

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ МИКРОСКОПИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЕЛИЧИНЫ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Шароватова Виталия Олеговича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-.м.н.

А.Э.Постельга

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

Д.А. Усанов

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2018

Введение. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия – это неразрушающий прямой метод исследования параметров материалов и структур. Данный метод позволяет с высокой степенью локальности получать информацию о поверхностных и подповерхностных свойствах различных сред. Он основывается на регистрации СВЧ воздействия, локализованного в ближнем поле зонда.

Благодаря эффекту ближнего поля СВЧ-микроскопия свободна от таких ограничений, как влияние изменения численных параметров на небольшом участке исследуемого образца и влияние параметров одного слоя сложной структуры на другие слои.

Среди наиболее распространенных методов измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах присутствует метод СВЧ магнитосопротивления, в основу которого положен эффект изменения потерь, вносимых полупроводником в СВЧ электрическое поле в зависимости от величины приложенного к образцу магнитного поля.

Одним из недостатков метода СВЧ магнитосопротивления является отсутствие учета многослойности структуры высших типов волн в волноводе, содержащем исследуемую структуру, при выводе рабочих соотношений, связывающих измеряемые параметры с характеристиками СВЧ волны.

В современной науке, помимо реальных экспериментов широко распространены способы воспроизведения и анализа методов исследования с помощью трехмерного моделирования. Программы трёхмерного моделирования СВЧ структур приобрели широкую популярность среди разработчиков радиоволновых устройств. Одной из таких программ является HFSS.

HFSS – пакет программ, который рассчитывает численные параметры и строит изображения электромагнитных полей в трёхмерных пассивных структурах произвольной формы. Для расчёта параметров СВЧ структур

пакет HFSS использует метод конечных элементов: разделение структуры на ячейки и решение для каждой ячейки системы уравнений Максвелла численным методом. Это позволяет определить все параметры СВЧ структуры, а также рассчитать поля внутри и вне структуры.

Целью бакалаврской работы являлось: показать возможность определения величины подвижности носителей зарядов полупроводниковых материалов и структур при помощи ближнеполевой СВЧ микроскопии.

Бакалаврская работа содержит 4 главы:

1 Бесконтактные методы измерения параметров полупроводников на сверхвысоких частотах

1.1 Ближнеполевая СВЧ микроскопия и её применение

1.1.1 Измерительная установка и оптимальная конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа

2. Магниторезистивный эффект. Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах

2.1 Магниторезистор. Виды магниторезистивного эффекта

2.2 Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах

2.2.1 Волноводный метод СВЧ магнитосопротивления

3 Экспериментальное применение двухзондовой СВЧ микроскопии для определения величины подвижности носителей заряда полупроводниковых материалов и структур

4. Получение изображения электрических полей и электромагнитных волн в САПР HFSS

4.1. Моделирование измерительной системы ближнеполевого СВЧ микроскопа

1 Бесконтактные методы измерения параметров полупроводников на сверхвысоких частотах

Контроль параметров полупроводников методом СВЧ имеет существенные преимущества перед зондовым, поскольку является бесконтактным и позволяет получить усредненные по объему параметры полупроводника.

СВЧ методы позволяют проводить измерения параметров материалов, не приводящие к разрушению образца и изменению его свойств. С помощью данного метода можно определить такие параметры, как удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, время жизни, эффективная масса и подвижность носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, толщина полупроводниковых слоёв и т.д. К тому же становится возможным проводить измерение сразу нескольких параметров, на одной измерительной установке с использованием одного образца. Отсутствие контакта и возможность вынесения измерительных приборов за пределы области температурного воздействия на полупроводник позволяет исследовать свойства полупроводников в широком интервале температур и, в частности, контролировать их параметры в процессе термообработки.

1.1 Ближнеполевая СВЧ микроскопия и её применение

Многие традиционно используемые СВЧ-методы измерения параметров материалов и структур позволяют получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения. Пространственное разрешение при контроле изменения свойств материалов с использованием таких методов ограничивается несколькими миллиметрами. Следствием такого усреднения было то, что на результат измерений могла существенно влиять флуктуация параметров в сравнительно малой части

исследуемого объекта, а при измерении параметров одного из слоев сложных структур могли влиять параметры других слоев. От данных ограничений свободны измерители (микроскопы), основанные на использовании эффекта ближнего поля. Эти микроскопы позволяют проводить количественные измерения с высоким разрешением.

1.1.1 Измерительная установка и оптимальная конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа

Существует методика исследования и контроля свойств материалов ближнеполевым СВЧ-микроскопом, в котором в качестве измерительной резонансной головки используется низкоразмерный волноводный резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма». Возможность создания СВЧ-резонаторов на основе так называемых низкоразмерных резонансных систем и их высокая чувствительность к возмущающим воздействиям показана в работах. Резонансы в таких системах вызваны возбуждением в них высших типов колебаний. Такого рода резонаторы были названы «низко размерными», так как один из размеров резонатора намного меньше длины волны основного типа. Вносимое через зонд в низкоразмерный резонатор малое возмущение, изменяющее его электрическую длину, приводит к значительному изменению его характеристик, что и демонстрировалось в работах. В резонатор были включены два зонда, выполненных из медной проволоки, диаметр зондов равен 100 мкм. Посредством двух петель связи обеспечивается электрическая связь с ёмкостной диафрагмой.

2. Магниторезистивный эффект. Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах

Искривление траектории носителей заряда в магнитном поле приводит к изменению составляющей тока, направленной вдоль вектора электрического поля, что эквивалентно изменению удельного сопротивления

полупроводника. Это явление получило название эффекта магнитосопротивления (Эффекта Гаусса) или магниторезистивного эффекта.

Магнитосопротивление – изменение электрического сопротивления проводящего материала за счёт внесения его в магнитное поле. В общем случае имеется в виду изменение тока через образец в конкретном направлении при неизменном напряжении и меняющемся значении магнитного поля. Магнитосопротивление характерно для всех веществ. Для сверхпроводников существует критическое магнитное поле, при котором разрушается эффект сверхпроводимости и возвращается нормальное состояние с наличием сопротивления образца. В нормальных металлах магнитосопротивление выражено слабее, когда в полупроводниках оно может быть в 100 – 10 000 раз сильнее, чем в металлах.

Также магнитосопротивление зависит от ориентации образца относительно магнитного поля. Благодаря силе Лоренца магнитное поле закручивает траектории скорости в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, но не меняет проекцию траектории скорости на направление магнитного поля.

Магнитосопротивление определяется разностью между начальным сопротивлением магниторезистора R_0 и сопротивлением магниторезистора в магнитном поле R_B . Начальное сопротивление R_0 определяется материалом и геометрией образца.

2.1 Магниторезистор. Виды магниторезистивного эффекта

Магниторезистор представляет собой полупроводниковый резистор, основное свойство которого заключается в способности изменять свое электрическое сопротивление под действием магнитного поля.

Магниторезисторы характеризуются такими параметрами, как чувствительность, номинальное сопротивление, рабочий ток, термостабильность и быстродействие, диапазон рабочих температур.

Таблица 2.1 – Типы магниторезисторов

Типы магниторезисторов		
Полупроводниковые магниторезисторы;	Анизотропные магниторезисторы;	Гигантские магниторезисторы.

Существует несколько видов магнитосопротивления: отрицательное, анизотропное, гигантское, колоссальное, туннельное.

2.2 Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах

Для измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах используются методы, основанные на использовании гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых материалах. Подобные измерения представляют собой трудоемкие и малопроизводительные операции, что обусловлено необходимостью приготовления холловских образцов или дисков Корбино, нанесения на них омических контактов. Измеряемые этими методами параметры материала являются интегральными, локальные измерения без разрушения образца невозможны.

Одним из наиболее свободных от указанных недостатков методов измерения является метод СВЧ магнитосопротивления, в основу которого положен эффект изменения потерь, вносимых полупроводником в СВЧ электрическое поле в зависимости от величины приложенного внешнего постоянного магнитного поля. Эффект СВЧ магнитосопротивления проявляется при условии, что электрическое СВЧ поле и постоянное магнитное поле ортогональны. При этом возможно несколько вариантов ориентации полей относительно плоскости, в которой находится пластина исследуемого материала.

2.2.1 Волноводный метод СВЧ магнитосопротивления

Рассмотрен волновой метод СВЧ магнитосопротивления. Получена формула для расчёта величины подвижности носителей зарядов в полупроводниках.

Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах и в структурах полупроводниковых приборов представляет интерес, так как знание этого параметра позволяет прогнозировать основные характеристики приборов на основе этих материалов. Известные способы определения подвижности носителей заряда с использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления позволяли получать только усредненную по объёму полупроводника подвижность носителей заряда. Их использование было также связано с ограничениями, накладываемыми на толщину исследуемого образца.

Благодаря высокой локальности и чувствительности ближнеполевой СВЧ микроскопии открывается возможность регистрации изменения свойств полупроводниковых материалов при внешних воздействиях на образец, в частности, изменения подвижности носителей заряда при воздействии на полупроводник внешнего магнитного поля. Способ, описанный в статье, использующий для измерения подвижности носителей заряда сканирующий ближнеполевой СВЧ микроскоп, позволяет измерять подвижность носителей заряда на сверхвысоких частотах бесконтактно с высокой степенью локальности, строить профили распределения подвижности носителей заряда вдоль координаты сканирования, измерять подвижность носителей заряда в полупроводниковых приборах при прохождении через них электрического тока, что выгодно отличает его от известных способов.

В ходе эксперимента были получены зависимости коэффициента отражения от расстояния между образцом и зондами и от направления

магнитного поля. Получено значение подвижности носителей заряда арсенида галлия GaAs.

4. Получение изображения электрических полей и электромагнитных волн в САПР HFSS

Одним из возможных вариантов использования САПР HFSS является проектирование СВЧ устройств и антенн. Обширный функционал данного пакета программ позволяет рассчитывать численные параметры структур и устройств, а также строить изображения электромагнитных волн и полей. Это позволяет визуально представить работу устройства и получить экономическую выгоду за счёт экономии материалов.

Чтобы рассчитать поля и параметры структуры надо построить 3D модель структуры задать размеры и материалы для отдельных её частей. Затем задать такие параметры, как волновой порт, в случае работы с волноводом, рабочую частоту прибора, полосу рабочих частот, воздушный бокс, границы излучения, и т.д.

4.1. Моделирование измерительной системы ближнеполевого СВЧ микроскопа

Реальная установка состоит из СВЧ генератора, коаксиальных кабелей, волновода, индуктивной и ёмкостной диафрагмы, игл-зондов, исследуемого образца, панорамного измерителя КСВН, АЦП и ЭВМ для расчёта параметров и прочих элементов, в зависимости от эксперимента и необходимых условий его проведения.

При работе в САПР HFSS не нужно моделировать всю установку, достаточно смоделировать измерительную часть. Были смоделированы участок волновода, индуктивная и ёмкостная диафрагмы, иглы-зонды и исследуемый образец. Для оптимизации модели не были учтены технические отверстия, соединение волновода и игл-зондов, крепление волновода и

образца. Это допустимо, так как в поставленные задачи не входит учёт тонкостей реальной модели.

Измерительная часть установки ближнеполевого СВЧ-микроскопа была смоделирована для следующих случаев:

1. Измерительная часть в отсутствии образца и внешнего магнитного поля;
2. В присутствии образца, без внешнего магнитного поля;
3. В присутствии образца, с разными направлениями внешнего магнитного поля.

Список использованной литературы

1. Jervis T. R., Jonson E. E. Geometrical magnetoresistance and Hall mobility in Gunn effect devices // Solid State Electronics. 1970. V. 13, № 2. P. 181 - 189.
2. Molnar B., Kennedy T. A. Evaluation of S and Se implanted GaAs by contactless mobility measurements // J. Electrochim. Soc. 1970. V. 125, № 8. P. 1318 - 1320.
3. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ магнитосопротивления / В. С. Банников, Ю. Г. Качуровский, И. В. Петренко и др.// Электронная промышленность. 1982. № 9. С. 48 - 49.
4. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ магнитосопротивления / В. С. Банников, Ю. Г. Качуровский, И. В. Петренко и др.// Электронная промышленность. 1986. № 3. С. 66 - 67.
5. Бесконтактные радиоволновые методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов / М. В. Детинко, Ю. В. Лисюк, Ю. В. Медведев, А. А. Скрыльников // Известия вузов. Физика. 1992. Т. 35, № 9. С.45 - 63.

6. Д.А. Усанов, С.С. Горбатов. Резонансы в волноводной системе "штырь с зазором – близкорасположенный поршень // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 49. – № 2. – С. 27–33.
7. Резонансы в полубесконечном волноводе с диафрагмой, связанные с возбуждением волн высших типов / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, С.Б. Вениг, В.Е. Орлов. // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 18. – С. 47–49.
8. Д.А. Усанов, С.С. Горбатов. Управляемый магнитным полем СВЧ - выключатель на р-і-п диодах // ПТЭ. – 2003. – № 1. – С. 72–73. 70. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов / Д. А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. – 312 с.
9. Магниторезистивный эффект [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://mirznani.com/a/321611/magnitorezistivnyu-effekt> свободный. (Дата обращения: 25.04.2017 г.)
10. Ковтонюк, Н. Ф., Измерения параметров полупроводниковых материалов. / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. - М.: Металлургия, 1970. - 429 с.
11. Павлов, Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. / Л. П. Павлов. - М.: Высшая школа, 1975. - 206 с.
12. Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов / В. В. Батавин. - М.: Сов. радио, 1976. -102 С.
13. Molnar B., Kennedy T. A. Evaluation of S and Se implanted GaAs by contactless mobility measurements // J. Electrochim. Soc. 1970. V. 125, № 8. P. 1318 - 1320.
14. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ магнитосопротивления / В. С. Банников, Ю. Г. Качуровский, И. В. Петренко и др. // Электронная промышленность. 1982. № 9. С. 48 - 49.

15. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ магнитосопротивления / В. С. Банников, Ю. Г. Качуровский, И. В. Петренко и др. // Электронная промышленность. 1986. № 3. С. 66 - 67.
16. Бесконтактные радиоволновые методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов / М. В. Детинко, Ю. В. Лисюк, Ю. В. Медведев, А. А. Скрыльников // Известия вузов. Физика. 1992. Т. 35, № 9. С. 45-63.
17. W.Chaisantikulwat, M.Mouis, G.Ghibaud, C.Gallon, C.Fenouillet-Beranger, D.K.Maude, T.Skotnicki, S.Cristoloveanu . Magnetoresistance technique for mobility extraction in short channel FDSOI transistors. Solid-State Electronics, 50 (4), 637 (2006).
18. B. Molnar, T.A. Kenedy. Evaluation of S- and Se-implanted GaAs by contactless mobility measurement. J. Electrochem. Soc. Solid-State Science and Technology, 125 (8), 1318 (1978).
19. В.С. Банников, Ю.Г. Качуровский, И.В. Петренко. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ-магнитосопротивления. Электронная промышленность, 9, 48 (1982).
20. С.М. Безручко, В.Н. Подшивалов, А.И. Фисун. Прибор для бесконтактного определения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах. Электронная промышленность, 3, 66 (1986).
21. D. Usanov, A. Skripal, A. Abramov, A. Bogolubov, V. Skvortsov, M. Merdanov. Measurement of the metal nanometer layer parameters on dielectric substrates using photonic crystals based on the waveguide structures with controlled irregularity in the microwave band. Proc. of 37rd European Microwave Conference (Munich, Germany, 2010), p. 198.
22. D. Usanov, A. Skripal, D. Ponomarev, E. Latysheva, S. Nikitov New Techniques of Measurement Parameters of Thin Semiconductor Layers by means of Microwave Photonic Crystals, Proc. of 20th International

Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications
MIKON-2014 (Gdansk, Poland, 2014), v.1, p. 62.

23. Д.А. Усанов. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. (Саратов, Изд-во Сарат. ун-та, 2010), с. 100.

24. P. Gregory, J. F. Blackburn, K. Lees, R. N. Clarke, T. E. Hodgetts, S. M. Hanham, N. Klein. Measurement of the permittivity and loss of high-loss materials using a near-field scanning microwave microscope. *Ultramicroscopy*, 161, 137 (2016).