

УДК 535-4,-14,-15,-263, 537.531, 537.563.5, 537.872.2

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ДВУХЦВЕТНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

П. А. Чижов¹, А. А. Ушаков^{1,2}, В. В. Букин¹, С. В. Гарнов¹

В работе показана возможность модуляции мощности терагерцового излучения, генерируемого в лазерной плазме, создаваемой при фокусировке двухцветных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе, при использовании струи газа, направленной в область возникновения плазмы.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, терагерцовое излучение, лазерная плазма.

Введение. Среди источников терагерцового излучения, основанных на использовании фемтосекундных лазерных импульсов, можно выделить лазерную плазму, возникающую при фокусировке двухцветных импульсов [1]. Излучение такого источника обладает довольно высоким пиковым значением электрического поля, а также широким спектром, перекрывающим весь терагерцовый диапазон [2, 3]. Эффективность генерации и направленность терагерцового излучения сильно зависят от режима фокусировки излучения, фазировки между гармониками, потенциала ионизации газа [3–11].

Целью данной работы было исследование возможности управления мощностью терагерцового излучения, генерируемого при оптическом пробое двухцветными фемтосекундными импульсами в воздухе с локальной модификацией при помощи струи другого газа (аргона, углекислого газа).

Схема эксперимента. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника оптической накачки применялась лазерная система на основе титан-сапфира (длительность импульса $t = 40$ фс, длина волны лазерного излучения $\lambda = 800$ нм, энергия лазерного импульса 2.8 мДж, диаметр гауссового пучка 12 мм (по

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pvch@inbox.ru.

² МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62.

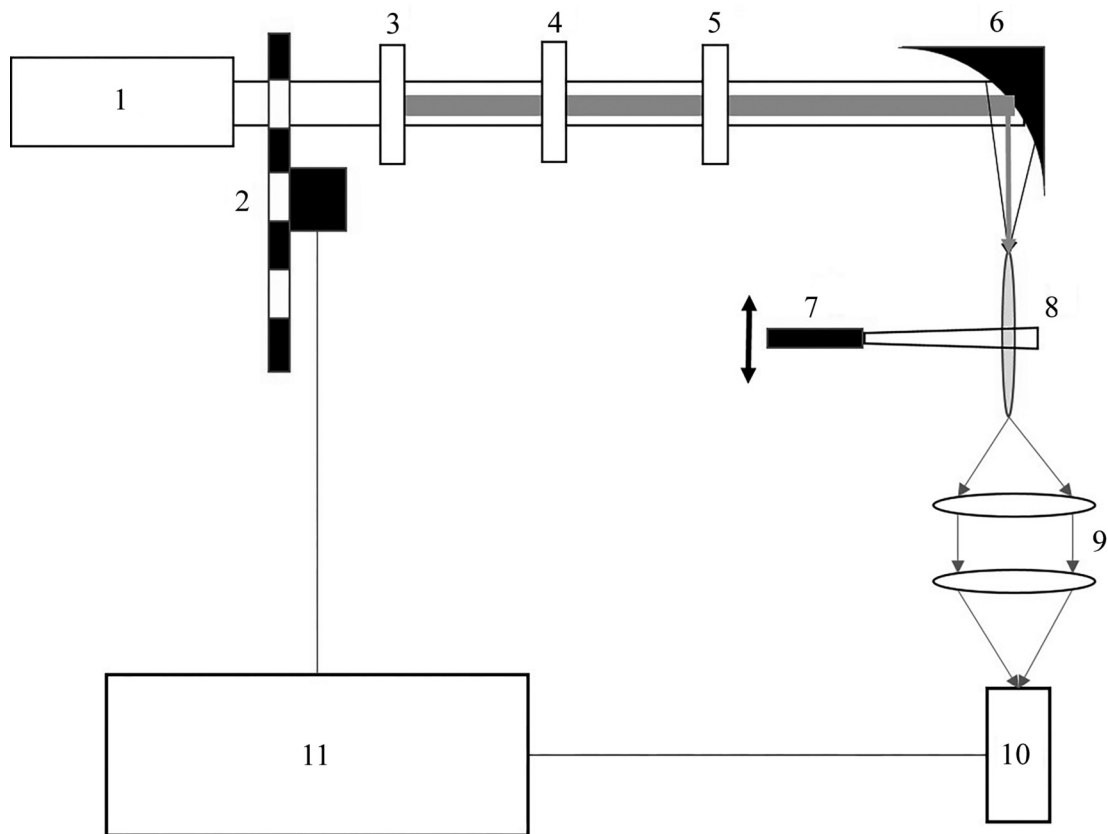


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 – фс-лазер; 2 – obtюратор; 3 – кристалл ГВГ; 4 – пластинка-компенсатор; 5 – фазовая пластинка $\lambda/2$ для 800 нм, λ для 400 нм; 6 – параболическое зеркало; 7 – сопло для подачи газа; 8 – лазерная плазма; 9 – тефлоновые линзы; 10 – ячейка Голея; 11 – синхронный детектор.

уровню $1/e^2$), частота следования импульсов 1 кГц, горизонтальная поляризация излучения). Для получения двухцветного импульса в лазерный пучок вставлялся кристалл-генератор второй гармоники (ВВО, $10 \times 10 \times 0.2$ мм³, I-тип синхронизма). Для более эффективной генерации терагерцового излучения поляризации компонентов двухцветного импульса делались сонаправленными при помощи фазовой пластинки ($\lambda/2$ для 800 нм, λ для 400 нм), а также компенсировалась групповая задержка между импульсами на разных гармониках при распространении в оптических элементах и в воздухе при помощи пластинки из кальцита. Двухцветный импульс фокусировался параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 200 мм, создавая вблизи фокуса видимый глазом плазменный канал, протяженностью порядка 8 мм. Данная плазма служила источником терагерцового излучения.

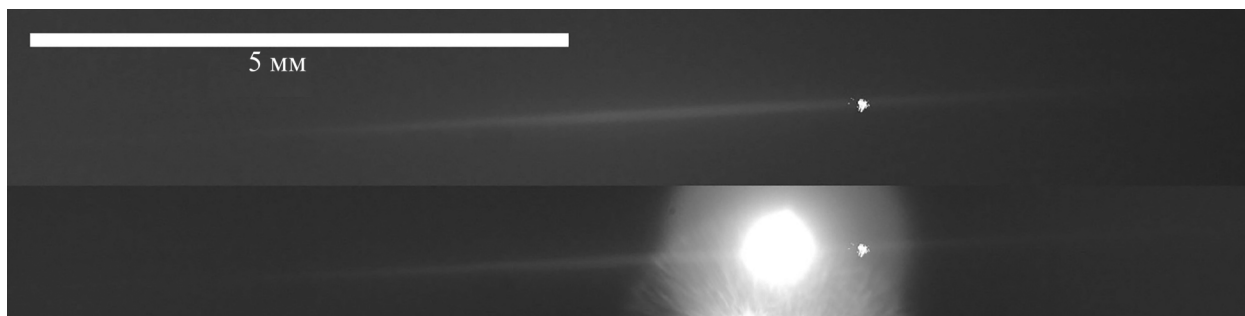


Рис. 2: Изображения свечения плазменного канала: в воздухе без возмущения и в присутствии струи аргона.

К плазменному каналу было перпендикулярно подведено сопло диаметром 0.8 мм, находящееся от плазмы на удалении ~ 2 мм. Газ (аргон, углекислый газ) подавался через данное сопло, формируя струю, пересекающую область формирования плазменного канала. Струя могла перемещаться вдоль плазменного канала при помощи автоматизированного механического столика, на котором было закреплено сопло. При подаче газа фиксировалось изменение свечения плазмы в области, куда попадала струя газа (см. рис. 2).

Терагерцовое излучение собиралось системой из двух тефлоновых линз (фокусные расстояния 100 мм, диаметр линз 50 мм) на вход ячейки Голея (Tydex GC-1P). Для регистрации мощности ТГц излучения применялся синхронный детектор (Stanford research systems SR830), осуществлялась модуляция лазерного и терагерцового излучения механическим обтюратором с частотой ~ 15 Гц.

Результаты и обсуждение. В ходе эксперимента были получены зависимости мощности терагерцового излучения от положения струи газа вдоль плазменного канала, приведенные на рис. 3.

Хорошо видно увеличение мощности ТГц излучения при направлении струи аргона в центральную часть плазмы. Хотя потенциал ионизации атомарного аргона сравним с энергией ионизации азота [12], при филаментации фемтосекундного лазерного излучения плотность плазмы в аргоне сразу после ионизации была в 2/2.5 раза выше, чем в воздухе/азоте соответственно [13]. Опираясь на механизм генерации терагерцового излучения, связанный с возникновением фототоков в плазме при ионизации двухцветным импульсом, амплитуда генерируемого терагерцового поля прямо пропорциональна электронной плотности в плазменном канале [7, 14, 15].

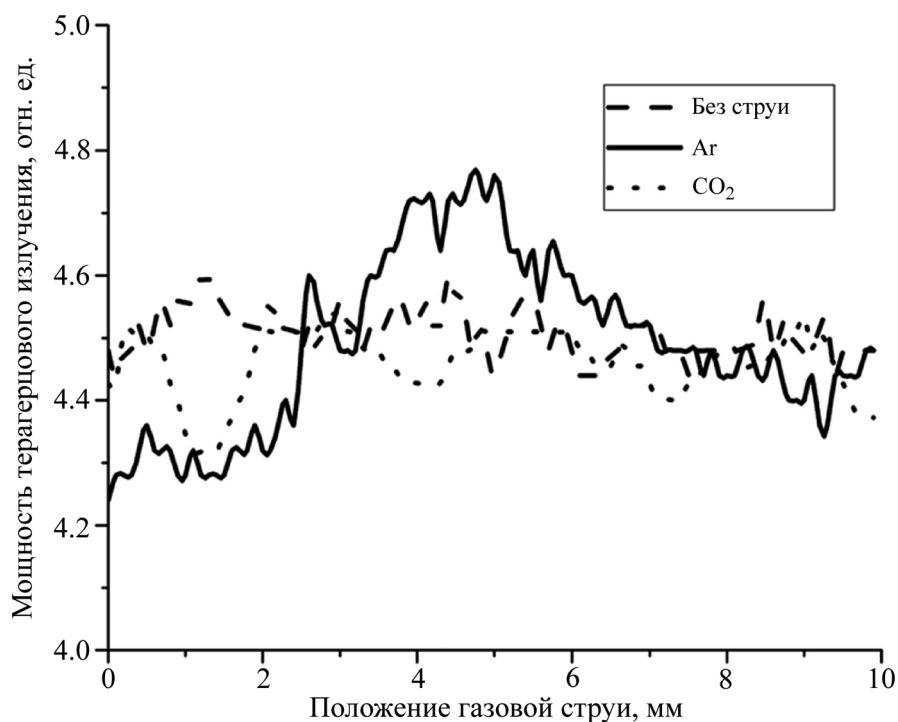


Рис. 3: Графики зависимости мощности терагерцового излучения от положения струи газа.

При воздействии струей углекислого газа на область образования плазмы мощность терагерцового излучения практически не менялась. Это, видимо, связано с тем, что энергия ионизации углекислоты выше, чем у кислорода, но ниже, чем у азота [12].

Падение мощности терагерцового излучения, наблюдаемое при струе газа, направленной в начало плазменного канала, может быть связано с нестабильностью фазового фронта лазерного импульса при прохождении через турбулентную среду, что приводит к нестабильности положения начала плазменного канала от импульса к импульсу. При воздействии струи на середину–конец плазменного канала этот эффект должен быть менее выражен, так как начальный участок более стабилен, а в дальнейшем режим распространения импульса близок к филаментации.

В целом модуляция мощности терагерцового излучения при применении струи аргона составила порядка 10% от мощности в случае фокусировки в атмосферном воздухе. Хотя изменения, вносимые таким образом, не слишком велики, можно использовать направленную струю газа для характеристики локальной эффективности генерации вдоль плазменного канала.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества”. Проект № 6(1).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. J. Cook and R. M. Hochstrasser, *Opt. Lett.* **25**(16), 1210 (2000).
- [2] X.-C. Zhang, A. Shkurinov and Y. Zhang, *Nat. Photon.* **11**, 16 (2017).
- [3] M. Clerici, M. Peccianti, B. E. Schmidt, et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**(25), 253901 (2013).
- [4] H. Zhong, N. Karpowicz, and X.-C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **88**(26), 261103 (2006).
- [5] M. Kress, T. Löffler, S. Eden, et al., *Opt. Lett.* **29**(10), 1120 (2004).
- [6] Y. S. You, T. I. Oh and K. Y. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **109**(18), 183902 (2012).
- [7] A. Gorodetsky, A. D. Koulouklidis, M. Massaouti and S. Tzortzakis, *Phys. Rev. A* **89**(3), 033838 (2014).
- [8] A. A. Ushakov, P. A. Chizhov, V. A. Andreeva, et al., *Opt. Express* **26**(14), 18202 (2018).
- [9] P. A. Chizhov, A. A. Ushakov, V. V. Bukin and S. V. Garnov, *Laser Phys. Lett.* **16**(7), 075301 (2019).
- [10] A. A. Ushakov, N. A. Panov, P. A. Chizhov, et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**(8), 081102 (2019).
- [11] K. Kim, J. H. Glowina, A. J. Taylor and G. Rodriguez, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **48**(6), 797 (2012).
- [12] А. Н. Завилопуло, Ф. Ф. Чипев, О. Б. Шпенник, *ЖТФ* **75**(4), 19 (2005).
- [13] P. A. Chizhov, V. V. Bukin and S. V. Garnov, *Journal of Physics: Conference Series* **666**, 012018 (2016).
- [14] K. Y. Kim, J. H. Glowina, A. J. Taylor, and G. Rodriguez, *Optics Express* **15**(8), 4577 (2007).
- [15] R. V. Volkov, P. A. Chizhov, A. A. Ushakov, et al., *Laser Physics* **25**(60), 065403 (2015).

Поступила в редакцию 28 октября 2019 г.

После доработки 6 ноября 2019 г.

Принята к публикации 6 ноября 2019 г.