

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СРЕДСТВАМИ
ДВУХЗОНДОВОЙ БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ МИКРОСКОПИИ

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 201 группы кафедры физики твердого тела
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий
Цыгановой Анастасии Владимировны

Научный руководитель
Доцент, к.ф.-м.н.

подпись, дата

А.Э. Постельга

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

подпись, дата

Д.А. Усанов

Саратов 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	3
1	Бесконтактные методы измерения полупроводников на СВЧ	4
2	Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах	6
3	Экспериментальная реализация методики измерения величины подвижности носителей зарядов полупроводниковых материалов, средствами двухзондовой СВЧ микроскопии	8
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	14
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	15

ВВЕДЕНИЕ

Большинство СВЧ методов измерения параметров материалов и структур дают возможность получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения.

От такого рода ограничений свободны микроскопы, работающие на эффекте ближнего поля. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия – это неразрушающий прямой метод исследования, позволяющий с высокой степенью локальности получать информацию о поверхностных и подповерхностных свойствах различных сред. Этот метод базируется на регистрации СВЧ-воздействия, локализованного в ближнем поле зонда.

Для измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах применяются методы, основанные на использовании гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых материалах [1 – 3]. Следует отметить, что такие измерения представляют собой трудоемкие и малопроизводительные операции.

Одним из наиболее распространенных методов измерения является метод СВЧ магнитосопротивления [4 – 8], в основу которого положен эффект изменения потерь, вносимых полупроводником в СВЧ электрическое поле в зависимости от величины приложенного внешнего постоянного магнитного поля.

Цель работы: показать возможность определения величины подвижности носителей заряда полупроводниковых материалов средствами двухзондовой ближнеполевой СВЧ микроскопии.

Реализация цели работы обеспечивалась решением следующих задач:

- критический анализ литературы, посвященной ближнеполевой СВЧ микроскопии, а также магниторезистивному эффекту и методам измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах;
- критический анализ литературы, посвященной измерению параметров полупроводников на СВЧ;
- экспериментальная реализация методики измерения величины подвижности носителей зарядов полупроводниковых материалов, средствами двухзондовой СВЧ микроскопии.

1 Бесконтактные методы измерения полупроводников на СВЧ

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

Пользуясь, СВЧ методами можно проводить измерения, не разрушая материал и не изменяя его свойств, в процессе измерений. С помощью СВЧ методов измерения могут быть определены удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость полупроводника, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, толщина полупроводниковых слоёв и другие параметры. 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.

Использование СВЧ методов измерения открывает принципиально новые возможности при исследовании свойств полупроводников. С их помощью становится возможным изучение анизотропных эффектов, квантовых явлений, эффектов в сильных электрических полях и других. Самые распространенные бесконтактные методы определения параметров полупроводников представлены в таблице 1.

Таблица 1- Бесконтактные методы определения параметров полупроводников

Методы	Недостатки
Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников	Для измерения параметров полупроводников волноводным методом необходим образец специальной формы для минимизации зазоров между образцом и волноводом и возможно измерить лишь усреднённые параметры;
Мостовые методы измерения параметров полупроводников	Необходимость в высококвалифицированном персонале, а также в сложной регистрирующей аппаратуре. При использовании данного метода

	может возникнуть неоднозначность полученных результатов, поэтому необходимо производить измерения двух образцов с двумя разными толщинами;
Резонаторные методы измерения параметров полупроводников	При измерении параметров полупроводниковых материалов резонаторными методами возникают погрешности, связанные с потерями электромагнитной энергии в стенках резонатора. Источником погрешности может быть зазор между образцом и стенками резонатора, что приводит к расстройке резонатора;
Измерение параметров материалов методом волноводно-диэлектрического резонанса	Возникает требование к форме пластин, заключающееся в необходимости существования прямолинейного участка на боковой грани образца, превышающего размер узкой стенки;
Ближнеполевая СВЧ-микроскопия	В отличие от однозондового метода двухзондовый обладает большей чувствительностью за счет наличия в измерительной головке двух диафрагм: емкостной и индуктивной.

2 Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах

Для измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах применяются методы, основанные на использовании гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых материалах [8 – 10]. Следует отметить, что такие измерения представляют собой трудоемкие и малопродуктивные операции. Это обусловлено необходимостью приготовления холловских образцов или дисков Корбино, нанесения на них омических контактов, кроме того, 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 [11 –15], 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, если электрическое СВЧ поле и постоянное магнитное поле ортогональны.

В таблице 2 представлены методы определения подвижности носителей заряда в полупроводников материалах.

Таблица 2- методы определения подвижности носителей заряда в полупроводников материалах.

Методы	Описание
Измерение дрейфовой подвижности	Скорость дрейфа носителя заряда в электрическом поле, деленная на единицу напряженности поля $\mu = x / Utd;$
Измерение подвижности по геометрическому магнитосопротивлению	На исследуемый образец наносятся омические контакты большой площади и через них в направлении x пропускается электрический ток I_x . В поперечном магнитном поле B_z в образце возникает холловский ток I_y . результирующий ток в образце будет направлен под некоторым холловским углом к току I_x , что приведет к изменению сопротивления образца в направлении x $\frac{\Delta R}{R_0} = (\mu_m * B_z)^2 ;$
Волноводный метод СВЧ магнитосопротивления	Подвижность свободных носителей заряда с постоянными затухания волны в волноводе при наличии внешнего магнитного поля и без него $\mu_n = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\alpha - \alpha_m}{\alpha_m}} ;$
Резонаторный метод СВЧ магнитосопротивления	Измеряя добротности пустого и заполненного резонатора в присутствии и без внешнего постоянного магнитного поля, можно определить подвижность свободных носителей заряда $\mu_n = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Delta Q / Q - \Delta Q^m / Q^m}{\Delta Q^m / Q^m}}$ <p>в полупроводнике</p>

3 Экспериментальная реализация методики измерения величины подвижности носителей заряда полупроводниковых материалов, средствами двухзондовой СВЧ микроскопии

Известен классический метод волноводного СВЧ-магнитосопротивления, в котором подвижность свободных носителей заряда определяется по изменению в магнитном поле с индукцией B мощности, проходящей через волновод, который не позволяет обеспечить локальность измерений [20].

Для измерения величины подвижности носителей зарядов полупроводниковых материалов, средствами двухзондовой СВЧ микроскопии в качестве образца был использован антимонид индия.

Экспериментальные исследования локальной СВЧ подвижности носителей заряда в антимониде индия были проведены с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа на основе резонансной системы «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма» методом СВЧ магнитосопротивления. Также исследования показали возможность бесконтактного локального измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах с высокой концентрацией носителей заряда.

Благодаря высокой локальности и чувствительности ближнеполевой СВЧ микроскопии появилась возможность регистрации изменения свойств полупроводниковых материалов при малых внешних воздействиях на образец.

В отличие от классического метода СВЧ магнитосопротивления, позволяющего получать лишь усредненную по объему полупроводника подвижность носителей заряда, а так же налагающего ограничения на толщину образца. Аналогичный метод с использованием сканирующего ближнеполевого СВЧ микроскопа позволяет измерять локальную подвижность носителей заряда, в том числе подповерхностных слоев, что выгодно его отличает от других методов исследования подвижности.

Методика измерений была следующей: исследуемый образец антимонида индия, имеющий геометрические размеры 12 мм × 12 мм × 1,25 мм закреплялся в непосредственной близости к сердечнику электромагнита таким образом, что магнитное поле было параллельно его широкой грани. Учитывая небольшой размер немагнитного зазора сердечника магнитное поле было квазиоднородным. Затем к широкой грани исследуемого материала подводился зонд ближнеполевого СВЧ микроскопа, в котором в качестве измерительной резонансной головки используется низкоразмерный волноводный резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма», таким образом, что электрической поле между иглами было направлено по нормали к магнитному полю. Электромагнит калибровался с помощью линейного датчика Холла SS495А. Далее проводилось измерение модуля коэффициента отражения в полосе рабочих частот (9.23–9.35 ГГц) с помощью измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления Я2Р-61 при разных показателях индукции магнитного поля, с последующей оцифровкой полученных результатов на персональной ЭВМ с помощью АЦП L-Card E14-140M. Индукция магнитного поля изменялась в пределах от -71.2 мТ до 71.2 мТ. Зависимость модуля коэффициента отражения от индукции магнитного поля представлена на рисунке 1.

Для расчета подвижности носителей заряда в образце использовалось соотношение, применяемое в классическом методе СВЧ магнитосопротивления [17]:

$$\mu = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{a_0 - \alpha}{\alpha}}, \quad (1)$$

где μ – СВЧ подвижность носителей заряда, B - индукция магнитного поля, a_0 - высокочастотные потери в материале без магнитного поля, α - высокочастотные потери в материале при индукции магнитного поля равной B .

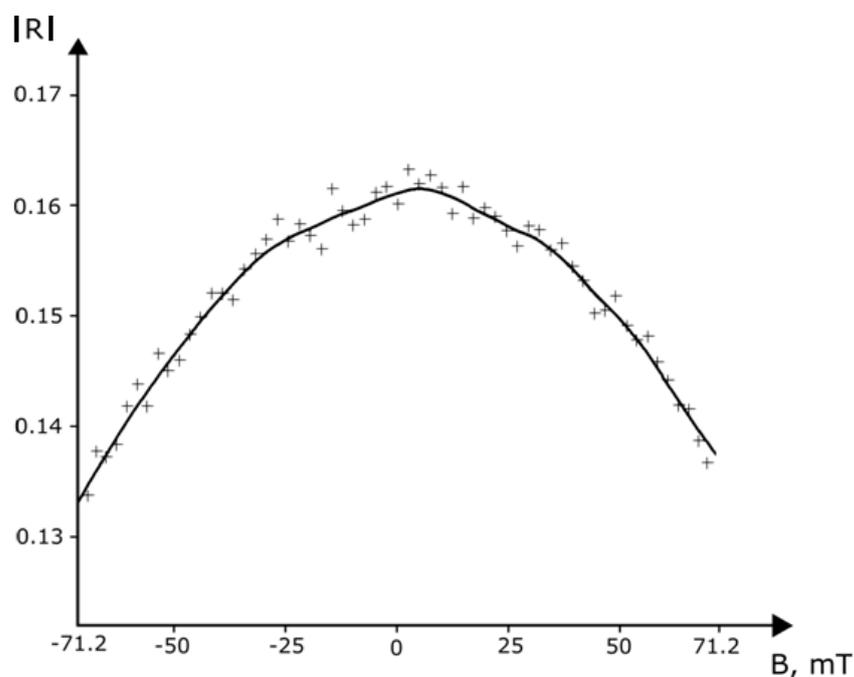


Рисунок 1- Зависимость модуля коэффициента отражения от индукции магнитного поля (сплошная линия). Экспериментальные точки (+).

В качестве высокочастотных потерь использовался натуральный показатель поглощения, который находился из полученного экспериментально модуля коэффициента отражения и коэффициента прохождения $T = 0$.

Показатель поглощения находился с помощью следующего соотношения:

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln(\sqrt{1 - R^2}), \quad (2)$$

где x - расстояние на котором происходит поглощение в образце, R - экспериментально измеренный модуль коэффициента отражения. С учетом соотношения (2) окончательное выражения для СВЧ подвижности носителей заряда примет вид:

$$\mu = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\ln(\sqrt{1 - R_0^2}) - \ln(\sqrt{1 - R^2})}{\ln(\sqrt{1 - R^2})}}, \quad (3)$$

где R_0 - модуль коэффициента отражения в отсутствии магнитного поля.

На рисунке 2 приведена расчетная зависимость СВЧ подвижности носителей заряда образца *InSb* от индукции магнитного поля. Как видно из

полученного графика, при достижении определенной индукции подвижность перестает зависеть от величины магнитного поля. Это объясняется тем, что при увеличении индукции магнитного поля перестает выполняться условие «слабости» магнитного поля - $\mu B \ll 1$, и, соответственно, сопротивление образца достигает насыщения и не зависит от индукции магнитного поля.

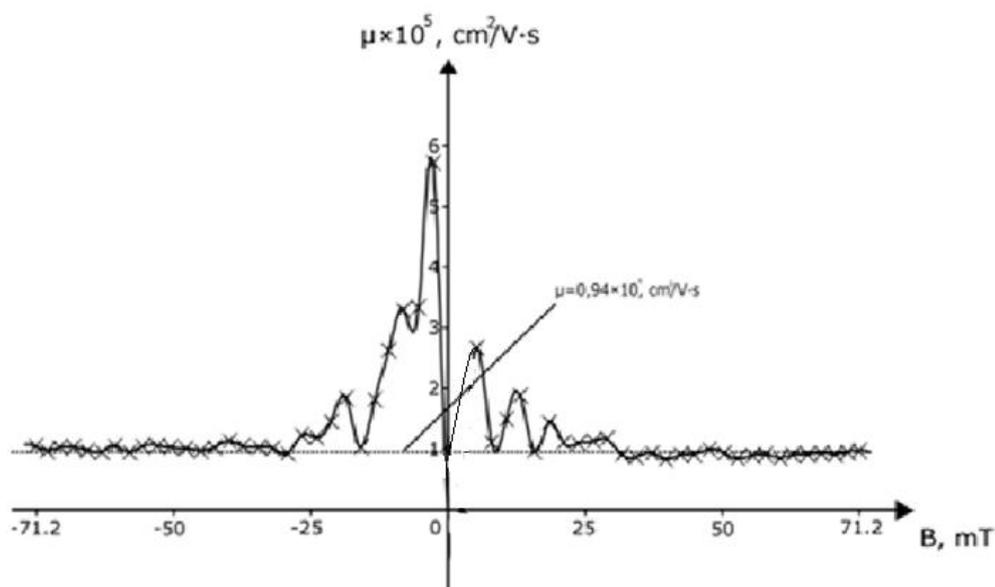


Рисунок 2- Зависимость СВЧ подвижности носителей заряда в образце антимонида индия от индукции магнитного поля (сплошная линия). Экспериментальные точки (+).

Показанная в данной работе возможность измерения СВЧ подвижности носителей заряда с помощью метода СВЧ магнитосопротивления с использованием сканирующего ближнеполевого СВЧ микроскопа открывает перспективы исследования сложных полупроводниковых структур с высокой степенью локальности измерений при условии решения задачи измерения коэффициента прохождения, или достижения условий, когда $T \ll 1$, как в нашем случае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведён критический анализ литературы о ближнеполевой СВЧ-микроскопии, её назначении и применении. Рассмотрены возможные конструкции СВЧ-микроскопа. Также изучены бесконтактные методы измерения параметров полупроводниковых структур на сверхвысоких частотах. К ним относятся:

- Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников;
- Мостовые методы измерения параметров полупроводников;
- Резонаторные методы измерения параметров полупроводников;
- Измерение параметров материалов методом волноводно-диэлектрического резонанса;

Проанализирована информация о магниторезистивном эффекте и метод СВЧ-магнитосопротивления, в котором подвижность свободных носителей заряда определяется по изменению в магнитном поле с индукцией B мощности, проходящей через волновод, содержащий полупроводниковую эпитаксиальную структуру. Изучены следующие методы СВЧ-магнитосопротивления, такие как:

- Измерение дрейфовой подвижности;
- Измерение подвижности по геометрическому магнитосопротивлению;
- Волноводный метод СВЧ магнитосопротивления;
- Резонаторный метод СВЧ магнитосопротивления.

Проведено экспериментальное исследование локальной СВЧ подвижности носителей заряда в антимониде индия, которое показывало, что в области «сильного» ($-71.2 - 71.2$ мТ) магнитного поля результаты измерений СВЧ подвижности носителей заряда носят стабильный характер, что показывает высокую повторяемость полученных экспериментальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковтонюк Н. Ф., Концевой Ю. А. Измерения параметров полупроводниковых материалов / Н. Ф.Ковтонюк, Ю. А. Концевой. - М.: Металлургия, 1970. - 429 С.
2. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов / Л. П.Павлов.- М.: Высшая школа, 1975. - 206 С.
3. Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов / В. В. Батавин.- М.: Сов. радио, 1976. -102 С.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Ковтонюк, Н. Ф., Измерения параметров полупроводниковых материалов. / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. - М.: Металлургия, 1970. - 429 с.
9. Павлов, Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов./ Л. П. Павлов. - М.: Высшая школа, 1975.- 206 с.
- 10.Батавин, В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов / В. В. Батавин.- М.: Сов. радио, 1976. -102 С.
- 11.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.

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ-магнитосопротивления / Банников В. С., Качуровский Ю. Г., Петренко И. В. и др. // Электронная промышленность. - 1982. - № 9. - С. 48.