

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 534-14

Управление расходимостью ТГц-излучения, возникающего в лазерной плазме филамента

Д.М. Лубенко¹, В.Е. Прокопьев^{1,2}, С.В. Алексеев¹, М.В. Иванов¹,
В.Ф. Лосев^{1*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 14.03.2019 г.

Исследованы условия генерации ТГц-излучения в плазме филамента, создаваемого в воздухе фемтосекундными импульсами излучения при абберационной фокусировке в одноцветной и двухцветной оптических схемах. Продемонстрирована возможность управления диаграммой направленности ТГц-излучения путем приложения электрического поля и внесения разной степени абберационных искажений в лазерный пучок.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, ТГц-излучение, филаментация, лазерная плазма, схемы генерации ТГц-излучения, управление параметрами ТГц-излучения; ultrashort laser pulses, THz radiation, filamentation, laser plasma, optical schematics for THz generation, control of parameters of THz radiation.

Введение

Терагерцовое (ТГц) излучение — относительно новая область исследований. ТГц-диапазон занимает часть спектра между инфракрасной и микроволновой областями. ТГц-излучение имеет низкую энергию фотона и поэтому не приводит к фотоионизации биологических тканей, как рентгеновское, а значит, является безопасным. ТГц-излучение слабо рассеивается при проходе через диэлектрические материалы, что позволяет получать изображения объектов в ТГц-диапазоне. Большинство биологических и химических соединений в данном диапазоне имеет характерный спектр, обусловленный колебательными и вращательными переходами. Следовательно, с помощью ТГц-излучения возможны анализ биологических объектов, контроль качества пищевой и лекарственной продукции, поиск взрывчатых веществ [1] и т.д.

Широкое распространение получили методы генерации ТГц-излучения в нелинейных кристаллах (НК) и газах. Генерация в НК позволяет получить ТГц-сигнал с довольно узким спектром, что дает большие возможности по спектральной перестройке полученного сигнала. Однако этот метод не лишен недостатков: в подобных генераторах присутствуют

широкополосные «провалы», вызванные фоновыми пиками поглощения в НК; часть спектра оказывается недоступной из-за интерференции ТГц-волн, отраженных от граней кристалла; генераторы на НК имеют низкую предельную интенсивность накачки вследствие их невысокой лучевой стойкости, что накладывает ограничения на максимальную генерируемую мощность импульса в ТГц-диапазоне. Генерация в газовой среде возникает в лазерной плазме, что значительно увеличивает предельно допустимую интенсивность накачки. Кроме того, такую плазму возможно создать дистанционно в непосредственной близости от объекта исследования, что уменьшает потери на поглощение ТГц-излучения парами воды в атмосферном воздухе.

Генерация ТГц-излучения в плазме филамента была предсказана в 1990 г. в [2] и затем экспериментально подтверждена в работах [3–6]. Позднее была показана генерация ТГц-излучения в лазерной плазме при наличии внешнего электрического поля [7–11], полученное излучение было хорошо коллимировано. В [8] показано, что интенсивность ТГц-излучения увеличивается с ростом напряжения, приложенного к области образования лазерной плазмы, при этом максимум ТГц-сигнала располагается на оси тонкой протяженной слабосветящейся плазменной нити, возникающей вблизи фокальной перетяжки — филамента [9]. При приложении продольного электрического поля было отмечено увеличение ТГц-сигнала на частоте 0,1 ТГц на три порядка и диаграмма направленности ТГц-излучения регистрировалась в виде конуса [12].

* Дмитрий Михайлович Лубенко (lubenkodm@gmail.com); Владимир Егорович Прокопьев (prokor@ogl.hcei.tsc.ru); Сергей Владимирович Алексеев (darok@sibmail.com); Михаил Валерьевич Иванов (mikhlan.iv@gmail.com); Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru).

Генерация ТГц-излучения при смешении первой и второй гармоник неодимового лазера была продемонстрирована в работах [13–17] и названа «двухцветной». Было обнаружено, что пространственное распределение излучения имеет форму конуса с максимумом энергии по его краю и зависит от длины филамента. С увеличением его длины излучение становится более направленным, низкочастотные компоненты спектра ТГц-импульса находятся ближе к центру, а высокочастотные — по краю окружности. В [18–21] показано, что низкочастотные компоненты ТГц-спектра преобладают в центре, а высокочастотные — по краям конуса, формируемого ТГц-излучением.

Следует отметить, что для дистанционного мониторинга окружающей среды в ТГц-диапазоне вопрос формирования интенсивного терагерцового сигнала с широким спектром и узкой диаграммой направленности в заданной удаленной точке воздушного пространства весьма актуален [22].

В настоящей работе исследуется угловая направленность ТГц-излучения, возникающего из плазмы филамента, который формируется в воздухе при абберационной фокусировке фемтосекундных импульсов излучения в одно- и двухцветной оптических схемах в условиях приложенного электрического поля и без него.

Экспериментальная установка и методики измерения

Эксперименты проводились на фемтосекундном Ti:Sapphire лазерном комплексе «Старт-480М» (Avesta Project, Россия) со следующими параметрами выходного излучения: длина волны $\lambda = 950$ нм, длительность импульса $\tau = 60$ фс, частота следования импульсов $f = 10$ Гц, энергия в импульсе $E = 10$ мДж. Излучение лазера направлялось на фокусирующее зеркало ($F = 750$ мм) под углами 9 и 14°, что приводило к образованию филамента вблизи области перетяжки. Таким образом плазма филамента создавалась в условиях абберации. При малых углах (менее 10°) реализовывалась накачка, близкая к осесимметричной, а при больших (более 10°) — абберационная.

Генерация ТГц-излучения из плазмы филамента изучалась с электрическим полем и без него. Электрическое поле прикладывалось поперек филамента; изменений диаграммы направленности при горизонтальном и вертикальном приложении поля отмечено не было. Использовались электроды — алюминиевые шары радиусом 12 мм, расстояние между которыми составляло 6 мм. Максимальная напряженность электрического поля достигала 3 кВ/мм. Интенсивность ТГц-излучения в случае приложения электрического поля зависела не только от величины последнего, но и от положения электродов относительно оси филамента в продольном направлении. Положение электродов в пространстве выбиралось так, чтобы получить максимально возможный уровень сигнала на выходе ТГц-детектора.

В экспериментах по генерации ТГц-излучения в двухцветной схеме накачки для получения излучения второй гармоники на длине волны 475 нм использовали кристалл KDP толщиной 1,8 мм, установленный до фокусирующего зеркала. При этом эффективность преобразования излучения во вторую гармонику составляла 20%.

Энергию и мощность лазерного излучения определяли с помощью измерителя энергии Gentec Maestro с измерительной головкой QE50LP-H-MB-D0, длительность импульса — с помощью автокоррелятора Avesta ASF-20. Для регистрации возникающего ТГц-излучения применялся программно-аппаратный комплекс на основе оптико-акустического детектора Голея Tydex GC-1P (0,04–20 ТГц) с набором фильтров, отсекающих излучение видимого диапазона. Спектральные характеристики фильтров в ТГц-диапазоне определяли при помощи спектрометра Zomega Z3 с временным разрешением (0,2–3,5 ТГц). Для измерения диаграммы направленности ТГц-излучения детектор и систему фильтров устанавливали на подвижный рельс, центр вращения которого совпадал с окончанием лазерного филамента (-ов). Центр входного окна детектора находился на одной высоте с осью лазерного пучка накачки. Диаграммы направленности снимали только в горизонтальной плоскости.

Для удобства измерения и повышения точности мы пользовались линейной шкалой (рис. 1), что обуславливает несколько неравномерное распределение точек измерения на графиках. Согласно литературным данным диаграммы направленности ТГц-излучения не имеют резких неоднородностей. Поэтому при обработке результатов измерений для удобства визуального восприятия информации была применена сглаживающая функция B-Spline программного пакета Origin; результат каждого цикла измерений нормировался на единицу для удобства сравнения графиков.

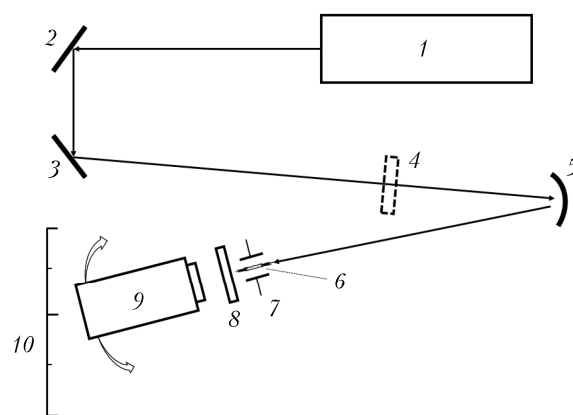


Рис. 1. Блок-схема эксперимента (вид сверху): 1 — лазерная система; 2, 3 — зеркала; 4 — кристалл KDP (устанавливался в экспериментах с двухцветной схемой накачки); 5 — фокусирующее зеркало; 6 — область филаментации; 7 — электроды (устанавливались в экспериментах с приложением электрического поля); 8 — набор светофильтров; 9 — детектор ТГц-диапазона; 10 — шкала отсчета смещения детектора

Результаты и их обсуждение

Исследование условий формирования плазмы филамента при различных углах падения лазерного пучка основной частоты на сферическое зеркало показало, что для угла в 9° происходило образование одного филамента длиной 37 мм. При угле 14° образовывался филамент длиной 81 мм с двумя максимумами свечения в области меридионального и сагиттального фокусов.

Генерация ТГц-излучения в одноцветной схеме при отсутствии электрического поля, приложенного к области филаментации, как в работах [3–6], нами не была зарегистрирована. Это объясняется недостаточной чувствительностью используемого детектора. При приложении электрического поля интенсивность ТГц-излучения возрастала, как и в [8], что позволило зарегистрировать диаграммы направленности ТГц-излучения, представленные на рис. 2. В случае накачки с углом падения 9° наблюдается хорошая корреляция распределения излучения с результатами [9] (с поправкой на то, что в нашем случае измерение велось в широком спектральном диапазоне). Более выраженные максимумы излучения при угле 14° , возможно, связаны с возникновением двух ТГц-пучков по аналогии с наблюдаемыми пучками видимого диапазона [23], когда из начальной части филамента, образованного в условиях абберационной накачки, формировались два тонких плазменных канала, распространяющихся под небольшим углом друг к другу.

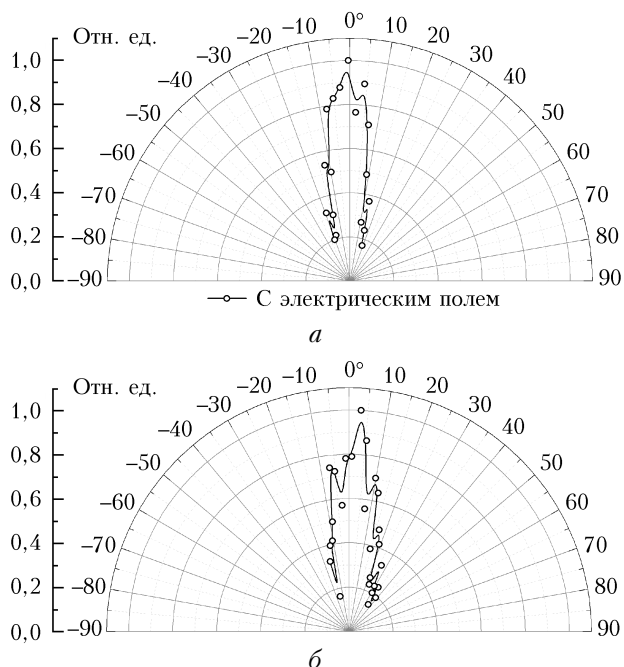


Рис. 2. Диаграммы направленности ТГц-излучения в одноцветной схеме при углах падения 9° (а) и 14° (б)

В двухцветной схеме накачки генерация излучения ТГц-диапазона наблюдалась нами как с полем, так и без него. Так же, как и в [13–17], при

двухцветной накачке в отсутствие электрического поля нами наблюдалось конусообразное распределение ТГц-излучения (рис. 3, а). С электрическим полем ТГц-пучок становился более направленным, что хорошо коррелирует с результатами, полученными для одноцветной схемы накачки в работах [7–11].

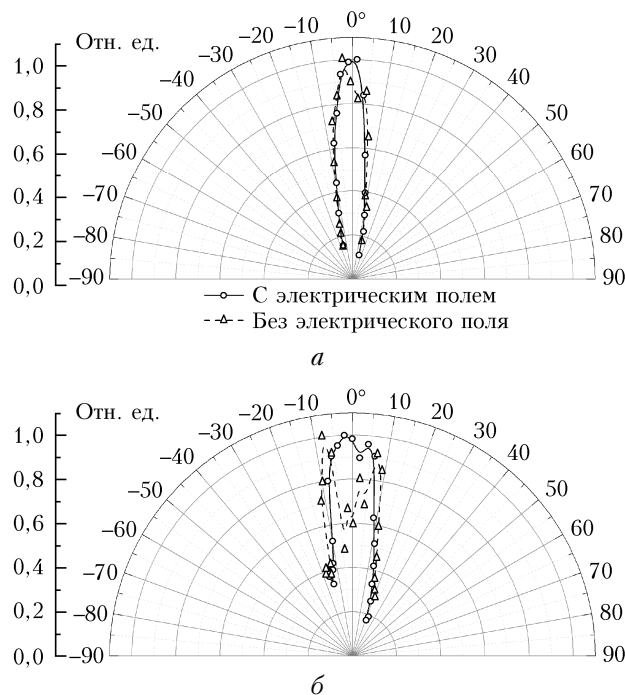


Рис. 3. Диаграммы направленности ТГц-излучения в двухцветной схеме при углах падения 9° (а) и 14° (б)

В случае накачки с большей абберацией (рис. 3, б) наблюдаются более широкая диаграмма направленности и увеличение количества максимумов, что так же, как и в эксперименте с одноцветной схемой накачки, можно объяснить генерацией ТГц-пучков, направленных по двум осям с углом между ними $10\text{--}15^\circ$.

Заключение

Таким образом, изучены условия генерации ТГц-излучения из плазмы филамента, создаваемого в воздухе фемтосекундными импульсами излучения при абберационной фокусировке в одноцветной и двухцветной оптических схемах. Показано, что внесение аббераций в лазерный пучок при фокусировке позволяет получить два пучка излучения ТГц-диапазона, распространяющихся под углом друг к другу, расходимостью которых можно управлять путем приложения электрического поля к области филаментации. Экспериментально подтверждено, что электрическое поле, приложенное к плазме филамента, существенно повышает энергию ТГц-излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-48-703027 р_мол_а.

1. Zhu B., Chen Y., Deng K., Hu W., Yao Z.S. Terahertz Science and Technology and Applications // Progress in Electromagnetics Research Symposium Conf. Ser. Beijing. 2009. P. 1166–1170.
2. Hamster H., Falcone R.W. Proposed Source of Subpicosecond Far Infrared Radiation // Ultrafast Phenomena VII. Springer Series in Chemical Physics. Berlin: Springer, 1990. V. 53. P. 125–127.
3. Hamster H., Sullivan A., Gordon S., Falcone R.W. Short-pulse terahertz radiation from high-intensity-laser-produced plasmas // Phys. Rev. E. 1994. V. 49, N 1. P. 671–677.
4. Tzortzakis S., Méchain G., Patalano G., André Y., Prade B., Franco M., Mysyrowicz A. Coherent subterahertz radiation from femtosecond infrared filaments in air // Opt. Lett. 2002. V. 27, N 21. P. 1944–1946.
5. Méchain G., Tzortzakis S., Prade B., Franco M., Mysyrowicz A., Leriche B. Calorimetric detection of THz radiation from femtosecond filaments in air // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2003. V. 77, N 8. P. 707–709.
6. Amico C.D., Houard A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Coherent and incoherent radial THz radiation emission from femtosecond filaments in air // Opt. Express. 2007. V. 15, N 23. P. 15274–15279.
7. Löffler T., Jacob F., Roskos H.G. Generation of terahertz pulses by photoionization of electrically biased air // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77, N 3. P. 453–455.
8. Löffler T., Roskos H.G. Gas-pressure dependence of terahertz-pulse generation in a laser-generated nitrogen plasma // J. Appl. Phys. 2002. V. 91, N 5. P. 2611–2614.
9. Houard A., Liu Y., Prade B., Tikhonchuk V.T., Mysyrowicz A. Strong enhancement of terahertz radiation from laser filaments in air by a static electric field // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100, N 25. P. 1–4.
10. Chen Y., Wang T.J., Marceau C., Thiberge F., Châteauneuf M., Dubois J., Kosareva O., Chin S.L. Characterization of terahertz emission from a dc-biased filament in air // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95, N 10. P. 93–96.
11. Wang T.J., Yuan S., Chen Y., Daigle J.F., Marceau C., Thiberge F., Châteauneuf M., Dubois J., Chin S.L. Toward remote high energy terahertz generation // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97, N 11. P. 111108-1–3.
12. Liu Y., Houard A., Prade B., Mysyrowicz A., Diaw A., Tikhonchuk V.T. Amplification of transition-Cherenkov terahertz radiation of femtosecond filament in air // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93, N 5. P. 2006–2009.
13. Wang T., Marceau C., Yuan S., Chen Y., Wang Q., Th F. External focusing effect on terahertz emission from a two-color femtosecond laser-induced filament in air // Laser Phys. Lett. 2011. V. 61, N 1. P. 57–61.
14. Borodin A.V., Esaulkov M.N., Kuritsyn I.I., Kotelnikov I.A., Shkurinov A.P. On the role of photoionization in generation of terahertz radiation in the plasma of optical breakdown // J. Opt. Soc. Am. B. 2012. V. 29, N 8. P. 1911.
15. You Y.S., Oh T.I., Kim K.Y. Off-axis phase-matched terahertz emission from two-color laser-induced plasma filaments // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 109, N 18. P. 1–5.
16. Blank V., Thomson M.D., Roskos H.G. Spatio-spectral characteristics of ultrabroadband THz emission from two-color photoexcited gas plasmas and their impact for nonlinear spectroscopy // New J. Phys. 2013. V. 15, N 7. P. 20 p.
17. Klarskov P., Strikwerda A.C., Iwaszczuk K., Jepsen P.U. Experimental three dimensional beam profiling and modeling of a terahertz beam generated from a two-color air plasma // New J. Phys. 2013. V. 15. 13 p.
18. Kim K.Y., Taylor A.J., Glowina J.H., Rodriguez G. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser – gas interactions // Nat. Photon. 2008. V. 2. P. 605–609.
19. Rodriguez G., Dakovski G.L. Scaling behavior of ultrafast two-color terahertz generation in plasma gas targets: Energy and pressure dependence // Opt. Express. 2010. V. 18, N 14. P. 15130–15143.
20. Thomson M.D., Blank V., Roskos H.G. Terahertz white-light pulses from an air plasma photo-induced by incommensurate two-color optical fields // Opt. Express. 2010. V. 18, N 22. P. 23173–23182.
21. Matsubara E., Nagai M., Ashida M. Ultrabroadband coherent electric field from far infrared to 200 THz using air plasma induced by 10 fs pulses // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101, N 1. P. 011105.
22. Кулипанов Г.Н., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г., Ошляков В.К., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Бабченко С.В. Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1070–1073; Kulipanov G.N., Lisenko A.A., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Kubarev V.V., Chesnokov E.N., Babchenko S.V. Experimental study of the interaction between terahertz radiation from the Novosibirsk free-electron laser and water aerosol // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 2. P. 165–168.
23. Ivanov N.G., Losev V.F., Lubenko D.M., Prokop'ev V.E., Sitnik K.A. Forming of supercontinuum in the visible upon filamentation of a femtosecond pulse in the air // Proc. SPIE 10228. Nonlinear Opt. Appl. 2017. V. X. P. 1022809-1–9.

D.M. Lubenko, V.E. Prokopev, S.V. Alekseev, M.V. Ivanov, V.F. Losev. Control of THz radiation divergence in laser filament.

Conditions of THz generation in laser filament from ultrashort pulses under aberrations in one- and two-color optical scheme are observed. Possibilities of controlling THz radiation pattern by electric field and aberrations in focusing beam are discussed.