

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела

**Измерение эффективной массы полупроводников р и n типа
бесконтактным сверхвысокочастотным методом**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 411 группы
направления 11.03.04 Электроника и наноэлектроника
факультета нано- и биомедицинских технологий

Буденная Мария Евгеньевна

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.Э. Постельга

инициалы, фамилия

И.О. Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Удельное электросопротивление и эффективная масса в полупроводниковых материалах являются наиболее важными характеристиками, влияющими на область применения, качество материала и итоговую стоимость. Измеряют эти параметры необходимо на любом предприятии, которое занимается полупроводниковыми материалами и приборами на их основе. Наиболее распространённым методом измерения является зондовый метод. Однако, у него существует недостаток – из-за малых толщин измеряемых объектов и исключительной твёрдости зондов измерения зондовыми методиками являются разрушающими: в месте контакта зонда с полупроводником создаётся локальное механическое нарушение поверхности. высокочастотный метод отвечает требованиям бесконтактности, однако имеет существенные ограничения по толщине измеряемых образцов (не менее 0,1 мм и не более 1 мм) и не позволяет измерять сопротивления выше 200 Ом·см. Таким образом, сверхвысокочастотный (СВЧ) метод, который заключается в поглощении СВЧ сигнала свободными носителями заряда и позволяет определять количество носителей как в тонких плёнках, так и в массивных образцах, является практически единственным неразрушающим методом, который применим для контроля параметров микронных и субмикронных структур.

Целью настоящей работы является проведение эксперимента по одновременному определению толщины полупроводникового образца, его электропроводности, энергии активации легирующей примеси и эффективной массы по спектру отражения СВЧ излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести критический анализ литературы, посвящённой методам определения параметров полупроводниковых материалов.
2. Выполнить серию экспериментов по измерению спектра отражения СВЧ излучения в диапазоне 8-12 ГГц от исследуемой структуры при различных значениях температуры.

3. Решить обратную задачу для определения значений эффективных масс методом наименьших квадратов.

Эффективная масса, величина, имеющая размерность массы, характеризующая динамические свойства *квазичастиц*. Например, движение *электрона проводимости* в кристалле под действием внешней силы F и сил со стороны кристаллической решётки может быть описано как движение свободного электрона, на который действует только сила F (закон Ньютона), но с эффективной массой m^* , отличной от массы m свободного электрона.

Существуют различные методы определения эффективной массы. Наиболее распространёнными являются методы: циклотронного и плазменного резонанса. Недостатками данных методов являются необходимость знания одного из параметров при определении другого и невозможность определения электропроводности, толщины, энергии активации примеси и коэффициентов рассеяния носителей заряда.

Экспериментальное исследование проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 3. СВЧ-излучение от генератора качающейся частоты 1 панорамного измерителя КСВН и ослабления направлялось через коаксиально-волноводный преобразователь 2, вентиль 3 и два направленных ответвителя 5 в волновод 6 и на структуру, полностью заполняющую поперечное сечение волновода и включающую в себя диэлектрический слой 7 и полупроводниковый слой 8, параметры которого необходимо определить. Падающее и отраженное от измеряемой структуры электромагнитное излучение через направленные ответвители 5 направлялось на детекторы 4, сигналы с которых поступали на индикаторный блок 10 и через АЦП 9 в компьютер 11 для анализа.

Существует проблема одновременного измерения диэлектрической проницаемости и толщины образца, помещённого в волновод неразрушимыми методами. Физический смысл диэлектрической проницаемости – уменьшение скорости электромагнитной волны. Из этого

следует, что увеличение диэлектрической проницаемости ведёт к уменьшению скорости длины волны. Это можно трактовать, как увеличение образца – это является проблемой.

Диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной, мнимую часть которой входит электропроводность. У одного и того же полупроводника диэлектрическая проницаемость не меняется, а электропроводность может меняться в зависимости от концентрации и типа легирующей примеси, а также от подвижности.

Поэтому находим электропроводность.

Но также следует учитывать температуру, которая оказывает влияние на подвижность. При изменении температуры полупроводника, изменяется его толщина вследствие температурного расширения, но эти изменения незначительны. Учётом толщины можно пренебречь, но можно и не пренебрегать, так как на результаты это влияние не оказывает. Изменяется существенно только электропроводность полупроводника. При комнатной температуре все примеси становятся полностью ионизованными – а собственные переходы ещё не начинаются. Следовательно можно определить зависимость электропроводности от температуры с помощью зависимости при комнатной температуре. Подвижность определяется, в свою очередь, преобладающим механизмом рассеяния. В полупроводнике учитывается два механизма рассеяния:

Разогрев носителей заряда приводит к увеличению подвижности, а также и увеличению электропроводности. При достижении определённой температуры происходит перегиб – электроны начинают рассеиваться, подвижность уменьшается.

Также в своей работе мы будем учитывать энергию активации, т.е. ту энергию, которую необходимо передать заряду, чтобы преодолеть расстояние между примесным уровнем и дном зоны проводимости. Для этого охладим полупроводник ниже температуры полной ионизации примеси –

примесь деионизируется, электроны вновь попадают на примесный уровень.

$$\sigma = e(\mu_n n_i + \mu_p p_i)$$

В результате можно сделать следующее заключение: удельная электропроводность полупроводника зависит от концентрации электронов и дырок и от их подвижности. С учётом энергии:

$$\sigma = e(\mu_n + \mu_p) n_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

$$n = n_0 \cdot e^{-W/kT}$$

Итак, определив электропроводность и толщину строим график зависимости электропроводности от температуры. Затем из графика находим энергию активации.

После чего была поставлена следующая задача: известны все параметры, кроме эффективной массы. Учитывая недостатки методов циклотронного и плазменного резонанса, к которым относится маленькая температура и большой магнитный резонанс, которые не дают гарантии того, что при комнатной температуре эффективная масса не изменится, будем решать многопараметровую задачу методом последовательного приближения. В результате решения задачи можно убедиться, что полученная эффективная масса совпадает с табличными данными.

Для экспериментального исследования были выбраны два образца: кремний толщиной 400 мкм, легированный галлием ($\Delta W_{Ga} = 0.072$ эВ[12]) и кремний толщиной 360 мкм, легированный сурьмой ($\Delta W_{Sb} = 0.043$ эВ[12]), а в качестве диэлектрика был выбран фторопласт () толщиной 30 мм. Температуру изменяли с применением жидкого азота и регистрировали с помощью термопары.

Для определения значений электропроводности был применен метод, описанный в [13], в котором для каждой из температур проводилось

измерение спектра отражения СВЧ-излучения, а затем, в ходе решения обратной задачи, вычислялось значение электропроводности.

На рис. 4 приведена температурная зависимость электропроводности, построенная по результатам измерений образца p – типа (сплошная линия на рис. 4). Зависимость электропроводности от температуры, построенная с использованием значений эффективных масс электропроводности и плотности состояний, определенных предлагаемым методом, также представлена на рис.4 (прерывистая линия). На рис. 3 показаны также границы диапазона температур, в котором производился расчет (сплошные вертикальные линии).

На рисунке изображена зависимости определяемых значений эффективной массы (a), параметра (коэффициентов рассеяния носителей заряда на фонах) и концентрации легирующей примеси N (b) от количества экспериментальных точек r .

Выводы

Экспериментально реализованы методы одновременного измерения толщины, электропроводности и эффективной массы полупроводниковых образцов. В качестве исследуемых образцов были выбраны кремний, легированный галлием ($\Delta W_{Ga} = 0.072$ эВ[12]), и кремний, легированный сурьмой ($\Delta W_{Sb} = 0.043$ эВ[12]), а в качестве диэлектрика был выбран фторопласт. Температуру изменяли с применением жидкого азота и регистрировали с помощью термопары.

В настоящей работе была решена обратная задача и найдены такие параметры, как:

для образца p – типа:

- эффективная масса электропроводности – $0.39 \cdot m_e$;

для образца n – типа:

- эффективная масса электропроводности – $0.27 \cdot m_e$,

Также были проведены и анализированны зависимости определяемых значений эффективной массы (a), параметра (b) и концентрации

легирующей примеси N (ϵ) от количества экспериментальных точек r . По представленным зависимостям можно сделать заключение, что получение 70 значений является достаточным, для точного определения исследуемых параметров и дальнейшее увеличение количества экспериментальных значений не представляет интереса и не является рациональным.