

УДК 535.3+537.86.029.65/.79

*С.Ю. САРКИСОВ**, *Г.Е. ДУНАЕВСКИЙ***, *А.Г. СИТНИКОВ****, *Д.Е. ГЕНИН****, *Ф.В. РУДОВ*****ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ФИЛАМЕНТА¹**

Получена генерация терагерцового излучения в плазме филаментов лазерных импульсов длительностью 38 фс и энергией в импульсе 1–3,5 мДж. Экспериментально исследованы зависимости амплитуды и частотных спектров генерируемых терагерцовых импульсов от энергии и сдвига фаз лазерного импульса на основной частоте и ускоряющего носители заряда в плазме импульса на удвоенной частоте. Регистрация терагерцовых импульсов осуществлялась в диапазоне частот 0,2–2,5 ТГц с помощью электрооптического детектирования в кристалле GaSe.

Ключевые слова: лазерный филамент, терагерцовое излучение, импульсная терагерцовая спектроскопия.

Введение

Метод генерации терагерцовых импульсов в плазме лазерного филамента (например, [1–4]) обладает такими преимуществами по сравнению с оптико-терагерцовым преобразованием в полупроводниковых кристаллах (например, [5, 6]), как высокая пиковая мощность терагерцового излучения, отсутствие ограничений интенсивности лазерного импульса из-за наличия порога пробоя активной среды, широкий диапазон генерируемых частот. Среди недостатков можно выделить необходимость использования источников лазерных импульсов высокой интенсивности – как правило, дорогостоящих и некомпактных регенеративных усилителей. Частота повторения импульсов в таких системах обычно составляет единицы килогерц, что затрудняет применение схемы синхронного детектирования и увеличивает уровень шумов. В настоящее время в рамках одной из существующих концепций генерация терагерцового излучения в плазме лазерных филаментов объясняется четырехволновым смешением [3], в рамках другой – возникновением тока носителей заряда в плазме под действием ассиметричного электрического поля, образуемого наложением сдвинутых по фазе основного и удвоенного по частоте лазерных импульсов [1, 2]. Возможно также детектирование терагерцовых импульсов в плазме лазерных филаментов за счет генерации второй гармоники при нелинейном четырехволновом взаимодействии с участием лазерного и терагерцового импульсов [4]. Данный процесс может быть стимулирован применением внешнего электрического поля в области взаимодействия импульсов.

Экспериментальные методы

В настоящей работе эксперименты по генерации терагерцовых импульсов в плазме лазерных филаментов проводились с использованием стандартной схемы (рис. 1). Источником лазерных импульсов являлась система из регенеративного усилителя Spitfire Pro ($\lambda = 791$ нм, $\tau = 38$ фс, $P = 3,5$ Вт) на титан-сапфире с задающим генератором Mai Tai SP (Spectra-Physics, США). Частота повторения лазерных импульсов составляла 1 кГц. Генерация второй гармоники лазерных импульсов осуществлялась в кристалле ВВО толщиной 200 мкм, помещаемом перед фокусом линзы с фокусным расстоянием $f = 10$ см. Кристалл устанавливался на подвижке с микровинтом для осуществления изменения расстояния от него до фокуса линзы. Сигнал с балансных фотодиодов усиливался синхронным детектором SR 510 (Stanford Research Systems, США). Поляризация лазерного импульса, фокусируемого для образования филамента и генерации второй гармоники в кристалле ВВО, регулировалась с помощью полуволновой пластины, мощность – с помощью диафрагмы. Когерентная регистрация терагерцовых импульсов осуществлялась методом электрооптического детектирования в кристалле GaSe толщиной 1,5 мм, устанавливаемом таким образом, что его оптическая ось была параллельна волновым векторам взаимодействующих импульсов. Терагерцовый спектрометр не был вакуумирован, что определяет присутствие известных пиков поглощения водяных паров на полученных спектрах.

Сканирование временных форм терагерцовых импульсов осуществлялось путем перемещения линии задержки с двумя зеркалами с шагом, соответствующим задержке 66 фс между зондирующим и терагерцовым импульсами; в каждой точке проводилось усреднение 10–20 показаний

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-512.2012.2 и проекта 2.4885.2011, финансируемого в рамках Государственного задания.

SR 510. В большинстве экспериментов модуляция лазерных импульсов не проводилась, т.е. в качестве опорного сигнала на вход SR 510 подавался сигнал с синхронизационного выхода регенеративного усилителя. Управление приборами в процессе измерений осуществлялось программой, написанной в среде LabView.

Результаты и их обсуждение

При четырехволновом смешении амплитуда терагерцового сигнала должна быть пропорциональна мощности излучения на основной частоте лазера и амплитуде излучения на удвоенной частоте [3]. В проведенных экспериментах увеличение мощности лазерных импульсов не всегда приводило к увеличению сигнала. Возможно, это происходило из-за дефокусировки лазерного излучения или усиления поглощения терагерцового излучения в более плотной плазме. Типичный вид зарегистрированных в экспериментах сигналов представлен на рис. 2 и 3. Провал в районе 0,6 ТГц (рис. 2, б) связан с фоновым поглощением в GaSe [5].

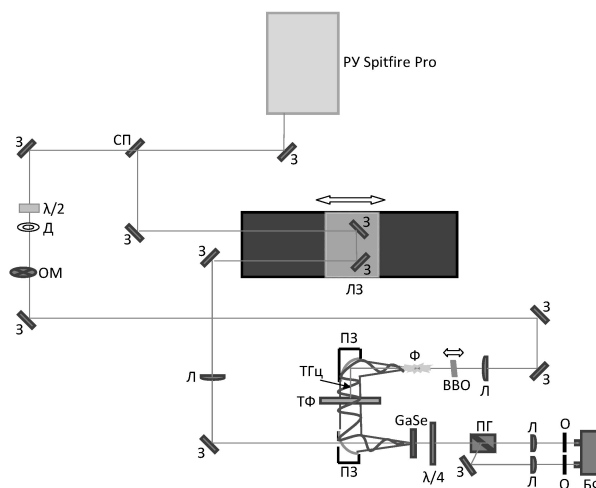


Рис. 1. Схема экспериментальной установки; РУ – регенеративный усилитель, ЛЗ – линия задержки, З – зеркало, Л – линза, ПЗ – параболическое зеркало, ПГ – призма Глана, О – ослабитель, ТФ – тфеллоновый фильтр, $\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка, $\lambda/2$ – полуволновая пластинка, БФ – балансные фотодиоды, ОМ – оптический модулятор, Д – ирисовая диафрагма, СП – светоделительная пластина

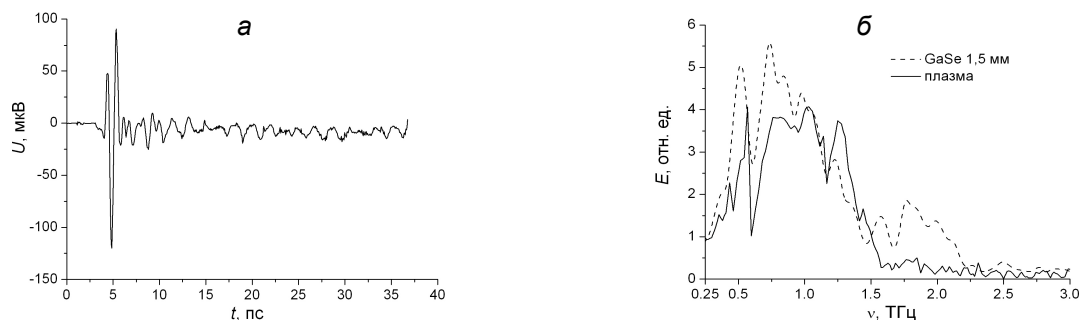


Рис. 2. Временная (а) и амплитудно-частотная (б) формы терагерцового импульса, генерированного в плазме филамента импульсного лазерного излучения средней мощностью 2,7 Вт при расстоянии от кристалла ВВО до фокуса линзы 2,5 см. Для сравнения штриховой линией показан спектр импульса, генерированного в кристалле GaSe по еее-типу взаимодействия [5] при накачке импульсами с той же длительностью и центральной длиной волны, но пиковой мощностью на 6 порядков меньше и частотой повторения 84 МГц. Детектор был тем же. Следует сравнивать спектральные формы импульсов, но не уровни сигнала

При углах поворота оптической оси полуволновой пластины относительно плоскости поляризации лазерного излучения 0, 30 и 60° мощности излучения на основной частоте с поляризацией, совпадающей с поляризацией излучения второй гармоники, составляли 2,5, 1,875 и 0,625 Вт, измеренные мощности второй гармоники – <0,8, 2 и 1,9 мВт соответственно, при этом амплитуды главных максимумов относились как 5,5:4,4:1. При подстройке уровня сигнала второй гармоники путем поворота кристалла ВВО не наблюдалось линейной зависимости амплитуды сигнала относительно амплитуды поля второй гармоники. Сигнал без второй гармоники был почти на уровне шумов. Для проведения более детальных экспериментов необходима реализация схемы с независимым контролем мощности и поляризации взаимодействующих лазерных импульсов. Зависимость амплитуды терагерцового сигнала от расстояния между кристаллом ВВО и фокусом линзы (рис. 4) сходна с наблюдаемой в [2]. Ее связывают со сдвигом фаз между основным и удвоенным по частоте лазерным импульсом, который обусловлен дисперсией в воздушной среде и возникновением асимметричного электрического поля волны, создающего ток носителей заряда в плазме.

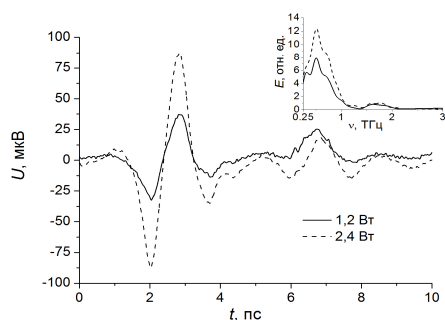


Рис. 3. Временная и амплитудно-частотная (на вставке) формы терагерцового импульса, генерированного в плазме филамента импульсного лазерного излучения при средних мощностях 1,2 и 2,4 Вт и расстоянии от ВВО до фокуса линзы 2,5 см

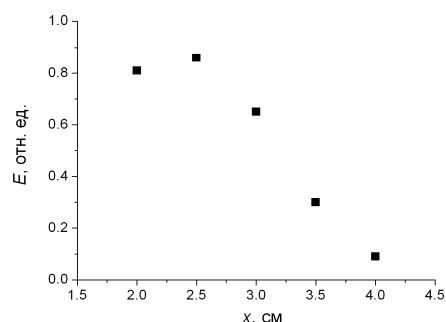


Рис. 4. Зависимость амплитуды главного максимума с временной формы терагерцовых импульсов энергией 2,5 мДж от расстояния от кристалла ВВО до фокуса линзы

Заключение

В результате проделанной работы получен терагерцовый спектрометр на основе генерации в плазме лазерного филамента. По наблюдаемым зависимостям амплитуды терагерцового поля от мощности лазерных импульсов на основной и удвоенной частотах, а также от положения кристалла ВВО до фокуса линзы можно предположить, что в условиях проведенных экспериментов основным механизмом генерации терагерцового излучения является не четырехволновое смешение, а генерация током носителей заряда в плазме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomson M.D., Blank V., and Roskos H.G. // Opt. Express. – 2010. – V. 18. – No. 22. – P. 23173–23182.
2. Kim K.Y., Glownia J.H., Taylor A.J., and Rodriguez G. // Opt. Express. – 2007. – V. 15. – No. 8. – P. 4577–4584.
3. Xie X., Dai J., and Zhang X.C. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – No. 7. – P. 075005-1–4.
4. Xie X., Dai J., and Zhang X.C. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – No. 10. – P. 103903-1–4.
5. Nazarov M.M., Sarkisov S.Yu., Shkurinov A.P., and Tolbanov O.P. // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 99. – No. 8. – P. 081105-1–3.
6. Саркисов С.Ю., Сафиуллин Ф.Д., Скакунов М.С. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8. – С. 31–39.

*Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского Томского государственного университета,
г. Томск, Россия
E-mail: sarkisov@elefot.tsu.ru

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

***Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

Саркисов Сергей Юрьевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Дунаевский Григорий Ефимович, д.т.н., профессор;
Ситников Алексей Геннадьевич, к.ф.-м.н., науч. сотр.;
Генин Дмитрий Евгеньевич, аспирант;
Рудов Федор Валентинович, мл. науч. сотр.

S.Yu. SARKISOV, G.E. DUNAEVSKY, A.G. SITNIKOV, D.E. GENIN, F.V. RUDOV

STIMULATION OF TERAHERTZ GENERATION IN FEMTOSECOND LASER FILAMENT

Terahertz generation in air plasmas of laser filaments created by pulses with duration of 35 fs and energy of 1.5–3.5 mJ was obtained. Dependencies of amplitudes and frequency spectra of generated terahertz radiation on energy and phase shift of main laser pulse and frequency-doubled pulse, accelerating charge carriers in air plasma, were studied experimentally. Terahertz spectra were registered within 0.2–2.5 THz frequency range by electrooptic detection in GaSe crystal.

Keywords: laser filament, terahertz radiation, terahertz time-domain spectroscopy.