

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

Кафедра физики твёрдого тела

**ОДНОВРЕМЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ,
ТОЛЩИНЫ, ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ, КОЭФФИЦИЕНТОВ
РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, КОНЦЕНТРАЦИИ И ЭНЕРГИИ
АКТИВАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 201 группы по направлению 11.04.04 «Электроника и
наноэлектроника» студентки 2 курса факультета нано- и биомедицинских
технологий
Дмитриевой Екатерины Юрьевны

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.Э. Постельга

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Существует проблема измерения параметров высокоомных материалов распространенными контактными методами. Она частично решается использованием оптических методов, однако они имеют низкую разрешающую способность и относительно низкую чувствительность. В связи с этим в этой работе предложен метод одновременного определения следующих параметров полупроводников: толщины, электропроводности в широком интервале температур, энергии активации примеси, эффективной массы, коэффициентов рассеяния носителей заряда, также концентрации легирующей примеси [1]. В особенную группу могут быть выделены сверхвысокочастотные микроволновые способы [2-4]. СВЧ способы принадлежат к классу так, называемых бесконтактных способов, к которым относят еще способ вихревых токов, квазиоптические, оптические и электронографические способы.

Особое место среди бесконтактных методов занимают сверхвысокочастотные (СВЧ) методы. Определение искомых параметров осуществляется путём анализа зависящих от неизвестных параметров частотных зависимостей коэффициента отражения или пропускания СВЧ излучения от исследуемого образца. Данные методы обладают рядом существенных преимуществ. Они позволяют измерять одновременно несколько параметров на одном образце на одной установке, не влияя на измеряемые параметры в процессе измерений. Более того, большинство полупроводниковых приборов работают на сверхвысоких частотах, поэтому важно знать параметры материала именно на СВЧ.

Целью данной работы является проведение эксперимента по одновременному определению электропроводности, толщины, эффективной массы, коэффициентов рассеяния носителей заряда, концентрации и энергии активации легирующей примеси полупроводниковых материалов по спектрам отражения СВЧ-излучения.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- проведение критического анализа литературы по теме: измерение параметров полупроводников на СВЧ;
- провести вывод соотношения, связывающего значение электропроводности с определяемыми параметрами и температурой;
- проведение компьютерного эксперимента по одновременному определению параметров полупроводникового образца в программном пакете Mathcad15;
- проведение экспериментального исследования по одновременному определению электропроводности, толщины, эффективной массы, коэффициентов рассеяния носителей заряда, концентрации и энергии активации легирующей примеси параметров полупроводника;
- сделать выводы.

В ходе выполнения дипломной работы был проведен эксперимент по одновременному определению параметров полупроводников легирующей примеси полупроводниковых материалов по спектрам отражения СВЧ-излучения.

Образцы представляют собой:

1. кремний, легированный бором ($\Delta W_B = 0,045$ эВ);
2. кремний, легированный сурьмой ($\Delta W_{Sb} = 0,043$ эВ);
3. в качестве диэлектрика был подобран фторопласт (толщина - 29 мм).

Дипломная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 50 источников. Общий объем диплома составляет 78 страниц, включая 20 рисунков и 1 таблицу.

1 Основные свойства полупроводников

В первой части дипломной работы рассказывается о полупроводниках и их основных свойствах.

Полупроводники как определенный класс материалов, были популярны ещё с конца XIX века, но лишь только теория твердого тела разрешила

понять их индивидуальность. Полупроводниками называют вещества, обладающие электронной проводимостью, которая занимает промежуточное состояние среди изоляторов и металлов [5].

Полупроводники — это материалы, кристаллизирующиеся в решётке типа алмаз. Подобная решетка представляет собой тетраэдр, по вершинам которого размещены четыре атома, вокруг атома находящегося в центре тетраэдра.

Энергетическими уровнями называют допустимые значения энергии электрона. Чем дальше орбита электрона располагается от ядра, тем выше уровень энергии принадлежит данной орбите. Создавая энергетические зоны, энергетические уровни смещаются при взаимодействии атомов.

Валентную зону (ВЗ) формируют энергетические уровни валентных электронов. Выше ВЗ располагается зона проводимости (ЗП). Зона проводимости состоит из уровней свободных электронов, которые потеряли связь с атомом. Между ВЗ и ЗП расположена запрещенная зона (ЗЗ). Запрещенная зона представляет собой зону, которая не может быть занята электронами [5].

Твердые тела возможно поделить на 3 группы: проводники; полупроводники и диэлектрики.

Механизмы рассеяния в полупроводниках можно разделить на несколько видов: рассеяние на тепловых колебаниях решетки; рассеяние на ионах примеси; рассеяние на нейтральных атомах; сложный механизм рассеяния и другие механизмы рассеяния.

2 Методы измерения полупроводниковых параметров

Во второй части дипломной работы рассказывается о методах измерения полупроводниковых параметров.

Выбор тех или иных способов определения параметров зависит от особенностей образца, вероятность производства электрических контактов, геометрической формы. В идеале метод должен быть неразрушающим и не требующим дополнительной подготовки исследуемого образца.

Для нахождения электрофизических характеристик диэлектрических и полупроводниковых материалов и структур возможно применять зондовые, вольт-фаррадные методы, методы, связанные с эффектами Холла, магнитосопротивления, фотопроводимости и так далее [1-4]. Вышеуказанные методы относятся к контактным так как их использование всегда связано в необходимости создания контакта с исследуемым образцом и часто их использование связано с разрушением исследуемого материала [2,4-6].

К бесконтактным методам относятся методы вихревых токов, квазиоптические, оптические и электронографические методы. Так же к этому классу относятся СВЧ методы. В основе СВЧ методов лежит определение спектра отражения, взаимодействующего с образцом сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения.

1. По используемому физическому явлению СВЧ методы измерений делят на методы, основанные на: поглощении СВЧ волны свободными носителями заряда; инерционности движения носителей заряда в СВЧ поле; вращении плоскости поляризации электромагнитной волны в магнитном поле; резонансных эффектах (циклотронный резонанс, например).

2. По типу используемой электродинамической системы можно выделить методы: основанные на использовании линии передачи (волноводные, коаксиальные, полосковые); мостовые; резонаторные – основаны на использовании СВЧ резонаторов различного типа.

3. По взаимному расположению образца и электродинамической системы выделяют способы нахождения: проходными системами – исследуемый образец помещается внутрь волновода или резонатора; накладными системами – образец прикладывается к отверстию связи, выполненному в измерительной ячейке [1,3,5].

3 Способы определения параметров полупроводников СВЧ методом измерений

В третьей части дипломной работы рассказывается о способах определения параметров полупроводников СВЧ методом измерений.

Одновременное определение характеристик полупроводниковых слоёв таких, как электропроводность и толщина волноводными СВЧ методами, не представляется возможным ввиду того, что существуют различные сочетания значений отмеченных характеристик, в присутствии которых наблюдается одна и та же частотная зависимость коэффициента отражения сверхвысокочастотного излучения.

Следовательно, данные измерения частотной зависимости коэффициента отражения R на СВЧ необходимо проводить при различных значениях температуры исследуемой структуры и по ним определять искомые параметры полупроводниковых слоёв с учётом известных их температурных зависимостей [6].

При теоретическом анализе рассмотрим распространение $TE_{10}(H_{10})$ - волны в волноводе и ее отражение от структуры полупроводник-диэлектрик (рисунок 1).

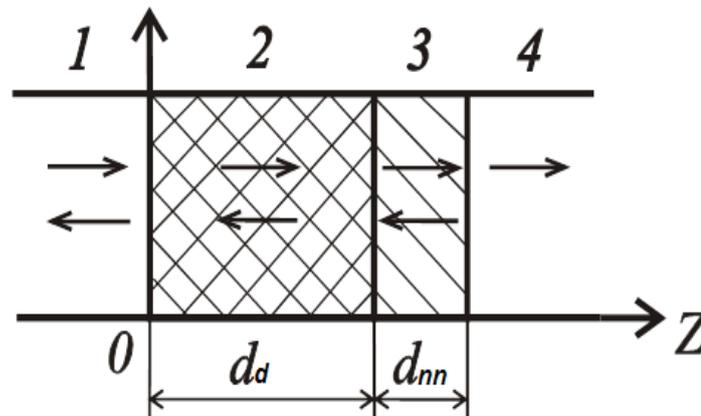


Рисунок 1 – Схема заполнения волновода полупроводниковым образцом:

1,4 – незаполненные области волновода, 2 – диэлектрический слой, толщиной d_d ; 3 – полупроводниковый слой, толщиной – d_{nn}

Используя известные выражения для E и H компонент полей волны H_{10} в волноводе и условия их сшивания на границах областей 1, 2, 3, 4, получим соотношения, определяющие коэффициенты прохождения отражения от структуры, изображенной на рисунке 1.

Для отыскания значений электропроводности (σ) и толщины слоя полупроводника (d_{nn}) по спектру отражения $R(w)$ электромагнитного

излучения может быть применен метод наименьших квадратов, в присутствии осуществления которого находятся такие пары значений параметров σ и d_{nn} , при которых сумма S квадратов разностей экспериментальных $|R_{exp}(i)|^2$ и расчетных $|R_{teor}(\omega_i, \sigma, d_{nn})|^2$, с помощью соотношения значений квадратов модулей коэффициента отражения становится минимальной. Следует отметить, что для применения данной методики необходимо знание характера температурных зависимостей искомых параметров [6].

4 Экспериментальная часть

В четвертой части дипломной работы представлены экспериментальные результаты дипломной работы.

В данной работе представлена возможность синхронного определения толщины полупроводникового образца, электропроводности, коэффициентов рассеяния носителей заряда, эффективной массы, концентрации и энергии активации легирующей примеси полупроводниковых материалов по спектрам отражения СВЧ-излучения.

Использование слоя диэлектрика с фиксированной толщиной и известными параметрами необходимо для обеспечения существенным образом проявляющегося контраста частотной зависимости коэффициента отражения от параметров исследуемой структуры. Диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрика подбираются таким образом, чтобы в используемом для измерений диапазоне частот находился минимум коэффициента отражения, обусловленный наличием диэлектрика. Наличие минимума в вышеуказанной зависимости позволяет точнее установить искомые характеристики при решении обратной задачи ввиду того, что погрешность определения частоты измерительной аппаратуры в несколько раз меньше погрешности в определении амплитуды волны.

Для нахождения значений толщины слоя полупроводника (d_{nn}) и электропроводности (σ) по диапазону отражения электромагнитного

излучения $R_{exp0}(\omega_i)$ и $R_{exp1}(\omega_i)$ использована методика, изложенная в третьей главе.

С помощью жидкого азота в условиях данного эксперимента удается достичь температур порядка 120-140 К, которых вполне достаточно для использования предложенной методики. В данном интервале температур преобладающим остается механизм рассеяния на акустических фононах, а условие малости температур не выполняется.

На рисунок 2 приведены экспериментальные зависимости коэффициента отражения $R(f)$ от частоты падающего СВЧ-излучения от измеряемой структуры (образец р-типа), целиком заполняющей поперечный разрез волновода, при температурах 123 и 133 К. Видно, что с изменением температуры на 10 К происходит значительное изменение зависимости коэффициента отражения от частоты, что (при известном значении d_{nn}) позволяет определить температурную зависимость электропроводности кремния.

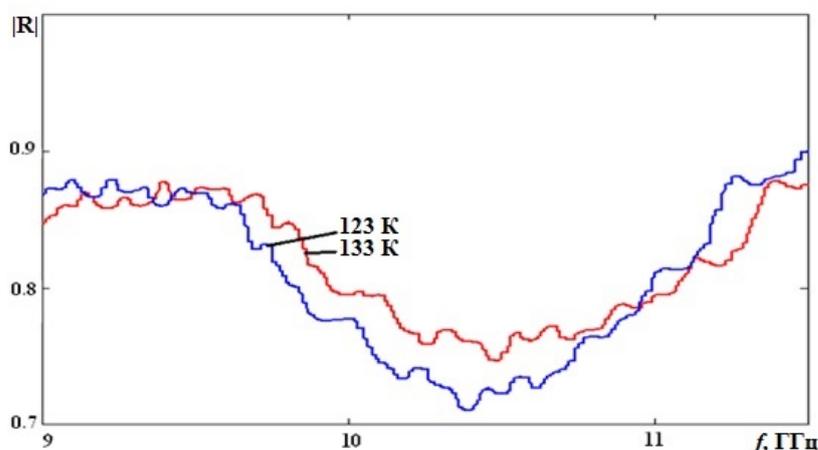


Рисунок 2 – Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного спектра от измеряемой структуры диэлектрик - полупроводник р-вида при температурах 123 и 133 К

Значения электропроводности и толщины полупроводникового образца были определены методом наименьших квадратов. Применяя числовые итерационные способы с помощью компьютера, в предлагаемом интервале искомых параметров проводился

переборка абсолютно всех допустимых значений с шагом, характеризуемым требуемой верностью, в дальнейшем интервал сужался, а шаг уменьшался и так далее, что позволило конкретно установить желанные толщину и электропроводность.

Так как, толщина исследуемого образца предполагается неизменной во всем диапазоне температур, то, измерив спектр отражения СВЧ излучения при низкой температуре и решив однопараметровую обратную задачу, можно найти значение электропроводности, соответствующее данной температуре. Значения электропроводности были рассчитаны для 123 и 133 К.

На рисунок 3 показана вычисленная в соответствии с исходными измерениями температурная зависимость электропроводности образцов *p*-вида 1 и вычисленная 2, построенная с применением значений характеристик полупроводника, установленных предлагаемым способом. Также показана температура полной ионизации примеси 4, нижняя 3 и верхняя 5 границы физически значимого интервала температур.

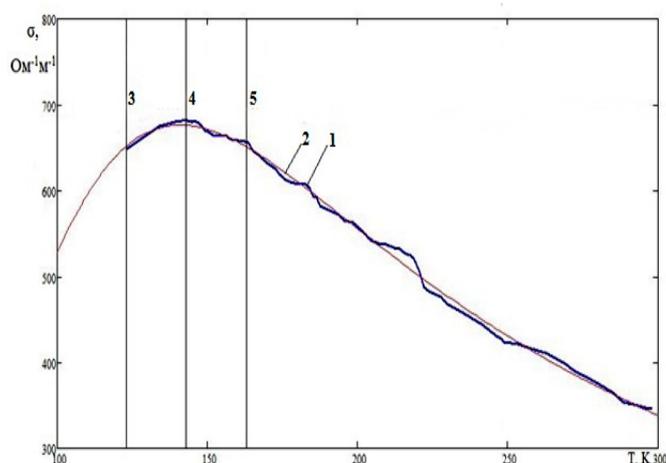


Рисунок 3 – 1 – опытным путем установленная температурная зависимость электропроводности образца *p*-типа; 2 – температурная зависимость электропроводности образца *p*-типа, полученная вычисленным методом; 3 – нижняя граница существенного интервала температур, применяемого при нахождении характеристик образца *p*-типа; 4 – температура абсолютной ионизации примеси; 5 – верхняя граница физического интервала температур

В следствиипостановленияобратной задачи предлагаемым методом былиустановленысоответствующеезначенияжеланныххарактеристик, представленные в таблице 1.

Таблица 1 –Параметры исследуемых полупроводников

	Образец р-типа	Образец n-типа
Толщина полупроводникового образца d_{nn}	$d_{nn} = 407 \text{ мкм}$ (409 мкм)	$d_{nn} = 358 \text{ мкм}$ (360 мкм)
Энергия активации примеси ΔW	бора в кремнии $\Delta W_B = 0.047 \text{ эВ}$ (0.045 эВ)	сурьмы в кремнии $\Delta W_{Sb} = 0.042 \text{ эВ}$ (0.043 эВ)
Эффективная масса m_p^*, m_n^* ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$) — масса свободного электрона	дырок $m_p^* = 0,41 \cdot m_e$ (0,42 $\cdot m_e$)	электронов $m_n^* = 0,28 \cdot m_e$ (0,27 $\cdot m_e$)
Электропроводность σ при температуре 125 К	$\sigma = 652 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$\sigma = 135 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$
Электропроводность σ при температуре 298 К	$\sigma = 342 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$\sigma = 38 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$
Концентрация примеси легирующей примеси N_A, N_D	бора $N_A = 9,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($1,02 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$)	сурьмы $N_D = 5,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($5,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$)
Коэффициент рассеяния носителей заряда на ионах примеси a при температуре 298 К	$a = 20 \text{ Кл/В} \cdot \text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{3/2}$	$a = 281 \text{ Кл/В} \cdot \text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{3/2}$
Коэффициент рассеяния носителей заряда на фононах b	$b = 9,9 \cdot 10^6 \text{ Кл} \cdot \text{К}^{3/2} / \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}$	$b = 2,4 \cdot 10^7 \text{ Кл} \cdot \text{К}^{3/2} / \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}$

В скобках приведены значения из справочника и результаты независимых измерений.

В следствии решения обратной задачи предлагаемым методом былиустановленысоответствующеезначенияискомыххарактеристик, собственно что в границахпогрешностиотвечаетитогамнезависимыхизмерений толщины с поддержкой микрометра, табличным значениям энергии активации сурьмы и

бора в кремнии [7] и эффективной массы электронов и дырок [8],
итогамрешенияобратнойоднопараметровойзадачипо нахождению
электропроводности признакомыхинных параметрах,
итогамиизмеренияскопления примеси способом плазменного резонанса и
вычисленным значениям коэффициентов рассеяния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы была показана возможность
одновременного определения сразу нескольких характеристик
полупроводникового слоя СВЧ методами измерения.

В результате снятия и анализа частотных зависимостей коэффициентов
отражения от структуры диэлектрик-полупроводник были определены:
электропроводность в широком интервале температур, толщина
полупроводникового слоя, энергия активации примеси, эффективная масса,
коэффициент рассеяния носителей заряда и концентрация легирующей
примеси. В качестве исследуемых образцов нами были выбраны кремний,
легированный бором, и кремний, легированный сурьмой.

Достоинства представленного в работе способа определения
параметров полупроводников обусловлены тем, что он относится к
бесконтактным методам измерения. Это позволяет проводить измерения с
высокой точностью, не влияя на исследуемые параметры в процессе
измерения.

Таким образом, были успешно решены основные поставленные задачи.
А именно, проведение модельного эксперимента по одновременному
определению параметров полупроводникового образца и проведение
экспериментального исследования по одновременному определению шести
параметров полупроводникового слоя. Следует отметить, что значения
параметров на СВЧ и постоянном токе могут не совпадать, а нами измерены
параметры именно на СВЧ.

Данный метод может найти широкое применение для контроля параметров полупроводниковых пластин при одностороннем доступе к изделию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Коган И. М., Тамарчак Д. Я., Хотунцев Ю. Л. Автодины. // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. 1984. Т. 33. С. 3 - 175.
- 2 Усанов Д. А., Посадский П.В. Детекторный эффект в усилителях на диодах с переносом электронов. – Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 5. С. 1085 - 1086.
- 3 Усанов Д. А., Безменов А. А. Детектирование СВЧ полевыми транзисторами, работающими в активном режиме // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1986. № 2. С. 19 - 21.
- 4 Киреев П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев, М.: Высш. шк., 1975. 584 с.
- 5 Шалимова К. В. Физика полупроводников/ К.В.Шалимова К.В. -М.: Изд. "Энергия" 1976. - 400 с.
- 6 Скворцова А., Литвиненко О. В., Орлова М. Определение констант деформационного потенциала n -Si, p -Si по концентрационному аугармонизму. — Физика и техника полупроводников, 2003, т. 37, № 1, с. 17—21.
- 7 Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н.Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения. – Известия вузов. Электроника, 2011, № 4, с.71–77.
- 8 Усанов Д.А., Постельга А.Э. Определение толщины, электропроводности и энергии активации примеси полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения. – Дефектоскопия, 2014, № 5, с. 60–68.