относятся к генерации параболических симиляритонов в ОВС с усилением [14] или убывающей дисперсией [15]. Недавно в пассивном ОВС (без усиления), под совместным воздействием керровской нелинейности и дисперсии, был сформирован нелинейно-дисперсионный симиляритон [11-13] с колоколообразным временным (и спектральным) профилем и линейным чирпом, с наклоном $\gamma = (k_2 z)^{-1}$, заданным дисперсией ОВС (z – длина и k_2 – коэффициент дисперсии групповых скоростей ОВС). Важно, что спектральная ширина такого симиляритона $\Delta\omega_{\text{sim}}$ задается мощностью импульса на входе в ОВС $P_0 = w/\Delta t_0$ [11-13]:

$$\Delta\omega_{\text{sim}} = \sqrt{CP_0}, \quad (1)$$

где w – энергия и Δt_0 – длительность импульса на входе в ОВС, а $C = n_2 k_0 (k_2 S)^{-1}$ – постоянная, зависящая от параметров ОВС (n_2 – коэффициент керровской нелинейности, k_0 – волновое число и S – эффективная площадь моды). Так как потери в ОВС ничтожны, то энергия импульса на входе в ОВС совпадает с таковой для симиляритона, и длительность импульса на входе Δt_0 можно определить, измерив спектральную ширину и энергию симиляритона: $\Delta t_0 = Cw/\Delta\omega_{\text{sim}}^2$. На практике, для квазинепрерывного излучения удобно измерять не энергию одиночного импульса, а среднюю мощность $\bar{P} = w\nu$ фемтосекундного лазерного излучения с частотой повторения ν . Тогда для длительности фемтосекундного импульса на входе в ОВС имеем:

$$\Delta t_0 = (C/\nu) (\bar{P}/\Delta\omega_{\text{sim}}^2). \quad (2)$$

Таким образом, измерение длительности фемтосекундных импульсов можно проводить, генерируя нелинейно-дисперсионные симиляритоны в отрезке пассивного ОВС длиной ~ 1 м и измеряя его спектральную ширину и среднюю мощность.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований, ведущих к разработке метода диагностики лазерных

фемтосекундных импульсов. На рис.1 представлена схема эксперимента. В качестве задающего генератора (L) использовалась фемтосекундная лазерная система Coherent Verdi V10-Mira 900F со следующими параметрами излучения: длина волны излучения $\lambda = 800$ нм, длительность импульсов $\Delta t = 100$ фс, частота повторения $\nu = 76$ МГц. Импульсы лазера удлинялись в стеклах SF11 разной толщины или в дисперсионной линии задержки, состоящей из двух дисперсионных призм в качестве среды с отрицательной дисперсией ($\pm D$). Часть излучения полупрозрачным зеркалом (M) подавалась на автокоррелятор APE PulseCheck (AC) для измерения длительности импульсов на входе тестируемого устройства. Другая часть излучения вводилась в ОВС (F), где и формировался симиляритон. Далее, измерялись спектральная ширина симиляритона $\Delta\lambda_{\text{sim}}$ и средняя мощность излучения $\bar{p}$ в оптическом спектральном анализаторе OSA Ando AQ6315 (S), определялась длительность импульса по формуле (2) и сравнивалась с длительностью, измеренной автокоррелятором. Исследования проводились для импульсов длительностью $\Delta t_0 = 100 - 300$ фс, в диапазоне средних мощностей излучения $\bar{p} = 50 - 500$ мВт.

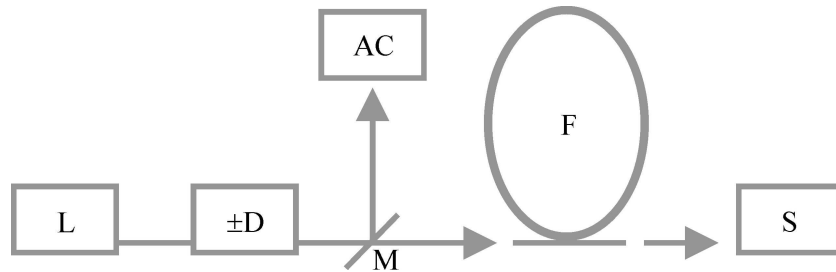


Рис.1. Схема экспериментальной установки: L – лазерная система Coherent Verdi V10-Mira 900F; $\pm D$ – среда с положительной или отрицательной дисперсией; M – полупрозрачное зеркало; AC – автокоррелятор APE PulseCheck; F – ОВС; S – спектрометр OSA Ando AQ6315.

На рис.2 приведена экспериментальная зависимость начальной длительности импульса от спектральной ширины симиляритона $\Delta t_0 = f(\Delta\lambda_{\text{sim}}/\sqrt{\bar{p}})$, свидетельствующая о количественном соответствии измерений, проведенных предлагаемым и автокорреляционным методами. При этом нормировка $\Delta\lambda_{\text{sim}}$ на величину $\sqrt{\bar{p}}$ позволяет сделать эту зависимость универсальной, т.е. не зависящей от энергии импульса. Так как точность измерения средней мощности и разрешающая способность спектрометра ($\delta\lambda \sim 0.05$ нм) для симиляритонов с $\Delta\lambda > 20$ нм практически не ограничивают точность определения длительности данным методом ($\delta(\Delta t_0)/\Delta t_0 = \delta\bar{p}/\bar{p} + 2\delta(\Delta\lambda)/\Delta\lambda \sim 1\%$), то разница значений длительностей, определенных данным и автокорреляционным методами, в основном связана с методическими ошибками этих методов. Для предлагаемого метода таковым является невысокая точность выражения (1) для симиляритонов с меньшим

спектральным уширением [11-13], а для автокорреляционного метода – неопределенность формы импульса. В диапазоне средних мощностей излучения $\bar{p} = 50 - 500$ мВт, в котором проводились измерения, спектры уширялись в 3–8 раз. При этом отклонение значений длительностей τ_c , получаемых с помощью формулы (2), от значений, измеренных автокоррелятором, не превышало 5% (рис.2).

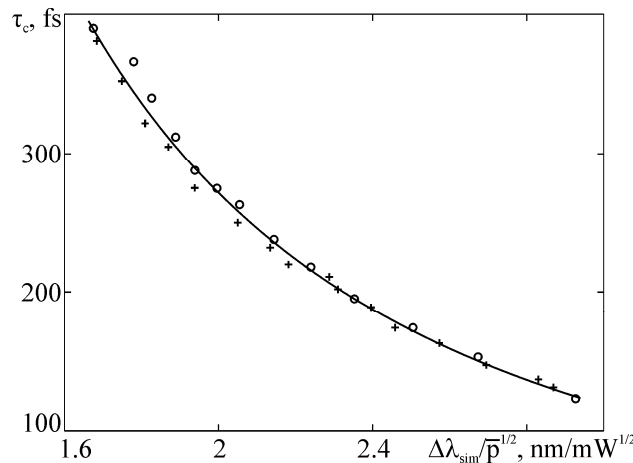


Рис.2. Экспериментальная зависимость $\tau_c = \sqrt{2}\Delta t_0$ от $\Delta\lambda_{\text{sim}}/\sqrt{\bar{p}}$. Кружки соответствуют импульсам с положительными начальными чирпами, крестики – с отрицательными, сплошная линия – аппроксимированная в соответствии с выражением (2) кривая.

Отметим, что для ~100 фс импульсов (со спектральной шириной $\Delta\lambda \sim 10$ нм) спектральная ширина симиляритона составляет $\Delta\lambda > 20$ нм, позволяя в качестве спектрометра использовать просто дифракционную решетку. Тогда измерение средней мощности излучения можно проводить в нулевом порядке дифракции. Отметим также, что длительность нелинейно-дисперсионного симиляритона однозначно определяется его спектральной шириной и дисперсионными характеристиками ОВС: $\Delta t_{\text{sim}} = \Delta\omega_{\text{sim}}/\gamma = k_2 z C \sqrt{w/\Delta t_0}$. Это позволяет при длинах ОВС ~1 км, вместо измерения спектральной ширины симиляритона, измерить его длительность наносекундным осциллографом и определить длительность исходного импульса $\Delta t_0 = (Ck_2 z / v)(\bar{p} / \Delta t_{\text{sim}}^2)$.

Таким образом, нами предложен и апробирован простой в реализации метод измерения длительности фемтосекундных лазерных импульсов, основанный на генерации нелинейно-дисперсионного симиляритона в пассивном ОВС и измерении ширины его спектра (или длительности). Метод может быть использован для повседневного контроля и наладки фемтосекундных лазеров.

Работа выполнена в рамках совместного проекта Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, Франция) и Государственного Комитета по Науке (ГКН, Армения) (грант # IE007). А. Зейтунян благодарит также ГКН и National Foundation of Science and Advanced Technology (NFSAT) за финансовую

поддержку в рамках проекта Early Career Support Program (гранты # A-16 и ECSP-09-50).

ЛИТЕРАТУРА

1. **D.J.Kane, R.Trebino.** Opt. Lett., **18**, 823 (1993).
2. **C.Iaconis, I.A.Walmsley.** Opt. Lett., **23**, 792 (1998).
3. **V.Messenger, F.Louradour, C.Froehly, A.Barthélémy.** Opt. Lett., **28**, 743 (2003).
4. **M.Lelek, F.Louradour, A.Barthélémy, C.Froehly, T.Mansourian, L.Mouradian, J.P.Chambaret, G.Chériaux, B.Mercier.** J. Opt. Soc. Am. B, **25**, A17 (2008).
5. **P.Kockaert, M.Haelterman, Ph.Emplit, C.Froehly.** IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **10**, 206 (2004).
6. **V.V.Loizovoy, I.Pastirk, M.Dantus.** Opt. Lett., **29**, 775 (2004).
7. **M.A.Foster, R.Salem, D.F.Geraghty, A.C.Turner-Foster, M.Lipson, A.L.Gaeta.** Nature, **456**, 81 (2008).
8. **T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy.** J. Opt. Soc. Am. B, **25**, A101 (2008).
9. **M.Maier, W.Kaiser, J.A.Girdomane.** Phys. Rev. Lett., **17**, 1275 (1966).
10. **А.С.Мгерян, О.А.Мовсесян, А.А.Киракосян, Л.Х.Мурадян.** Изв. НАН Армении, Физика, **40**, 41 (2005).
11. **A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, P.Kockaert, P.Emplit, F.Louradour, A.Barthélémy.** J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public., **4**, 09009 (2009).
12. **А.С.Зейтунян, К.А.Паланджян, Г.Л.Есаян, Л.Х.Мурадян.** Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 97 (2010).
13. **A.S.Zeytunyan.** Proc. of the YSU, Phys. and Mathem. Sciences, № **1**, 54 (2010).
14. **V.I.Kruglov, A.C.Peacock, J.D.Harvey, J.M.Dudley.** J. Opt. Soc. Am. B, **19**, 461 (2002).
15. **T.Hirooka, M.Nakazawa.** Opt. Lett., **29**, 498 (2004).

ՖԵՄՏՈՎԱՅՐԿՅԱՆԱՅԻՆ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍՆԵՐԻ ԴԻԱԳՆՈՍՏԻԿԱ՝
ՀԻՄՆՎԱԾ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ-ԴԻՍՊԵՐՍԻՎ ՍԻՄԻԼԱՐԻՏՈՆԻ ԳԵՆԵՐԱՅՄԱՆ ՎՐԱ

Ա.Ս. ԶԵՅԹՈՒՆՅԱՆ, Հ.Ռ. ՄԱԴԱԹՅԱՆ, Գ.Լ. ԵՍԱՅԱՆ, Լ.Խ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

Առաջարկված և փորձարկված է ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների տևողության որոշման ավտոկորելյացիոն մեթոդին այլընտրանք, հիմնված պասիվ (առանց ուժեղացման) մանրաթելային լուսատարում ոչ գծային-դիսպերսիոն սիմիլյարիտոնի գեներացման և մուտքային իմպուլսի տևողությամբ տրվող նրա սպեկտրալ լայնության (տևողության) չափման վրա:

DIAGNOSTICS OF FEMTOSECOND LASER PULSES BASED ON THE GENERATION OF NONLINEAR-DISPERSIVE SIMILARITON

A.S. ZEYTUNYAN, H.R. MADATYAN, G.L. YESAYAN, L.KH. MOURADIAN

We propose and experiment an alternative to the autocorrelation technique for determination of femtosecond laser pulse duration. The method is based on the generation of nonlinear-dispersive similariton in a passive fiber (without gain) and measurement of its bandwidth (or duration) given by the input pulse power.