

## Взаимодействие терагерцового электромагнитного излучения с системой зонд-объект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе

В. Н. Трухин<sup>1)+</sup>□, А. В. Андрианов<sup>+</sup>, В. А. Быков\*, А. О. Голубок<sup>▽</sup>□, Н. Н. Зиновьев<sup>+</sup>, Л. Л. Самойлов<sup>+</sup>□,  
И. Д. Сапожников<sup>▽</sup>, А. В. Трухин<sup>△</sup>, М. Л. Фельштын<sup>▽</sup>

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

\* ЗАО “НТ МДТ”, 124482 Москва, Россия

<sup>▽</sup> Институт аналитического приборостроения РАН, 190103 Санкт-Петербург, Россия

□ Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 197101  
Санкт-Петербург, Россия

△ Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 28 декабря 2010 г.

Приведены результаты экспериментального исследования механизма взаимодействия когерентного терагерцового излучения с системой зонд-нанообъект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе. Установлено, что тип материала образца, находящегося под зондом, а также геометрия зонда определяют вид зависимости дифференциального сигнала терагерцового поля от расстояния между зондом и образцом. Амплитуда модуляции высоты зонда существенно влияет на спектральный состав дифференциального терагерцового сигнала, который непосредственно связан с амплитудой и фазой терагерцовой волны, рассеянной системой зонд-нанообъект.

Одной из важнейших задач создания новых методов неразрушающей диагностики наноструктур является разработка оптических методов, сочетающих высокое пространственное, временное и спектральное разрешения и позволяющих изучать электронные процессы в единичных наноструктурах, кластерах и молекулах. Одним из таких перспективных направлений является терагерцовая (ТГц) микроскопия ближнего поля. Имеющиеся в настоящее время результаты, полученные в этой области [1–3], пока не позволяют построить адекватную картину целого ряда физических процессов, которые имеют место вблизи вершины зонда сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) под действием внешнего электромагнитного поля. К таким процессам относятся эффекты усиления внешнего ТГц электромагнитного поля вблизи острия и пространственной локализации ТГц поля в субволновой области вблизи вершины зонда в условиях, когда радиус вершины зонда существенно меньше длины волны.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований механизма взаимодействия ближнепольной компоненты ТГц электромагнитного поля с нанообъектом вблизи зонда АСМ. Исследовалась зависимость пространственной

локализации ТГц поля в субволновой области вблизи вершины зонда от расстояния между зондом и исследуемыми объектами различного типа, а также спектральные свойства дифференциального сигнала ТГц ближнепольного микроскопа, связанного с ближнепольным взаимодействием.

Исследования проводились с использованием специально созданного ТГц когерентного безапертурного микроскопа ближнего поля, который представляет собой сочетание когерентного ТГц спектрометра с временным разрешением [4] и интегрированного в него АСМ, работающего в полуконтактном режиме. В качестве генератора ТГц излучения применялась фотопроводящая антенна на основе низкотемпературного GaAs, возбуждаемая световыми импульсами фемтосекундного титан-сапфирового лазера (длина волны излучения 800 нм, длительность импульсов 90 фс, частота повторения импульсов 80 МГц). Регистрация ТГц излучения осуществлялась с помощью кристалла ZnTe методом электрооптического стробирования. Данный метод позволяет измерять текущее состояние электромагнитного поля ТГц импульса во времени, определяя не только его амплитуду, но и фазу. Модуль АСМ был создан на основе модернизированной платформы сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) “NanoEducator”. В основе работы СЗМ “NanoEducator” лежит использование зави-

<sup>1)</sup> e-mail: valera.truchin@mail.ru

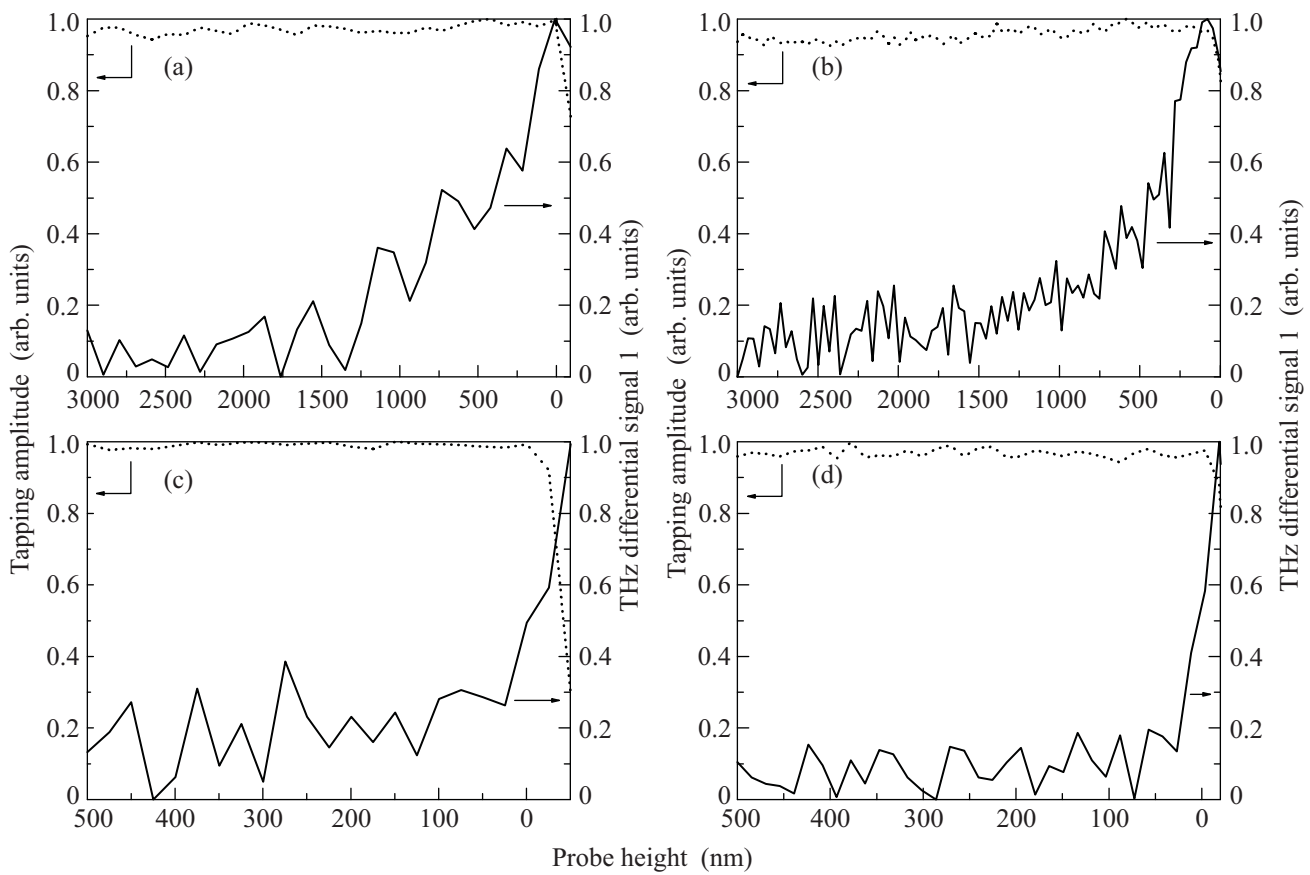


Рис.1. Зависимости амплитуды колебаний зонда АСМ (точки) и величины ТГц дифференциального сигнала (сплошная линия) от расстояния между зондом и исследуемым образцом. Дифференциальный ТГц сигнал регистрировался на 1-й гармонике частоты вертикальных колебаний зонда. Кривые подвода приведены для зонда с радиусом закругления 600 нм, находящегося над полупроводником (а) и металлом (б), и для зонда с радиусом закругления 75 нм, находящегося над полупроводником (с) и металлом (д)

симости величины силового взаимодействия между зондом в виде острой вольфрамовой иглы и поверхностью исследуемого образца от величины расстояния между зондом и образцом. В процессе сканирования величина локального взаимодействия поддерживается постоянной с помощью системы автоматического слежения, которая, регистрируя сигнал взаимодействия (измеряется амплитуда колебаний зонда), поддерживает его среднее значение на постоянном уровне. Система обратной связи регистрирует изменения амплитуды колебаний зонда на собственной резонансной частоте и подстраивает его положение по вертикали таким образом, чтобы величина взаимодействия оставалась постоянной в ходе сканирования.

ТГц излучение, генерируемое в фотопроводящей полупроводниковой антенне, с помощью пары параболических зеркал собиралось и фокусировалось на острие зонда. Использовалось р-поляризованное ТГц излучение. Рассеянное и отраженное ТГц излуче-

ние посредством дополнительной пары параболических зеркал собиралось и направлялось на электрооптический детектор. Регистрация ТГц излучения осуществлялась в геометрии зеркального отражения вперед при угле падения  $\sim 60^\circ$ . При этом в детектор попадало как зеркально отраженное от поверхности образца излучение, так и излучение, рассеянное от системы зонд-объект. Для непосредственного выделения сигнала, обусловленного компонентами ближнего поля, взаимодействующими с зондом, применялась техника двойного синхронного детектирования. При этом последовательно выделялись как основной ТГц сигнал на частоте модуляции ТГц излучения (30 кГц), падающего на систему зонд-объект, так и сигнал на частоте вертикальных колебаний зонда (1 кГц). Такой сигнал в дальнейшем будем называть дифференциальным.

В качестве тестового образца использовалась полупроводниковая пластина (GaAs) с нанесенными на ней полосами металла (Au) шириной 100 мкм. Об-

разец предварительно был изучен как методом растровой электронной микроскопии, так и стандартными методами СЗМ. Зонд изготавливался путем электрохимического травления вольфрамовой проволоки диаметром 150 мкм. Длина зонда составляла несколько миллиметров. Вершина зонда имела конусообразную форму длиной 400–1000 мкм. Для оценки формы изготовленного острия определялся радиус окружности, вписываемой в его вершину (радиус закругления острия). Типичные значения для использованных зондов составляли 50–500 нм.

На рис.1 приведены зависимости амплитуды дифференциального сигнала ТГц поля от расстояния между зондом и образцом (кривые подвода), в которых в качестве точной привязки к положению зонда используется синхронно измеряемая кривая подвода АСМ. Кривые 1а,б измерены с использованием зонда с радиусом закругления 600 нм, а кривые 1с,д – зондом с радиусом закругления 75 нм. Кривые 1а,с получены в случае, когда подвод зонда осуществлялся к поверхности полупроводника, а кривые 1б,д – к поверхности металла. Из приведенных рисунков отчетливо видно, что крутизна роста усиления рассеянного ТГц излучения возрастает с уменьшением радиуса кривизны вершины зонда, а расстояние, на котором происходит этот рост, примерно соответствует величине радиуса закругления зонда. Кроме того, можно видеть (рис.1), что крутизна роста дифференциального сигнала в случае подвода к металлу выше, чем для подвода к полупроводнику. Отметим, что максимальные величины дифференциального сигнала, полученного для зондов с разными радиусами кривизны, имеют один порядок.

На рис.2 приведены волновые формы ТГц импульсов и соответствующие спектры (вставка), полученные в режиме поддержания постоянной амплитуды колебаний зонда. ТГц волновые формы были получены как для полного отраженного и рассеянного ТГц излучения (соответствующий сигнал регистрировался первым синхронным услителем на частоте модуляции падающего ТГц излучения), так и для ТГц излучения, рассеянного системой зонд-объект (этот дифференциальный сигнал регистрировался вторым синхронным услителем на частоте вертикальных колебаний зонда). Следует отметить, что сопоставление соответствующих амплитудных спектров ТГц излучения для зондов с радиусом закругления острия 75 и 600 нм имеет одну характерную особенность: спектр регистрируемой волны в дальней зоне (1 и 2 гармоника дифференциального сигнала) не имеет высокочастотной составляющей, присущей исходному спектру ТГц излучения. Данная особенность наблюдается вне

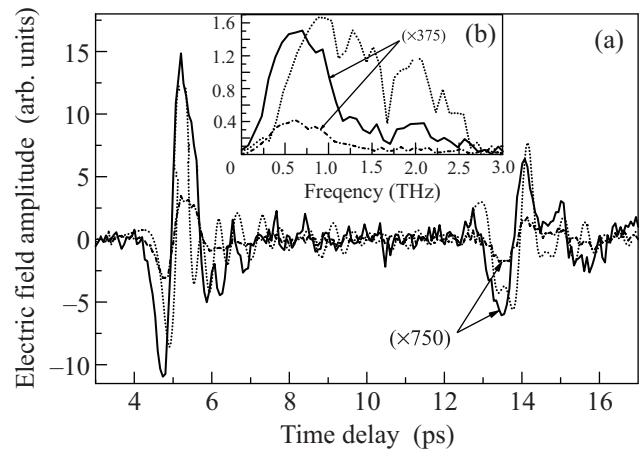


Рис.2. Волновые формы исходного ТГц импульса (точки), 1-й (сплошная линия) и 2-й (штрих-пунктирная линия) гармоник дифференциального ТГц сигнала (а), а также соответствующие им спектры (б). Радиус закругления зонда 600 нм. Зонд находится над Au

зависимости от положения зонда над Au, либо над GaAs. Также отметим, что на волновых формах, соответствующих как исходной ТГц электромагнитной волне, так и рассеянной зондом ТГц волне в дальней зоне, кроме основного импульса наблюдается дополнительный импульс, задержанный относительно основного на время, соответствующее прохождению ТГц излучения через слой полупроводника с длиной, равной удвоенной толщине подложки GaAs. Этот факт свидетельствует о том, что ТГц излучение рассеивается зондом как в верхнюю область пространства над поверхностью образца, так и в область пространства внутри образца.

Необходимо отметить, что кривые подвода для дифференциального ТГц сигнала имеют разные абсолютные значения максимумов при нахождении зонда над различными материалами. Эта особенность в усилении рассеяния была использована для получения ТГц изображения исследуемого образца во время сканирования в режиме АСМ (рис.3). На рис.3б приведена топография области перехода между Au и GaAs, а на рис.3а показана зависимость АСМ-сигнала по одной координате (выделенная линия на рис.3б). На рис.3д приведено пространственное распределение дифференциального ТГц сигнала, а на рис.3с представлено соответствующее распределение дифференциального сигнала по одной координате. Анализ кривых распределения (рис.3а и рис.3с) показывает идентичное пространственное разрешение в обеих измерительных методиках. Это свидетельствует о том, что ТГц пространственное разрешение определяется в основном радиусом кривизны зонда.

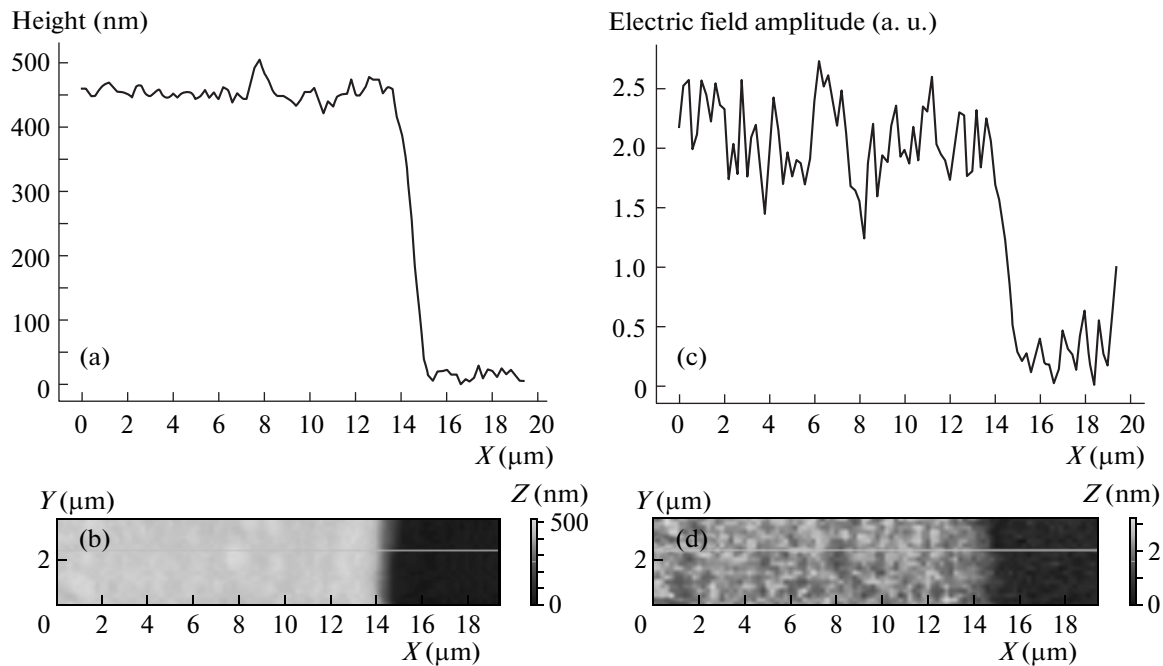


Рис.3. Изображение области перехода между металлом и полупроводником. АСМ изображение (а) и его сечение (б). ТГц изображение, полученное в максимуме волновой формы дифференциального сигнала на 1-й гармонике частоты вертикальных колебаний зонда (с) и соответствующее сечение (д). Радиус закругления зонда 75 нм

В настоящей работе были проведены исследования зависимости спектрального распределения дифференциального ТГц сигнала от амплитуды модуляции высоты зонда над поверхностью образца. Как уже отмечалось выше (см. рис.2), при малой амплитуде модуляции высоты зонда происходит подавление высокочастотной части спектра рассеянного системой зонд-объект ТГц излучения по сравнению с исходным излучением. Увеличение амплитуды модуляции высоты зонда приводит к существенному изменению спектра рассеянного ТГц излучения. Как видно из рис.4, при возрастании амплитуды модуляции спектр ТГц излучения уширяется, а его максимум смещается в область высоких частот. При этом возрастает вклад высокочастотных компонент спектра. Таким образом, рассеивающая система зонд-объект в зависимости от параметров модуляции зонда сложным образом формирует спектральное распределение ТГц излучения, которое регистрируется приемным блоком ТГц ближнепольного микроскопа.

Полученные экспериментальные результаты не удается объяснить только в рамках модели рассеяния ТГц излучения на металлической сфере [3], используемой в целом ряде работ, относящихся к оптической микроскопии ближнего поля (см., например, [5] и другие ссылки там), несмотря на то, что вид кривых подвода для зондов с разными радиусами закруг-

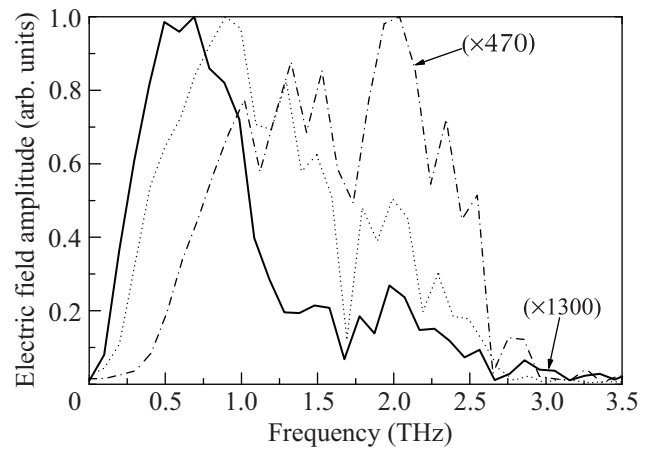


Рис.4. Амплитудные спектры ТГц излучения, измеряемые в ТГц ближнепольном микроскопе. Исходный спектр ТГц излучения – точки; спектр дифференциального ТГц сигнала при амплитуде модуляции высоты 20 нм – сплошная линия; спектр дифференциального ТГц сигнала при амплитуде модуляции высоты 50 нм – штрих-пунктирная линия

ления может быть качественно описан с помощью соответствующих аналитических выражений. Привлечение антенной модели [1] позволяет качественно объяснить некоторые особенности спектра рассеянного ТГц излучения, обусловленного ближнеполь-

ным взаимодействием, а именно, подавление высокочастотных компонент в спектре дифференциального сигнала. Однако наблюдаемое необычное поведение спектров дифференциального ТГц сигнала в ТГц ближнепольном микроскопе при изменении параметров модуляции зонда не находит объяснения в рамках указанных выше моделей. Это свидетельствует о необходимости продолжения разработки теоретической модели эффекта взаимодействия ближнепольной компоненты ТГц поля с нанообъектом вблизи зонда АСМ.

Таким образом установлено, что вид кривых подвода зависит как от типа материала объекта под зондом, так и от геометрии зонда. При уменьшении радиуса закругления зонда усиливается темп роста дифференциального сигнала. Эффект усиления рассеяния ТГц излучения наблюдается на расстояниях, соизмеримых с радиусом закругления зонда. Установлено, что изменение амплитуды модуляции расстояния между зондом и поверхностью образца приводит к существенному изменению спектрального

распределения дифференциального сигнала, который непосредственно связан с амплитудой и фазой терагерцового поля, рассеянного системой зонд-нанообъект.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки (Госконтракты # 14.740.11.0602, # 02.513.11.3389), а также при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований ОФН РАН "Современные проблемы радиофизики".

1. G. C. Cho, H.-T. Chen, S. Kraatz et al., *Semicond. Sci. Technol.* **20**, S286 (2005).
2. K. Wang, D. M. Mittleman, N. C. J. van der Valk et al., *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2715 (2004).
3. H.-G. von Ribbeck, M. Brehm, D. W. van der Weide et al., *Opt. Express* **16**, 3430 (2008).
4. B. Ferguson and X.-C. Zhang, *Nature Photonics* **1**, 26 (2002).
5. H.-T. Chen, R. Kersting, and G. C. Cho, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3009 (2003).