

"УТВЕРЖДАЮ"

Руководитель предприятия

Проректор по научной работе, к.т.н.



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу
Королева Сергея Александровича "Микроволновая микроскопия полупроводниковых
структур",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы работы

Микроволновая микроскопия — динамично развивающийся метод исследования электромагнитных свойств различных сред, включая полупроводниковые структуры. Отличительной особенностью метода является возможность бесконтактного измерения параметров с субволновым разрешением. С уменьшением размеров микроволновых структур возникает необходимость создания измерительных систем, предназначенных для изучения свойств объектов в микро- и нано-масштабах. Ограничение разрешающей способности волновой диагностики определяется длиной волны λ . Это ограничение можно преодолеть, используя ближнее электромагнитное поле, локализованное в пределах апертуры антенны. Размер апертуры D определяет разрешающую способность устройства: субволновое разрешение достигается при $D \ll \lambda$. В данной работе и используется указанный подход.

Сложной и до конца не решённой задачей остаётся количественное определение параметров среды. Наиболее перспективным представляется метод, основанный на решении обратной задачи. В рамках данного метода связь между измеряемыми характеристиками микроскопа и параметрами образца устанавливается с помощью теоретической модели, к которой предъявляются высокие требования к точности и скорости вычислений.

В работе решается актуальная задача развития методов ближнепольной микроскопии для постановки и решения проблем диагностики сложных объектов, внутренняя структура которых характеризуется большим числом параметров. Основное внимание уделено развитию метода количественной оценки параметров полупроводниковых структур с помощью микроволнового микроскопа с использованием разработанной модели.

Научная новизна исследований и полученных результатов

- Развита теоретическая модель взаимодействия коаксиального зонда микроволнового микроскопа со слоистой средой, имеющей произвольный глубинный профиль комплексной диэлектрической проницаемости. В рамках модели получено аналитическое выражение для импеданса зонда.
- Метод микроволновой микроскопии распространён на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. Для повышения точности измерения сопротивления слоя предложено использовать в качестве эталонных образцов полупроводниковые плёнки вместо объёмно-однородных пластин. С помощью сконструированного микроволнового микроскопа получены латеральные профили сопротивления канала транзисторных гетероструктур.
- Достигнута микронная разрешающая способность метода за счёт использования коаксиального зонда. Теоретической основой метода является разработанная модель монополярной антенны, описывающая взаимодействие коаксиального зонда со слоистой средой.
- Метод микроволновой микроскопии распространён на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. Для повышения точности измерения сопротивления слоя предложено использовать в качестве эталонных образцов полупроводниковые плёнки вместо объёмно-однородных пластин. Достигнута микронная разрешающая способность метода за счёт использования коаксиального зонда.
- Теоретической основой метода является разработанная модель монополярной антенны, описывающая взаимодействие коаксиального зонда со слоистой средой. С помощью сконструированного микроволнового микроскопа получены латеральные профили сопротивления канала транзисторных гетероструктур.
- При помощи микроволнового микроскопа протестированы алмазные подложки и эпитаксиальные слои, в которых обнаружена гигантская латеральная неоднородность проводимости. Получены электрофизические характеристики эпитаксиального слоя, не искажённые шунтирующим влиянием неоднородно проводящей подложки. Установлена корреляция свойств высокоомной области эпитаксиального слоя с расположенном ниже мезоскопическим дефектом подложки.
- Разработан и апробирован в эксперименте метод ближнеполярной микроволновой томографии с микронным латеральным разрешением.

Достоверность полученных результатов

Теория микроволнового микроскопа разработана в рамках стандартных подходов теории антенн и теории распространения электромагнитных волн. Развита модель подтверждена экспериментально. В основе предложенного метода микроволновой микроскопии лежит верифицированная теория и известный метод решения обратной задачи. Метод апробирован на разнообразных структурах, полученные результаты согласуются с измерениями стандартным методом ван дер Пау. Исследования алмазных структур были проведены различными методами: результаты измерений согласуются между собой. Измерения методом ближнеполярной микроволновой томографии проводятся с использованием калиброванного коммерческого оборудования, результаты измерений обрабатываются с использованием программы, реализованной на основе известного алгоритма минимизации функции нескольких переменных. Результаты, полученные методом ближнеполярной микроволновой томографии, согласуются со значениями, предоставленными производителем структур.

Практическая значимость

Развитый метод неразрушающего контроля с использованием микроволновой микроскопии позволяет локально измерять сопротивление проводящих слоёв многослойных полупроводниковых структур с латеральным разрешением ~50–100 мкм. Применение данного метода к исследованию алмазных подложек и структур позволило измерить распределение проводимости, изменяющейся в плоскости поверхности более чем на порядок с характерным масштабом неоднородности ~0.1–1 мм. Определены электрофизические параметры эпитаксиального слоя, не искажённые шунтирующим влиянием неоднородно проводящей подложки. В настоящее время разработанный метод применяется в ИФМ РАН для предростовой диагностики проводимости монокристаллических алмазных подложек. Разработанный метод используется для измерения удельного сопротивления кремниевых пластин и исследования их неоднородности в соответствии с договором между ИФМ РАН и НПП «Салют».

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК к оформлению диссертаций.

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает её содержание. Основные положения и выводы диссертации прошли апробацию и достаточно полно отражены в опубликованных работах.

Однако работа не лишена некоторых недостатков:

- В диссертации не проведено исследование разрешающей способности микроскопа в зависимости от расстояния зонд-образец, а также в зависимости от глубины залегания тестируемого проводящего слоя.
- В диссертации отсутствует анализ предельных возможностей латеральной разрешающей способности, включая аппаратные ограничения.

Отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку работы, которая представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной задачи, характеризующейся теоретической новизной и практической полезностью.


Представленная работа в полной мере соответствует требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики, а её автор, С. А. Королев, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация, автореферат и настоящий отзыв обсуждены на заседании кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры (МИТ)

"_31_" августа 2018 г., протокол № 7.

Заведующий кафедрой МИТ, профессор, д.т.н. В. А. Тутик

Секретарь кафедры МИТ, старший преподаватель И. С. Шолина



Краткая информация об организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5

Тел. +7 812 346-44-87

Факс +7 812 346-27-58

root@post.etu.spb.ru