

## ВИЗНАЧЕННЯ АМПЛІТУДНИХ ТА ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕМТОСЕКУНДНИХ ІМПУЛЬСІВ МЕТОДОМ ОПТИЧНОГО СТРОБУВАННЯ З РОЗДІЛЕННЯМ ЗА ЧАСТОТОЮ

<sup>1</sup>Інститут фізики НАН України

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

### Анотація.

Генерація лазерних імпульсів гранично малої фемто- та аттосекундної тривалості є ефективним інструментом у дослідженнях різноманітних швидкоплинних процесів, коректний опис яких вимагає знання характеристик ультракоротких імпульсів, що можливо за рахунок впровадження та вдосконалення передових методів їх дослідження. Авторами роботи було впроваджено автоматизовану методику оптичного стробування з розділенням за частотою, що забезпечило автоматичне отримання вихідних імпульсів з заданими параметрами, що є вкрай необхідним при виконанні досліджень за використання фемтосекундного випромінювання. Це значно розширює можливості ЦККП «Фемтосекундний лазерний комплекс» при Інституті Фізики НАН України.

**Ключові слова:** Ультракороткі лазерні імпульси, оптичне стробування з розділенням за частотою, фемтосекундні лазери, амплітудні та фазові характеристики ультракоротких імпульсів, компенсатор дисперсії групової швидкості.

Генерація лазерних імпульсів гранично малої фемто- та аттосекундної тривалості є ефективним інструментом у дослідженнях різноманітних швидкоплинних процесів, наприклад, хімічних реакцій [1]. Коректний опис таких процесів вимагає знання характеристик ультракоротких імпульсів (УКІ), що можливо за рахунок впровадження та вдосконалення передових методів їх дослідження, що й стало метою даної роботи.

Знання часового та фазового профілю імпульсу є важливим у фізиці та хімії швидких процесів, оскільки це забезпечує:

- точність вимірювань - часовий профіль імпульсу дозволяє точно визначати тривалість і форму імпульсу, що є критичним для дослідження швидкоплинних процесів, таких як хімічні реакції або фізичні явища, що відбуваються на фемто- та аттосекундних часових масштабах;
- контроль і оптимізацію - фазовий профіль імпульсу допомагає контролювати і оптимізувати процеси, такі як компресія імпульсів, що дозволяє досягати бажаних характеристик імпульсу для конкретних застосувань;
- можливість проведення аналізу складних процесів - знання фазового та часового профілю, що сприяє проведенню якісного аналізу складних процесів, таких як взаємодія світла з матерією, що є важливим для розуміння фундаментальних механізмів цих процесів.

Нами було проведено аналітичний огляд існуючих методик визначення амплітудно- фазових характеристик УКІ [2-6]. Традиційні методи вимірювань забезпечують, як правило, контроль лише одного з параметрів УКІ (в більшості випадків - тривалості), що недостатньо для багатьох застосувань [2-4].

В Інституті фізики НАН України в ЦККП НАН України «Лазерний фемтосекундний комплекс» було створено унікальну дослідницьку установку із застосуванням методики оптичного стробування з розділенням за частотою (ОСРЧ) [5,6]. Також, було створено апаратно-

програмний комплекс для забезпечення автоматизації процесу вимірювань, визначення амплітудно-фазових характеристик УКІ та реалізації автоматичного відтворення оптимальних параметрів УКІ під умови конкретного експерименту/задачі.

У ході виконання роботи було проведено серію експериментів з визначення амплітудно-фазових характеристик фемтосекундних імпульсів. Аналіз результатів довів необхідність контролю наявності “чірпу”, набутого за рахунок проходження імпульсом оптичних елементів, та застосування компенсатора дисперсії групової швидкості для його модифікації – стиснення або розтягнення.

Також, було проведено вдосконалення оптичної схеми шляхом застосування дистанційного керування експериментальною установкою, що дало змогу:

- визначати амплітудно-фазові характеристики імпульсу джерела випромінювання;
- забезпечувати автоматичну мінімізацію величини “чірпу” за допомогою компенсатора, керованого відповідним програмним забезпеченням;
- у 7 разів швидше відновлювати фемтосекундні імпульси складної форми;
- від 50 до 90 разів прискорити обробку імпульсів середньої та простої складності, відповідно.

На рис. 1 представлено профілі фемтосекундного імпульсу, отримані за допомогою автоматизованої методики ОСРЧ на базі генерації другої гармоніки.

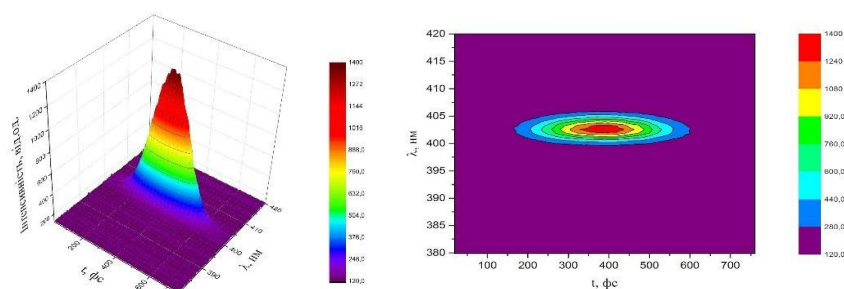


Рис. 1. Два варіанти представлення профілю ( а) тривимірний та б) двовимірний ) фемтосекундного імпульсу отримані за допомогою автоматизованої методики ОСРЧ на базі генерації другої гармоніки. Довжина хвилі накачки,  $\lambda=802$  нм, крок часової затримки  $t=7$  фс

У табл. 1 для порівняння наведено характеристики УКІ: виміряні методом ОСРЧ (відновлені апаратно-програмним комплексом за допомогою ітераційного алгоритму) та контрольні вимірювання, проведені за традиційною - автокореляційною методикою.

Табл.1. Характеристики УКІ, отримані за допомогою автоматизованої методики ОСРЧ та автокореляційного методів

№	ОСРЧ		Автокореляційна методика	
	Спектральна ширина на половині висоті, $\lambda_{FWHM}$ , нм	Часова ширина на половині висоті, $t_{FWHM}$ , фс	Спектральна ширина на половині висоті, $\lambda_{FWHM}$ , нм	Тривалість фемтосекундного імпульсу, $t_{FWHM}$ , фс
1	10	109	8	105
2	9	152	9	160
3	10,0	308	9	318

Отже, експериментально реалізована автоматизована методика ОСРЧ дозволяє визначати часові та фазові характеристики УКІ та модифікувати ”чірп”, набутий за рахунок проходження оптичних елементів.

**Висновок.** Впровадження автоматизованої методики ОСРЧ має практичну цінність і значно розширює можливості ЦККП «Фемтосекундний лазерний комплекс» при ІФ НАН України, оскільки установка забезпечує автоматичне отримання вихідних імпульсів з заданими параметрами, що є вкрай необхідним при виконанні досліджень за використання фемтосекундного випромінювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. I.V. Блонський, I.M. Дмитрук, M.G. Зубрлін, V.M. Кадан, P.I. Коренюк, I.A. Павлов, V.O. Сальников. Часороздільні методи для фемтофотоніки наноструктур. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* 6 (1), 45 (2008).
2. M. Rhodes, Z. Guang, R. Trebino. Unstable and multiple pulsing can be invisible to ultrashort pulse measurement techniques. *Appl. Sci.* 7, 40 (2017).
3. Mustafa Sadettin, Hasan Kalyoncu, Ahmet Ihsan Kutlar. An Autocorrelation Technique for Pulse Width Measurement of Ultrashort Optical Pulses. *Lasers in Engineering* 38(1-2):17-23, 2017.
4. Ross N. Relic. Measuring the Pulse Duration of a Femtosecond Laser Using Intensity Autocorrelation. *Macalester Journal of Physics and Astronomy*. V. 11, Issue 1, 2023, p.1-28.
5. Lina Xu, Erik Zeek. Simulations of Frequency-Resolved Optical Gating for measuring very complex pulses. *Journal of the Optical Society of America B*. V.5, No 6, 2009, p.941-943.
6. R. Jafari, R. Trebino. High-speed "multi-grid" pulse-retrieval algorithm for frequency-resolved optical gating. *Opt. Express* 26, 2643 (2018).

**Хоменко Вадим Володимирович**, молодший науковий співробітник Відділу когерентної і квантової оптики Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [khomenko.vadim@gmail.com](mailto:khomenko.vadim@gmail.com)

**Ходько Аліна Андріївна**, канд. фіз.-мат. наук, науковий співробітник Відділу когерентної і квантової оптики Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [khodkoalina@gmail.com](mailto:khodkoalina@gmail.com)

**Голубенко Роман Сергійович**, аспірант Відділу когерентної і квантової оптики Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [holubenko.r@proton.me](mailto:holubenko.r@proton.me)

**Левшин Олексій Євгенович**, канд. фіз.-мат. наук, науковий співробітник Відділу теоретичної фізики Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [levshin0712@gmail.com](mailto:levshin0712@gmail.com)

**Войцехович Валерій Степанович**, старший дослідник, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник Відділу когерентної і квантової оптики Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [valvvs55@gmail.com](mailto:valvvs55@gmail.com)

**Качалова Наталія Михайлівна**, старший дослідник, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник Відділу когерентної і квантової оптики Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [kachalova7nm@gmail.com](mailto:kachalova7nm@gmail.com)

**Дмитрук Ігор Миколайович**, проф., д-р фіз.-мат. наук, зав. каф. експериментальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, провідний науковий співробітник Відділу фотонних процесів Інституту Фізики НАН України, м. Київ, Україна, [igor\\_dm@yahoo.com](mailto:igor_dm@yahoo.com)

## DETERMINATION OF AMPLITUDE AND PHASE CHARACTERISTICS OF FEMTOSECOND PULSES USING FREQUENCY-RESOLVED OPTICAL GATING

### Abstract.

*The generation of extremely short femto- and attosecond-duration laser pulses is an effective tool in the study of various fast processes, the correct description of which requires knowledge of the characteristics of ultrashort pulses, which is possible due to the introduction and improvement of advanced methods for their study. The authors of the work introduced an automated method of optical gating with frequency resolution, which ensured the automatic receipt of output pulses with specified parameters, which is extremely necessary when performing research using femtosecond radiation. This significantly expands the capabilities of the Research Center for collective use "Femtosecond Laser Complex" at the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine.*

**Vadim Khomenko**, Junior Researcher at the Department of Coherent and Quantum Optics Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [khomenko.vadim@gmail.com](mailto:khomenko.vadim@gmail.com)

**Roman Golubenko**, Postgraduate student at the Department of Coherent and Quantum Optics Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [holubenko.r@proton.me](mailto:holubenko.r@proton.me)

**Alina Khodko**, PhD (Phys. & Math.), Researcher Scientist at the Department of Coherent and Quantum Optics Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [khodkoalina@gmail.com](mailto:khodkoalina@gmail.com)

**Aleksej Levshin**, PhD (Phys. & Math.), Researcher Scientist at the Department of Theoretical Physics Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [levshin0712@gmail.com](mailto:levshin0712@gmail.com)

**Valeriy Voytsekhovich**, Senior Researcher Scientist, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher at the Department of Coherent and Quantum Optics Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [valvvs55@gmail.com](mailto:valvvs55@gmail.com)

**Natalia Kachalova**, Senior Researcher Scientist, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher at the Department of Coherent and Quantum Optics, Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [kachalova7nm@gmail.com](mailto:kachalova7nm@gmail.com)

**Igor Dmitruk**, Prof., Dr.Sci. (Phys. & Math.), Head of the Department of Experimental Physics of Faculty of Physics of the Taras Shevchenko National University of Kyiv, Leading Research at the Department of Coherent and Quantum Optics Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [igor\\_dm@yahoo.com](mailto:igor_dm@yahoo.com)