

## Увеличение контраста и разрешения в конфокальной терагерцовой видео-системе

Н. Н. Зиновьев<sup>1)\*</sup>, А. В. Андрианов<sup>1)\*</sup>, А. Дж. Галлант<sup>2)\*</sup>, Дж. М. Чамберлайн<sup>2)\*</sup>, В. Н. Трухин<sup>+</sup>

<sup>+</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup>Department of Physics of Durham University, Durham DH1 3LE, UK

Поступила в редакцию 26 августа 2008 г.

Экспериментально продемонстрирован эффект усиления контраста изображения в терагерцовой видео-системе дальнего поля без потери спектрального состава анализируемого излучения. Представленный результат достигнут благодаря использованию конфокальной диафрагмы, помещаемой в область промежуточного фокуса оптической системы. Полученный результат является принципиальным продвижением к достижению субволнового контраста и разрешающей способности когерентных видео- систем микроскопии в терагерцовой области спектра.

PACS: 42.30.Va, 42.68.Sq, 42.79.Ag

Использование электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона открывает принципиально новые возможности в исследованиях свойств различных материалов в молекулярной и клеточной биофизике, биофотонике, молекулярной электронике, в диагностиках наноскопии и многих других важных приложениях. Основной причиной, обуславливающей растущий интерес к ТГц системам, является тот факт, что именно в ТГц диапазон попадают многие характерные спектральные особенности самых разных объектов, начиная от ридберговских состояний отдельных атомов до молекулярных колебаний макромолекул и их комплексов (ДНК, РНК, протеиновых комплексов). Эта фундаментальная особенность ТГц спектра открывает новые пути построения аналитических видео-систем, базирующихся на принципах построения контраста, основанного на различиях в структуре, композиции, типах, ориентационных свойствах химических связей и других собственных характерных особенностях нано-компонент различных объектов. Реализация отмеченных выше возможностей позволяет выйти на значительно более информативный уровень характеристики объекта по выбранным его собственным спектральным характеристикам, отличающийся от достигаемых информационных характеристик в методиках электронной и рентгеновской микроскопии, сканирующей пробной микроскопии, масс-микроспектрометрии и их аналогов. Эти информационные достоинства ТГц систем, открывающие новые горизонты в фундаментальных

исследованиях и их практическом освоении, обуславливают выдвигание области ТГц оптики и фотоники в ряд критических технологий современности.

Достигнутый прогресс в когерентных нелинейно-оптических технологиях ультракоротких лазерных импульсов позволяет построить замкнутую на одном принципе ТГц видео-систему [3], состоящую из когерентно-связанных между собой нелинейно-оптического излучателя и гетеродинного детектора. К настоящему времени разработаны принципиальные основы технологий, позволяющие получать изображение объекта интегрированное по частотам ТГц диапазона как посредством растрового сканирования, так и изображение объекта в реальном масштабе времени. С использованием методов оптики ближнего поля и растрового сканирования зонда показана принципиальная возможность получения ТГц изображения с разрешением, превосходящим дифракционный предел [2–4]. Однако использование методов растрового сканирования приводит к существенному снижению как быстродействия формирования изображения, так и появлению различного рода арте-фактов.

Принцип конфокальной микроскопии, предложенный Мински [5] и успешно применяемый в микроскопии видимого диапазона, по нашему мнению, может существенно повысить разрешающую способность систем ТГц когерентной микроскопии. Суть принципа конфокальной микроскопии состоит в помещении диафрагм малого диаметра (размером  $\sim 1$ – $5$  диаметров диска Эйри) в фокальной плоскости объектива микроскопа. Такая конфокальная диафрагма блокирует излучение, исходящее из областей исследуемого объекта, не совпадающих с его сечени-

<sup>1)</sup>e-mail: nick.zinovev@mail.ioffe.ru

<sup>2)</sup>A.J. Gallant, J.M. Chamberlain.

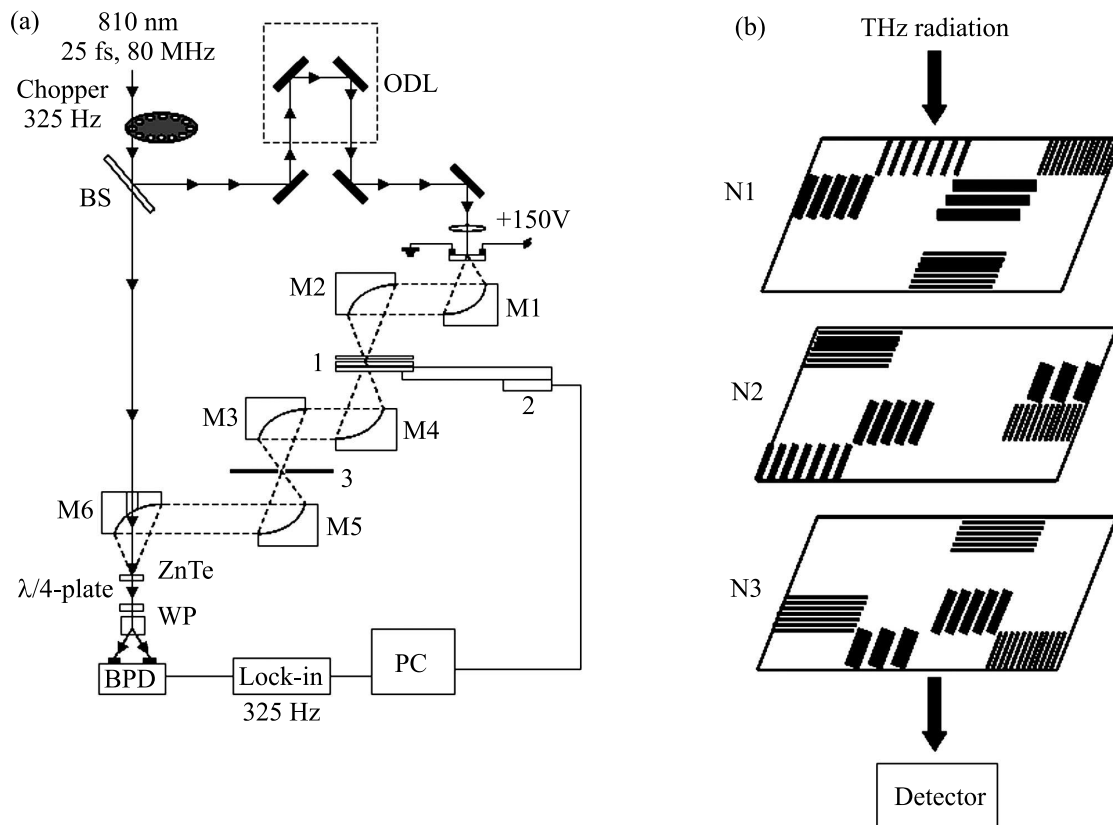


Рис.1. (а) Схема экспериментальной установки: 1 – трехмерный фантом (тестовый образец); 2 – двухкоординатный манипулятор для линейных перемещений, управляемый от компьютера (PC); 3 – ирисовая конфокальная диафрагма  $D$ .  $M1$ - $M6$  – параболические зеркала диаметром  $D = 50.8$  мм, имеющие внеосевые расстояния  $F$ , равные 50.8, 101.6, 101.6, 50.8, 50.8 и 76.2 мм, соответственно;  $ODL$  – оптическая задержка;  $BS$  – светоделительная пластина;  $BPD$  – фотодиодный балансный детектор. Ход лучей ТГц излучения схематически показан пунктирными линиями. Сплошные линии соответствуют ходу лучей титан-сапфирового лазера. (б) Структура тестового образца, представляющего собой Si-пластины размером  $24 \times 24 \times 0.6$  мм, с нанесенными на них металлическими полосками, имеющими характерные размеры 4-х типов: 250, 350, 500 и 750 мкм. Расстояние между пластинами было выбрано равным 3 мм.

ем сопряженной конфокальной плоскостью объектива. Это усиливает контраст изображения а также повышает пространственное разрешение как в фокальной плоскости, так и по глубине. До сих пор этот прием не применялся в ТГц видео-системах. В настоящей работе мы сообщаем об экспериментальной демонстрации возможностей конфокального метода в ТГц области частот.

Для экспериментальной демонстрации принципа конфокальной микроскопии мы использовали корреляционную схему оптической когерентной регистрации ультракоротких импульсов во временном окне по типу “накачка-зонд”, сконфигурированную для геометрии ТГц абсорбционной спектроскопии – рис.1а. Импульсы ИК излучения фемтосекундного титан/сапфирового лазера длительностью 25 фс, центральной длиной волны 810 нм, частотой повторения 80 МГц и средней мощностью излучения  $\sim 50$  мВт

возбуждали ТГц эмиттер. ТГц эмиттер выполнен в виде фотопроводящей антенны на основе полупроводящего GaAs толщиной 0.5 мм и расстоянием между контактами 400 мкм, на которую подавалось напряжение 150 В. Система 90-градусных внеосевых параболических зеркал  $M1$  –  $M6$  образовывала ТГц оптическую ячейку фокусировки пучка ТГц излучения на исследуемый образец и регистрации вторичного излучения (рассеянного и прошедшего) от образца (см. рис.1а). Каждой паре 90-градусных параболоидов в ТГц оптической ячейке могут быть сопоставлены эквивалентные эффективные линзы –  $O1$ ,  $O2$  и  $O3$ . Объектив  $O1$  (соответствует зеркалам  $M1$  и  $M2$ ) фокусирует излучение на образец. Вторичное излучение собирается объективом  $O2$  (соответствует зеркалам  $M3$  и  $M4$ ) и фокусируется в сопряженной плоскости, где располагается конфокальная диафрагма  $D$ . С помощью дополнительного объекти-

ва **О3** (соответствует зеркалам *M5* и *M6*) осуществлялся перенос изображения диафрагмы *D* на электрооптический кристалл (**EO**) ZnTe, играющий роль ТГц детектора. В **EO** кристалле импульсы ТГц излучения рекомбинируют с ИК импульсами линейно-поляризованного излучения зондирующего пучка, в результате чего осуществляется оптическое гетеродинамирование – конверсия импульсов зондирующего излучения в ИК импульсы разностной и суммарной частоты ( $\omega_{ИК} \pm \Omega_{ТГц}$ ). При этом линейная поляризация зондирующего излучения превращается в эллиптическую, степень эллиптичности которого определяется мгновенной величиной ТГц поля в **EO** кристалле в момент времени, определяемый положением зондирующего импульса. Декодирование ТГц сигнала производилось посредством пропускания конвертированного излучения ( $\omega_{ИК} \pm \Omega_{ТГц}$ ) через  $1/4$ -волновую пластину и призму Волластона. Получаемые на выходе такой системы поляризационного детектора два ИК пучка детектируются двумя фотодиодами, отношение разностного и суммарного сигналов которых измеряет абсолютную амплитуду ТГц поля  $E_{ТГц}(t, z)$ , где  $t$  соответствует текущему времени оптической задержки,  $z$  соответствует положению конфокальной диафрагмы *D* или объектива **О2**. Изменением положения зондирующего импульса посредством управляемой оптической задержки осуществлялось стробирование волновой формы ТГц импульса. Сигнал  $E_{ТГц}(t, z)$  измерялся с помощью векторного синхронного усилителя EG&G 7225 на частоте модуляции 325 Гц. Исследуемый образец был размещен на двухкоординатном манипуляторе для линейных перемещений с разрешением 1 мкм, управляемом от компьютера и обеспечивающим сканирование пятна ТГц излучения по поверхности образца. Персональный компьютер также управлял линией оптической задержки, позволяющей контролировать взаимное временное положение зондирующего и основного импульсов титан-сапфирового лазера, и измерял выходной сигнал синхронного усилителя. Программная обработка ТГц сигнала формировала ТГц изображение.

Разработанный тестовый трехмерный образец позволял определить пространственное разрешение системы по плоскости образца, а также оценить селективность ТГц изображения по глубине образца. На рис.1b показан один из вариантов трехмерного тестового фантома, который представлял собой стопку из трех пластин Si, легированного бором, с удельным сопротивлением 20 Ом-см, размером  $24 \times 24$  мм<sup>2</sup> и толщиной 0.6 мм. На поверхности пластин путем напыления Cr толщиной 80 нм были

созданы тестовые шаблоны, состоящие из рядов металлических полосок и промежутков с характерными размерами полосок и зазорами 250, 350, 500 и 750 мкм, как показано на рис.1b. Размер таких шаблонов, имитирующих набор различных пространственных частот, составлял порядка  $\sim 6 \times 6$  мм, каждая пластина содержала по 5 таких интегрированных шаблонов. Конструкция держателя образца позволяла менять расстояние между пластинами Si с помощью спэйсеров с варьируемыми зазорами. Результаты, представленные в статье, были получены при зазорах между пластинами, равных 3 мм.

Волновые формы ТГц излучения, прошедшего оптическую систему в нормальной конфигурации и в конфокальной конфигурации, показаны на рис.2a. Рис.2b показывает также спектры ТГц излучения.

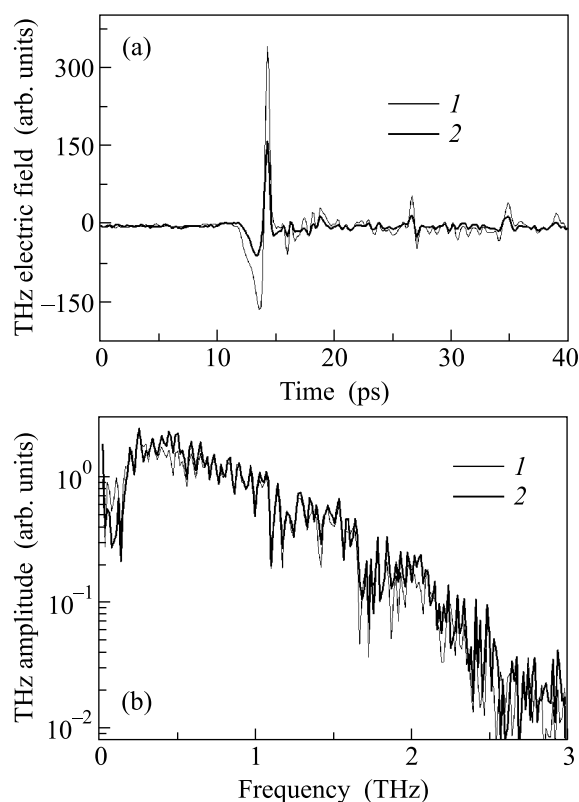


Рис.2. (a) Характерные волновые формы ТГц сигнала. (b) Спектры ТГц излучения. 1 – нормальная конфигурация оптической системы (конфокальная диафрагма полностью открыта); 2 – конфокальная конфигурация оптической системы (диаметр конфокальной диафрагмы минимален и составляет 1.2 мм)

Как видно из рисунка, максимум в спектрах ТГц излучения приходится на частоту порядка 0.3 ТГц, что соответствует длине волны излучения 1 мм в воздухе. Многочисленные узкие линии в спектре в области 0.5–3 ТГц связаны с поглощением ТГц излучения на

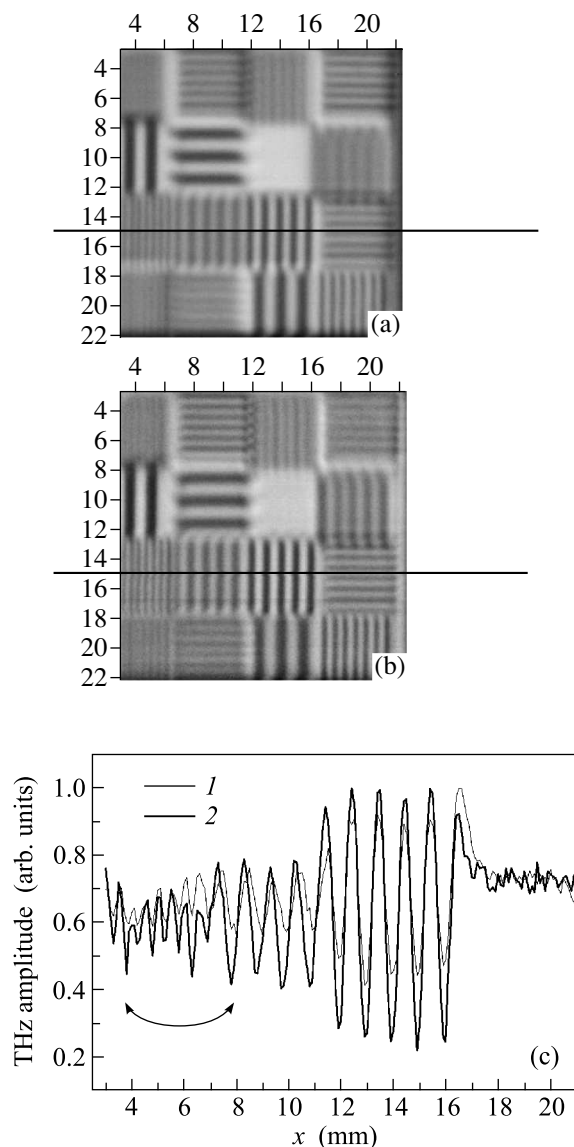


Рис.3. (а) ТГц изображение тестового образца в случае нормальной конфигурации оптической системы. (б) ТГц изображение тестового объекта в случае конфокальной конфигурации оптической системы. (с) Распределение амплитуды ТГц электрического поля по плоскости изображения вдоль линий, схематически показанных на рис.3а и б: 1 – нормальная конфигурация; 2 – конфокальная конфигурация. Стрелкой выделена область значений  $X$ , анализируемая в тексте. ТГц изображение, интегральное по спектру. ТГц сигнал соответствует максимуму положительного всплеска ТГц электрического поля (см. рис.2а). Пространственный шаг сканирования по поверхности образца 100 мкм

парах воды. Важно отметить, что введение конфокальной диафрагмы выбранного диаметра не меняет спектрального состава когерентного ТГц излучения. На рис.3а и б показаны ТГц изображения ис-

следуемого образца, соответствующие случаю, когда фокус объектива  $O2$  приходится на поверхность пластины N2 (см. рис.1б), измеренные в максимуме первой положительной полуволны волновой формы электрического поля ТГц излучения (см. рис.2а) с шагом пространственного сканирования 100 мкм по двум координатам в плоскости образца. Из сравнения ТГц изображения образца в нормальной и в конфокальной конфигурациях можно видеть, что введение конфокальной диафрагмы дает существенное улучшение контраста и разрешения деталей объекта. Отчетливо видно, что пространственные частоты шаблонов, не разрешаемых в нормальной конфигурации, оказываются совершенно разрешенными в конфокальной конфигурации ТГц видео-системы. На рис.3с показаны распределения амплитуды ТГц электрического поля по плоскости изображения (распределения в направлении  $X$ -координаты) вдоль сплошных линий, наложенных на изображения рис.3а и б. Эти распределения позволяют количественно характеризовать эффект возрастания пространственного контраста изображения в случае конфокальной конфигурации оптической системы. Анализ данных распределений показывает, что в случае конфокальной конфигурации оптической системы, в области значений  $X$  от 3 до 7 мм, соответствующих системе металлических полосок и промежутков с характерным размером 250 мкм на пластине N2 (см. рис.1б), отношение минимумов и максимумов амплитуды ТГц электрического поля в среднем составляет 0.76. То есть структура с характерным размером порядка 250 мкм оказывается вполне разрешенной согласно критерию Релея [6], устанавливающему максимальную величину, равную 0.811, для отношения минимума и максимума сигнала в его распределении в случае приемлемого разрешения. Важно добавить, что в случае нормальной конфигурации оптической системы (кривая 1 на рис.3с) данное отношение составляет в среднем 0.9, что позволяет считать структуру с характерным размером порядка 250 мкм практически не разрешенной в случае нормальной конфигурации оптики. Проводились также эксперименты и со смещением области фокуса на пластины № 1 или № 2 с целью определения возможности селекции ТГц изображения по глубине. Анализ этих экспериментальных данных, которые будут представлены в отдельной работе, показывает, что конфокальная конфигурация системы позволяет существенно повысить как контраст, так и разрешение в ТГц изображении по  $z$ , то есть по глубине объекта.

В заключение отметим, что использование конфокальной диафрагмы в конфигурации когерентно-

го сканирующего ТГц микроскопа дальнего поля существенно увеличивает контраст изображения и увеличивает разрешение не хуже, чем  $\lambda/4$ . При оптимальном выборе диаметра конфокальной диафрагмы полностью сохраняется спектральный состав ТГц излучения, используемого в видео-системе.

Работа выполнена при поддержке гранта НАТО # СВР.ЕАР.ЕV.982445 а также при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 08-02-00162) и Федерального агентства по науке и инновациям (Гос. контракт # 02.513.11.3389).

- 
1. W. L. Chan, J. Deibel, and D. M. Mittleman, Rep. Prog. Phys. **70**, 1325 (2007).
  2. S. Hunsche, M. Koch, I. Brener, and M. C. Nuss, Opt. Commun. **150**, 22 (1998).
  3. Roland Kersting, Hou-Tong Chen, N. Karpowicz, and G. C. Cho, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **7**, S184 (2005).
  4. H.-G. von Ribbeck, M. Brehm, D.W. van der Weide et al., Optics Express, **16**, 3430 (2008).
  5. M. Minsky, Scanning **10**, 128 (1988).
  6. М. Борн и Э. Вольф, *Основы оптики*, М.: Наука, 1973.