

Сравнительный анализ методик двумерной пространственно-временной визуализации поля импульсного терагерцевого излучения с применением электрооптического кристалла

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

Приводится сравнение двух методик двумерной визуализации поля импульсного терагерцевого излучения («теневого» и «интерферометрической»), основанных на линейном электрооптическом эффекте с применением детектирующего кристалла ZnTe размером 1 × 1 см. Проводится анализ уровня шума и динамического диапазона при использовании указанных методик. Обсуждаются границы применимости предложенных методов.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, интерферометрия, электрооптическое детектирование.

1. Введение

Активное развитие источников терагерцевого (ТГц) излучения предоставляет возможности для создания новых приложений в задачах спектроскопии, микроскопии, удаленной диагностики, томографии и построения изображений [1–12]. Особый интерес представляют импульсные ТГц источники, применяемые в различных задачах спектроскопии с временным разрешением, например, с помощью методики электрооптического детектирования [4, 5, 12]. Существуют различные схемы регистрации поля импульсного ТГц излучения с помощью электрооптических кристаллов. В первых работах [2, 4] использовались приемники без пространственного разрешения, что приводило к необходимости растрового сканирования. Кроме того, скорость визуализации снижалась из-за сканирования задержки между пробным оптическим и ТГц импульсами. Последнее было устранено с помощью применения chirпированных зондирующих импульсов, позволяющих зарегистрировать временную форму ТГц импульса [6, 13, 14]. Однако скорость визуализации определяется в основном временем, требуемым для пространственного сканирования [7, 15]. Поэтому представляет интерес использование кристаллов большой апертуры [16–19] для визуализации ТГц импульса без пространственного сканирования.

В настоящий момент известны две различные методики визуализации полей ТГц импульсов с применением широкоапертурных электрооптических кристаллов, позволяющих избавиться от поточечного пространственного сканирования. Первая методика, которую мы в дальнейшем будем называть теневой, основана на регистрации не-

больших изменений интенсивности зондирующего излучения вследствие наведенной ТГц полем деполяризации в электрооптическом кристалле. Такая методика была продемонстрирована при регистрации поля ТГц импульсов с использованием частично скрещенных поляризаторов в детекторе [18, 19], либо квадрата поля ТГц импульсов при использовании скрещенных поляризаторов в детекторе [7]. Вторая методика, которую мы в дальнейшем будем называть интерферометрической, основана на регистрации искривления полос интерференционной картины вследствие наведенного ТГц полем двулучепреломления в электрооптическом кристалле [17]. В настоящей работе мы проводим сравнение этих двух схем визуализации поля ТГц импульсов с применением широкоапертурного электрооптического кристалла, которые позволяют избавиться от поточечного сканирования.

2. Экспериментальные установки

2.1. Схема теневого измерения ТГц поля на установке 1

Источником оптического излучения служил титан-сапфировый лазер (центральная длина волны 775 нм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульса 150 фс, энергия импульса 2.8 мДж, диаметр гауссова пучка 12 мм по уровню $1/e^2$, горизонтальная поляризация). Лазерное излучение делилось на две части. Основная часть лазерного излучения направлялась для генерации ТГц излучения в источнике (рис. 1), основанном на оптическом выпрямлении фемтосекундного излучения с наклонным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития (LiNbO_3) [20]. ТГц излучение из источника коллимировалось и фокусировалось двумя тефлоновыми линзами ($f = 10$ см и $f = 6$ см) на поверхность детектирующего широкоапертурного кристалла ZnTe ($10 \times 10 \times 0.5$ мм, ориентация $\langle 110 \rangle$). Вторая часть лазерного излучения – зондирующий импульс – пропусклась через линию переменной оптической задержки, четвертьволновую пластинку, светофильтры и линзу, расширяющую пучок, после чего совмещалась с ТГц излучением на лавсановой пленке и направлялась в кристалл ZnTe. Плоскость детектирующего кристалла ZnTe отображалась телескопом на матрицу КМОП-камеры (Basler acA2040-25gm-NIR, 1", 2048 × 2048). На пути зон-

А.А.Ушаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru

П.А.Чижов, В.В.Букин, С.В.Гарнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38
А.Б.Савельев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

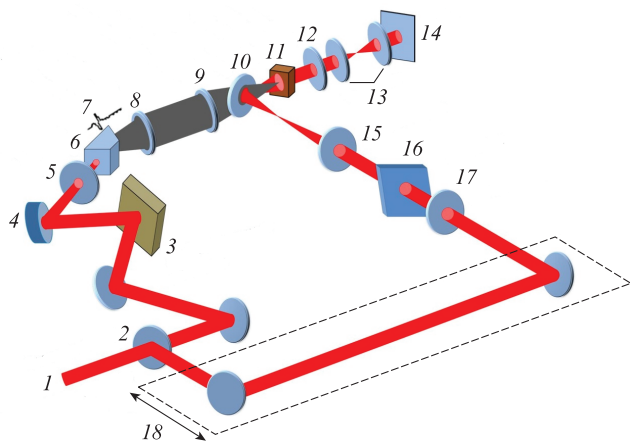


Рис.1. Схема установки 1:

1 – титан-сапфировый лазер (775 нм, 10 Гц, 2,8 мДж); 2 – светоделитель; 3 – дифракционная решетка; 4 – сферическое зеркало ($f = 20$ см); 5 – пластинка $\lambda/2$; 6 – LiNbO₃; 7 – ТГц излучение; 8 – тефлоновая линза ($f = 10$ см); 9 – тефлоновая линза ($f = 6$ см); 10 – лавсановая пленка; 11 – ZnTe (0.5 мм); 12 – поляризатор; 13 – телескоп; 14 – КМОП-камера; 15 – линза ($f = 5$ см); 16 – фильтры; 17 – пластинка $\lambda/4$; 18 – линия задержки.

дирующего пучка до телескопа устанавливался поляризатор, пропускающий вертикально поляризованное излучение. ТГц поле наводило двулучепреломление в кристалле и вызывало изменение яркости изображения кристалла на КМОП-камере за счет линейного электрооптического эффекта [21].

Яркость изображения поверхности кристалла из-за электрооптического эффекта [1] менялась пропорционально фазовому сдвигу оптического излучения, который возник в присутствии ТГц поля,

$$I \cong \frac{I_0}{2} \left(1 + \frac{\pi E_{\text{ТГц}}}{E_\pi} \right). \quad (1)$$

Здесь $E_{\text{ТГц}}$ – напряженность электрического ТГц поля; E_π – напряженность ТГц поля, вызывающая сдвиг фазы π ; I_0 – исходная интенсивность оптического пучка. Для использованного кристалла ZnTe $E_\pi = 178$ кВ/см [1]. Типичные величины напряженностей наблюдаемых полей в установке 1 составляли 2–3 кВ/см, таким образом, могло быть использовано линейное приближение (1). Впоследствии двумерные распределения амплитуды ТГц поля могли быть найдены из картин освещенности поверхности кристалла. Изменение задержки между ТГц и оптическими импульсами позволяло получить двумерно-временное ($2D + \tau$) распределение электрического ТГц поля.

В процессе эксперимента для повышения отношения сигнал/шум были получены изображения кристалла как в присутствии ТГц поля (сигнальные), так и в его отсутствие (опорные). Для каждого положения временной задержки между оптическим и ТГц импульсами было сделано по 50 сигнальных и опорных кадров. Вначале сигнальные и опорные изображения усреднялись независимо друг от друга для каждой задержки в отдельности. Поскольку напряженность ТГц поля пропорциональна отношению изменения яркости изображения поверхности кристалла вследствие электрооптического эффекта, использовалась опорная серия изображений с тем, чтобы учесть изменение яркости изображения относительно первоначально невозмущенного оптического излучения. Таким

образом, значение ТГц поля может быть найдено по формуле

$$E_{\text{ТГц}}(x, y, \tau) = \frac{I_{\text{sign}}(x, y, \tau) - I_{\text{ref}}(x, y, \tau)}{I_{\text{ref}}(x, y, \tau)} \frac{E_\pi}{\pi} \\ = \frac{I_{\text{sign}}(x, y, \tau) - I_{\text{ref}}(x, y, \tau)}{I_{\text{ref}}(x, y, \tau)} \times 55 \text{ кВ/см}, \quad (2)$$

где $I_{\text{sign}}(x, y, \tau)$ и $I_{\text{ref}}(x, y, \tau)$ – сигнальные и опорные интенсивности изображений в различных точках поверхности кристалла (координаты x, y) и в различные времена задержек τ между оптическим и ТГц импульсами. В результате был получен трехмерный массив данных: набор из примерно 100 двумерных изображений (2048×2048 точек каждое) с временным шагом 125 фс. Поскольку размер пикселя изображений составляет 5.5 мкм, что существенно меньше характерных длин волн ТГц излучения (в максимуме спектра источника частота 0.6 ТГц соответствует длине волны 400 мкм), исходный размер изображения (2048×2048 пикселей) является избыточным. Для уменьшения объема данных проводилась пространственная фильтрация с применением гауссова фильтра (разрешение $\sigma = 60$ мкм) и последующим укрупнением получаемых эффективных пикселей распределений. Конечный размер пространственных распределений составлял 120×120 точек.

2.2. Схема измерения ТГц поля методом интерферометрии на установке 2

Во второй схеме (рис.2) также использовался титан-сапфировый лазер (800 нм, 10 Гц, 40 фс, 2.5 мДж, 12 мм по уровню $1/e^2$, горизонтальная поляризация). Аналогично предыдущей установке регистрация ТГц излучения проводилась по схеме накачка–зондирование. Основная часть оптического излучения использовалась в качестве накачки для источника ТГц излучения, аналогичного источнику в уста-

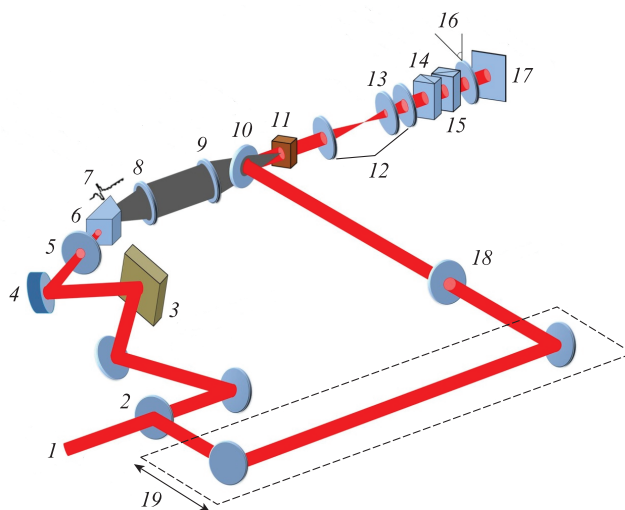


Рис.2. Схема установки 2:

1 – титан-сапфировый лазер (800 нм, 10 Гц, 2,5 мДж); 2 – светоделитель; 3 – дифракционная решетка; 4 – сферическое зеркало ($f = 20$ см); 5 – пластинка $\lambda/2$; 6 – LiNbO₃; 7 – ТГц излучение; 8 – тефлоновая линза ($f = 10$ см); 9 – тефлоновая линза ($f = 6$ см); 10 – лавсановая пленка; 11 – ZnTe (0.5 мм); 12 – телескоп; 13 – интерференционный фильтр; 14 – призма Волластона ($\alpha = 1.5^\circ$); 15 – призма Волластона ($\alpha = 3^\circ$); 16 – поляризатор ($\beta = 45^\circ$); 17 – КМОП-камера; 18 – пластинка $\lambda/2$; 19 – линия задержки.

новке 1. Вторая часть лазерного излучения – зондирующий импульс – служил для регистрации поля с помощью интерферометрической методики. Плоскость детектирующего кристалла отображалась телескопом на поверхность матрицы той же самой КМОП-камеры. Интерферометр состоял из двух призм Волластона (с углами разведения лучей 1.5° и 3°) и поляризатора, ориентированного под углом 45° . Визуализация ТГц поля была основана на регистрации изменения интерференционной картины за счет изменения оптического пути для волн с ортогональными поляризациями при наведении двулучепреломления в кристалле под действием внешнего ТГц поля. Подробно принцип измерения ТГц поля описан в работе [17].

Аналогично вышеописанному методу были получены изображения поверхности электрооптического кристалла с интерференционными полосами (интерферограммы) как в присутствии ТГц импульса (сигнальные), так и без него (опорные). С целью повышения отношения сигнал/шум для каждой величины задержки между оптическим и ТГц импульсами также было сделано по 50 сигнальных и опорных кадров. Для восстановления разности фаз применялась обработка интерферограмм, основанная на методе фильтрации в фурье-пространстве [22], а затем полученные распределения фаз усреднялись. В результате обработки получалось двумерное распределение среднего изменения сдвига фазы из-за присутствия поля ТГц импульса. По сдвигу фазы можно вычислить напряженность ТГц поля E_{THz} . В соответствии с [23] в случае использования поляризаций оптического и ТГц импульсов, ориентированных относительно кристаллографических осей ZnTe как в нашем эксперименте,

$$E_{\text{THz}} = \frac{\Gamma \lambda}{\pi d n^3 r_{41}} = \frac{\Gamma E_{\text{opt}}}{\pi} \cong \Gamma \times 55 \text{ кВ/см}, \quad (3)$$

где Γ – фазовый сдвиг из-за воздействия ТГц поля; λ – длина волны зондирующего излучения; n и r_{41} – показатель преломления и электрооптический коэффициент кристалла; d – толщина кристалла.

3. Результаты экспериментов

Итак, были получены наборы двумерных пространственных распределений электрических полей импульсного ТГц излучения, измеренные с помощью как теневой (рис.3), так и интерферометрической методики (рис.4). Поскольку длительность оптического импульса существенно меньше длительности ТГц импульса, поле последнего можно рассматривать как постоянное относительно оптического. Ввиду наличия синхронизма между ТГц и оптическим излучениями в кристалле, ТГц поле можно считать постоянным во всем объеме. В обеих экспериментальных схемах оптическое излучение нормально падало на кристалл, поэтому получаемые распределения поля являются сечениями волновых фронтов ТГц импульсов фронтом оптического импульса, который совпадает с плоскостью кристалла.

В теневой методике при нормальном падении плоского волнового фронта ТГц излучения должно наблюдаться затемнение или просветление всего изображения при изменении задержки между оптическим и ТГц импульсами. При наклонном падении плоского фронта ТГц излучения сечения фронтов ТГц импульсов будут представляться полосами, соответствующими напряженности поля, которые

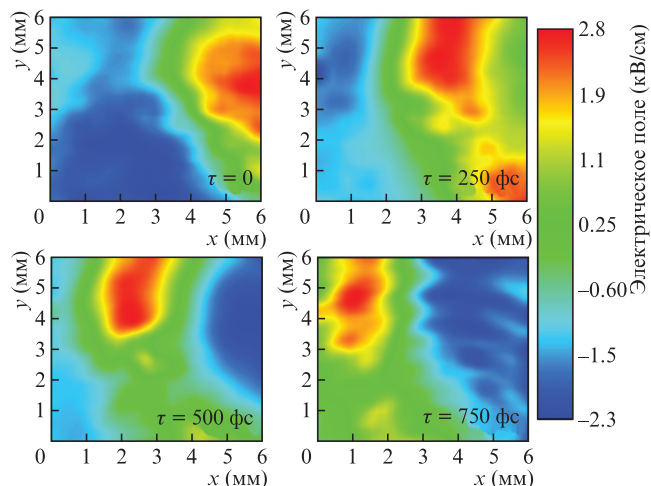


Рис.3. Пространственные распределения поля ТГц излучения, зарегистрированные с помощью теневой методики при различных временных задержках τ между зондирующим оптическим и ТГц импульсами. Цветное изображение рис.3 помещено на сайте нашего журнала www.quantum-electron.ru.

будут перемещаться вдоль плоскости кристалла при изменении задержки между оптическим и ТГц импульсами. Чем ближе угол падения к нормальному, тем больше ширина этих полос.

Аберрационные и дифракционные эффекты при распространении ТГц импульсов приводят к искривлению их волновых фронтов и соответствующему искривлению полос получаемых распределений. В нашем случае углы падения ТГц излучения относительно плоскости кристалла и, следовательно, плоскости фронта зондирующего излучения в описанных установках различались, что привело к различию размеров полос на пространственных распределениях детектируемых ТГц полей: в интерферометрической методике полосы существенно уже, чем в теневой. При изменении задержки между зондирующим и ТГц импульсами происходит сдвиг полос. Нулевое значение задержки на рис.3 и 4 выбиралось произвольно, поскольку для анализа фронта ТГц импульса важно знать лишь

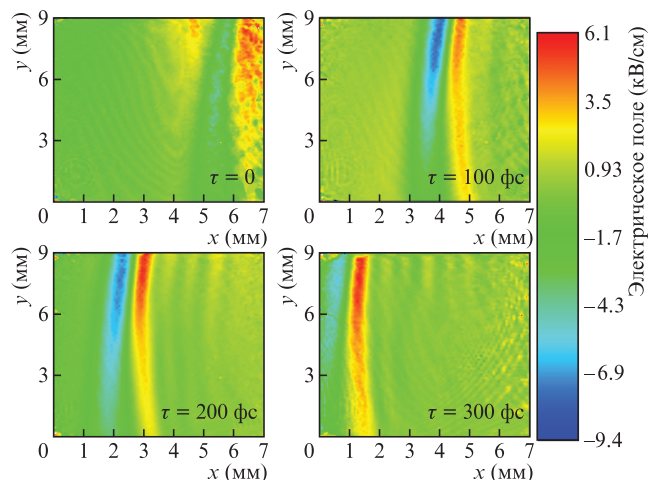


Рис.4. Пространственные распределения поля ТГц излучения, зарегистрированные с помощью интерферометрической методики при различных временных задержках τ между зондирующим оптическим и ТГц импульсами. Цветное изображение рис.4 помещено на сайте нашего журнала www.quantum-electron.ru.

относительное изменение задержки между оптическим и ТГц импульсами.

Для оценки уровня шумовой составляющей в получаемых распределениях поля вычислялось среднеквадратичное значение данных по области кадра, в которой отсутствовал сигнал. В случае теневой методики эквивалентное значение уровня шума напряженности поля δE составило 100 В/см. В интерферометрическом методе среднеквадратичное значение шумовой составляющей разности фаз $\delta\varphi$ составило 5 мрад, что эквивалентно шумовой напряженности электрического поля $\delta E = 280$ В/см. Указанные значения согласуются со значениями, ранее полученными в других экспериментах [6, 7, 17, 23]. Одной из основных причин снижения чувствительности в случае применения интерференционного метода является присутствие механических вибраций, вызывающих случайный сдвиг интерференционных полос на плоскости детектирующего кристалла. Подобный недостаток может быть устранен при снижении уровня механических вибраций и увеличении количества усреднений получаемых изображений.

Важной характеристикой используемых методов является их динамический диапазон измерений. Он определяется как отношение максимально измеряемой величины ТГц поля к среднеквадратичному уровню шума. Максимальный диапазон измерений ТГц поля в электрооптических методиках определяется, в первую очередь, свойствами используемого для регистрации кристалла (электрооптический коэффициент, ориентация осей, толщина). В обеих экспериментальных схемах применялся один и тот же кристалл ZnTe. Максимальная величина измеряемого поля в обеих схемах $E_{\pi} = \pm 178$ кВ/см, что соответствует достижению максимальной/минимальной яркости изображения кристалла в теневой методике либо сдвигу на половину ширины полосы в интерференционной картине. Это, в свою очередь, соответствует границам диапазона однозначного определения фазы в интерференционной методике. Для теневой методики динамический диапазон составил 1780, для интерференционной – 636. Основным преимуществом последней является то, что она, в отличие от теневой методики, зависит не от освещенности кадра, а от контраста интерференционных полос. В случае изменения яркости изображения плоскости кристалла (смещение зондирующего пучка вдоль плоскости кристалла, флуктуации освещенности в различных частях кадра), уровень шума для теневой методики будет возрастать, тогда как для интерференционной методики это влияние будет существенно меньше. Однако при высокой повторяемости качества зондирующего пучка это преимущество интерференционной методики перед теневой исчезает.

Важным вопросом также является линейность отклика сигнала от величины ТГц поля. Поскольку формулы (1)–(3) получены в рамках предположения линейности отклика на величину ТГц полей, то для полей, достигаемых в последних работах [24–26], некорректно использовать данное предположение. Для оценки величины поля в такой ситуации используют другие методы измерений.

4. Заключение

В работе проведено сравнение двух схем визуализации поля импульсного ТГц излучения, основанных на из-

мерении деполяризации пробного лазерного импульса в электрооптическом кристалле теневым и интерферометрическим методами. Из-за наличия механических вибраций в схеме, основанной на интерференционной методике, уровень шума втрое выше, а динамический диапазон втрое ниже, чем в схеме с теневой методикой. Интерферометрическая методика может иметь преимущество для визуализации ТГц полей при использовании лазерных систем с мелкомасштабными флуктуациями интенсивности пучка и его направленности. Хотя обе методики ограничены по диапазону измерения величин напряженности полей ТГц излучения, они не требуют поточечного сканирования и могут быть использованы для задач построения изображения объектов в ТГц диапазоне частот.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения». А.А.У. выражает благодарность Фонду содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа «УМНИК», договор FASIE 11488ГУ/2017) и фонду «Базис».

1. Zhang X.-C., Xu J. *Introduction to THz Wave Photonics* (New York: Springer, 2010).
2. Mittleman D.M., Hunsche S., Boivin L., Nuss M.C. *Opt. Lett.*, **22**, 904 (1997).
3. Wynne K., Jaroszynski D. *Opt. Lett.*, **24**, 25 (1999).
4. Mittleman D.M., Jacobsen R.H., Nuss M.C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 679 (1996).
5. Peiponen K.-E., Zeitler J.A., Kuwata-Gonokami M. (Eds) *Terahertz Spectroscopy and Imaging* (Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, Vol. 171).
6. Jiang Z., Zhang X. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 1214 (2000).
7. Jiang Z., Zhang X. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **47**, 2644 (1999).
8. Oh S.J., Choi J., Maeng I., Park J.Y., Lee K., Huh Y.-M., Suh J.-S., Naam S., Son J.-H. *Opt. Express*, **19**, 4009 (2011).
9. Ferguson B., Wang S., Gray D., Abbot D., Zhang X.-C. *Opt. Lett.*, **27**, 1312 (2002).
10. Hu B.B., Nuss M.C. *Opt. Lett.*, **20**, 1716 (1995).
11. Kim K.Y., Yellampalle B., Taylor J., Rodriguez G., Glownia J.H. *Opt. Lett.*, **32**, 1968 (2007).
12. Wang S., Ferguson B., Abbott D., Zhang X.-C. *J. Biol. Phys.*, **29**, 247 (2003).
13. Yellampalle B., Kim K.Y., Rodriguez G., Glownia J.H., Taylor A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 211109-1 (2005).
14. Jiang Z., Zhang X.-C. *Opt. Lett.*, **23**, 1114 (1998).
15. Kim K.Y., Yellampalle B., Rodriguez G., Averitt R.D., Taylor J., Glownia J.H. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 41123 (2006).
16. Zhang L., Karpowicz N., Zhang C., Zhao Y., Zhang X. *Opt. Commun.*, **281**, 1473 (2008).
17. Чижов П.А., Ушаков А.А., Букин В.В., Гарнов С.В. *Квантовая электроника*, **45**, 434 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 434 (2015)].
18. Wu Q., Hewitt T.D., Zhang X.C. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1026 (1996).
19. Wu Q., Sun F.G., Campbell P., Zhang X.C. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 3224 (1996).
20. Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M.C., Bartal B., Nelson K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, B6 (2008).
21. Jiang Z., Zhang X.-C. *Opt. Express*, **5**, 243 (1999).
22. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 156 (1982).
23. Casalbuoni S., Schlarb H., Schmidt B., Schmäser P., Steffen B., Winter A. *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams*, **11**, 1 (2008).
24. Vicario C., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Fortov V.E., Hauri C.P. *Opt. Lett.*, **39**, 6632 (2014).
25. Agranat M.B., Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., Fortov V.E., Kondratenko P.S. *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 85704 (2018).
26. Vicario C., Shalaby M., Hauri C.P. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 83901-1 (2017).