

УДК 535.4, 535-14

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА НА ЩЕЛИ

М.С. Куля, Я.В. Грачев, А.А. Городецкий, В.Г. Беспалов

Экспериментально и теоретически получены временные зависимости амплитуды электрического поля терагерцового электромагнитного импульса из нескольких осцилляций для различных углов дифракции на щели в дальней зоне. Выявлено, что с ростом угла дифракции наблюдаются существенные изменения временной формы электрического поля исследуемого импульса, а также соответствующие изменения спектра. Сравнение результатов исследования показывает хорошее согласование расчетов и экспериментальных результатов. Полученные результаты могут быть использованы в импульсной терагерцовой оптике и спектроскопии.

Ключевые слова: оптика импульсов из малого числа колебаний электрического поля, импульсное терагерцовое излучение, дифракция на щели.

Введение

Терагерцовым (ТГц) обычно называют излучение, лежащее в интервале частот 0,1–10 ТГц, которое по длинам волн находится между инфракрасным и миллиметровым/субмиллиметровым диапазонами, от 0,03 мм до 3 мм. Исследования физики и техники ТГц излучения начались достаточно давно [1, 2], однако только с развитием фемтосекундной оптики и микроэлектроники в данной области наметился значительный сдвиг, возрос интерес к фундаментальным и прикладным исследованиям, были опубликованы первые монографии [3, 4]. Были созданы методы получения и детектирования ТГц излучения с использованием световых импульсов фемтосекундной длительности при возбуждении носителей заряда в фотополупроводниках и сверхпроводниках; с помощью оптического детектирования в $\chi^{(2)}$ нелинейных средах; при оптическом пробое газов излучением первой и второй гармоник фемтосекундного лазера [5–7].

Одним из фундаментальных явлений оптики является дифракция света, однако исследований пространственно-временной структуры при распространении сверхкороткого широкополосного импульса, обладающего сложной амплитудно-фазовой структурой, в достаточной мере не проводилось [8–11]. Экспериментально дифракцию импульсов из нескольких осцилляций электромагнитного поля для волн в видимом и ИК-диапазонах спектра на практике достаточно сложно изучать, так как практически нет возможности прямой регистрации амплитуды и фазы, и только итерационные процедуры расчета позволяют восстановить исходный временной или пространственный профиль [12, 13].

Экспериментальное изучение дифракции сверхкороткого импульса со сложной амплитудно-фазовой структурой стало возможным с появлением техники регистрации временных форм электрического поля импульса широкополосного ТГц излучения. ТГц волновой фронт при возбуждении фемтосекундными импульсами, как правило, представляет собой несколько колебаний электромагнитного поля и обладает сложной амплитудно-фазовой структурой, связанной как с процессом генерации и дальнейшей дифракцией на образованной апертуре, так и с влиянием дисперсии среды [14]. Целью настоящей работы являлось получение экспериментальных результатов и сравнение расчетных зависимостей для спектрально-временных форм электрического поля волны при дифракции импульсов из малого числа колебаний на примере ТГц излучения с широкополосным спектром и длительностью несколько пикосекунд. Особенность работы заключалась в прямой регистрации временных форм дифракции предельно короткого импульса, что было затруднительно в оптике импульсов из большого числа колебаний. Данное исследование может быть полезным при интерпретации результатов измерений в импульсной ТГц оптике и спектроскопии.

Математическая модель

Рассмотрим одномерную задачу об определении распределения электрического поля $E(t)$ дифрагированного излучения в дальней зоне плоской ТГц волны, падающей на бесконечную в направлении оси z щель шириной $2a$ в системе координат x, y, z . Исходное импульсное электрическое поле $E(t)$ для терагерцовой волны записывается в виде

$$E(t) = \frac{t}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right), \quad (1)$$

где t – время; τ – длительность импульса.

Комплексный спектр данного поля определяется прямым преобразованием Фурье:

$$G(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{t}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cdot \exp(-i2\pi\nu \cdot t) dt, \quad (2)$$

где ν – частота излучения.

Широкополосный спектр ТГц излучения (2) можно представить в виде суперпозиции монохроматических компонент, каждая из которых описывается волновым числом $k = \frac{2\pi\nu}{c}$. Далее для каждой отдельной монохроматической компоненты можно записать дифракционный интеграл Фраунгофера. Так как щель бесконечна в плоскости z , то волна отклоняется только в плоскости xu , а разложение поля проводится по поперечной координате x . Таким образом, пространственно-временной спектр в дальней зоне дифракции может быть записан в следующем виде:

$$G(\nu, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{t}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cdot \exp(-i2\pi\nu \cdot t) dt \cdot \int_{-a}^a \exp(-ik'_y x) dx, \quad (3)$$

где

$$k'_y = \frac{2\pi\nu}{c} \sin(\theta), \quad (4)$$

c – скорость света в вакууме; a – половина ширины щели; k'_y – проекция волнового вектора дифрагированной ТГц волны на оптическую ось y ; θ – угол между k'_y и осью y .

С учетом (4) выражение (3) преобразуется в

$$G(\nu, \theta) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot a \cdot \nu}{c} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi \cdot a \cdot \nu}{c} \cdot \sin(\theta)} \right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \cdot \exp(-i2\pi\nu \cdot t) dt. \quad (5)$$

Таким образом, получаем для каждого значения дифракционного угла θ и частоты соответствующий комплексный спектр дифракции. Временная форма ТГц импульса может быть получена с помощью обратного преобразования Фурье от выражения (5):

$$E(t, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu, \theta) \cdot \exp(-i2\pi t \cdot \nu) d\nu. \quad (6)$$

Используя соотношения (5) и (6), можно рассчитать пространственно-временные картины дифракции импульсного ТГц излучения на щели. На рис. 1 показаны графики спектрального и временного дифракционного распределения для идеального ТГц импульса из одного колебания поля, задаваемого формулой (1). Видно, что с ростом угла дифракции θ наблюдаются изменения временной формы импульса, а также соответствующие изменения спектра. Ширина спектра сужается, а центральная частота смещается в область низких частот, при этом появляются вторичные максимумы в спектре дифракции. Во временной области с ростом угла дифракции максимумы амплитуды поля импульса смещаются в противоположных друг от друга направлениях по оси времени, что свидетельствует об искривлении исходного плоского волнового фронта терагерцовой волны при дифракции.

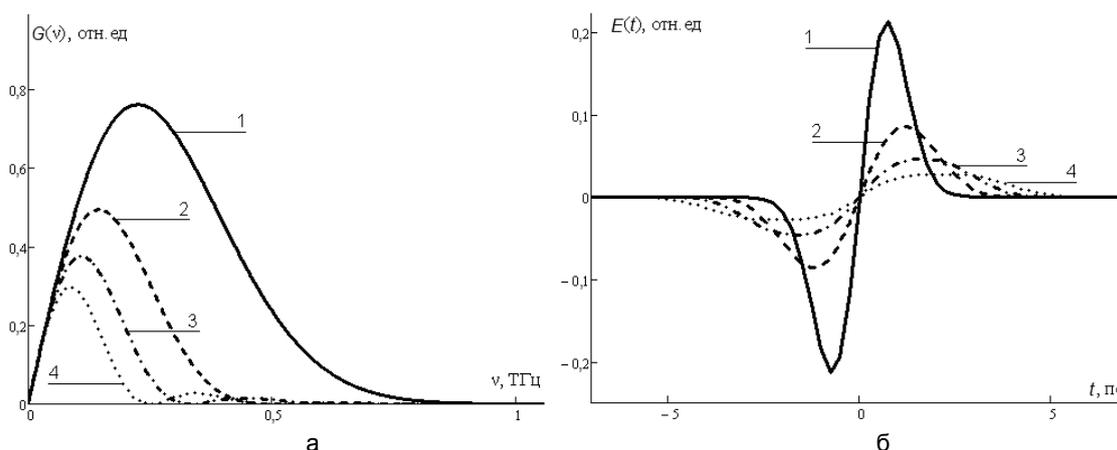


Рис. 1. Спектральное (а) и временное (б) распределение для дифрагированного идеального однопериодного ТГц импульса. Графики представлены для различных дифракционных углов: 1 – $\theta=0$ рад; 2 – $\theta=0,02$ рад; 3 – $\theta=0,03$ рад; 4 – $\theta=0,04$ рад. Ширина щели 300 мкм

Схема эксперимента

В схеме (рис. 2) лазерный пучок от фемтосекундного Yb: KYW лазера (длина волны $\lambda=1040$ нм; длительность импульса по уровню половинной ширины $\tau \approx 200$ фс; частота следования равна 80 МГц; средняя мощность $W_{\text{ср}}=1,2$ Вт) с помощью делителя пучка разделяется на пробный пучок и пучок накачки. Пучок накачки, пройдя через управляемую линию оптической задержки, попадает на полупроводниковый кристалл InAs, помещенный в постоянное магнитное поле, где происходит генерация ТГц излучения [6, 7]. Затем ТГц излучение коллимируется параболическим зеркалом диаметром 9 см, за которым находится тefлоновый фильтр, пропускающий ТГц излучение и рассеивающий мощное инфракрасное.

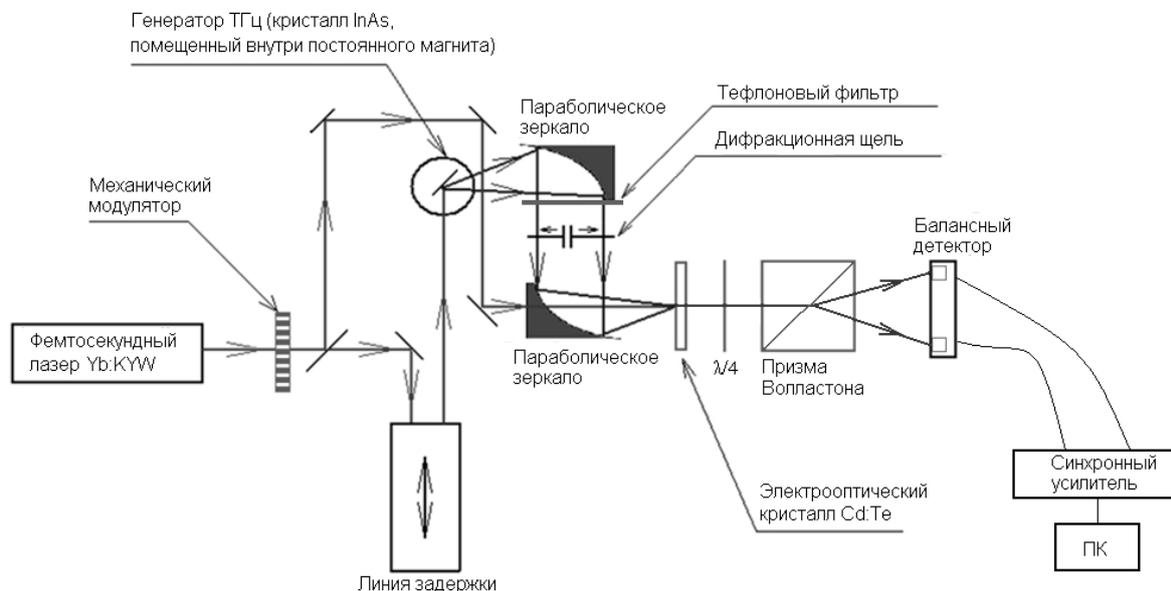


Рис. 2. Схема экспериментального исследования дифракции на щели ТГц импульса

Между двумя параболическими зеркалами помещается дифракционная щель из двух тонких алюминиевых пластин. Расстояние между металлическими пластинами выбиралось сопоставимым с длиной волны ТГц импульса для выполнения условия дифракции. Габаритные размеры сконструированной щели были равны апертуре сфокусированного пучка ТГц излучения, распространяющегося после первого параболического зеркала. Дифракционная щель закреплялась на микрометрической подвижке, таким образом, обеспечивалась точность при перемещении щели поперек пучка, что было эквивалентно перемещению системы регистрации по пространственной картине дифракции.

Оптический импульс пробного пучка по мере распространения по электрооптическому кристаллу Cd:Te подвергается воздействию постоянного электрического поля ТГц импульса. При коллинеарном распространении в кристалле линейная поляризация пробного пучка изменяется до эллиптической. С помощью четвертьволновой пластинки линейная поляризация переводится в круговую, затем с помощью призмы Волластона пучки с разными состояниями поляризации разделяются и попадают на балансный детектор. Разность интенсивностей на диодах балансной схемы пропорциональна полю ТГц излучения. Затем сигнал с балансного детектора поступает на синхронный усилитель и далее на компьютер.

С помощью линии оптической задержки производится изменение времени пересечения ТГц излучения и пробного пучка в кристалле, и, таким образом, измеряя при различных задержках картину двулучепреломления, регистрируется зависимость амплитуды электрического поля ТГц импульса от времени.

Результаты эксперимента и сравнение с расчетными результатами

Для щели размером 5 мм (приблизительно 10 длин волн центральной длины волны ТГц излучения) были измерены зависимости поля $E(t)$ для ТГц импульса в поперечных точках пространственной картины – 0 мм, 5 мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм, 30 мм, что соответствовало углам дифракции 0 рад, 0,016 рад, 0,033 рад, 0,049 рад, 0,065 рад, 0,098 рад, 0,13 рад. Полученные экспериментальные зависимости $E(t)$ имели дополнительный уровень шума вследствие того, что щель пространственно обрезала часть падающего излучения: для координаты 0 мм соотношение сигнал/шум составляло 30:1, для координаты 30 мм это значение достигало 10:1. Методами численной обработки шум частично устранялся, при вычислениях использовался фильтр, пропускающий низкие частоты и обрезывающий высокие частоты, соответствующие шуму. По полученной временной форме $E(t)$ были рассчитаны спектры дифракции ТГц импульса. Спектральная и временная формы дифрагированного импульса в центре нулевого максимума дифракции, полученные экспериментально, приведены на рис. 3. Временная зависимость исходного им-

пульса представляет собой одно полнопериодное колебание, за которым следуют хаотические выбросы различной полярности, связанные с дисперсией воздуха и поглощением в водных парах. Из графика следует, что амплитуда отрицательного выброса на переднем фронте импульса превышает амплитуду отрицательного выброса на заднем фронте, а спектр излучения сосредоточен в области 0,1–1,2 ТГц.

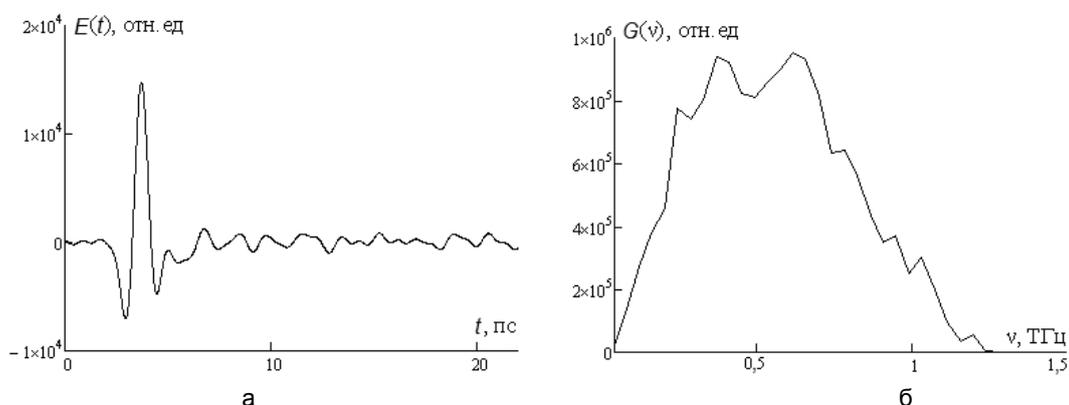
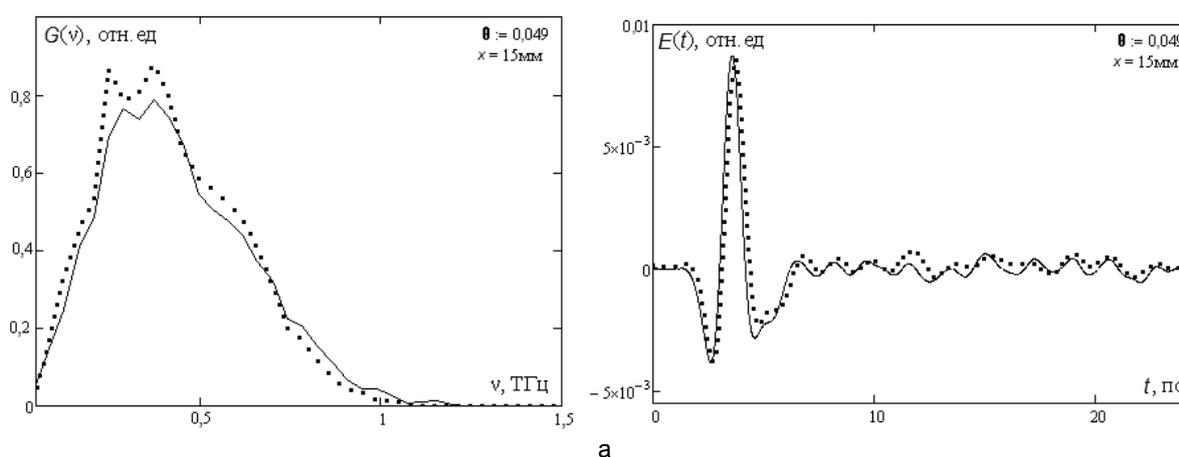


Рис. 3. Поле (а) и спектр (б) терагерцовой волны в центре нулевого максимума дифракции

Представленное на рис. 3 поле $E(t)$ является входным для численного расчета, описанного в разделе «Математическая модель». Далее приведены зависимости для дифрагированного на щели ТГц импульса в разных характерных поперечных точках пространственной картины дифракции (рис. 4). Сплошной линией представлены экспериментальные результаты, пунктирной – расчетные.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что с ростом угла дифракции наблюдается сужение спектра импульса и изменение его фазовых характеристик. С увеличением угла дифракции форма исходного импульса (полнопериодного колебания) претерпевает изменения, амплитуда отрицательного выброса на заднем фронте постепенно увеличивается и в крайних точках уже превышает отрицательную амплитуду на переднем фронте, что свидетельствует об изменении фазы колебания. Ширина спектра по половинному уровню монотонно уменьшается и при угле дифракции 0,13 рад составляет ~ 0,25 ТГц. С ростом угла дифракции центральная частота импульса также смещается в низкочастотную область (с 0,75 ТГц до 0,25 ТГц), у спектра дифракции появляется вторичный максимум. Таким образом, дифракционная щель ведет себя как пространственно-временной фильтр.

При сравнении экспериментальных результатов с расчетными наблюдается хорошее согласование. Однако в точке 25 мм видно, что передний фронт расчетного импульса начинает опережать передний фронт экспериментального импульса, что еще сильнее проявляется в точке 30 мм. Это говорит о возможном искривлении исходного плоского волнового фронта ТГц импульса при приближении к краю пространственной дифракционной картины.



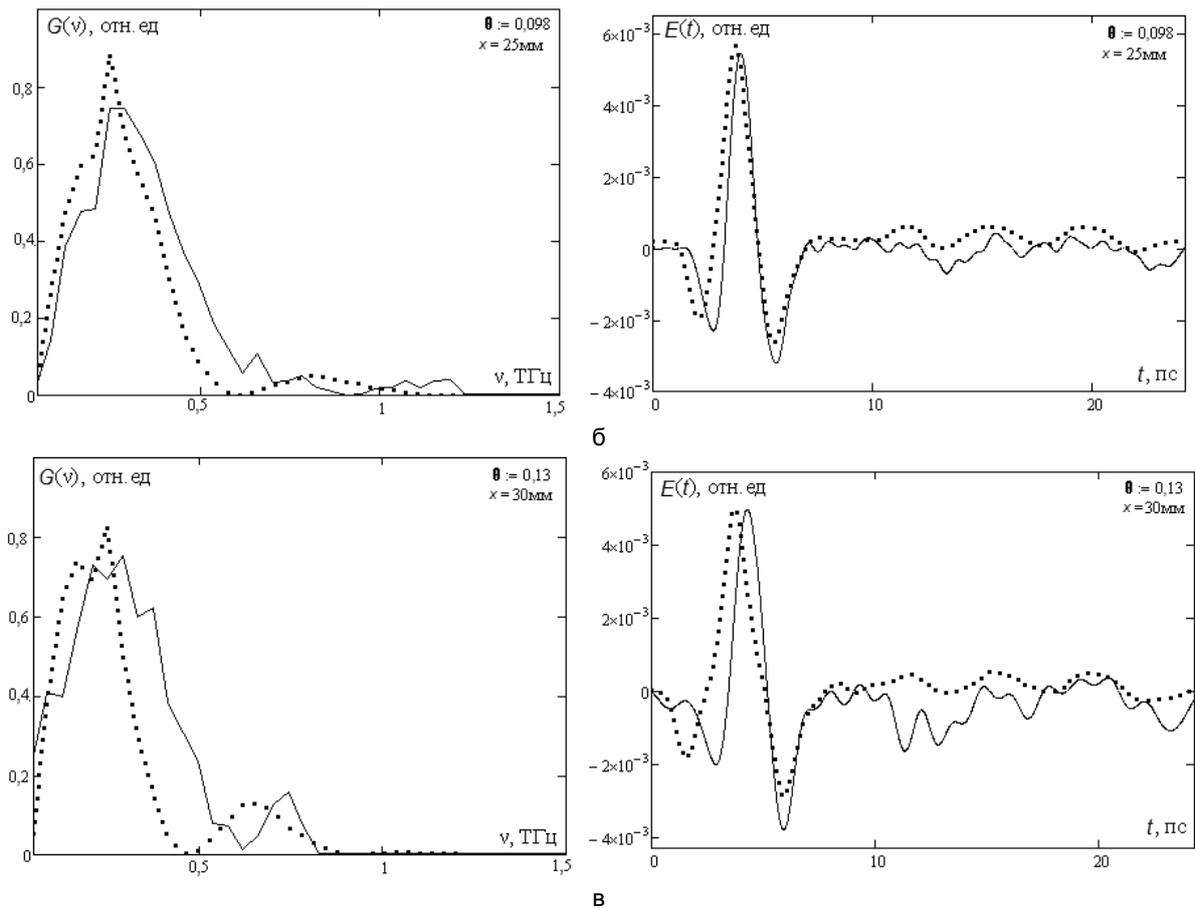


Рис. 4. Спектры (слева) и поля (справа) дифрагированных волн для пространственных точек : а) 15 мм; б) 25 мм; в) 30 мм. Сплошная линия соответствует экспериментальным результатам, пунктирная – расчетным результатам. Θ – угол дифракции в радианах; x – положение щели в поперечных координатах

Заключение

Проведен численный расчет дифракции ТГц волны на щели. Предложена схема и собрана экспериментальная установка для проведения исследования дифракции на щели однопериодного ТГц импульса. Проведен эксперимент, зарегистрированы временные формы дифракции предельно короткого ТГц электромагнитного импульса для различных углов дифракции на щели. По экспериментальным зависимостям поля от времени получены спектры дифракции. Выявлено, что с ростом угла дифракции происходит изменение временной формы ТГц импульса, при этом центральная частота смещается в более низкочастотную область, в спектре дифракции появляется вторичный максимум, что также подтверждается численными расчетами. По результатам сравнения расчета с экспериментом сделано предположение о возможном искривлении исходного плоского волнового фронта импульса при приближении к краю пространственной дифракционной картины.

Стоит также отметить, что ранее в работе [10] теоретически изучалась дифракция Фраунгофера ТГц волны в параксиальном приближении (дифракция на оптической оси), где показано изменение временной структуры импульса и смещение спектра в высокочастотную область. В настоящей работе рассматривался другой случай – непараксиальная дифракция, т.е. дифракция под большими углами к оптической оси. Этим обусловлено отличие результатов в части смещения спектра дифракции: смещение в высокочастотную область спектра при параксиальном случае и смещение в низкочастотную область с появлением вторичного максимума при непараксиальном случае. На следующем этапе исследований планируется проведение эксперимента с целью верификации искривления исходного плоского волнового фронта сверхкороткого ТГц импульса при дифракции.

Работа выполнена в рамках работы по госконтракту № 16.513.11.3070 от 19 апреля 2011 года.

Литература

1. Glagolewa-Arkadiewa A. Short electromagnetic waves of wave-length up to 82 microns // Nature. – 1924. – V. 113. – № 2844. – P. 640.
2. Геккер И.В., Юрьев В.И. Субмиллиметровые волны. – М.-Л. – Госэнергиздат, 1961. – 60 с.

3. Zhang X.C., Xu J. Introduction to THz wave photonics. – NY: Springer, 2009. – 246 p.
4. Lee Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. – Springer Science+Business Media, LLC, XII. 2009. – 340 p.
5. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93. – № 1. – С. 158–162.
6. Беспалов В.Г. Сверхширокополосное импульсное излучение в терагерцовой области спектра: получение и применение // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73. – № 11. – С. 28–37.
7. Беспалов В.Г., Ефимов Ю.Н., Милогладов Э.В. Генерация субпикосекундного терагерцового излучения в скрещенных электрическом и магнитном полях // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – № 15. – С. 41–44.
8. Розанов Н.Н. О дифракции предельно коротких импульсов // Оптика и спектроскопия. – 2003. – Т. 95. – № 2. – С. 327–330.
9. Sereda L., Ferrari A., Bertolotti M. Spectral and time evolution in diffraction from a slit of polychromatic and nonstationary plane waves // J. Opt. Soc. Am. – 1996. – V. 13. – P. 1394–1402.
10. Езерская А.А., Иванов Д.В., Беспалов В.Г., Козлов С.А. Дифракция однопериодных терагерцовых волн с гауссовым поперечным распределением // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 10–16.
11. Jingzhou U., WANG Li & YANG Guozhen. Effects of spectral linewidth of ultrashort pulses on the spatio-temporal distribution of diffraction fields // Chinese Science Bulletin. – June 2001. – V. 46. – № 11. – P. 901–904.
12. Iaconis C. and I.A. Walmsley. Spectral phase Interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses // Optics Letters. – 1998. – V. 23. – P. 792–794.
13. Петров Н., Беспалов В., Волков М. Восстановление волнового фронта при безопорной цифровой ПЗС-регистрации мультиспектральных спекл картин // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – Т. 2. – № 1. – С. 82–90.
14. Hu B.B., Zhang X.-C. and D.H. Auston. Terahertz Radiation Induced by Subbandgap Femtosecond Optical Excitation of GaAs // Phys. Rev. Lett. – 1991. – V. 67. – P. 2709.

Куля Максим Сергеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, maxk2350@yandex.ru

Грачев Ярослав Владимирович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gachev_y@mail.ru

Городецкий Андрей Александрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, andrei.gorodetsky@gmail.com

Беспалов Виктор Георгиевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, victorbespaloff@gmail.com