

ПИКОСЕКУНДНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ АКУСТООПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДИОГРАФИИ И ИНЕРЦИАЛЬНОГО УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

PICOSECOND LASER PULSE PROFILING USING ACOUSTO-OPTICS FOR RADIOGRAPHY AND INERTIAL PLASMA CONFINEMENT

К. Б. Юшков, А. И. Чижиков, В. Я. Молчанов, В. В. Романов¹

K. B. Yushkov, A. I. Chizhikov, V. Ya. Molchanov, V. V. Romanov¹

Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

National University of Science and Technology MISIS,

4 Leninsky Prospekt, Moscow, 119049

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В докладе представлены результаты экспериментов по акустооптическому управлению ультракороткими лазерными импульсами. Разработаны акустооптические дисперсионные линии задержки с рекордным спектральным разрешением 0,12 нм, предназначенные для управления пикосекундными импульсами лазеров на основе неодимового стекла. Создан комплекс акустооптического дисперсионного управления субпикосекундными лазерными каналами для стартовой части мощных лазерных систем. Продемонстрирована произвольная временная модуляция chirпированных импульсов с симметричными фронтами нарастания и спада 5 пс.

Experimental results on acousto-optic controlling of ultrashort laser pulses are reported. Acousto-optic dispersive delay lines with record spectral resolution of 0.12 nm have been designed and fabricated for Nd-glass picoseconds lasers. The complex of acousto-optic dispersive pulse shaping for the front-end of high power sub-ps laser systems has been created. Arbitrary temporal profiling of chirped laser pulses with 5 ps modulation rise/fall time are presented.

Пространственное и временное профилирование лазерных импульсов играет ключевую роль во многих задачах взаимодействия излучения с веществом. Одной из важнейших фундаментальных проблем, требующих профилирования импульсов, является лазерный термоядерный синтез (ЛТС) [1–4]. Формирование силовых лазерных импульсов специальной формы требуется как в традиционной схеме инерциального нагрева и удержания плазмы, так и в схеме быстрого зажигания, использующей более короткие лазерные импульсы петаваттной пиковой мощности. В настоящий момент для временного профилирования силовых наносекундных импульсов в установках ЛТС используются программируемые электрооптические модуляторы с быстрым действием порядка 10 ГГц [5–7]. В настоящем докладе представлены результаты управления формой лазерных импульсов

акустооптическим (АО) методом с полосой модуляции, на порядок превосходящей существующие электрооптические системы. Показано, что основным фактором, определяющим время нарастания фронтов модуляции, является спектральное разрешение АО-прибора.

Для управления спектром и длительностью ультракоротких лазерных импульсов широко используются акустооптические дисперсионные линии задержки (АОДЛЗ), основанные на анизотропном АО-взаимодействии лазерного импульса с частотно-модулированной (ЧМ) ультразвуковой дифракционной решеткой [8–10]. Фактически, АОДЛЗ представляет собой электронно-управляемую программируемую chirпированную брэгговскую решетку. Фазовая задержка осуществляется за счет пространственно-распределенного преобразования одной собственной поляризации

кристалла в ортогональную собственную поляризацию; эффективность преобразования каждой длины волны света определяется спектральной плотностью мощности ультразвуковой высокочастотной (ВЧ) волны на соответствующей фазовому синхронизму частоте. Таким образом осуществляется фазовая и амплитудная модуляция лазерных импульсов.

Рассмотрим модуляцию чирпированного лазерного импульса, имеющего ширину спектра $\Delta\lambda$ и длительность τ в АОДЛЗ. Не снижая общности дальнейшего рассмотрения, будем считать заданную спектральную функцию модуляции $M(\lambda)$ меандром. Фронты спектральной функции модуляции определяются свёрткой модулирующей функции с аппаратной функцией АОДЛЗ. В предположении аппаратной функции, имеющей форму sinc^2 и ширину $\delta\lambda$ по уровню -3 дБ, фронты нарастания и спада модуляции в спектральной области имеют ширину $1,2\delta\lambda$. Ширина аппаратной функции определяется в первую очередь геометрией АО-взаимодействия (т. е. направлением квазиколлинеарной дифракции относительно кристаллографических осей), длиной взаимодействия и расходимостью светового пучка [11, 12]. Принимая во внимание линейное соотношение между мгновенной частотой и временем в локальной системе отсчета, максимальную частоту модуляции интенсивности внутри импульса можно представить как

$$\Delta\nu = 0,3\Delta\lambda/(\delta\lambda \tau) = 0,3/(\delta\lambda \kappa). \quad (1)$$

Учитывая связь между длительностью импульса τ и шириной спектра $\Delta\lambda$ через коэффициент чирпа κ , $\tau = \kappa \Delta\lambda$, получим, что время нарастания фронта модуляции τ_r определяется шириной аппаратной функции АОДЛЗ:

$$\tau_r = 1,2 \delta\lambda \kappa. \quad (2)$$

Очевидно, полосу частот модуляции можно увеличить, уменьшая линейный чирп импульса κ , т. е. уменьшая дисперсию второго порядка, создаваемую стретчером и АОДЛЗ, однако при этом пропорционально уменьшается и длительность τ . Таким образом, величина произведения $\tau\Delta\nu$ остается постоянной при изменении коэффициента κ .

Эксперименты были выполнены на титан-сапфировой лазерной системе. Было получено время нарастания фронтов $\tau_r = 5$ пс при ширине спектра $\Delta\lambda = 100$ нм на центральной длине волны 795 нм и линейном чирпе $\kappa = 6,25$ пс/нм, создаваемом совместно стретчером и АОДЛЗ, имеющей ширину аппаратной функции $\delta\lambda = 0,24$ нм [13]. Соответствующая полоса модуляции равняется 70 ГГц, что существенно превосходит существую-

ющие электрооптические системы произвольной модуляции импульсов [5–7].

Основными параметрами АОДЛЗ являются спектральное разрешение, максимальная групповая задержка и эффективность дифракции, зависящие от длины и направления АО-взаимодействия в кристалле [9, 11]. Наиболее широко применяются АОДЛЗ на основе монокристаллов парателлурита (TeO_2), обеспечивающих высокую эффективность дифракции в ближнем инфракрасном диапазоне спектра [14]. Для управления излучением пикосекундного лазера на основе неодимового стекла, имеющего типичную ширину спектра $\Delta\lambda$ порядка нескольких нанометров, была создана конфигурация АОДЛЗ высокого разрешения [15]. АОДЛЗ, разработанные и изготовленные в НТУЦ Акустооптики НИТУ «МИСиС», имеют следующие характеристики: ширина аппаратной функции $\delta\lambda = 0,12$ нм; эффективность дифракции более 80 % при ширине спектра $\Delta\lambda = 12$ нм и мощности управляющего ВЧ-сигнала менее 10 Вт. АОДЛЗ данной конфигурации имеет длину взаимодействия $L = 65$ мм в направлении 20° к оси $[1\bar{1}0]$ в плоскости (110). Схема выбранной геометрии АОДЛЗ приведена на рис. 1. Волновой вектор ультразвука \mathbf{K} и вектор Умова \mathbf{S} лежат в кристаллографической плоскости (110). Эффективность АО-взаимодействия в данной геометрии достаточна для одновременной обработки и более широкого спектра излучения, например хром-форстеритного лазера на центральной длине волны 1250 нм с $\Delta\lambda \approx 60$ нм [16, 17]. При этом, полученное спектральное разрешение на 40 % превышает другие известные конфигурации АОДЛЗ.

На основе разработанных АОДЛЗ высокого разрешения был создан комплекс акустооптического дисперсионного управления субпикосекундными лазерными импульсами, представленный на рис. 2. Архитектура комплекса построена на двухкаскадной схеме применения АОДЛЗ, позволяющей независимо управлять фазой и спектром лазерного излучения [18, 19]. Таким образом, длительность лазерных импульсов и форма спектра контролируются независимо друг от друга. Комплекс состоит из двух оптико-механических блоков с сервоприводами, по одному для каждого каскада АОДЛЗ, и электронной системы управления, в основе которой лежит генератор ВЧ-сигналов произвольной формы. В состав электронной системы управления также входят спектрометры, система синхронизации и контроля эффективности дифракции и анализаторы профиля лазерных пучков в ближней зоне, что позволяет

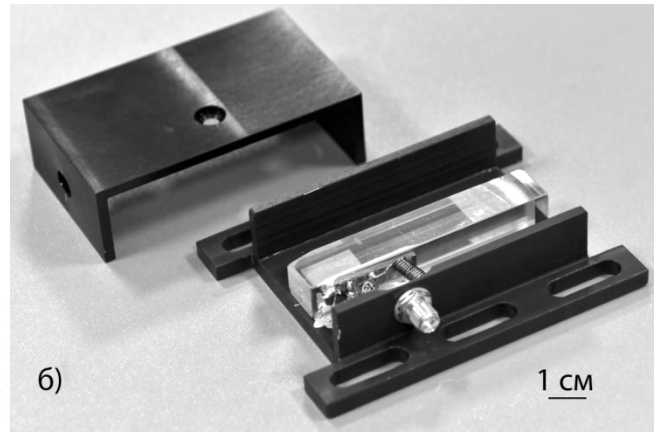
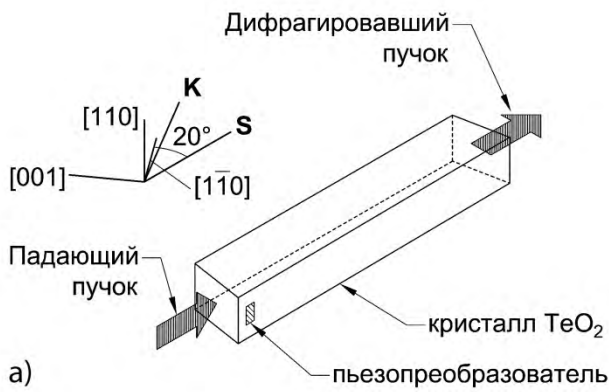


Рис. 1. Акустооптическая дисперсионная линия задержки высокого разрешения: схема (а); фотография (б)

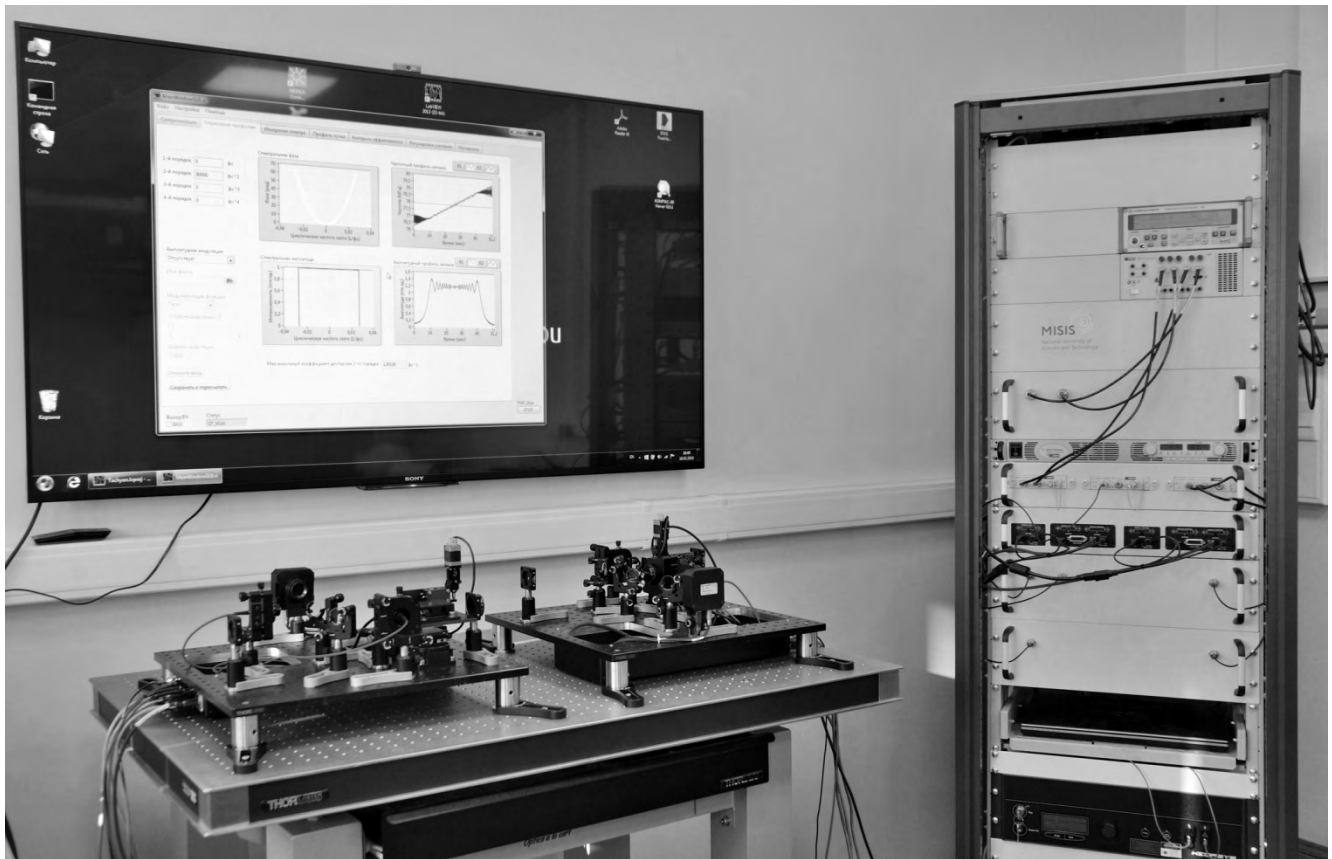


Рис. 2. Комплекс акустооптического дисперсионного управления субмикросекундными лазерными импульсами

производить автоматизированную юстировку и настройку комплекса. Для дистанционного управления комплексом создано программное обеспечение «ТАХИОН 1.0» с графическим интерфейсом [20].

Двухкаскадная архитектура позволяет варьировать размещение АОДЛЗ в оптической схеме стартового комплекса лазерной системы. Например, каскад амплитудной модуляции АОДЛЗ может быть размещен внутри регенеративного оптического усилителя, что позволяет предотвратить

сужение спектра излучения и, как следствие, сохранить близкую к исходной длительность импульса после сжатия [15]. Каскад фазовой модуляции АОДЛЗ может быть независимо от него установлен до или после оптического усилителя. Как показано в работе [17], фазовая модуляция при помощи АОДЛЗ может осуществляться и до регенеративного лазерного усилителя, в то время как амплитудная модуляция при этом оказывается неэффективной из-за насыщения усиления. При такой архитектуре комплекс акустооптического дис-

персионного управления может быть с незначительными модификациями в перспективе использован для различных субпикосекундных и фемтосекундных лазерных систем.

Для получения произвольной модуляции chirпированного лазерного импульса акустооптическая коррекция осуществляется в два этапа. Во-первых, производится измерение спектра излучения и его приведение к прямоугольной форме. Спектр излучения $I_0(\lambda)$ измеряется в окне шириной $\Delta\lambda$ (кривая 1 на рис. 3). Спектр ультразвукового сигнала, подаваемого на АОДЛЗ задается в виде

$$S_1(f) = \text{rect}(\Delta f) I_0(\lambda(f))^{-1/2}. \quad (3)$$

Спектральная фаза ультразвука является квадратичной функцией девиации частоты ультразвука f , коэффициент дисперсии второго порядка ψ_2 для которой однозначно связан с длительностью T получаемого волнового пакета [21]

$$\psi_2 = T/(4\pi \Delta f). \quad (4)$$

Максимальная длительность $T = L/V_g$ определяется длиной кристалла L и групповой скоростью ультразвука V_g в выбранном направлении АО-взаимодействия. Таким образом, на выходе АОДЛЗ получается излучение с прямоугольным спектром в заданном спектральном окне $\Delta\lambda$, которому соответствует диапазон частот ультразвука Δf (кривая 2 на рис. 3). Если произвольная модуляция задана в виде функции $M(\lambda)$, то на второй итерации алгоритма спектр ультразвука задается в виде

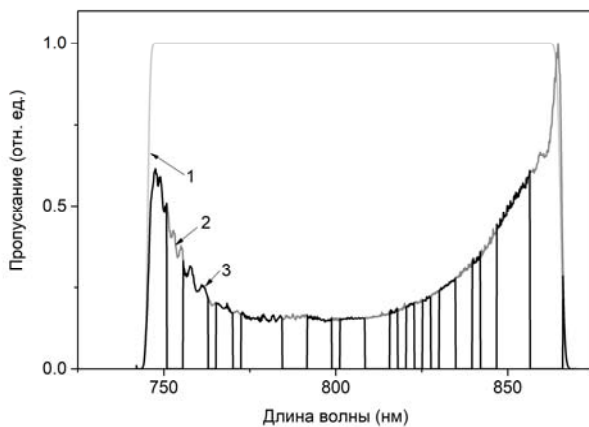
$$S_2(f) = S_1(f) M(\lambda(f))^{1/2}. \quad (5)$$

Результаты двухшагового произвольного профилирования спектра фемтосекундного лазерного

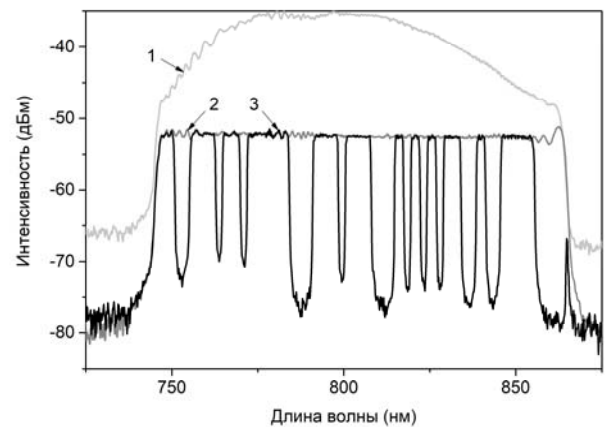
излучения приведены на рис. 3. В приведенном эксперименте спектральное окно шириной $\Delta\lambda = 120$ нм было разбито на 50 интервалов, ширина каждого составляла $10\delta\lambda = 2,4$ нм.

Аналогичные эксперименты, проведенные с АОДЛЗ высокого разрешения ($\delta\lambda = 0,12$ нм) на центральной длине волны излучения 1053 нм при ширине обрабатываемого спектрально окна $\Delta\lambda = 40$ нм продемонстрировали, что при ширине отдельного канала $3\delta\lambda = 0,36$ нм глубина модуляции составляет не менее -6 дБ, а при ширине канала $2\delta\lambda = 0,24$ нм глубина модуляции составляет не менее -3 дБ что позволяет получить более 160 разрешимых временных позиций при модуляции chirпированного импульса. При этом фронты нарастания интенсивности излучения определяются выражением (1) и могут регулироваться как изменением величины ψ_2 в самой АОДЛЗ, так и дополнительным лазерным стретчером.

По результатам работы можно сделать заключение, что АОДЛЗ высокого разрешения эффективны для осуществления произвольной модуляции chirпированных лазерных импульсов с фронтами нарастания и спада интенсивности порядка единиц пикосекунд. Для достижения минимальной длительности фронтов требуется максимальное сужение аппаратной функции АОДЛЗ, что достигается выбором геометрии АО-взаимодействия в кристалле парателлурита и большой длиной взаимодействия $L > 60$ мм. Важным фактором достижения максимального разрешения является температурная стабилизация АОДЛЗ, поскольку неоднородное поглощение высокочастотного ультразвука в АО-кристаллах приводит к уширению аппаратной функции и соответствующему ухудшению спектрального разрешения [22]. Исследование



а



б

Рис. 3. Произвольная спектральная модуляция фемтосекундного лазерного излучения: заданная функция пропускания АОДЛЗ (а); измеренный спектр прошедшего через АОДЛЗ фемтосекундного лазерного излучения (б)

распределения неоднородных тепловых полей в АОДЛЗ и методов их гомогенизации является ключевым фактором эффективного управления субпикосекундными лазерными импульсами с шириной спектра $\Delta\lambda < 10$ нм и подлежит дальнейшему изучению.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты 15-07-03719, 18-07-00670).

Список литературы

1. Ильяев Р. И., Гаранин С. Г. Исследование проблем термоядерного синтеза на мощных лазерных установках // Вестник РАН. 2006. Т. 76, № 6. С. 503–513.
2. Zuegel J. D., Borneis S., Barty C. et al. Laser challenges for fast ignition // Fusion Sci. Technol. 2006. V. 49, № 3. P. 453–482.
3. Гуськов С. Ю. Быстрое зажигание мишенной инерциального синтеза // Физика плазмы. 2013. Т. 39, № 1. С. 3–59.
4. Fujioka S., Arikawa Y., Kojima S. et al. Fast ignition realization experiment with high-contrast kilo-joule peta-watt LFEX laser and strong external magnetic field // Phys. Plasmas. 2016. V. 23, № 5. P. 056308.
5. Crane J. K., Wilcox R. B., Hopps N. W. et al. Integrated operations of the National Ignition Facility (NIF) optical pulse generation development system // Proc. SPIE. 1999. V. 3492. P. 100–111.
6. Jolly A., Gleyze J. F., Luce J. et al. Front-end sources of the LIL-LMJ fusion lasers: progress report and prospects // Opt. Eng. 2003. V. 42, № 5. P. 1427–1438.
7. Xu D., Tian X., Zhou D. et al. Temporal pulse precisely sculpted millijoule-level fiber laser injection system for high-power laser driver // Appl. Optics. 2017. Vol. 56, № 10. P. 2661–2666.
8. Пожар В. Э., Пустовойт В. И. О сжатии ультракоротких импульсов света // Квант. Электрон. 1987. Т. 17, № 4. С. 811–813.
9. Tournois P. Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems // Opt. Commun. 1997. V. 140, № 4–6. P. 245–249.
10. Molchanov V. Ya., Chizhikov S. I., Makarov O. Yu. Adaptive acousto-optic technique for femtosecond laser pulse shaping // Appl. Opt. 2009. V. 48, № 7. P. C118–C124.
11. Молчанов В. Я., Волошинов В. Б., Макаров О. Ю. Квазиколлинеарные перестраиваемые акустооптические фильтры для систем спектрального уплотнения и селекции оптических каналов // Квант. Электрон. 2009. Т. 39, № 4. С. 353–360.
12. Voloshinov V. B. Anisotropic light diffraction on ultrasound in a tellurium dioxide single crystal // Ultrasonics. 1993. V. 31, № 5. P. 333–338.
13. Yushkov K. B., Romanov V. V., Rogozhnikov G. S., Molchanov V. Ya. 70 GHz arbitrary modulation of chirped laser pulses by means of acousto-optics // Optics Letters. 2016. V. 41, № 23. P. 5442–5445.
14. Пат. RU 2453878 C1 МПК G02F1/11. Акустооптическая дисперсионная линия задержки / Молчанов В. Я., Чижиков С. И., Макаров О. Ю. // Открытия. Изобретения. 2012. № 17.
15. Chizhikov S. I., Garanin S. G., Goryachev L. V., Molchanov V. Ya., Romanov V. V., Rukavishnikov N. N., Sokolovskii S. V., Voronich I. N., Yushkov K. B. Acoustooptical adaptive correction of a chirped laser pulse spectral profile in a Nd-phosphate glass regenerative amplifier // Laser Phys. Lett. 2013. V. 10, № 1. P. 015301.
16. Овчинников А. В., Чефонов О. В., Молчанов В. Я. и др. Генерация перестраиваемого по частоте импульсного терагерцевого излучения хром-форстеритовой лазерной системой с акустооптическим управлением временным профилем импульсов // Квант. Электрон. 2016. Т. 46, № 12. С. 1149–1153.
17. Yushkov K. B., Molchanov V. Ya., Ovchinnikov A. V., Chefonov O. V. Acousto-optic replication of ultrashort laser pulses // Phys. Rev. A. 2017. V. 96, № 4. P. 043866.
18. Пат. RU 107868 U1 МПК G02F1/33. Двухкаскадная адаптивная дисперсионная оптическая линия задержки (варианты) / Молчанов В. Я., Чижиков С. И., Юшков К. Б. и др. // Открытия. Изобретения. 2011. № 24.
19. Молчанов В. Я., Чижиков С. И., Юшков К. Б. Двухкаскадная акустооптическая дисперсионная линия задержки для сверхкоротких лазерных импульсов // Квант. Электрон. 2011. Т. 41, № 8. С. 675–676.
20. Государственная регистрация программы для ЭВМ RU 2015662727. Управление двухкаскадной акустооптической дисперсионной линией задержки (ТАХИОН 1.0) / Романов В. В., Юшков К. Б., Макаров О. Ю. Публикация от 20.12.2015.
21. Molchanov V. Ya., Yushkov K. B. Advanced spectral processing of broadband light using acousto-optic devices with arbitrary transmission functions // Opt. Express. 2014. V. 22, № 13. P. 15668–15678.
22. Mantsevich S. N., Molchanov V. Ya., Yushkov K. B., Khorkin V. S., Kupreychik M. I. Acoustic field structure simulation in quasi-collinear acousto-optic cells with ultrasound beam reflection // Ultrasonics. 2017. V. 78. P. 175–184.