

УДК 537.862:535.14:535-15

ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ, СОЗДАВАЕМОЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

© 2022 г. Д. М. Лубенко¹, *, Е. А. Сандабкин¹, В. Ф. Лосев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук”, Томск, Россия

*E-mail: lubenkodm@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований условий генерации терагерцового излучения в плазме филамента. Исследована интенсивность, поляризация терагерцового излучения в одно- и двухцветной схемах в зависимости от величины и направления приложенного внешнего электрического поля к филаменту, энергии, и поляризации излучения накачки.

DOI: 10.31857/S0367676522070195

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовое (ТГц) излучение представляет интерес для создания систем мониторинга окружающей среды и материалов, контроля качества фармацевтической продукции, создания медицинских приборов [1], приборов для биологических исследований и систем терагерцового имиджинга (получения изображений). Благодаря большой длине волны и низкой энергии квантов такое излучение не является ионизирующим и не оказывает деструктивного воздействия на молекулярную структуру биологических тканей, а, следовательно, безопасно для живых организмов.

Широкое распространение получили источники ТГц излучения на базе нелинейных кристаллов (НК) и плазме лазерного филамента в газовой среде. Генераторы разностной частоты на НК позволяют получить узкополосный ТГц сигнал и обладают возможностью перестройки частоты в довольно широком диапазоне. Однако такие генераторы не лишены недостатков: фоновые пики в НК приводят к наличию широкополосных “провалов” в генерируемом спектре, некоторые участки спектра оказываются недоступными из-за интерференции волн, отраженных от граней кристалла, а сами НК имеют невысокую лучевую стойкость [2], что ограничивает получение высокоэнергетических ТГц импульсов. Использование плазмы лазерного филамента в генераторах ТГц излучения значительно увеличивает предельно возможные интенсивности накачки. Кроме того, такой источник становится возможным создать дистанционно вблизи объекта исследования, что

минимизирует потери на поглощение парами воды ТГц излучения в атмосферном воздухе.

Несмотря на большое количество работ по механизмам генерации ТГц излучения в плазме, практически отсутствуют сравнительные эксперименты, проведенные в одинаковых условиях. Таким образом, целью данной работы является экспериментальное сравнение одно- и двухцветной схем генерации в условиях наличия и отсутствия внешнего электрического поля, влияния величины и направления приложения внешнего электрического поля на интенсивность, диаграмму направленности и поляризацию получаемого ТГц излучения, а также обобщение имеющихся результатов.

Генерация ТГц излучения в плазме филамента была предсказана в 1990 г. в [3] и позже продемонстрирована в экспериментах в ряде работ [4–7]. Позднее было продемонстрировано влияние внешнего электрического поля на интенсивность, получаемого в лазерной плазме ТГц излучения [8–12], а также была отмечена низкая расходимость полученного излучения, близкая к дифракционной. Напряжение, приложенному к области образования лазерной плазмы, увеличивает интенсивность ТГц излучения [9], при этом полученный ТГц сигнал имеет максимум на оси филамента [10], а его диаграмма направленности регистрируется в виде конуса [13]. Схема генерации ТГц излучения с использованием лазерной плазмы, получаемой только от одной гармоники лазера, была названа “одноцветной”, а основанная на смешении первой и второй гармоник в лазерной плазме – “двухцветной”. Такая схема бы-

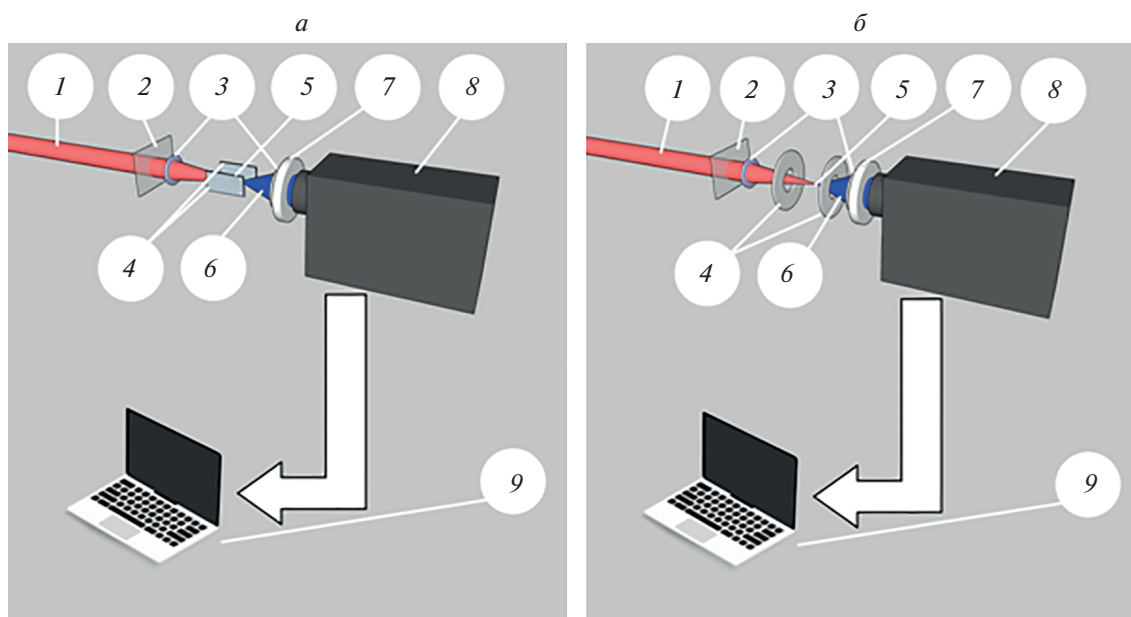


Рис. 1. Схема эксперимента по генерации ТГц излучения в плазме филамента: при поперечном (а) и продольном (б) приложении электрического поля. Цифрами обозначены: 1 – лазерный пучок, 2 – кристалл КДП, 3 – фокусирующие линзы, 4 – электроды, 5 – филамент, 6 – ТГц излучение, 7 – фильтр, 8 – детектор, 9 – ПК.

ла продемонстрирована в [14–18]. Было отмечено, что диаграмма направленности также имеет форму конуса и зависит от протяженности лазерного филамента и величины приложенного внешнего электрического поля. Стоит отметить, что для решения задач мониторинга окружающей среды актуальной задачей становится создание широкополосного интенсивного ТГц генератора, обладающего узкой диаграммой направленности.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на фемтосекундном стартовом лазерном комплексе “Старт-480М”. Стартовый комплекс состоит из задающего генератора, стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей, компрессора на дифракционных решетках. Параметры комплекса: центральная длина волны $\lambda = 960$ нм, длительность импульса $\tau = 60$ фс, энергия в импульсе $E = 10\text{--}15$ мДж. Спектральные параметры излучения регистрировались спектрометром Ocean Optics HR4000 (Ocean Optics, США) с разрешением 0.75 нм. Измерение мощности и энергии лазерного излучения проводились посредством Gentec Maestro (Gentec, США). Для определения длительности лазерных импульсов применялся автокоррелятор ASF-20 (Авеста, Россия), а изображение профиля пучка строилось при помощи профилометра Ophir SP620U (Ophir Optronics, Израиль).

Излучение лазера фокусировалось в воздухе плосковыпуклой линзой (в экспериментах использовались линзы с фокусным расстоянием от $F = 75$ мм до $F = 1000$ мм). Возникающие излучения регистрировалось посредством программно-аппаратного комплекса Tydex на основе ячейки Голя GC-1P (Tydex, Россия). Перед входным окном детектора помещался набор светофильтров, полностью отсекающих излучение лазера накачки, в отдельных экспериментах использовались отрезные светофильтры и поляризатор ТГц диапазона. Пропускание набора светофильтров в ТГц диапазоне определялось посредством спектрометра с временным разрешением Zomega Z-3 (Zomega, США). Для получения второй гармоники в двухцветной схеме применялся кристалл КДП толщиной 1.8 мм. На рис. 1 приведена общая схема для всех проведенных экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В одноцветной схеме была получена генерация ТГц излучения с пиковой мощностью до $15 \text{ Вт} \pm 40\%$ в импульсе, что позволило при комнатной температуре регистрировать сигнал при помощи ячейки Голя. Отметим, что энергия пучка накачки составляла всего 10 мДж, что в 20 раз меньше, чем в работе [7]. Спектр полученного излучения зарегистрировать не удалось ввиду того, что сигнал определялся практически на пределе чувствительности детектора и использование любого из 3 имеющихся отрезных светофильтров приводило к невозможности регистрации сигнала.

При поперечном приложении внешнего электрического поля (ЭП) напряженностью 650 В/мм к области филаментации пиковая мощность получаемого излучения увеличивалась до 200 Вт \pm 15%, а спектр генерации лежал вблизи 600 мкм (0.5 ТГц). При этом угол распространения ТГц пучка уменьшался, а его поляризация всегда совпадала с направлением приложения внешнего поля. При совпадении плоскости поляризации излучения накачки с направлением приложенного поля наблюдался незначительный рост сигнала с ТГц детектора.

При смене электродов на шаровые с целью локализации точки приложения электрического поля к различным областям филамента, было обнаружено, что наибольшая интенсивность ТГц сигнала наблюдается при приложении электрического поля к области геометрического фокуса системы – наиболее яркой области филамента, что соответствует максимальной концентрации электронов в лазерной плазме.

Продольное приложение поля так же увеличивало интенсивность генерации ТГц излучения. Зарегистрированная в эксперименте пиковая мощность составила 80 Вт \pm 30%, а максимум спектра лежал в длинноволновой области. Направление приложения электрического поля влияло на интенсивность генерации: при подаче положительного потенциала на ближайший по ходу распространения филамента электрод, регистрируемая мощность ТГц импульса была на 15% выше, чем при подаче положительного потенциала на дальний электрод. Наблюдаемый эффект свидетельствует о том, что движение электронов в филаменте направлено назад по отношению к направлению распространения лазерного импульса и подтверждает выводы [19]. Было исследовано и влияние точки приложения продольно направленного электрического поля к различным областям филамента на интенсивность генерации. Так же, как и в предыдущем эксперименте, максимум генерации соответствовал приложению электрического поля к области с максимальной концентрацией электронов.

Помимо генерации в одноцветной схеме, были так же проведены эксперименты по получению ТГц излучения при смешении первой и второй гармоник лазерного импульса в плазме филамента. При эффективности преобразования излучения во вторую гармонику в 16% при первом типе взаимодействия ($o + o \rightarrow e$), пиковая мощность в ТГц диапазоне составила 130 Вт \pm 5%. Спектр генерации в этом случае так же зарегистрировать не удалось.

При приложении поперечного электрического поля пиковая мощность ТГц импульса увеличивалась до 290 Вт \pm 5%. Поляризация была направлена по направлению приложения поля, а спектр

смещался в область длин волн порядка 600 мкм (0.5 ТГц).

При продольном приложении электрического поля так же, как и в случае с одноцветной схемой, регистрировались увеличение пиковой мощности ТГц импульса, которая составила 85 Вт \pm 10%. Спектр излучения и его поляризацию зарегистрировать не удалось ввиду малых величин ТГц сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В одинаковых условиях реализованы 6 схем генерации излучения ТГц диапазона. Экспериментально показано, что приложение внешнего электрического поля к области лазерного филамента приводит к увеличению интенсивности ТГц импульса и уменьшению его расходимости. Подтверждено направление фототока в филаменте от точки фокусировки к лазерной системе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Томской области (проект № 19-48-703027 р_мол_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чекрыгин В.Э.* // Известия ЮФУ. Техн. науки. 2009. № 7(96). С. 102.
2. *Nikogosyan D.N.* Nonlinear optical crystals: a complete survey. N.Y.: Springer, 2005. 428 p.
3. *Hamster H., Falcone R.W.* // Ultrafast Phenomena. Proc. 7th Int. Conf. (Monterey, 1990). P. 125.
4. *Hamster H., Sullivan A., Gordon S., Falcone R.W.* // Phys. Rev. E. 1994. V. 49. No. 1. P. 671.
5. *Tzortzakis S., Méchain G., Patalano G. et al.* // Opt. Lett. 2002. V. 27. No. 21. P. 1944.
6. *Méchain G., Tzortzakis S., Prade B. et al.* // Appl. Phys. B. 2003. V. 77. No. 8. P. 707.
7. *D'Amico C., Houard A., Franco M. et al.* // Opt. Express. 2007. V. 15. No. 23. Art. No. 15274.
8. *Löffler T., Jacob F., Roskos H.G.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. No. 3. P. 453.
9. *Löffler T., Roskos H.G.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. No. 5. P. 2611.
10. *Houard A., Liu Y., Prade B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. No. 25. Art. No. 255006.
11. *Chen Y., Wang T.J., Marceau C. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. No. 10. Art. No. 101101.
12. *Wang T.J., Yuan S., Chen Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. No. 11. Art. No. 111108.
13. *Liu Y., Houard A., Prade B. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. No. 5. Art. No. 051108.
14. *Wang T.J., Marceau C., Yuan S. et al.* // Laser Phys. Lett. 2011. V. 8. No. 1. P. 57.
15. *Borodin A.V., Esaulkov M.N., Kuritsyn I.I. et al.* // J. Opt. Soc. Amer. B. 2012. V. 29. No. 8. P. 1911.

16. *You Y.S., Oh T.I., Kim K.Y.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 109. No. 18. Art. No. 183902.
17. *Blank V., Thomson M.D., Roskos H.G.* // New J. Phys. 2013. V. 15. No. 7. Art. No. 075023.
18. *Klarskov P., Strikwerda A.C., Iwaszczuk K., Jepsen P.U.* // New J. Phys. 2013. V. 15. No. 7. Art. No. 075012.
19. *Liu Y., Liu S., Houard A. et al.* // Chin. Phys. Lett. 2020. V. 37. No. 6. Art. No. 065201.

THz radiation generation in a laser plasma of femtosecond pulse

D. M. Lubenko^{a,*}, E. A. Sandabkin^a, V. F. Losev^a

^a *Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055 Russia*

^{*}*e-mail: lubenkodm@gmail.com*

The results of experimental studies of the conditions for generating terahertz radiation in the filament plasma are presented. The intensity and polarization of terahertz radiation in one- and two-color schemes are investigated depending on the magnitude and direction of the applied external electric field to the filament, energy, and polarization of the pump radiation.