

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ GRENOUILLE НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,9 МКМ

✉ Д. Т. Батов<sup>1</sup>, В. С. Воропаев<sup>1</sup>, Р. Джафари<sup>2</sup>, С. Актюрк<sup>2</sup>,  
Р. Требино<sup>2</sup>, М. К. Тарабрин<sup>1</sup>, В. А. Лазарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК-техника»,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

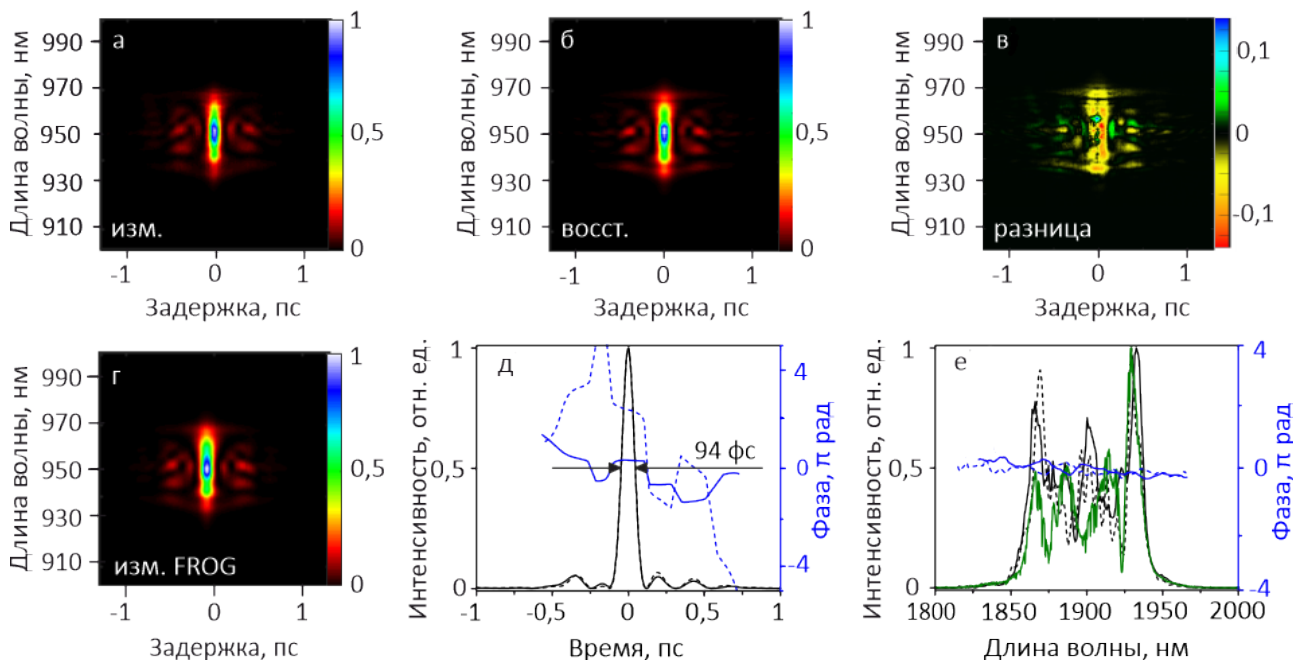
<sup>2</sup> Технологический институт Джорджии, Атланта, США

✉ daniilbatov@gmail.com

Волоконные тулиевые лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) на длинах волн около 1,9 мкм могут применяться во многих областях: для генерации суперконтинуума, рамановских солитонов в ближнем и среднем ИК-диапазонах, для хирургии, генерации высших гармоник [1]. При разработке лазерных систем УКИ одной из важных задач является детальное описание амплитудно-фазовых характеристик излучения, для решения данной задачи применяется много методов, среди которых наиболее известные FROG и SPIDER [2]. При этом существует не так много коммерчески доступных систем, позволяющих измерять временной профиль фазы и амплитуды УКИ в диапазоне длин волн 1,9 мкм. Система GRENOUILLE является простой, быстродействующей, высокочувствительной реализацией метода FROG [2, 3], ранее была предложена схема GRENOUILLE, которая позволяет измерить импульсы на длине волны 1,9 мкм [3, 4], но минимальная измеряемая длительность была на уровне 200–300 фс [4]. Целью настоящей работы является реализация системы GRENOUILLE для измерения УКИ длительностью менее 100 фс на длине волны 1,9 мкм.

Используемая схема GRENOUILLE отличается от ранее разработанной [4] следующими особенностями. Для расширения спектрального диапазона используется более широкий лазерный пучок на входе в систему (20,5 мм по уровню  $1/e^2$ ), а также цилиндрическая линза, фокусирующая излучение в кристалл  $Ag_3AsS_3$ , с меньшим фокусным расстоянием (100 мм). Для повышения чувствительности используется КМОП-матрица Quantalux CS2100M-USB с разрядностью АЦП 16 бит. Разработанной системой были успешно измерены УКИ волоконной тулиевой лазерной системы [5] с частотой повторения 24 МГц средней мощностью 10 мВт и различными длительностями в диапазоне от 70 фс до 1 пс, полученные путем настройки контроллера поляризации волоконной системы [5]. Для сравнения импульсы были измерены стандартным методом FROG. На рисунке *а* представлены результаты измерения УКИ длительностью 94 фс. Результаты восстановления спектрограммы методом RANA [6] показана на рисунке *б*. На рисунке *в* показана разница между измеренной и восстановленной спектрограммами УКИ. Ошибка восстановления спектрограммы  $G'$  [6] составляет 0,136, ошибка восстановления при измерении стандартным методом FROG  $G'$  составляет 0,068. Сравнение временных и спектральных профилей интенсивности и фазы импульса, полученных методом FROG и системой GRENOUILLE, показаны на рисунках *д* и *е* соответственно. В дополнение представлен спектр импульса, измеренный фурье-спектрометром OSA207 (Thorlabs). Также

проведены успешные измерения разработанной системой импульса с длительностью 74,5 фс, определенной по измеренной спектрограмме FROG, при этом необходимо было использовать нормирование спектрограммы на специальную маску [7], которая определяется профилем интенсивности пучка на входе в систему. При использовании более короткофокусной линзы (75 мм), фокусирующей излучение в кристалл, необходимость в использовании специальной маски может отпасть.



Измеренная (а) и восстановленная (б) спектрограммы УКИ длительностью 94 фс, разница между измеренной и восстановленной спектрограммами (в), измеренная спектрограмма методом FROG (г), временные профили интенсивности и фазы импульса (д), спектральные профили интенсивности и фазы импульса (е); сплошные кривые относятся к результатам восстановления спектрограммы FROG, пунктирные кривые — к результатам восстановления спектрограммы GRENOUILLE, зеленая кривая относится к результатам измерения спектра фурье-спектрометром

Таким образом, представленные изменения установки GRENOUILLE позволили значительно снизить минимально измеряемую длительность УКИ.

### Список литературы

1. Rudy C. W., Digonnet M. J., Byer R. L. Advances in 2- $\mu\text{m}$  Tm-doped mode-locked fiber lasers // Opt. Fiber Technol. 2014. Vol. 20. P. 642–649.
2. Trebino R., Jafari R., Akturk S.A. et al. Highly reliable measurement of ultrashort laser pulses // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128. P. 171103.
3. Akturk S., Kimmel M., Trebino R. Extremely simple device for measuring 1,5- $\mu\text{m}$  ultrashort laser pulses // Opt. Express 2004. Vol. 12. P. 4483–4489.
4. Власов Д. С., Волков Д. В., Воропаев В. С. и др. Система измерения амплитудно-фазовых характеристик ультракоротких импульсов на длине волны 1,9 мкм в режиме реального времени // Фотон-экспресс. 2021. № 6. С. 134–135.

5. Voropaev V., Batov D., Voronets A. et al. All-fiber ultrafast amplifier at 1.9  $\mu\text{m}$  based on thulium-doped normal dispersion fiber and LMA fiber compressor // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. P. 23693.
6. Jafari R., Jones T., Trebino R. 100 % reliable algorithm for second-harmonic-generation frequency-resolved optical gating // *Opt. Express.* 2019. Vol. 27. P. 2112–2124.
7. Lee D., Wang Z., Gu X., Trebino R. Effect and removal of an ultrashort pulse's spatial profile on the single-shot measurement of its temporal profile // *JOSA B.* 2008. Vol. 25. P. A93–A100.