Научная статья

УДК 535.015
DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-16-25

Разработка и апробация автокоррелятора для измерения длительности пикосекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона

Владислав Михайлович Борин[1,2,3], Петр Борисович Горностаев[4], Олег Игоревич Мешков[1,2], Александр Сергеевич Кучьянов[5], Станислав Владимирович Рева[1,2]

[1]Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

[2]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

[3]Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

[4]Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
Москва, Россия

[5]Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия

V.M.Borin@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-8317-5855
vor@kapella.gpi.ru
O.I.Meshkov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0001-6304-7525
aleks@iae.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-5292-2555
s.reva@g.nsu.ru

Аннотация

В работе представлена схема автокоррелятора, изготовленного для измерения длительности инфракрасных пикосекундных импульсов излучения 3-го лазера установки «Новосибирский лазер на свободных электронах», а также результаты тестирования автокоррелятора при измерении длительности пикосекундных импульсов в видимом диапазоне.

Ключевые слова

лазер на свободных электронах, интерферометрия, автокорреляция, длительность, инфракрасный, пикосекунда.

Для цитирования

Борин В. М., *Горностаев П. Б., Мешков О. И., Кучьянов А. С., Рева С. В.* Разработка и апробация автокоррелятора для измерения длительности пикосекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 16–25. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-16-25

© Борин В. М., Горностаев П. Б., Мешков О. И., Кучьянов А. С., Рева С. В., 2023

Development and Testing of an Autocorrelator for Measuring the Duration of Picosecond Pulses of Near-infrared Radiation

Vladislav M. Borin[1,2,3], Petr B. Gornostaev[4], Oleg I. Meshkov[1,2], Alexandre S. Kuch'yanov[5], Stanislav V. Reva[1,2]

[1]Institute of Nuclear Physics of the SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

[2]Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

[3]Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

[4]Prokhorov General Physics Institute of the RAS
Moscow, Russian Federation

[5]Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

V.M.Borin@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-8317-5855
vor@kapella.gpi.ru
O.I.Meshkov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0001-6304-7525
aleks@iae.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-5292-2555
s.reva@g.nsu.ru

Abstract

A scheme of an autocorrelator developed for measuring the duration of picosecond pulses of infrared radiation from the 3rd Novosibirsk Free Electron Laser is presented, as well as the results of approbation of the autocorrelator when measuring the duration of picosecond pulses in the visible range.

Keywords

Free Electron Laser, interferometry, autocorrelation, pulse length, infrared, picosecond

For citation

Borin V. M., Gornostaev P. B., Meshkov O. I., Kuchyanov A. S., Reva S. V. Development and testing of an autocorrelator for measuring the duration of picosecond pulses of near-infrared radiation. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 16–25 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-16-25

Введение

Третий лазер Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) установлен на 4-й дорожке ускорителя-рекуператора (рис. 1), его магнитная структура достаточно сложна: пучки электронов имеют различный энергетический разброс на разных дорожках ускорителя, кроме того в ускорителе находятся одновременно несколько пучков электронов, ускоряющихся и замедляющихся.

Условия генерации лазерного излучения на четвертой дорожке Новосибирского ЛСЭ накладывают строгие требования на параметры электронного пучка и настройку ускорителя [1], поэтому оптимальная работа лазера невозможна без оперативного измерения параметров электронных пучков и лазерного излучения. Одними из основных характеристик лазерного излучения является временная и спектральная ширина сигнала. В данный момент существует возможность измерения только спектральных характеристик и средней мощности излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. Измерение длительности импульса излучения является важным для пользователей установки, однако до сих пор провести такие измерения не удавалось.

Одна из основных проблем, связанных с диагностикой параметров излучения Новосибирского ЛСЭ, – отсутствие в нашем распоряжении готовых измерительных приборов, способных

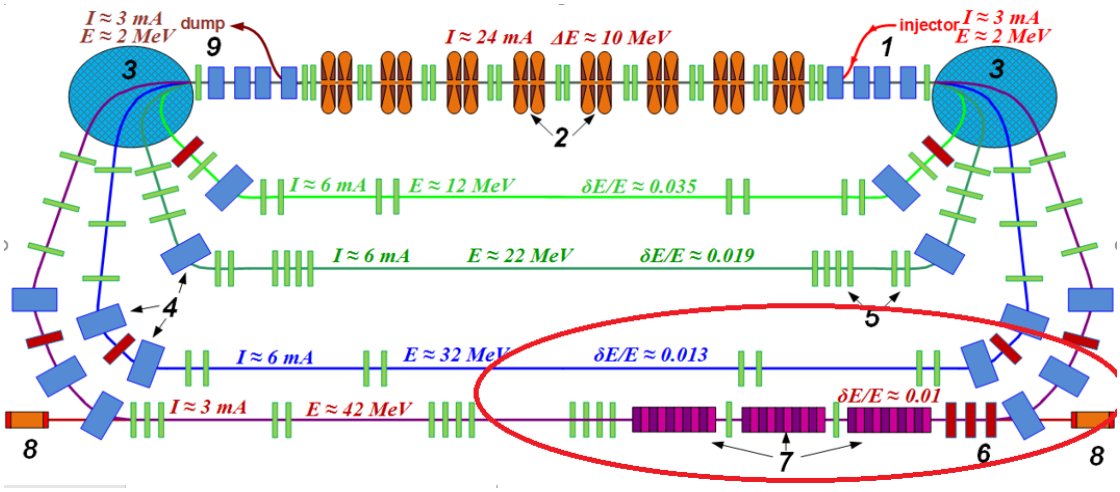

Рис. 1. Схема Новосибирского лазера на свободных электронах: *1* – инжектор электронов; *2* – ускоряющая секция; *3* и *4* – дипольные магниты; *5* и *6* – квадрупольные линзы; *7* – ондуляторы; *8* – зеркала оптического резонатора ЛСЭ; *9* – поглотитель электронов. На схеме показаны примерные значения энергий, токов и энергетических разбросов пучков на разных дорожках. Красным отмечена область размещения диагностических станций для измерения параметров пучков

Fig. 1. Layout of the Novosibirsk free electron laser: *1* – electron injector, *2* – accelerating section; *3*, *4* – dipole magnets; *5*, *6* – quadrupole lenses; *7* – undulators; *8* – FEL optical cavity mirrors; *9* – electron beam dump. The figure shows approximate values of energies, currents and energy spreads of beams on different tracks. The area where diagnostic stations are located for measuring beam parameters is marked in red

Таблица 1

Параметры третьего лазера Новосибирского ЛСЭ

Table 1

Parameters of the third laser of the Novosibirsk FEL

Диапазон длин волн, мкм	8–11
Рабочая частота повторения пучков, МГц	3,76
Максимальная средняя мощность, кВт	0,1
Энергия пучка, МэВ	38–42
Средний ток, мА	3

измерить длительность пикосекундных импульсов в диапазоне длин волн генерации лазера. Для решения данной проблемы была разработана оптическая схема автокоррелятора, основанная на оптических компонентах, имеющихся в нашем распоряжении.

1. Автокорреляционное измерение длительности импульса излучения

Одним из наиболее распространенных методов оптических измерений является измерение корреляционных функций [2]. Корреляционная функция двух комплексных функций $f(x)$ и $g(x)$ определяется следующим образом:

$$(f * g)(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g^*(t-\tau)\, dt, \qquad (1)$$

где g^* обозначает комплексно-сопряженную функцию к g. Корреляционная функция показывает степень сходства между одним сигналом и другим сигналом для разных значений τ –

чем больше значение корреляционной функции, тем это сходство сильнее. Если $f(t) = g(t)$, то такая функция называется автокорреляционной функцией. В оптике автокорреляционная функция электромагнитных полей обычно называется автокорреляционной функцией первого порядка $A(\tau)^{(1)}$:

$$A(\tau)^{(1)} = \int_{-\infty}^{\infty} E(t)E^*(t-\tau)\,dt. \tag{2}$$

Для регистрации автокорреляционной функции первого порядка необходимо поделить сигнал и направить на приемник излучения обе составляющие с изменяемой задержкой во времени относительно друг друга. Результирующий сигнал, регистрируемый детектором, позволяет определить автокорреляционную функцию. В оптике для таких измерений хорошо подходят интерферометрические методы. Согласно теореме Винера – Хинчина [3] автокорреляционная функция сигнала первого порядка связана с его частотным спектром излучения $I(\omega)$ через Фурье-преобразование:

$$F(\tau) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega)e^{i\omega\tau}d\omega. \tag{3}$$

Для импульса с гауссовой формой можно получить следующее соотношение между длительностью автокорреляционной функции первого порядка и шириной спектра:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sigma_\omega} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi c\sigma_\lambda}. \tag{4}$$

Автокорреляционная функция интенсивности обычно называется автокорреляционной функцией второго порядка $A(\tau)^{(2)}$:

$$A(\tau)^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I^*(t-\tau)dt. \tag{5}$$

Длительность автокорреляционной функции второго порядка τ_{ac} связана с длительностью исходного импульса τ_p следующим соотношением:

$$\tau_{ac} = k\tau_p, \tag{6}$$

где k – коэффициент, зависящий от формы импульса. Коэффициент можно рассчитать из уравнения (5), для импульса гауссовой формы $k = \sqrt{2}$, для импульса формы гиперболического секанса, часто встречающегося в лазерной физике, $k = 1{,}543$.

Таким образом, измерив автокорреляционную функцию первого и второго порядка, можно определить соответственно спектральную ширину и длительность импульса излучения.

Схема предложенного автокоррелятора для измерений длительности импульса на Новосибирском ЛСЭ представлена на рис. 2. Предложенная схема по устройству близка к схеме интерферометра Майкельсона [4], однако плечи интерферометра представляют собой тонкие плоские зеркала, расположенные в направлении распространения излучения и разнесенные в поперечной, к излучению плоскости относительно друг друга, для получения двух отдельных импульсов излучения. Изменение положения одного из зеркал, установленного на моторизированной подставке, позволяет контролировать длину пути одного из лучей и, соответ-

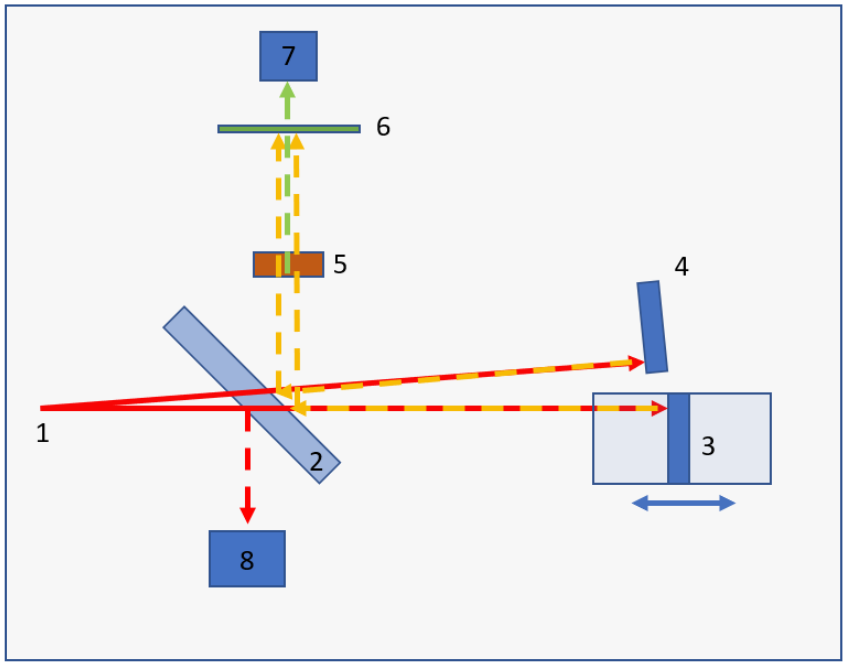

Рис. 2. Предложенная оптическая схема для измерения автокорреляционных функций: *1* – излучение от источника; *2* – полупрозрачное зеркало; *3* – зеркало на моторизированной подставке; *4* – неподвижное зеркало; *5* – нелинейный кристалл; *6* – полосовой фильтр; *7* – детектор излучения; *8* – место для установки дополнительной диагностики основной гармоники излучения

Fig. 2. Proposed optical scheme for measuring of autocorrelation functions: *1* – radiation from the source; *2* – translucent mirror; *3* – mirror on a motorized stand; *4* – fixed mirror; *5* – nonlinear crystal; *6* – bandpass filter; *7* – detector; *8* – place for installing additional diagnostics of the fundamental radiation harmonic

ственно, его временную задержку относительно другого. Смещение зеркала на длину a вносит задержку $\tau = \frac{2a}{c}$, где c – скорость света.

Свет от источника излучения (1) проходит через полупрозрачное зеркало (2) и после отражения от плеч интерферометра (3, 4) лучи направляются полупрозрачным зеркалом в направлении нелинейного кристалла (5). Для измерений на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ был выбрал кристалл дифосфида цинка-германия ($ZnGeP_2$)[1], который имеет квадратичную нелинейность и предназначен для работы в диапазоне длин волн излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. В нелинейном кристалле происходит генерация второй гармоники излучения, а ее интенсивность на выходе из нелинейного кристалла пропорциональна произведению квадратов поля интерферирующих в нем электромагнитных волн, т. е. произведению их интенсивностей [5]:

$$I_{SH}(\tau) \propto I^2(t) + I^2(t-\tau) + 4I(t-\tau)I(t), \quad (7)$$

где I_{SH} – интенсивность второй гармоники, I – интенсивность изучаемого импульса. Если импульсы приходят в кристалл с большой задержкой, то имеются лишь отдельные сигналы генерации второй гармоники от пришедших импульсов, а если задержка сопоставима с длительностью импульса, то появляется слагаемое, отражающее степень наложения интенсивностей $I(t)$

[1] См.: http://loc-ltd.com/zngep2/

импульсов (рис. 3). Измеряя зависимость интенсивности излучения второй гармоники от задержки τ, можно восстановить длительность импульса.

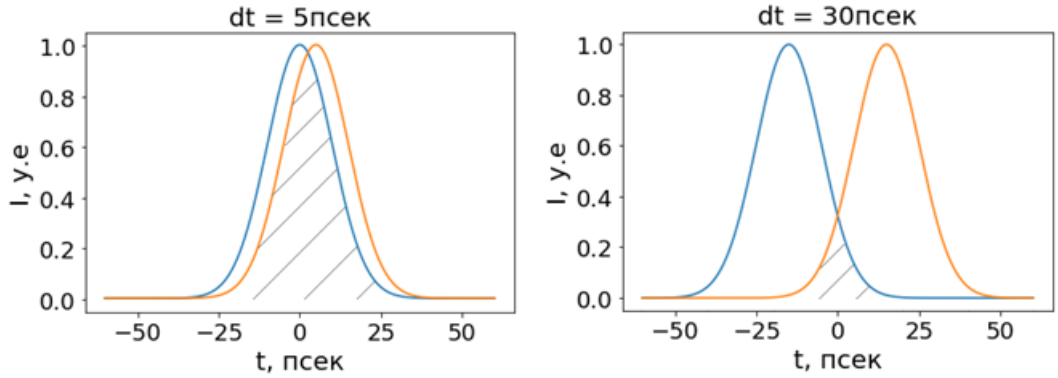

Рис. 3. Наложение интенсивностей импульсов излучения. Заштрихованная часть – область перекрытия импульсов
Fig. 3. Overlap of radiation pulse intensities. The shaded part is the area of pulse overlap

При первоначальной юстировке схемы путем изменения положения зеркала, установленного на моторизированной подставке, соосность зеркал проверяется по отсутствию изменения положения изображения на приемнике излучения во время изменения положения зеркала, установленного на моторизованной подставке, управляемой шаговым двигателем. Максимальная интенсивность излучения второй гармоники достигается за счет небольшого поворота неподвижного зеркала для достижения максимального перекрытия световых потоков, отраженных от разных зеркал. Интенсивность второй гармоники регистрируется с помощью болометрической матрицы (7 на рис. 2). Частота второй гармоники вдвое больше частоты изначального излучения (основная гармоника), которое в большинстве своем проходит через кристалл в неизменном виде. Поэтому перед матрицей располагается полосовой фильтр, не пропускающий исходный импульс. Поскольку время экспозиции одного кадра у болометрической матрицы много больше длительности импульса излучения, то возможно только интегральное измерение всего излучения второй гармоники, сгенерированного за один лазерный импульс. В таком случае регистрируемый матрицей сигнал является усреднением выражения (7) по большому числу периодов, усреднение же перекрестного слагаемого представляет собой автокорреляционную функцию второго порядка. Для регистрации автокорреляционной функции изображения с болометрической матрицы регистрируются при различных задержках сигнала τ, и из полученной автокорреляционной функции вычисляется длительность импульса. Среди положительных особенностей предложенной схемы измерения автокорреляционной функции стоит отметить: простоту процедуры юстировки схемы, отсутствие дорогостоящих оптических элементов, возможность легко перестроить схему для работы в другом диапазоне длин волн, возможность измерения импульсов с длительностью меньше 1 псек, так как минимальный шаг смещения механизированной подставки составляет 1,4 мкм, что соответствует задержке оптического сигнала порядка 10 фс.

2. Проверка работоспособности автокоррелятора в оптическом диапазоне

Предложенная схема была протестирована на неодимовом лазере с длительностью импульса порядка 10 пикосекунд по основанию с длиной волны излучения 1064 нм [6; 7]. Помимо автокоррелятора, длительность импульса лазерного излучения измерялась с помощью стрик-камеры PS-1/S20 с разрешающей способностью порядка 1 пс.

Схема эксперимента представлена на рис. 4.

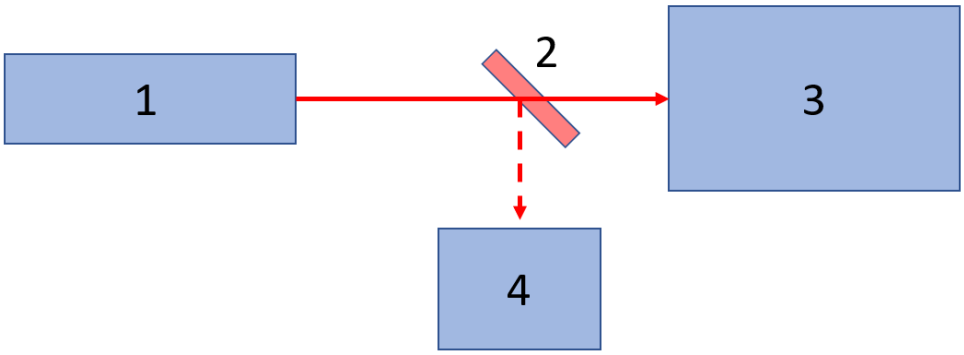

Рис. 4. Схема эксперимента по измерению на пикосекундном лазере с длиной волны 1064 нм: *1* – лазер; *2* – полупрозрачное зеркало; *3* – схема для измерения автокорреляционной функции; *4* – дополнительный детектор излучения / стрик-камера

Fig. 4. Schematic of the 1064 nm picosecond laser measurement experiment: *1* – Laser; *2* – translucent mirror; *3* – scheme for measuring the autocorrelation function; *4* – additional detector / streak camera

Для проведения измерений в оптическом диапазоне был использован нелинейный кристалл бета-бората бария (β-BaB_2O_4)[2], а в качестве детектора излучения использовалась цифровая ПЗС-камера. Интенсивность импульсов лазера дополнительно контролировалась детектором (8) (рис. 3).

Во время экспериментов с помощью предложенной схемы была проведена регистрация длительности автокорреляционной функции второго порядка. Излучение первой гармоники лазера отсекалось фильтром СЗС-23. Одновременно с измерениями автокорреляционным методом часть света через дополнительное полупрозрачное зеркало направлялась на стрик-камеру (4) (рис. 4) для прямой регистрации временного профиля импульса лазерного излучения.

3. Результаты апробации автокорреляционной схемы

Измеренная с помощью стрик-камеры длительность импульса неодимового лазера в серии из 40 измерений составляет 3,4 ± 0,5 пс, точность измерения в данном эксперименте определялось разрешающей способностью стрик-камеры. Пример полученного временного профиля лазерного импульса представлен на рис. 5.

Измерения с нелинейным кристаллом позволили измерить автокорреляционную функцию второго порядка, представленную на рис. 6.

Измеренная длительность автокорреляционной функции второго порядка (5) составила 5,4 ± 1,2 пс, таким образом длительность импульса лазерного излучения, определенная по измеренной автокорреляционной функции с помощью соотношения (6), составляет 3,6 ± 0,8 пс, что в пределах погрешности измерений совпадает со значением, полученным с помощью стрик-камеры. Кроме того, для наглядности совпадения полученных результатов на рис. 6 показана автокорреляционная функция второго порядка для профиля интенсивности пучка, показанного на рис. 5, совпадение между расчетной и измеренной автокорреляционными функциями находится в пределах ошибки измерений. Таким образом, можно заключить, что предложенная схема позволяет измерять длительность импульсов лазерного излучения с точностью не хуже, чем 1 пс.

[2] См.: http://ru.sdhengjing1.com/beta-barium-borate-product/

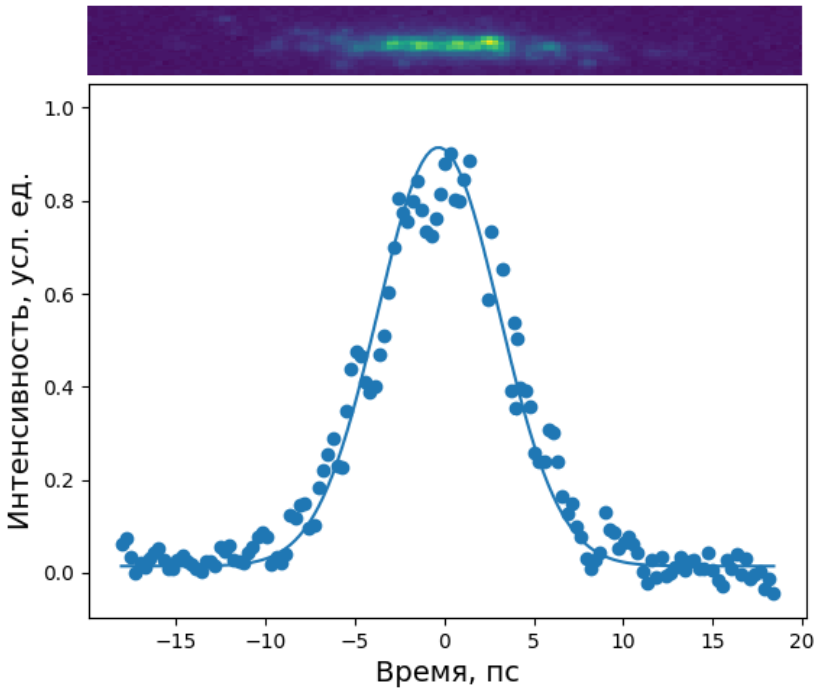

Рис. 5. Профиль лазерного импульса, зарегистрированный стрик-камерой
Fig. 5. Laser pulse profile recorded by streak camera

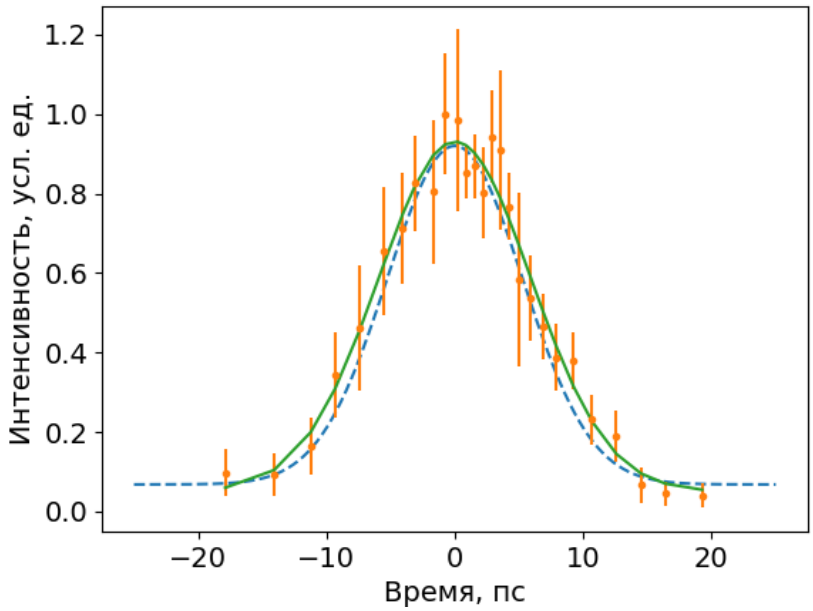

Рис. 6. Измеренная автокорреляционная функция второго порядка импульса неодимового лазера (*оранжевый*), ее аппроксимация (*зеленый*) и расчетная автокорреляционная импульса, зарегистрированного стрик-камерой (*синий пунктир*)
Fig. 6. Measured second-order autocorrelation function of a neodymium laser pulse (*orange*), its approximation (*green*) and calculated second-order autocorrelation function of the streak camera pulse (*blue dotted line*)

Помимо проверки возможности предложенной оптической схемы, на данный момент с использованием этой схемы автокоррелятора измерена автокорреляционная функция первого порядка для третьего лазера Новосибирского ЛСЭ (рис. 7).

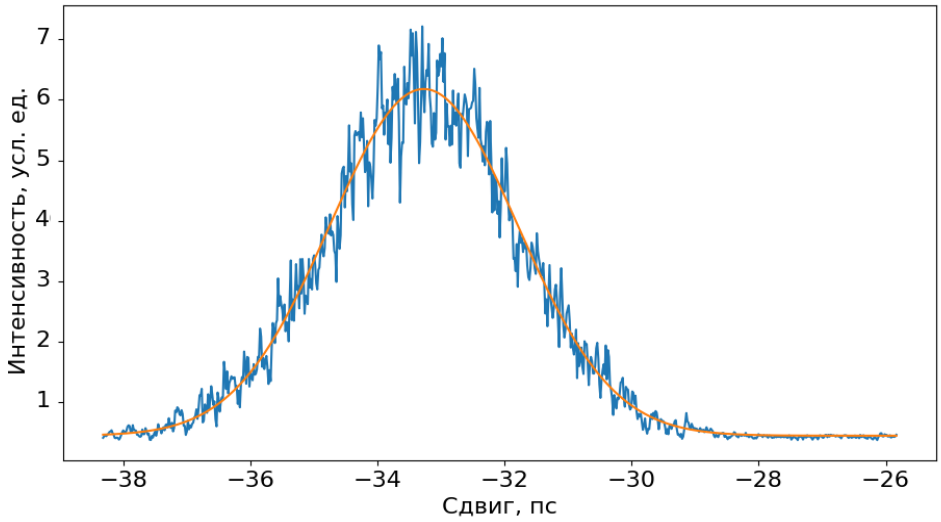

Рис. 7. Автокорреляционная функция первого порядка, измеренная на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ
Fig. 7. First-order autocorrelation function measured at the third laser of the Novosibirsk FEL

Измеренная функция хорошо аппроксимируется гауссовой формой с длительностью $\sigma_\tau = 2{,}4 \pm 0{,}2$ псек. Воспользовавшись соотношением (4) и параметрами измеренного монохроматором спектра излучения, получим ожидаемую длительность автокорреляционной функции излучения $\sigma_\tau = 2{,}5 \pm 0{,}2$ псек. Два разных метода измерений хорошо согласуются между собой, что также подтверждает корректность работы предложенной схемы автокоррелятора.

Заключение

В результате экспериментов была успешно апробирована схема измерения длительности пикосекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона. Измерения спектральной ширины, проведенные с использованием данной схемы на Новосибирском ЛСЭ, находятся в согласии с прямым измерением спектральной ширины, проведенным ранее [8]. В дальнейшем данная схема автокоррелятора будет использоваться с кристаллом дифосфида цинка-германия ($ZnGeP_2$) для измерений длительности лазерного импульса третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.

Список литературы

1. **Shevchenko O. A. et al.** Current status of the Novosibirsk infrared FEL and the third stage lasing // Phys. Part. Nuclei Lett. 2016. Vol. 13. P. 1002–1005.
2. **Yaglom A. M.** An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice–Hall, 1962.
3. **Wiener N.** Time Series. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964. P. 42.
4. **Michelson A., Morley E.** On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether // American Journal of Science. 1987. Vol. 34 (203). P. 333–345.
5. **Trebino R.** Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses : монография / R. Trebino. New York: Springer, 2002. 425 p.
6. **Komarov K. P., Kuch'yanov A. S., Ugozhaev V. D.** Generation of stationary ultrashort pulses by a passive mode-locking solid state laser // Optics communications. 1986. Vol. 5, № 4. P. 279–284.

7. **Комаров К. П., Кучьянов А. С.** О предельной длительности УКИ света, генерируемых твердотельными лазерами в режиме пассивной синхронизации мод // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 2. С. 207–210.
8. **Getmanov Ya. et al.** Development and application of electron beam optical diagnostics for the multi-turn ERL of the Novosibirsk FEL facility // JINST. 2020. Vol. 15. P. T06004.

References

1. **Shevchenko O. A. et al.** Current status of the Novosibirsk infrared FEL and the third stage lasing // Phys. Part. Nuclei Lett. 2016. Vol. 13. P. 1002–1005.
2. **Yaglom A. M.** An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice–Hall, 1962.
3. **Wiener N.** Time Series. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964. P. 42.
4. **Michelson A., Morley E.** On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether // American Journal of Science. 1987. Vol. 34 (203). P. 333–345.
5. **Trebino R.** Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses : монография / R. Trebino. New York: Springer, 2002. 425 p.
6. **Komarov K. P., Kuch'yanov A. S., Ugozhaev V. D.** Generation of stationary ultrashort pulses by a passive mode-locking solid state laser // Optics communications. 1986. Vol. 5, № 4. P. 279–284.
7. **Komarov K. P., Kuch'yanov A. S.** On the limiting duration of UKI light generated by solid-state lasers in the mode of passive mode synchronisation // Quantum Electronics. 1991. Vol. 18, no. 2. P. 207–210.
8. **Getmanov Ya. et al.** Development and application of electron beam optical diagnostics for the multi-turn ERL of the Novosibirsk FEL facility // JINST. 2020. Vol. 15. P. T06004.

Сведения об авторах

Борин Владислав Михайлович, младший научный сотрудник

Горностаев Петр Борисович, кандидат физико-математических наук

Мешков Олег Игоревич, доктор физико-математических наук

Кучьянов Александр Сергеевич, кандидат физико-технических наук

Рева Станислав Владимирович, старший лаборант

Information about the Authors

Vladadislav M. Borin, Research Assistant

Petr B. Gornostaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Oleg I. Meshkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Alexander S. Kuch'yanov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Stanislav V. Reva, Senior Laboratory Assistant

Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 19.07.2023

The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 18.07.2023; accepted for publication 19.07.2023