Письма в ЖЭТФ, том 86, вып. 7, с. 517 – 519 © 2007 г. 10 октября

Новый метод управления фазой предельно-короткого электромагнитного импульса в условиях нарушенного полного внутреннего отражения

А. И. Корытин, С. А. Лаврентьев[1)], *С. В. Мишакин*

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 9 августа 2007 г.

Предложен новый метод оперативного управления фазой предельно-короткого импульса в диапазоне от 0 до π с незначительными фазовыми искажениями. Представлены результаты эксперимента по управлению в пределах $0.7\,\pi$ фазой терагерцового импульса с относительной шириной спектра, превышающей октаву.

PACS: 42.72.Ai, 42.90.+m

Развитие современной лазерной техники позволило генерировать предельно короткие электромагнитные импульсы с длительностью, сравнимой с периодом осцилляций оптического поля. Такие импульсы могут содержать всего одну или две осцилляции электромагнитного поля. При этом ширина спектра сравнима с его центральной частотой и занимает целые спектральные диапазоны. Временная структура поля в импульсе при этом сильно зависит от сдвига фазы его высокочастотного заполнения относительно огибающей.

В экспериментах по взаимодействию предельно-коротких электромагнитных импульсов высокой интенсивности с веществом становится существенным различие фаз высокочастотного заполнения импульсов [1 – 3]. Для обеспечения максимальной эффективности экспериментов и стабильности результатов необходимо обеспечить не только стабилизацию указанной фазы, но также и возможность ее изменения, что является весьма актуальной задачей.

В настоящее время известны разные способы контроля фазы высокочастотного заполнения сверхкороткого электромагнитного импульса. В частности, для этой цели традиционно используются оптические линии задержки или электрооптические модуляторы, которые в случае предельно-коротких импульсов недостаточно эффективны, поскольку приводят к сопоставимым групповым задержкам.

Для предельно-коротких импульсов эффективнее использовать другие способы. Одним из способов повышения контраста сигнала в широкополосной терагерцовой интерферометрии является использование эффекта Гойа для сдвига фазы излучения на фиксированную величину в пределах π [4]. Другой подход был развит в работе [5], где с помощью управления фазовой самомодуляцией в фемтосекундном задающем генераторе удалось создать оптический стандарт частоты. Однако в данном методе малость нелинейного фазового набега допускает изменение фазы лишь в узком диапазоне значений.

В настоящей работе предложен новый метод, позволяющий производить управление фазой предельно-короткого электромагнитного импульса в широком диапазоне значений. Управление фазой осуществляется с помощью широкополосного интерферометра, состоящего из диэлектрической прямоугольной призмы и металлического зеркала, разделенных воздушным зазором.

Электромагнитный импульс проходит через призму при условии полного внутреннего отражения. Спадающее за границей диэлектрика электромагнитное поле импульса, отражаясь от металлического зеркала, возвращается в призму в виде электромагнитного импульса с некоторой временной задержкой относительно импульса, отраженного от границы диэлектрической призмы. В результате сложения этих двух импульсов изменяется форма импульса после прохождения данного интерферометра, что в спектральных терминах соответствует изменению фазы. При этом фаза электромагнитного импульса, вышедшего из интерферометра, является функцией величины зазора d вследствие некоторой временной задержки отраженного от металлического зеркала поля. Таким образом, меняя зазор между призмой и металлическим зеркалом d в пределах нескольких длин волн можно управлять фазой отраженного электромагнитного импульса в достаточно широком диапазоне. Теоретическое описание процесса отражения излучения

[1)]e-mail: lavr@ufp.appl.sci-nnov.ru

в предложенной системе может быть представлено в рамках теории диэлектрических пленок [6].

В нашей работе продемонстрировано управление фазой предельно короткого терагерцового импульса на экспериментальной установке, изображенной на рис.1. Для генерации и регистрации терагерцового

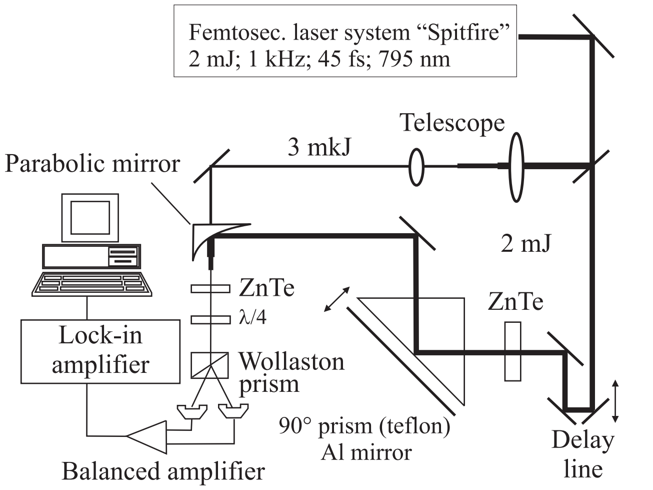

Рис.1. Схема экспериментальной установки для измерения и управления фазой предельно-короткого терагерцового импульса

излучения [7] использовалась фемтосекундная лазерная система “Spitfire” (Spectra Physics) обладающая следующими параметрами: энергия импульсов – 2 мДж, длительность – 45 фс, центральная длина волны – 795 нм, частота следования импульсов – 1 кГц, диаметр лазерного пучка – 7 мм. Лазерное излучение разделялось на два канала с помощью светоделителя СД, обеспечивающего коэффициент деления 1/600. Прошедшие через светоделитель излучение использовалось для генерации, а отраженное – для регистрации терагерцовых импульсов. В канале лазерного излучения накачки помещалась оптическая линия задержки, состоящая из зеркального уголкового отражателя, установленного на линейный моторизованный позиционер. Точность позиционирования составляла 0.125 мкм при длине сканирования 10 см. Фемтосекундные лазерные импульсы подавались на генератор Г – пластину ZnTe, где происходило преобразование частоты. Остатки лазерного излучения отсекались призмой из фторопласта, который обладает высоким пропусканием для низкочастотного излучения. Прошедшее через призму терагерцовые импульсы с помощью параболического зеркала ПЗ фокусировались на поверхность электрооптического кристалла П – пластину ZnTe.

Пробное лазерное излучение подавалось на поверхность кристалла приемника П через отверстие в параболическом зеркале под углом 5° к оси распространения низкочастотного излучения. Изменения поляризации пробного лазерного излучения за счёт эффекта Поккельса под действием электрического поля низкочастотной волны анализировались фазовой пластинкой $\lambda/4$, призмой Волластона ПВ и парой кремниевых фотодиодов, включенных по балансной схеме. Разностный фототок регистрировался синхронным усилителем SR510 (Stanford Research Systems). Общее управление экспериментальной установкой, сбором данных и их первичной обработкой осуществлялось через компьютер.

Временная зависимость напряженности электрического поля терагерцового импульса определялась по изменению состояния поляризации пробных лазерных импульсов при сканировании их временной задержки относительно импульсов накачки.

На рис.2 изображены распределение поля и модуль I Фурье-спектра терагерцового импульса.

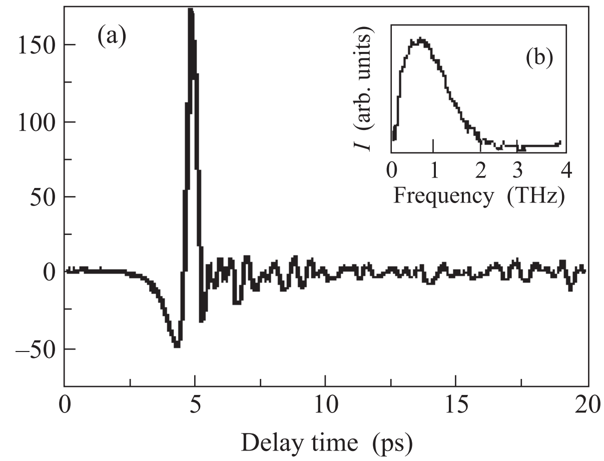

Рис.2. Типичное распределение напряженности поля импульса низкочастотного электромагнитного излучения (a) и модуль его фурье-спектра (b)

Предельно-короткий терагерцовый импульс состоит практически из одной осцилляции электромагнитного поля с масштабом порядка 1 пс. При этом ширина спектра импульса сравнима с его центральной частотой, составляющей 1 ТГц.

В эксперименте измерялись временные зависимости напряженности электрического поля терагерцового импульса от толщины воздушного зазора d между фторопластовой призмой и металлическим зеркалом. Угол падения лазерного пучка на основание призмы в эксперименте составлял 48°. Результаты эксперимента представлены на рис.3.

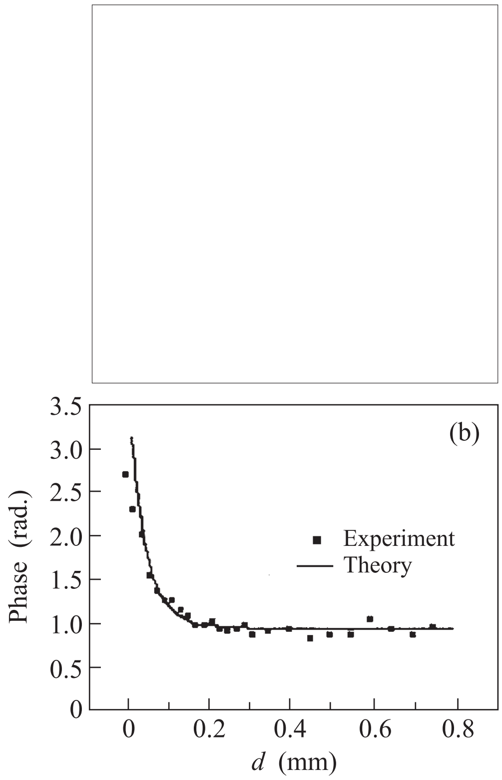

Рис.3. Зависимости временного распределения электрического поля (a) и фазы (b) терагерцового импульса от толщины воздушного зазора в интерферометре

На рис.3а показана зависимость временной структуры электрического поля от изменения толщины воздушного зазора между фторопластовой призмой и металлическим зеркалом. Напряженность электрического поля терагерцового импульса показана палитрой серого цвета. Из рисунка видно, что при нулевом зазоре электромагнитный импульс имеет практически симметричную форму. По мере увеличения зазора временное распределение электрического поля принимает антисимметричную форму, а затем снова возвращается к симметричной, но с противоположным знаком напряженности электрического поля. При достаточном удалении металлического зеркала от основания фторопластовой призмы предельно короткий терагерцовый импульс проходит через призму при условии полного внутреннего отражения. Уменьшение зазора приводит к нарушению условий полного внутреннего отражения и соответствующему изменению временного распределения электрического поля импульса. Следует отметить, что при этом амплитуда фурье-спектра импульса не меняется, однако происходит изменение его фазы. На рис.3b показана зависимость фазы фурье-спектра терагерцового импульса на частоте 1 ТГц от толщины воздушного зазора в интерферометре. Точками отмечены данные, полученные в ходе эксперимента. Сплошной линией показана теоретически рассчитанная зависимость фазы импульса от ширины зазора. Как видно из рисунка, приведенные экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Таким образом, можно сделать вывод о том, что происходит управление фазой терагерцового импульса в пределах $0.7\,\pi$ при изменении толщины воздушного зазора.

В заключение можно отметить, что в данной работе показана возможность управления фазовым сдвигом заполнения предельно-короткого электромагнитного импульса в интерферометре с переменной базой в условиях полного внутреннего отражения. В эксперименте продемонстрировано управление фазой в пределах $0.7\,\pi$ радиан для терагерцового импульса с относительной шириной спектра, превышающей октаву.

1. G. G. Paulus, F. Grasbon, H. Walther et al., Nature (London) **414**, 182 (2001).
2. K. T. Kim, C. M. Kim, M. G. Baik et al., Phys. Rev. A **69**, 051805(R) (2004).
3. A. Baltuska, Th. Udem, M. Uiberacker et al., Nature (London) **421**, 611 (2003).
4. A. B. Ruffin, J. V. Rudd, J. F. Whitaker et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 3410 (1999).
5. D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka et al., Science **288**, 635 (2000).
6. М. Борн, Э. Вольф, *Основы оптики*.: М.: Наука, 1973 (M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press 1968).
7. Р. А. Ахмеджанов, А. И. Корытин, А. Г. Литвак и др., Изв. ВУЗов, Радиофизика **XLVIII**, 939 (2005).