

Генерация терагерцевого излучения при фокусировке бихроматических фемтосекундных лазерных импульсов в газ и плазму

П.А. Чижов, Р.В. Волков, В.В. Букин, А.А. Ушаков, С.В. Гарнов, А.Б. Савельев

Исследована генерация импульсов терагерцевого излучения при фокусировке двухчастотных фемтосекундных лазерных импульсов. Фокусировка осуществлялась как в невозмущенный газ, так и в предварительно созданную плазму. Показано, что энергия импульсов терагерцевого излучения значительно уменьшается в случае фокусировки в плазму.

Ключевые слова: лазерная плазма, терагерцевое излучение.

1. Введение

Одним из перспективных направлений физики взаимодействия излучения с веществом является исследование лазерно-плазменных источников терагерцевого излучения [1, 2]. Такие источники обладают рядом преимуществ по сравнению с источниками, использующими оптическое выпрямление в нелинейных кристаллах, – это широкие полосы частот излучения (до нескольких десятков ТГц [3]) и возможность масштабирования при значительном изменении интенсивности возбуждающего лазерного излучения. Однако коэффициент преобразования энергии оптического излучения в терагерцевый диапазон мал в сравнении с другими нелинейно-оптическими методами генерации (см. напр., [4]). В связи с этим актуальной задачей является поиск методов повышения эффективности преобразования. Для этого необходимо детальное изучение механизмов генерации терагерцевого излучения в плазме. Помимо метода оптического пробоя двухчастотными импульсами [2, 3, 5–12] в литературе рассматриваются схемы пробоя при аксиальной фокусировке одночастотного излучения [13–15]. Также рассматривается проблема генерации терагерцевых импульсов при прохождении одночастотного лазерного излучения через слой разреженной плазмы [16].

Известно, что при одинаковой энергии фемтосекундного лазерного импульса наличие излучения как на основной частоте, так и на частоте второй гармоники (бихроматический импульс) позволяет генерировать излучение в терагерцевом диапазоне в сотни раз эффективнее [2, 3, 5–12]. Несмотря на большое число работ по дан-

ному способу генерации, вопрос о механизмах, приводящих к столь значительному различию в эффективности преобразования лазерного излучения в терагерцевое, продолжает обсуждаться как в теоретических, так и в экспериментальных работах [2, 3, 5–12]. При этом рассматриваются два основных механизма, которые могут приводить к эффективной генерации терагерцевого излучения в плазме при двухчастотном пробое: четырехволновое взаимодействие и возбуждение макроскопических фототоков.

В случае наличия у среды кубической нелинейности четырехволновое взаимодействие основной и второй гармоник излучения может вызывать постоянную (низкочастотную) поляризацию среды (исходного газа и плазмы), вследствие чего возникает импульс терагерцевого излучения [2, 3, 5, 6, 11]. Однако измеряемая при этом в многочисленных работах энергия генерируемых терагерцевых импульсов соответствует anomalously высокой кубической нелинейности плазмы [5].

Другим рассматриваемым механизмом является генерация тока при туннельной ионизации воздуха бихроматическим импульсом [8, 9, 11, 12]. Вероятность полевой ионизации в этом случае сильно зависит от напряженности суммарного электрического поля, при этом фотоэлектроны рождаются преимущественно вблизи максимума колебаний напряженности поля. В результате, после окончания воздействия лазерного излучения электроны имеют конечную скорость. В случае пробоя одночастотным лазерным излучением скорость фотоэлектронов будет направлена по направлению поляризации лазерного импульса, при этом средний ток будет равен нулю, так как примерно одинаковое число электронов ионизируется на полупериодах с противоположными направлениями вектора электрического поля в импульсе. Симметрия поля в импульсе нарушается, например, в случае пробоя фемтосекундным импульсом, состоящим из нескольких периодов излучения. Наличие в лазерном импульсе излучения второй гармоники также позволяет снять симметрию и, следовательно, сформировать импульс тока.

Цель нашего исследования – выяснение влияния процессов, связанных с ионизацией среды, на генерацию излучения в терагерцевом диапазоне в случае фокусировки двухчастотного лазерного излучения.

П.А. Чижов, В.В. Букин, С.В. Гарнов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pvch@inbox.ru, svgarinov@mail.ru

Р.В. Волков, А.А. Ушаков, А.Б. Савельев. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: abst@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2012 г., после доработки – 11 февраля 2013 г.

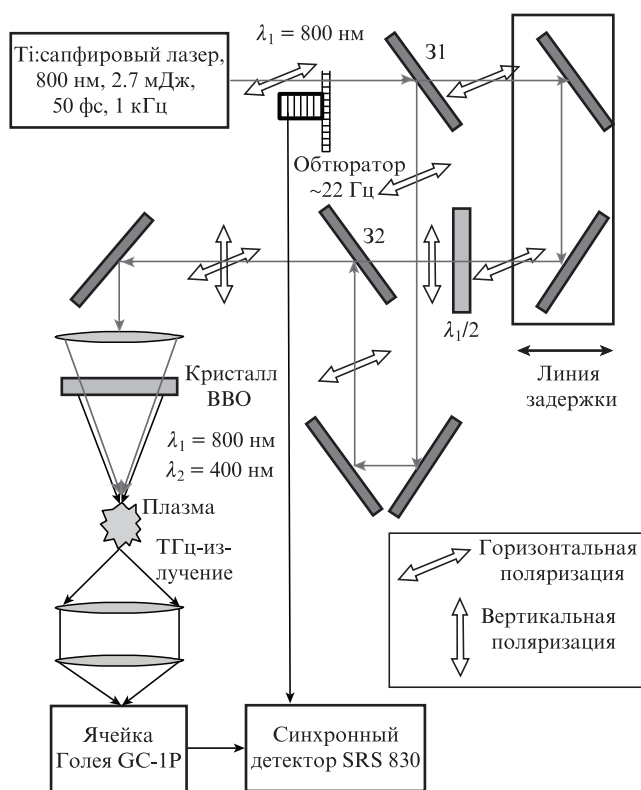


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В качестве источника фемтосекундных импульсов применялась лазерная система на основе Тi:сапфира Spitfire Pro XP (Spectra-Physics) со следующими параметрами: длительность импульса $\tau = 50$ фс, длина волны лазерного излучения $\lambda = 800$ нм, энергия лазерного импульса до 3 мДж, диаметр гауссового пучка 12 мм (по уровню $1/e^2$), частота следования импульсов 1 кГц.

Излучение титан-сапфирового лазера, поляризованное горизонтально, разделялось полупрозрачным зеркалом 31 на две примерно равные части, формируя два оптических импульса на основной гармонике. На пути одного из импульсов стояла пластинка $\lambda/2$, изменявшая его поляризацию на вертикальную. Затем импульсы совмещались полупрозрачным зеркалом 32. Временная задержка между этими импульсами изменялась с помощью линии задержки. Лазерное излучение фокусировалось линзой ($f = 15$ см), при этом в фокусе наблюдалась искра. По оценке методом интерферометрии плотность плазмы составляла $\sim 10^{18}$ см $^{-3}$ [17]. За линзой находился кристалл ВВО с синхронизмом I типа, настроенный на преобразование горизонтально поляризованного излучения во вторую гармонику. Расстояние от линзы до кристалла выбиралось для получения максимального терагерцевого сигнала [9].

Таким образом, оптический пробой газа (воздух атмосферного давления) осуществлялся импульсным бихроматическим лазерным полем (одновременно горизонтально поляризованной основной и вертикально поляризованной второй гармониками титан-сапфирового лазера, суммарная энергия в импульсе 400 мкДж) и импуль-

сом основной гармонике (вертикально поляризованной, энергия 450 мкДж). Благодаря изменению взаимной временной задержки бихроматическое излучение фокусировалось либо в невозмущенный газ, либо в плазму, предварительно созданную в газе в месте фокусировки. Система из двух тefлоновых линз (каждая диаметром 5 см с фокусным расстоянием 6 см) фокусировала терагерцевое излучение на вход ячейки Голя GC-1P (Tydex), закрытый черной бумагой, что препятствовало попаданию в него оптического излучения. Падение мощности регистрируемого сигнала из-за добавления дополнительного листа черной бумаги составляло около 10%. В схему был введен обтюратор для модуляции лазерного (и терагерцевого) излучения, что позволяло измерять среднюю мощность терагерцевого излучения методом синхронного детектирования.

В случае запаздывания бихроматического импульса относительно одночастотного, т.е. при фокусировке его в плазму, измеренная энергия терагерцевых импульсов E составила ~ 0.1 пДж. Если же бихроматический импульс приходил раньше одночастотного, энергия зарегистрированных терагерцевых импульсов $E = 0.9$ пДж. В случае пробоя воздуха только одночастотным оптическим излучением используемая техника не позволяла измерить сигнал ввиду его малости. Таким образом, в нашей схеме регистрировался только терагерцевый сигнал от бихроматического оптического импульса. Спектр зарегистрированных импульсов не измерялся.

Аналогичные измерения в описанной схеме сигнала на частоте третьей гармоники (за генерацию которого отвечает нелинейность того же порядка) показали, что наличие предварительно созданной плазмы снижает уровень сигнала всего лишь на 15%.

3. Заключение

Значительное падение мощности регистрируемого терагерцевого сигнала позволяет предположить, что процессы фотоионизации невозмущенного газа играют принципиальную роль в механизмах генерации терагерцевого излучения.

В то же время наличие плотной плазмы в области фокусировки бихроматического импульса может приводить к экранированию терагерцевого излучения (не экранируя при этом сигнал на частоте третьей гармоники).

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения», РФФИ (гранты № 11-02-12257-офи-м и № 12-02-01368-а), грантов Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-5996.2012.2 и МК-2975.2013.2, а также стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-2391.2013.2.

1. Hamster H., Sullivan A., Gordon S., White W., Falcone R.W. *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 2725 (1993).
2. Cook D.J., Hochstrasser R.M. *Opt. Lett.*, **25**, 1210 (2000).
3. Dai J., Liu J., Zhang X-C. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, **17**, 183 (2010).
4. Stepanov A.G., Bonacina L., Chekalin S.V., Wolf J.-P. *Opt. Lett.*, **33**, 2497 (2008).
5. Kress M., Löffler T., Eden S., Thomson M., Roskos H.G. *Opt. Lett.*, **29**, 1120 (2004).
6. Bartel T., Gaal P., Reimann K., Woerner M., Elsaesser T. *Opt. Lett.*, **30**, 2805 (2005).

7. Xie X., Dai J., Zhang X.-C. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 075005 (2006).
8. Kim K.Y., Glowia J.H., Taylor A.J., Rodriguez G. *Opt. Express*, **15**, 4577 (2007).
9. Balakin A.V., Borodin A.V., Kotelnikov I.A., Shkurinov A.P. *J. Opt. Soc. Am.*, **27**, 16 (2010).
10. Kress M., Löffler T., Thomson M.D., Dörner R., Gimpel H., Zrost K., Ergler T., Moshhammer R., Morgner U., Ullrich J., Roskos H.G. *Nat. Phys.*, **2**, 327 (2006).
11. Kress M., Löffler T., Thomson M., Roskos H.G. *Laser & Photon. Rev.*, **1** (4), 349 (2007).
12. Andreeva V.A., Borodin A.V., Esaulkov M.N., Kosareva O.G., Luo Q., Panov N.A., Shkurinov A.P., Wang K., Zhao H., Zhang X.-C. *Abstr. 37-th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (Moscow, 2012, p. 1–2).
13. Голубев С.В., Суворов Е.В., Шалашов А.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **79** (8), 443 (2004).
14. Быстров А.М., Введенский Н.В., Гильденбург В.Б. *Письма в ЖЭТФ*, **82** (12), 852 (2005).
15. Suvorov E., Akhmedzhanov R., Fadeev D., Plyakov I., Mironov V., Shishkin B. *Abstr. 35-th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (Rome, 2010, p. 1–2).
16. Фролов А.А. *Физика плазмы*, **36** (4), 347 (2010).
17. Букин В.В., Воробьев Н.С., Гарнов С.В., Конов В.И., Лозовой В.И., Малютин А.А., Щелев М.Я., Яцковский И.С. *Квантовая электроника*, **36** (7), 638 (2006).