

Секция F

ФОТОНИКА В ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 004.41; 535.372; 621.373.8

Оценка временных параметров лазерных источников для двухимпульсной лазерной диагностики

С.М. Бобровников, Е.В. Горлов, В.И. Жарков, С.Н. Мурашко

*Институт оптики атмосферы СО РАН**634055, Томск, Россия, пл. Академика Зюева, 1, bsm@iao.ru, gorlov_e@mail.ru, zharkov@iao.ru*

В работе описывается стенд для исследования процессов динамики фотофрагментов при двухимпульсном возбуждении молекул методом лазерной фрагментации с последующей лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛФ/ЛИФ). Приведена схема синхронизации двух твердотельных лазеров и фотоприемника при двухимпульсном методе ЛФ/ЛИФ. Представлены экспериментальные результаты временного джиттера лазерных импульсов двух твердотельных лазеров в зависимости от их схемы внешнего запуска.

Ключевые слова: лазер, диагностика, атмосфера, джиттер; laser, diagnostics, atmosphere, jitter.

Введение

В настоящее время, благодаря наличию лазерных источников с высоким временным, спектральным и пространственным разрешением, актуальна задача разработки и применения новых методов лазерной диагностики. Эти методы обеспечивают высокий уровень аналитической производительности и характеризуются работой в режиме реального времени, высокой селективностью и чувствительностью, а также возможностью мониторинга в полевых условиях. Следовательно, их можно использовать для маркировки и обнаружения атмосферных газов, детектирования и идентификации загрязнителей окружающей среды, проведения судебно-медицинской экспертизы, а также для контроля различных процессов, включая мониторинг сжигаемых веществ [1–7].

Что касается лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), то, помимо высокой чувствительности, она имеет потенциал для полевого дистанционного зондирования благодаря появлению новых компактных твердотельных лазеров. Прямое ЛИФ-обнаружение многоатомных молекул как правило затруднено, поскольку такие молекулы не имеют связанных верхних электронных состояний или обладают слабыми переходами, что влечет за собой низкоинтенсивный оптический отклик. Однако в этих случаях лазерный фотоллиз (ЛФ) может предшествовать ЛИФ, чтобы преобразовать сложные многоатомные молекулы в двухатомные или одноатомные фрагменты, которые можно легко перевести в верхние электронные состояния, которые хорошо флуоресцируют. Кроме того, в отличие от исходных молекул, которые обычно имеют широкие и бесструктурные спектральные характеристики, у фотофрагментов преобладают уникальные и хорошо разрешенные спектры, что может значительно облегчить их распознавание. Особый интерес представляет обнаружение соединений, содержащих общие функциональные группы, которые при фотоллизе выделяют характерные фрагменты, позволяющие установить принадлежность к конкретному классу соединений.

Для обнаружения молекул методом ЛФ/ЛИФ может использоваться одноимпульсный метод с помощью УФ-лазера, работающего на длинах волн, которые одновременно фотодиссоциируют соединения и впоследствии возбуждают электронно-колебательные переходы их фотофрагментов. Возможно применение двухимпульсной схемы для отдельной фотофрагментации и возбуждения.

Однако с точки зрения повышения общей эффективности процесса ЛФ/ЛИФ и достижения максимальной чувствительности метода представляет интерес исследование возможностей двухимпульсного способа возбуждения ЛФ/ЛИФ [8–14]. Первый импульс – импульс фрагментации – запускает в исходной молекуле фосфорорганического соединения (ФОС) диссоциацию; генерация второго импульса спустя время Δt и возбуждает флуоресценцию РО-фотофрагментов (молекул оксида фосфора, характеристические фрагменты ФОС).

Для фрагментации сложных молекул в работе [12, 15] использовался Nd:YAG-лазер Q-Smart 850 (LUMIBIRD). Возбуждение флуоресценции РО-фрагментов ФОС планируется проводить с помощью Титан-сапфирового лазера модели LX329A (SOLAR L.S.) с длиной волны излучения вблизи канта ветви P_{12} полосы $A^2\Sigma^+ (v' = 0) - X^2\Pi_{3/2} (v'' = 0)$ молекулы РО. Параметры используемых лазеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры лазеров		
Параметр	Значение	
	Nd:YAG-лазер Q-Smart 850	Ti-sapphire -лазер LX329A
Длина волны излучения, нм	266	247,78
Диапазон перестройки, нм	—	230-330
Максимальная энергия в импульсе, мДж	100	15*
Ширина линии излучения, пм	30	5**
Частота повторения импульсов, Гц	10	10
Длительность импульса излучения ($\tau_{0.5}$), нс	5	15***
Расходимость пучка, мрад	< 0,5	< 1,5
Размер пучка на выходе лазера, мм	III9	III3

* В максимуме перестроечной кривой;
** С интерферометром Фабри-Перо на основной частоте;
*** Зависит от длины волны генерации (приведено для 248 нм).

Блок-схема синхронизации двух твердотельных лазеров и фотоприемника при двухимпульсном методе ЛФ/ЛИФ приведена на рис. 1.

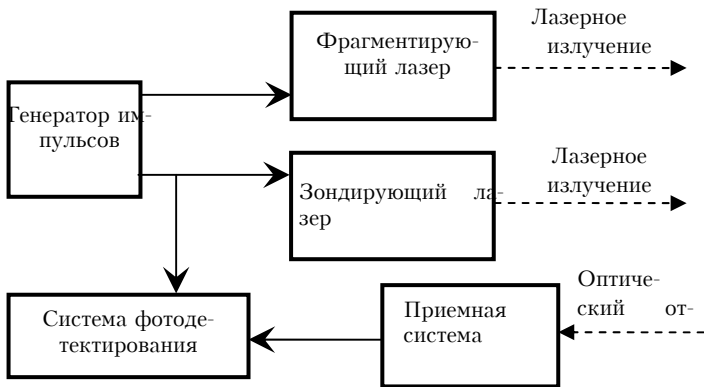


Рис. 1. Блок-схема синхронизации при двухимпульсном методе ЛФ/ЛИФ

Генератор импульсов формирует электрические ТТЛ-импульсы для внешнего запуска лазеров и стробируемой ПЗС-камеры iStar DH-712 (Andor Technology Ltd.). Технические параметры генератора PG-872 (Digit-EL) приведены в табл. 2. Первый канал генератора подключен к фрагментирующему лазеру. Второй канал, задержанный по времени относительно первого канала, запускает зондирующий лазер вместе с ПЗС-камерой.

Таблица 2

Технические параметры генератора PG-872	
Параметр	Значение
Количество каналов	2
Диапазон длительности импульса	от 10 нс до 10 с
Шаг длительности импульса	от 10 нс
Диапазон задержки	до 10 с
Шаг задержки	от 10 нс
Диапазон периодов	до 20 нс - 10 с
Шаг периода	от 10 нс
Диапазон времени простоя	до 10 с
Шаг времени простоя	10 нс
Время нарастания и спада	2 нс (5 В, 50 Ом, 100 пФ)
Выходной уровень	-5 В — +10 В (высокая нагрузка)
Выходное сопротивление	50 Ом
Выходной уровень и шаг сдвига	10 мВ
Аттенуатор	0 дБ, -20 дБ, ВЫКЛ.
Порог срабатывания	-5 В — +5
Шаг порога	В 10 мВ
Входное сопротивление триггера	200 Ом
Длительность импульса триггера	10 нс
Тип корпуса	Z4 A (160 × 140 × 60 мм)
Особенности	
Интерфейс	USB (с оптическим подключением)
Операционная система	Linux (Windows)
Каналы запуска	внутренние и внешние

Для корректной работы двухимпульсного метода ЛФ/ЛИФ необходимо определить временной джиттер лазерных импульсов (временная нестабильность импульса излучения лазера относительно импульса запуска внешнего генератора).

Оценка джиттера

Для экспериментальной оценки джиттера каждого из лазеров был реализован стенд, блок-схема которого приведена на рисунке 2. Генератор импульсов PG-872 формировал прямоугольные импульсы необходимой длительности на внешний запуск твердотельного лазера. Далее импульс лазерного излучения попадал на высокоскоростной фотодиод DET10A2 (Thorlabs). Электрический отклик с фотодиода передавался на 400 МГц осциллограф LeCroy (WaveSurfer), с помощью которого осуществлялась оцифровка.

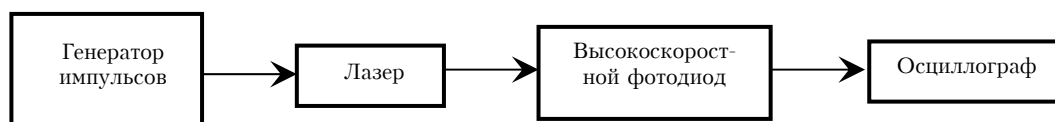


Рис. 2. Блок-схема стенда для оценки джиттера лазера

Для внешнего запуска твердотельного лазера с электрооптическим затвором возможны две схемы запуска. Первая схема запуска заключалась в подаче внешнего импульса на запуск лампы накачки лазера, а запуск электрооптического затвора осуществляется с помощью внутреннего генератора лазера. И вторая схема запуска, при котором на лазер подается два внешних импульса, один на запуск лампы накачки, и второй, задержанный по времени, на запуск электрооптического затвора. Оценка временного джиттера исследовалась для обеих схем запуска лазера. Кроме этого, перестраиваемая система Титан-сапфирового лазера исследовалась как в целом, так и отдельно его лазер накачки (модель LQ929B). Результаты временного джиттера лазерного импульса в зависимости от схемы запуска приведены в табл. 3.

Таблица 3

Джиттер лазера			
Схема внешнего запуска	Nd:YAG-лазер Q-Smart 850	Nd:YAG-лазер LQ929B	Ti-sapphire-лазер LX329A
Внешний импульс на лампу; Внутренний импульс на затвор.	150 нс	1 нс	35 нс
Внешний импульс на лампу; Внешний импульс на затвор.	1 нс	1 нс	35 нс

Из табл. 3 видно, что для внешнего запуска, фрагментирующего Nd:YAG -лазера Q-Smart 850 необходимо использовать два независимых импульса запуска. Для зондирующего титан-сапфирового лазера модели LX329A достаточно использовать один импульс запуска на лампу лазера накачки (модель LQ929B).

Таким образом, экспериментально измеренный джиттер титан-сапфирового лазера модели LX329A оказался 35 нс и не зависел от схемы внешнего запуска. В то время как джиттер Nd:YAG -лазера Q-Smart 850 оказался 1 и 150 нс в зависимости от внешнего запуска с двумя каналами синхронизации и одним каналом, соответственно. Полученная информация о временных джиттерах лазерных импульсов позволит учитывать их временную неточность при проведении будущих экспериментов по изучению динамики двухимпульсного возбуждения молекул методом ЛФ/ЛИФ. Проведенные эксперименты по оценке временного джиттера двух твердотельных лазеров при двухимпульсном методе ЛФ/ЛИФ показали необходимость использования минимум трех независимых каналов синхронизации для более точного позиционирования лазерных импульсов во времени.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Rodgers M.O., Asai K., Davis D.D. Photofragmentation-laser induced fluorescence: a new method for detecting atmospheric trace gases // Appl. Opt. 1980. V. 19, N 21. P. 3597–3605.
2. Rodgers M.O., Davis D.D. A UV-Photofragmentation/Laser-Induced Fluorescence Sensor for the Atmospheric Detection of HONO // Environ. Sci. Technol. 1989. V. 23, N 9. P. 1106–1112.
3. Sandholm S.T., Bradshaw J.D., Dorris K.S., Rodgers M.O., Davis D.D. An Airborne Compatible Photofragmentation Two-Photon Laser-Induced Fluorescence Instrument for Measuring Background Tropospheric Levels of NO, NO_x, and NO₂ // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N D7. P. 10,155–10,161.
4. Galloway D.B., Bartz J.A., Huey L.G., Crim F.F. Pathways and kinetic energy disposal in the photodissociation of nitrobenzene // J. Chem. Phys. 1993. V. 98, N 3. P. 2107–2114.

5. Lemire G.W., Simeonsson J.B., Sausa R.C. Monitoring of vapor-phase nitro compounds using 226-nm radiation: fragmentation with subsequent NO resonance-enhanced multiphoton ionization detection // *Anal. Chem.* 1993. V. 65, N 5. P. 529–533.
6. Galloway D.B., Glenewinkel-Meyer T., Bartz J.A., Huey L.G., Crim F.F. The Kinetic and Internal Energy of NO from the Photodissociation of Nitrobenzene // *J. Chem. Phys.* 1994. V. 100, N 3. P. 1946–1952.
7. Wu D.D., Singh J.P., Yueh F.Y., Monts D.L. 2,4,6-Trinitrotoluene detection by laser-photofragmentation–laser-induced fluorescence // *Appl. Opt.* 1996. V. 35, N 21. P. 3998–4003.
8. Simeonsson J.B., Sausa R.C. A critical review of laser photofragmentation/fragment detection techniques for gas phase chemical analysis // *Appl. Spectrosc. Rev.* 1996. V. 31, N 1. P. 1–72.
9. Swayambunathan V., Singh G., Sausa R.C. Laser photofragmentation–fragment detection and pyrolysis–laser-induced fluorescence studies on energetic materials // *Appl. Opt.* 1999. V. 38, N 30. P. 6447–6454.
10. Daugey N., Shu J., Bar I., Rosenwaks S. Nitrobenzene detection by one-color laser photolysis/laser induced fluorescence of NO ($v = 0-3$) // *Appl. Spectrosc.* 1999. V. 53, N 1. P. 57–64.
11. Shu J., Bar I., Rosenwaks S. Dinitrobenzene Detection by Use of One-color Laser Photolysis and Laser-Induced Fluorescence of Vibrationally Excited NO // *Appl. Opt.* 1999. V. 38, N 21. P. 4705–4710.
12. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I. Laser-induced fluorescence of PO-photofragments of dimethyl methylphosphonate // *Appl. Opt.* 2022. V. 61, N 21. P. 6322–6329. DOI: 10.1364/AO.456005
13. Qiu Y., Guo X., Shi M., Zhou Y., Wu J., Li J., Sun H., Zhang Z., Hang Y., Li X., Li Y. Plasma dynamics and chlorine emission characteristics on cement pastes using collinear dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2023. V. 209. P. 106799. DOI:10.1016/j.sab.2023.106799
14. Zhang Z., Wu J., Hang Y., Zhou Y., Tang Z., Shi M., Qiu Y., Liao K., Liu T. and Li X. Quantitative analysis of chlorine in cement pastes based on collinear dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2022. V. 191. P. 106392. DOI: 10.1016/j.sab.2022.106392
15. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н. Лазерно-индуцированная флуоресценция продуктов фотодиссоциации поверхностных следов триэтилфосфата // *Оптика атмосферы и океана*. 2025. Т. 38, № 3. С. 238–242. DOI: 10.15372/AOO20250311. <https://ao.iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.03/11>.

S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V.I. Zharkov, S.N. Murashko. Evaluation of time parameters of laser sources for two-pulse laser diagnostic.

The paper describes the setup for studying photofragment dynamics processes during double-pulse excitation of molecules by laser fragmentation with subsequent laser-induced fluorescence (LF/LIF). A scheme for synchronizing two solid-state lasers and a photodetector during the double-pulse LF/LIF method is given. Experimental results of the temporal jitter of laser pulses of two solid-state lasers are presented depending on their external trigger scheme.