

На правах рукописи

САМОЙЛОВ
Леонид Леонидович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С СИСТЕМОЙ ЗОНД-ОБЪЕКТ В ТЕРАГЕРЦОВОМ БЕЗАПЕРТУРНОМ
БЛИЖНЕПОЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ**

Специальность: **01.04.05 – Оптика**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2013

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Терагерцовая ближнепольная микроскопия – это один из новых развивающихся методов неразрушающей диагностики наноструктур. Исследования в терагерцовом спектральном диапазоне представляют исключительный интерес благодаря большому количеству спектральных особенностей различных материалов и веществ, широко востребованных, в частности, современной полупроводниковой промышленностью и медициной, а также рядом других направлений. Характерные размеры объектов таких исследований лежат между единицами нанометров и десятками микрометров, что формирует основные требования к методу диагностики подобных структур: регистрация спектральных особенностей в терагерцовом диапазоне в максимально возможном спектральном интервале и с максимально высокими пространственным и спектральным разрешением. Одним из перспективных методов решения данной задачи и является терагерцовая ближнепольная микроскопия, в основе которой лежит тесная интеграция методик сканирующей зондовой микроскопии и времяразрешенной терагерцовой когерентной спектроскопии.

В основе метода лежит регистрация терагерцового ближнего поля, создаваемого исследуемым объектом, при помощи специально изготовленного зонда, который может представлять собой либо заостренный волновод с малой входной апертурой, либо просто конус. Пространственное разрешение, получаемое при помощи апертурных зондов, ограничено эффектами волноводной отсечки и низкой пропускной способностью самой апертуры, что не позволяет разрешить объекты с характерными размерами меньше десятков микрометров. Это ограничение можно обойти за счет применения безапертурных зондов, которые выступают в роли усилителя возбуждающего терагерцового поля и используются для переизлучения ближнепольных компонент в область дальнего поля.

Основным вопросом в интерпретации сигнала, полученного при помощи такого зонда, является анализ процессов, которые происходят в ходе взаимодействия возбуждающего поля как с исследуемым образцом, так и с самим зондом, и оценка их роли в итоговом сигнале. Попытки такого анализа проводились рядом зарубежных групп и ранее, однако полученные ими результаты не представляются согласованными и не образуют целостной модели, которая бы объясняла особенности такого взаимодействия. Таким образом, основополагающий вопрос о том, как зонд влияет на результирующее распределение ближнего поля и последующую интерпретацию зарегистрированного сигнала, остается

открытым и, несомненно, актуальным для правильного понимания принципов работы терагерцового безапертурного ближнепольного микроскопа.

Цель работы: исследовать особенности взаимодействия возбуждающего терагерцового поля с исследуемым объектом, вблизи которого находится зонд безапертурного ближнепольного микроскопа.

Задачи исследований:

1. Разработать модуляционную методику выделения терагерцового сигнала, обусловленного компонентами ближнего поля, взаимодействующими с зондом в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе.
2. Исследовать влияние геометрической формы зонда на эффект усиления ближнепольной компоненты терагерцового излучения, рассеянного на зонде терагерцового безапертурного ближнепольного микроскопа.
3. Исследовать влияние параметров модуляции зонда на спектральные характеристики терагерцового излучения, регистрируемого при помощи разработанной методики.
4. Провести экспериментальные исследования зависимости величины ближнепольной компоненты терагерцового поля от расстояния между зондом и поверхностью для различных сред, отличающихся величиной диэлектрической проницаемости.
5. Провести экспериментальные исследования распределения концентрации носителей заряда в полупроводниковых структурах. На основе модели точечного диполя и модели антенны разработать упрощенную модель, достаточную для анализа экспериментальных результатов и для идентификации электронных свойств полупроводниковых структур в терагерцовом диапазоне.
6. Провести теоретические и экспериментальные исследования рассеяния терагерцового импульса, сфокусированного на зонде терагерцового безапертурного ближнепольного микроскопа.

Научная новизна работы определяется результатами экспериментальных исследований, проведенных впервые; разработанной новой модуляционной методикой, позволяющей регистрировать ближнепольную компоненту терагерцового поля и связывать ее характеристики с фундаментальными свойствами исследуемого образца; обнаружением ряда новых эффектов, а именно:

1. Впервые систематически исследовано, как характеристики терагерцового излучения, рассеянного на зонде терагерцового безапертурного ближнепольного микроскопа, зависят от формы зонда, параметров его модуляции, а также диэлектрической проницаемости исследуемого образца.
2. Экспериментально показано, что зонды с вогнутым коническим профилем позволяют увеличить сигнал рассеяния на порядок по сравнению с зондами с выпуклым конусом.
3. Обнаружен эффект, связанный со спектральной перестройкой рассеянного зондом терагерцового излучения при увеличении амплитуды его модуляции.
4. Впервые показано, что краевая дифракция происходит не только на концах ограниченного рассеивателя, но также и на границе перехода от области возбуждения к области тени.

Практическая значимость результатов

1. Разработанная модуляционная методика регистрации ближнепольной компоненты терагерцового поля позволяет выделить очень слабый сигнал рассеяния локального терагерцового поля на зонде.
2. Разработаны практические рекомендации по выбору зондов и режимов работы терагерцового ближнепольного микроскопа.

Методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований процесса взаимодействия ближнепольной компоненты терагерцового электромагнитного поля с исследуемым объектом вблизи зонда атомно-силового микроскопа были использованы методы терагерцовой когерентной спектроскопии и терагерцовой ближнепольной микроскопии.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана модуляционная методика регистрации ближнего терагерцового поля, рассеянного на зонде безапертурного ближнепольного терагерцового микроскопа. Методика включает в себя регистрацию сигнала, обусловленного рассеянием ближнего терагерцового поля исследуемой структуры на острие зонда, путем последовательной двухуровневой частотной фильтрации общего сигнала рассеяния терагерцового излучения на системе «зонд-исследуемый объект» сначала на

частоте ω_0 модуляции основного терагерцового излучения, а затем на частоте ω_3 вертикальных колебаний зонда относительно исследуемого образца ($\omega_3 \ll \omega_0$).

2. Амплитуда и спектральный состав терагерцового излучения, рассеянного на зонде безапертурного ближнепольного терагерцового микроскопа, зависят от формы зонда, амплитуды его модуляции, а также от диэлектрической проницаемости образца, находящегося под острием зонда. Зависимость амплитуды рассеянного на зонде терагерцового ближнего поля от высоты зонда над образцом определяется, в том числе, диэлектрической проницаемостью образца, и, наряду с индивидуальным спектральным откликом каждого образца, формирует механизм контраста, позволяющий дифференцировать исследуемые объекты.
3. Разработана методика определения пространственного распределения концентрации носителей заряда с разрешением до 100 нм в полупроводниковых структурах. Методика основана на моделях точечного диполя и антенны и позволяет связывать полученные в эксперименте спектры терагерцового ближнепольного сигнала, зарегистрированного по разработанной двухуровневой модуляционной методике, с дисперсией показателя преломления исследуемого полупроводника в терагерцовой области спектра, который, в свою очередь, зависит от концентрации носителей заряда данного полупроводника.
4. При рассеянии сфокусированного гауссового терагерцового пучка на зонде безапертурного ближнепольного терагерцового микроскопа, имеющего форму конуса с малым углом раствора либо тонкого цилиндра, на конце зонда и на границе перехода от области возбуждения к области тени происходит возбуждение дифракционных краевых волн, которые определяют угловой и частотный спектры рассеянного излучения. Конец зонда и область неоднородного возбуждения на границе перехода от области возбуждения к области тени являются центрами локализации источника генерации терагерцовых электромагнитных волн.

Апробация работы

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в проведении экспериментов, обработке и обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций на их основе.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах, 4 из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет XXX страниц, включая XX рисунков, X таблицы и список литературы, содержащий XXX наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Трухин В.Н., Зиновьев Н.Н., Андрианов А.В., Самойлов Л.Л., Голубок А.О., Фельштын М.Л., Сапожников И.Д., Быков В.А., Трухин А.В. Терагерцовый когерентный сканирующий зондовый микроскоп. // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2010. Т. 5. № 4. С. 151–153.
2. Трухин В.Н., Андрианов А.В., Быков В.А., Голубок А.О., Зиновьев Н.Н., Самойлов Л.Л., Сапожников И.Д., Трухин А.В., Фельштын М.Л. Взаимодействие терагерцового электромагнитного излучения с системой зонд-объект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе. // Письма в ЖЭТФ. Том 93. № 3, Ст.134–138.
3. Трухин В.Н., Голубок А.О., Лютецкий А.В., Матвеев Б.А., Пихтин Н.А., Самойлов Л.Л., Сапожников И.Д., Тарасов И.С., Фельштын М.Л., Хорьков Д.П. Диагностика полупроводниковых структур с использованием терагерцового безапертурного ближнепольного микроскопа. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 8-9. Ст. 640–648.
4. Трухин В. Н., Самойлов Л. Л., Хорьков Д. П. Особенности рассеяния сфокусированного терагерцового излучения на зонде терагерцового ближнепольного микроскопа. // Письма в ЖЭТФ. Том 96. № 12. Ст. 899–904.
5. Trukhin V.N., Zinov'ev N.N., Andrianov A.V., Samoilov L.L., Golubok A.O., Sapozhnikov I.D., Felsztyn M.L., Bykov V.A. Terahertz coherent scanning probe microscope. // Proceedings of 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2010. DOI: 10.1109/ICIMW.2010.5612469.
6. Trukhin V.N., Golubok A.O., Samoilov L.L. Probe shape effect on near-field enhancement in apertureless terahertz near-field microscope. // Proceedings of 36th International Conference

on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2011. DOI: 10.1109/irmmw-THz.2011.6104848.

7. Samoylov L.L., Trukhin V.N., Buyskikh A.S., Horkov D.P. Edge diffraction in the scattering of focused terahertz radiation. // Proceedings of Days on Diffraction (DD). 2012. Ст. 211–214. DOI: 10.1109/DD.2012.6402781

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ