

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ФОКУСИРОВКИ НА УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ, СОЗДАВАЕМОЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ПРОБОЕ ДВУХЦВЕТНЫМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

П. А. Чижев<sup>1</sup>, Д. Д. Ланчик<sup>1,2</sup>, А. А. Ушаков<sup>1</sup>, В. В. Букин<sup>1</sup>, С. В. Гарнов<sup>1,2</sup>,  
А. Б. Савельев-Трофимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им А.М. Прохорова РАН

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

В последнее время активно развиваются методы генерации терагерцового (ТГц) излучения, основанные на взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с веществом. Один из таких источников основан на оптическом пробое газовых сред фемтосекундными лазерными импульсами [1, 2]. Подобные источники позволяют генерировать импульсное ТГц излучение широкого спектрального диапазона и могут быть использованы для удаленной диагностики.

Впервые применение лазерной плазмы для генерации ТГц излучения было предложено и осуществлено в 1994 г. в работе [1]. В [2] было использовано внешнее поле, наводящее дипольный момент в возникающей плазме, что разрешает процесс оптического выпрямления и позволяет повысить эффективность генерации при использовании импульсов с энергиями порядка нескольких мДж. Дальнейшие исследования показали, что аналогом такого внешнего поля может служить поле второй гармоники, что также повышает эффективность генерации [3]. Ряд работ посвящён изучению энергетических [3, 4] и поляризационных [4, 5] свойств ТГц излучения, а также его пространственного распределения [6]. Однако на настоящий момент лишь небольшое количество работ посвящено изучению направленности ТГц излучения. Исследование генерации терагерцового излучения при различных режимах фокусировки фемтосекундных лазерных импульсов важно для создания источников направленного широкополосного ТГц излучения.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование углового распределения терагерцового излучения, получаемого при фокусировке двухчастотных фемтосекундных лазерных импульсов с различными числовыми апертурами.

Для изучения угловой диаграммы направленности ТГц излучения, получаемого из двухчастотной фемтосекундной лазерной плазмы, использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

В качестве источника оптического излучения использовался титан-сапфировый лазер Coherent Elite Pro (длина волны 774 нм, частота следования импульсов 1 кГц, энергия импульса 2,7 мДж, длительность импульса 150 фс, диаметр пучка 12 мм по уровню  $1/e^2$ ). Выходящее из лазера излучение пропускать через кристалл ВВО (толщина 200 мкм, 10 % эффективность преобразования, I-тип) для генерации второй гармоники. Для компенсации задержки между гармониками ставилась пластинка-компенсатор из кальцита. Далее излучение проходило через фазовую пластинку, которая является полуволновой для первой гармоники и волновой для второй, для совмещения поляризаций излучения на основной и удвоенной частоте. После этого излучение фокусировалось в воздух различными параболическими зеркалами с фокусными расстояниями 2,5, 10 или 20 см, создавая в воздухе видимую глазом искру. Расходящееся оптическое излучение отфильтровывалось от терагерцового с помощью тефлоновой пластинки. Для регистрации мощности генерирующегося в плазме ТГц излучения в лазере проводилась модуляция оптического (и, соответственно, терагерцового) излучения прямоугольными временными окнами с частотой 20 Гц и применялась ячейка Голея (TydexGC-1P) совместно с синхронным детектором.

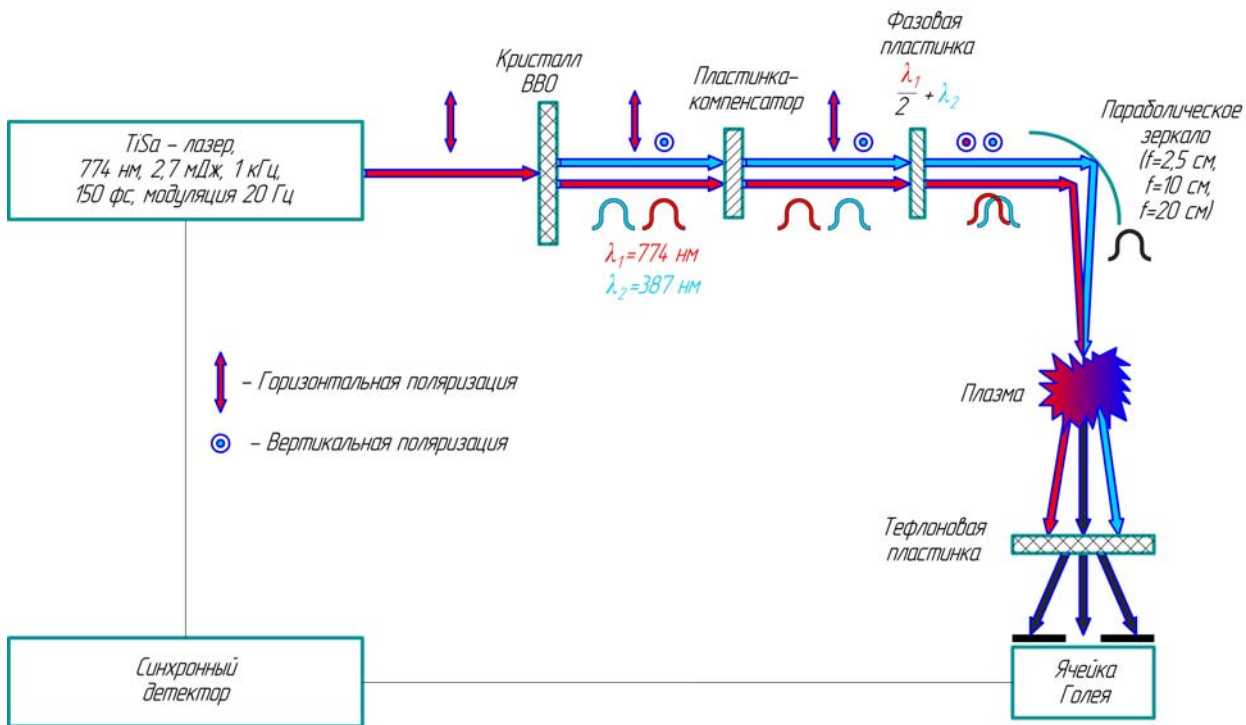
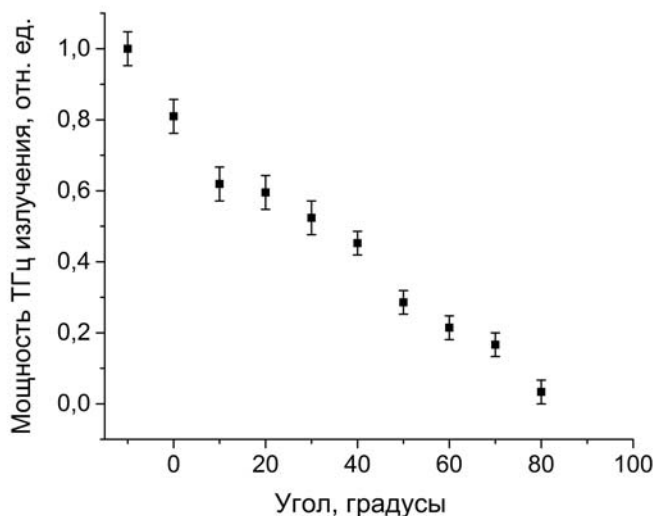


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

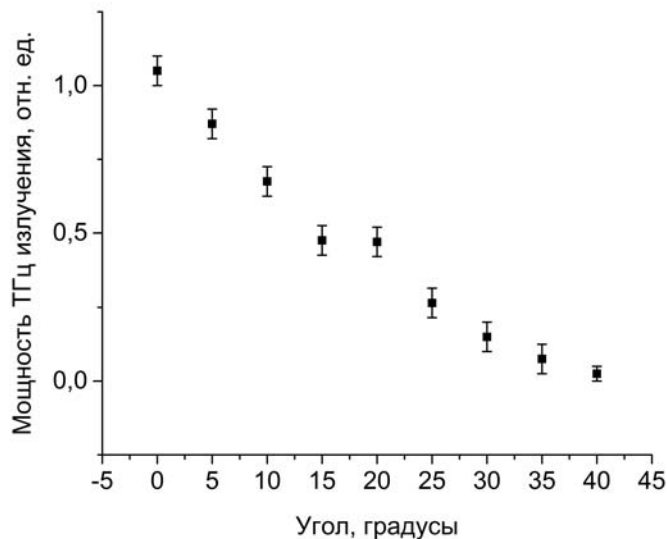
Для измерения диаграммы направленности ячейка Голя помещалась на расстоянии 25 см (в случае  $f = 10; 20$  см) или 20 см ( $f = 2,5$  см) относительно плазменной искры (что соответствовало дальней зоне) и двигалась по углу относительно оптической оси с шагом 10, 5 и 2,5 градусов для  $f = 2,5$  см,  $f = 10$  см и  $f = 20$  см соответственно. Перед входным окном ячейки Голя располагалась диафрагма с диаметром  $\sim 7$  мм, благодаря чему ТГц излучение из соседних точек измерения не перекрывалось.

В ходе измерений получено распределение средней мощности ТГц излучения в зависимости от угла поворота детектора. Результаты представлены на рис. 2.3 (а, б, в):

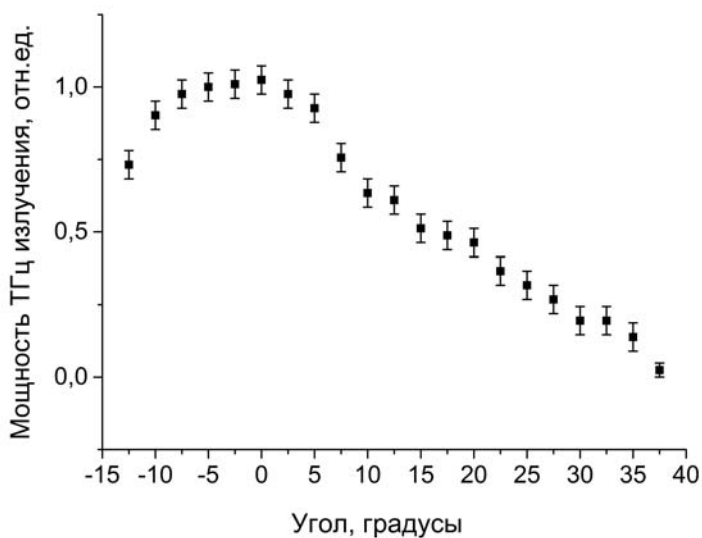


а

Рис. 2. Графики зависимости мощности излучения от угла регистрации для случаев: а –  $f = 2,5$  см; б –  $f = 10$  см; в –  $f = 20$  см



б



в

Окончание рис. 2.

Из результатов следует, что 50 % мощности терагерцового излучения локализовано в углах распространения не более чем 30 градусов относительно оптической оси для случая фокусировки параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 2,5 см, 20 градусов для зеркала с фокусным расстоянием 10 см и 15 градусов для зеркала с  $f = 20$  см. Подобная зависимость может быть объяснена тем, что при генерации точечным источником ТГц излучение из него распространяется под достаточно большими углами в направлении распространения оптического излучения (в случае обычного точечного источника излучение распространяется одинаково во весь телесный угол). При увеличении протяженности источника возникает больше точек на его оси, излучение из которых приходит в разные точки под большими углами к оптической оси в противофазе и, следовательно, подавляется деструктивной интерференцией, вследствие чего большая часть мощности ТГц излучения локализуется ближе к оптической оси.

Для фокусного расстояния параболического зеркала 20 см, используемого для фокусировки фемтосекундного излучения, диаграмма направленности ТГц излучения более узкая, вследствие чего такой режим фокусировки является более предпочтительным для направленной генерации ТГц излучения.

### Список литературы

1. Hamster H., Sullivan A., Gordon S., White W., Falcone R. W. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction // *Phys. Rev. Lett.* (1993).
2. Löffler T., Jacob F., Roskos H.G. Generation of terahertz pulses by photoionization of electrically biased air // *Appl. Phys. Lett.* (2000).
3. Cook D. J., Hochstrasser R. M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air // *Opt. Lett.* (2000).
4. Xie X., Dai J., Zhang X.-C. Coherent control of THz wave generation in ambient air // *Phys. Rev. Lett.* (2006).
5. Esaulkov M., Kosareva O., Makarov V., Panov N., Shkurinov A. Simultaneous generation of nonlinear optical harmonics and terahertz radiation in air: polarization discrimination of various nonlinear contributions // *Front. Optoelectron* (2014).
6. Zhong H., Karpowicz N., Zhang X.-C. Terahertz emission profile from laser-induced air plasma // *Appl. Phys. Lett.* (2006).