

**СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,9 МКМ****М.В. Ванюшин**

vanyushinmv@student.bmstu.ru

SPIN-код: 2951-3420

Д.С. Власов

dimvla97@gmail.com

SPIN-код: 5226-9435

А.И. Воронец

andrew-voronec@yandex.ru

SPIN-код: 4696-2984

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Работа посвящена реализации метода измерения амплитудно-фазовых характеристик ультракоротких лазерных импульсов, называемого методом частотно-разрешенного оптического стробирования. Рассмотрена реализация методики с использованием генерации второй гармоники и проведено сравнение параметров импульса, полученных с помощью указанного метода и измерением сигнала спектрометром и автокоррелятором. Цель данной работы — реализация метода частотно-разрешенного оптического стробирования для измерения амплитудно-фазовых характеристик ультракоротких импульсов лазера с длиной волны 1,9 мкм. Актуальность этой работы обусловлена отсутствием коммерчески доступных устройств для измерения указанных характеристик на длине волны 1,9 мкм.

Ключевые слова

Лазер, ультракороткие импульсы, частотно-разрешенное оптическое стробирование, средний инфракрасный диапазон, генерация второй гармоники, измерения амплитудно-фазовых характеристик, автокорреляция импульса, спектрограмма

Поступила в редакцию 15.05.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Лазерные технологии — это инженерная отрасль, активно развивающаяся с середины прошлого века. Одним из многочисленных видов лазеров является так называемый лазер ультракоротких импульсов (УКИ), который имеет большую область применений: волоконная связь, медицина [1], прецизионная обработка материалов, генерация суперконтинуума [2] и многое другое [3]. Однако каждое устройство нуждается в контроле, нуждаются в измерении характеристик и лазеры УКИ. Возникает проблема: ультракороткие импульсы — это одно из самых коротких событий, созданных человеком, и чтобы его измерить, необходимо событие еще короче, чтобы можно было получить его временную развертку. Как же измерить самый малый во времени импульс? Эта проблема была частично решена с помощью измерения автокорреляционной функции [4]. Автокорреляционная функция позволяла оценить длительность импульса, тогда как спектр можно было измерить с помощью спектрометра, однако данные измерения не давали никакой информации о фазе сигнала, а значит, и о зависимости электрического поля от времени. Полное измерение ультракороткого импульса

считалось невозможным вплоть до появления метода частотно-разрешенного оптического стробирования в 1992 г. [5]. С помощью УКИ на длине волны 1,9 мкм возможно создание когерентного широкополосного источника суперконтинуума в среднем инфракрасном диапазоне спектра, который может применяться во многих областях науки, техники и медицины. При этом коммерчески доступных установок для измерения амплитудно-фазовых характеристик ультракоротких импульсов в этом диапазоне на данный момент нет, что подчеркивает актуальность этой работы.

Частотно-разрешенное оптическое стробирование. Частотно-разрешенное оптическое стробирование (англ. *Frequency-resolved optical gating* — FROG) основано на взаимодействии сигнала с самим собой в нелинейной среде. В простейшей форме оно представляет собой получение той же автокорреляционной функции, однако вместо зависимости энергии от задержки измеряется зависимость спектра сигнала от задержки. Это позволяет использовать алгоритм восстановления импульса для получения точной временной развертки его фазы и амплитуды. Существует несколько методов реализации частотно-разрешенного оптического стробирования, обычно их классифицируют по эффектам нелинейности: оптический эффект Керра, самодифракция, генерация второй гармоники и генерация третьей гармоники. В этой работе рассмотрена геометрия частотно-разрешенного оптического стробирования, основанная на генерации второй гармоники.

Установка (рис. 1) работает следующим образом: на вход в установку попадает ультракороткий импульс, который делится на две части светоделителем 1. При этом между получившимися импульсами вносится регулируемая задержка с помощью подвижных зеркал 5, 6. В дальнейшем два сигнала с помощью линзы 8 попадают под углом на нелинейный кристалл 9. Коллинеарные составляющие сгенерированной второй гармоники распространяются с фундаментальными волнами и, поскольку не несут необходимой в рамках данного метода информации, отсекаются диафрагмой. Неколлинеарная составляющая возникает только при пересечении двух импульсов в пространстве и во времени, после чего она вводится с помощью линзы 11 в многомодовый волоконный световод 12, который передает излучение в оптический спектрометр. Поле неколлинеарной составляющей определяется выражением

$$E_{sig}(t, \tau) \propto E(t)E(t - \tau),$$

где $E(t)$ — напряженность электрического поля измеряемого импульса; $E(t - \tau)$ — напряженность электрического поля задержанного импульса.

Спектр излучения измеряется для различных значений задержки. Результатом является функция зависимости интенсивности I_{FROG}^{shg} , регистрируемая спектрометром, от частоты ω и задержки τ (спектрограмма импульса):

$$I_{FROG}^{shg}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t)E(t - \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2.$$

ра OSA207C (Thorlabs Inc., United States) и автокоррелятора PulseCheck (APE, Germany) и принять их за эталонные в данном случае значения, а также измерить характеристики импульса, используя описанную методику. Соответствующая схема показана на рис. 2, б. Для измерения спектра второй гармоники используется спектрометр AQ6370C (Yokogawa, Japan). Для генерации второй гармоники используется нелинейный кристалл бета-бората бария.

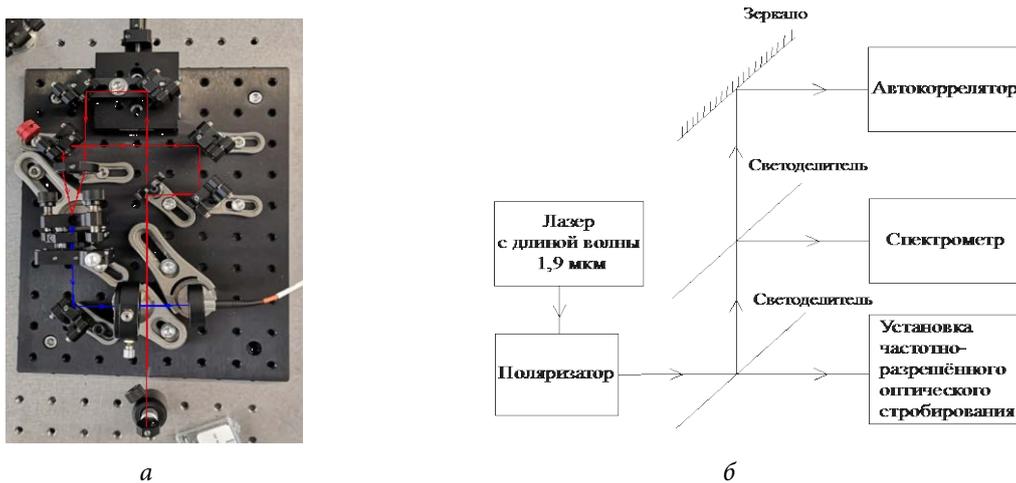


Рис. 2. Проверка работоспособности установки:
а — фотография установки; *б* — схема измерения

После измерения спектрограммы сигнал восстанавливается с помощью программы FROG, разработанной создателем данного метода Риком Требино, и далее сравнивается с измеренными спектром и автокорреляцией.

Импульсы генерируются с помощью волоконного тулиевого усилителя мощности задающего генератора УКИ на длине волны 1,9 мкм. На рис. 3 приведена спектрограмма измеренного импульса и восстановленные по ней амплитуда и фаза.

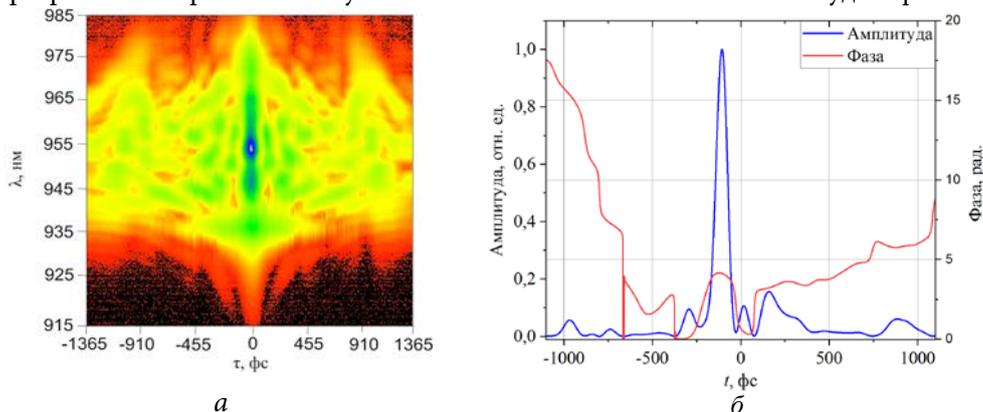


Рис. 3. Восстановление сигнала с помощью программы FROG:
а — спектрограмма сигнала; *б* — амплитуда и фаза сигнала

Сравнение спектра и автокорреляционной функции, полученных с помощью установки частотно-разрешенного оптического стробирования и со спектрометра и автокоррелятора, показано на рис. 4.

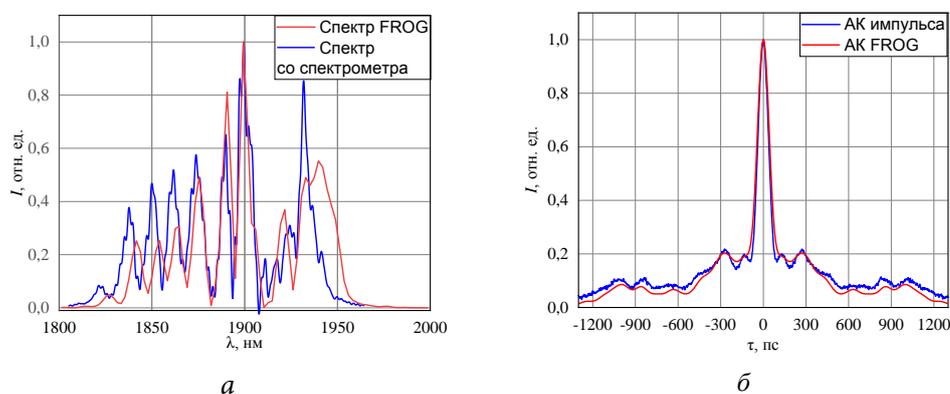


Рис. 4. Сравнение результатов, полученных разными методами:

a — спектры; *б* — автокорреляционные функции

На рис. 4, *a* можно увидеть, что на полученном с помощью метода частотно-разрешенного оптического стробирования спектре сигнала достоверно отражена центральная длина волны и ширина спектра. Несоответствие интенсивности можно объяснить потерями в установке частотно-разрешенного оптического стробирования, имеющей множество оптических элементов, и погрешностями алгоритма восстановления.

На рис. 4, *б* можно наблюдать две автокорреляционные функции. Ширина измеренной автокорреляционной функции здесь составляет 95,2 фс. Примем, что рассматриваемый импульс имеет форму гауссоиды, тогда длительность измеряемого импульса составляет 68 фс [3]. Длительность импульса по восстановленной амплитудно-фазовой характеристике (см. рис. 3, *б*) составляет 73,5 фс. Таким образом, погрешность измерения разработанной системы равна 7,5 %. Такая погрешность может быть связана со следующим фактором. Время измерения спектрограммы составляет около 10 мин, при этом исследуемый лазер имеет свойство изменять длительность импульсов на 10 % в течение работы. Таким образом, снятая спектрограмма может содержать информацию различных распределений амплитудно-фазовых характеристик. Чтобы избавиться от этой погрешности, необходимо разработать систему, измеряющую импульсы в реальном времени, например, GRENOUILLE [8, 9].

Выводы. В результате проведенной работы была создана установка для измерения амплитудно-фазовых характеристик ультракоротких импульсов на длине волны 1,9 мкм, основанная на использовании метода частотно-разрешенного оптического стробирования. Проведенные измерения показали, что созданная установка позволяет восстановить исходный сигнал с погрешностью по длительности импульса около 7,5 %.

Литература

- [1] Donodin A., Voropaev V., Lazarev V., et al. Femtosecond thulium-doped fiber-ring laser for mid-IR spectroscopic breath analysis. *Saratov Fall Meeting 2018: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 2019, art. 11066. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2520721>
- [2] Donodin A., Xie S., Voropaev V., et al. Supercontinuum generation in a as 2 S 3-Silica nanospire waveguide pumped by tm-doped fiber laser. *CLEO/Europe-EQEC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871929>
- [3] Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов. *Квантовая электроника*, 2001, т. 31, № 2, с. 95–119.
- [4] Diels J.C.M., Fontaine J.F., McMichael I.C., et al. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy. *Appl. Opt.*, 1985, vol. 24, no. 9, pp. 1270–1282. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.24.001270>
- [5] Manzoni C. Ultrashort pulse characterization. URL: <https://osa.zoom.us/rec/share/xMkpf-Cu0HtJZ43ozWjeeKAoJsfJaaa82iQWqPoPxRqideYyvKFk2i25rSqx9qXV?startTime=1586962717000> (дата обращения: 15.03.2020).
- [6] Barakat R., Newsam G. Necessary conditions for a unique solution to two-dimensional phase recovery. *J. Math. Phys.*, 1984, vol. 25, no. 11, pp. 3190–3193. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.526089>
- [7] Trebino R., Kane D.J. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, vol. 10, no. 5, pp. 1101–1111. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.001101>
- [8] Крюков П.Г. Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики. М., Физматлит, 2008.
- [9] Багаев С.Н., Ватник С.М., Майоров А.П. и др. Спектроскопия и лазерная генерация моноклинных кристаллов KY (WO 4) 2: Тм. *Квантовая электроника*, 2000, т. 30, № 4, с. 310–314.

Ванюшин Михаил Владимирович — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Власов Дмитрий Сергеевич — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Воронец Андрей Иванович — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Лазарев Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ванюшин М.В., Власов Д.С., Воронец А.И. Система измерения амплитудно-фазовых характеристик ультракоротких импульсов на длине волны 1,9 мкм. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 06(47). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-06-619>

A SYSTEM FOR MEASURING THE AMPLITUDE-PHASE CHARACTERISTICS OF ULTRASHORT PULSES AT A 1.9 MM WAVELENGTH

M.V. Vanyushin

vanyushinmv@student.bmstu.ru

SPIN-code: 2951-3420

D.S. Vlasov

dimvla97@gmail.com

SPIN-code: 5226-9435

A.I. Voronets

andrew-voronec@yandex.ru

SPIN-code: 4696-2984

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This work is devoted to the realization of a method for measuring the amplitude-phase characteristics of ultrashort laser pulses, called the frequency-resolved optical gating. The paper considers the implementation of the method through second harmonic generation and compares the pulse parameters obtained using this method and the measurement of the signal by a spectrometer and autocorrelator. The purpose of this work is to implement a frequency-resolved optical gating method for measuring the amplitude-phase characteristics of ultrashort laser pulses with a wavelength of 1.9 microns. This work is important because of the lack of commercially available devices for measuring these characteristics at a wavelength of 1.9 microns.

Keywords

Laser, ultrashort pulses, frequency-resolved optical gating, mid-infrared band, second harmonic generation, measuring the amplitude-phase characteristic, autocorrelation of pulse, spectrogram

Received 15.05.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Donodin A., Voropaev V., Lazarev V., et al. Femtosecond thulium-doped fiber-ring laser for mid-IR spectroscopic breath analysis. *Saratov Fall Meeting 2018: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 2019, art. 11066. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2520721>
- [2] Donodin A., Xie S., Voropaev V., et al. Supercontinuum generation in a as 2 S 3-Silica nanospine waveguide pumped by tm-doped fiber laser. *CLEO/Europe-EQEC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871929>
- [3] Kryukov P.G. Ultrashort-pulse lasers. *Kvantovaya elektronika*, 2001, vol. 31, no. 2, pp. 95–119. (in Russ.). (Eng. version: *Quantum Electron.*, 2001, vol. 31, no. 2, pp. 95–119. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n02ABEH001906>)
- [4] Diels J.C.M., Fontaine J.F., McMichael I.C., et al. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy. *Appl. Opt.*, 1985, vol. 24, no. 9, pp. 1270–1282. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.24.001270>
- [5] Manzoni C. Ultrashort pulse characterization. URL: <https://osa.zoom.us/rec/share/xMkpF-Cu0HtjZ43ozWjeeKAojsfJaaa82iQWqPoPxRqideYyvKFk2i25rSqx9qXV?startTime=1586962717000> (accessed: 15.03.2020).

- [6] Barakat R., Newsam G. Necessary conditions for a unique solution to two dimensional phase recovery. *J. Math. Phys.*, 1984, vol. 25, no. 11, pp. 3190–3193. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.526089>
- [7] Trebino R., Kane D.J. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, vol. 10, no. 5, pp. 1101–1111. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.001101>
- [8] Kryukov P.G. Femtosekundnye impul'sy. Vvedenie v novuyu oblast' lazernoy fiziki [Femtosecond pulses. Introduction into new field of laser physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008 (in Russ.).
- [9] Bagaev S.N., Vatnik S.M., Maiorov A.P., et al. The spectroscopy and lasing of monoclinic Tm:KY(WO₄)₂ crystals. *Kvantovaya elektronika*, 2000, vol. 30, no. 4, pp. 310–314 (in Russ.). (Eng. version: *Quantum Electron.*, 2000, vol. 30, no. 4, pp. 310–314. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n04ABEH001713>)

Vanyushin M.V. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Vlasov D.S. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Voronets A.I. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Lazarev V.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Vanyushin M.V., Vlasov D.S., Voronets A.I. A system for measuring the amplitude-phase characteristics of ultrashort pulses at a 1.9 μm wavelength. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 06(47). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-06-619.html> (in Russ.).