

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Кафедра физики твёрдого тела

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ ПЛОТНОСТИ
СОСТОЯНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
МАГИСТРА

студентки 2 курса 201 группы

направления 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Подшибякиной Натальи Алексеевны

Научный руководитель

Доцент, к.ф.-м.н

А.Э. Постельга

должность, уч. степень, уч.

подпись, дата

инициалы, фамилия

звание

Зав. кафедрой физики твёрдого тела

Профессор, д.ф.-м.н

А.В.Скрипаль

должность, уч. степень, уч.

подпись, дата

инициалы, фамилия

звание

Саратов, 2019

Актуальность: При отработке технологии изготовления полупроводниковых материалов, конструировании новых типов полупроводниковых приборов, выяснении условий их эксплуатации во многом определяется уровнем развития методов измерений электрофизических параметров полупроводниковых материалов и полупроводниковых структур. В большинстве случаев измерения параметров полупроводников производятся при их включении в цепи постоянного тока, в низкочастотные, реже в высокочастотные цепи. К таким параметрам, в частности, относятся электропроводность, диэлектрическая проницаемость, концентрация, подвижность, эффективная масса носителей заряда и др. Эти параметры зависят от температуры, частоты и напряженности приложенных электрического и магнитного полей, размеров полупроводникового образца и других факторов. Задача измерения этих параметров является актуальной и востребованной практикой [1].

Методы измерения параметров полупроводников очень разнообразны, в их основу положены оптические, электрофизические, магнитоэлектрические и другие эффекты, но задача об одновременном определении нескольких параметров материала остается актуальной.

Отметим, что большое число работ [2-4] посвящено методам определения проводимости, концентрации и подвижности носителей заряда. Измерению же таких фундаментальных параметров, характеризующих квантовомеханические свойства материалов, как эффективная масса электропроводности и эффективная масса плотности состояний уделено сравнительно малое внимание [5].

Знание эффективной массы квазичастиц необходимо для изучения зонной структуры полупроводников, моделирования процессов проводимости и разработки реальных полупроводниковых приборов, поэтому задача по определению эффективной массы носителей в конкретном образце остается актуальной.

В ходе исследования была сформулирована *цель настоящей работы*:

Показать возможность бесконтактного измерения значений эффективных масс электропроводности и плотности состояний в полупроводнике на примере кремния n- и p-типа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести критический анализ литературы, посвящённой методам определения параметров полупроводниковых материалов.
2. Провести измерения электропроводности кремния n- и p-типа при различных температурах.
3. Определить значения эффективных масс путем решения обратной задачи с использованием численных методов.

В первой главе подробно представлены методы измерения параметров полупроводников.

Во второй главе рассматриваются известные методы измерения эффективной массы электропроводности.

В третьей главе подробно описан метод измерения эффективных масс электропроводности и плотности состояний кремния.

Основное содержание работы:

Понятие эффективной массы плотности состояний

Чтобы ввести эффективную массу плотности состояний, нужно сначала найти выражение для плотности состояний:

$$\text{---} \tag{1.1}$$

Чтобы найти плотность состояний в случае многоэллипсоидальной изоэнергетической поверхности, введём в k – пространстве преобразование

$$, \quad , \quad ,$$

Отсюда следует:

$$\text{---} \tag{1.2}$$

Число состояний в элементарном объёме k – пространства и в единице объёма обычного пространства равно

$$\text{---} \tag{1.3}$$

Принимая во внимание закон дисперсии в форме (1.2), получим выражение для плотности состояний

$$\text{---} \tag{1.4}$$

Сопоставляя выражения (1.3) и (1.4), мы видим, что роль изотропной эффективной массы m в случае анизотропного квадратичного закона дисперсии играет величина . Поэтому вводят эффективную массу плотности состояний [6]:

Теоретическое обоснование методики измерений эффективных масс

Данный метод основан на сопоставлении экспериментально полученной температурной зависимости электропроводности образца с теоретической зависимостью, учитывающей температурные зависимости концентрации и подвижности и наличие двух механизмов рассеяния носителей заряда: на фононах и ионах примеси.

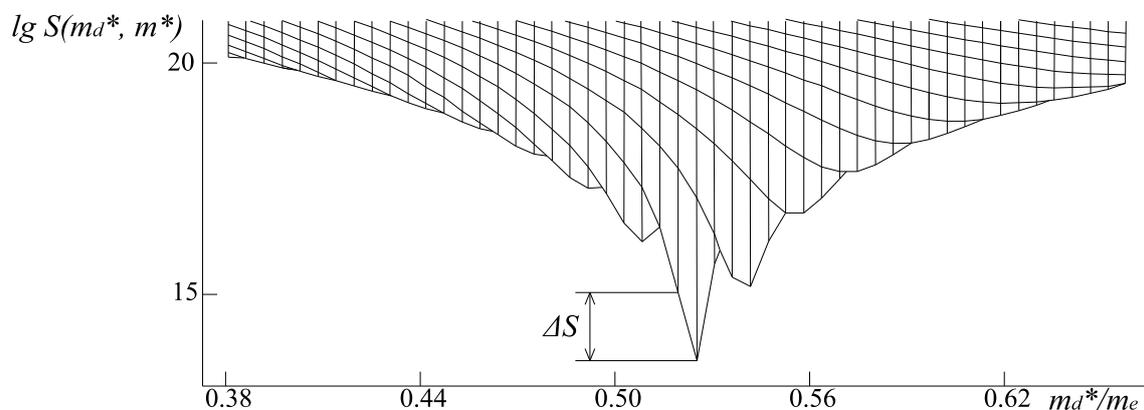
Подставляя в известное соотношение для электропроводности $\sigma = e \cdot n, p \cdot \mu$ [7] зависимости, определяющие подвижность носителей заряд и их концентрацию, можно получить температурную зависимость электропроводности в виде

$$\sigma(T) = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot N \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \hbar^2}{m_d^* \cdot k \cdot T}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)}}{\frac{3 \sqrt{2} \cdot N \cdot E_I^2 \cdot m^{*5/2} \cdot (k \cdot T)^{3/2}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \hbar^4 \cdot c_I \cdot E^{*-1/2}} + \frac{N \cdot 2 \cdot \pi^{3/2} \cdot e^4 \cdot \sqrt{m^*} \cdot g(T)}{2 \sqrt{2} \cdot \varepsilon_L^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot k \cdot T}{2}\right)^{3/2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot N \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \hbar^2}{m_d^* \cdot k \cdot T}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)}\right)}}$$

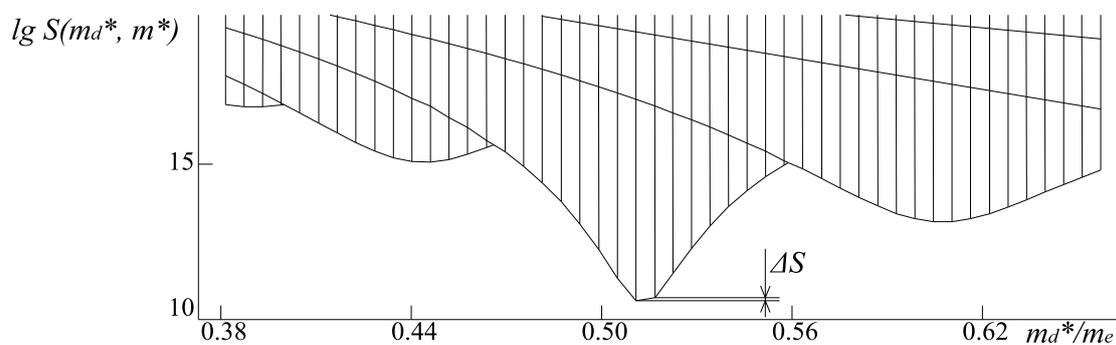
В данную зависимость одновременно входят эффективные массы электропроводности и плотности состояний, благодаря чему, возможно их одновременное определение по экспериментальным температурным зависимостям электропроводности.

В эксперименте для определения значений эффективных масс был использован метод наименьших квадратов. Перед применением данного метода необходимо определить диапазон температур, в котором будет проводиться расчет для определения искомых параметров. Правильный выбор диапазона обеспечивает наибольшую точность в определении значений эффективных масс. Проведенный модельный эксперимент показал, что при выборе диапазона температур, серединой которого является температура, при которой достигается максимальное значение электропроводности), получается

наибольшая чувствительность функции невязок к изменению эффективной массы.



а



б

Рисунок 1 - Логарифмическая зависимость функции невязок от эффективной массы плотности состояний:

а – при расчете в диапазоне температур от 50 до 150 К;

б – в диапазоне температур от 150 до 250 К [8]

Из этих зависимостей видно, что при выборе диапазона температур от 50 до 150 К разница между двумя соседними значениями функции невязок в минимуме (ΔS) значительно превышает аналогичную разницу при расчете в диапазоне температур от 150 до 250 К (в первом случае ΔS составляет не менее 12% от минимального значения, а во втором 3-5%).

На рисунке 2 представлена логарифмическая зависимость функции невязок от эффективных масс, наглядно показывающая, что существует

единственная комбинация эффективных масс, при которой достигается минимум функции невязок, то есть единственное решение.

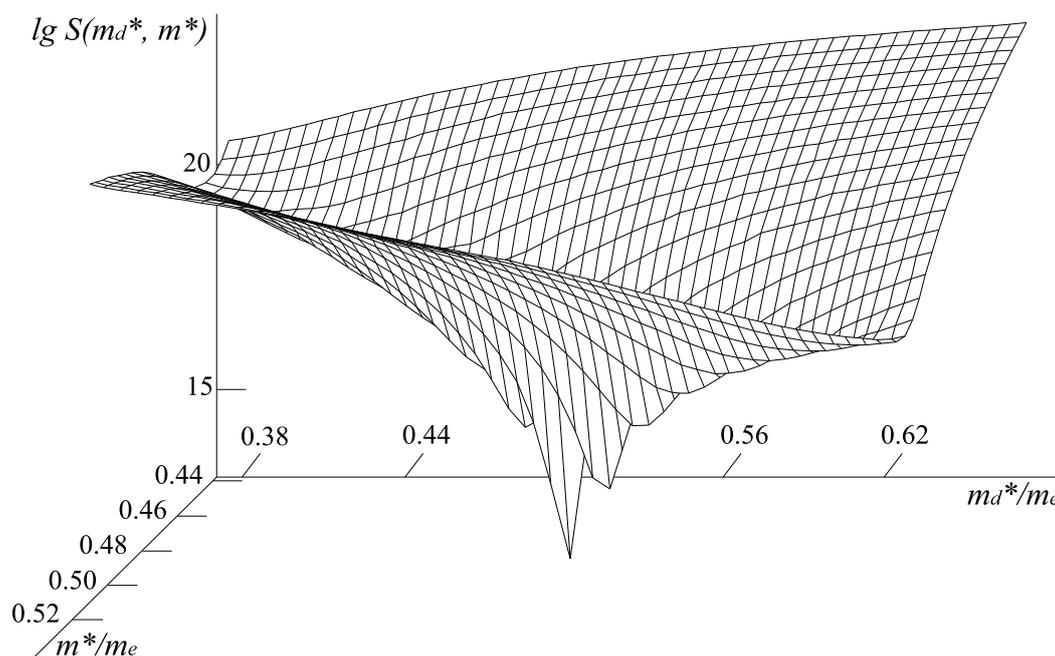


Рисунок 2 - Логарифмическая зависимость функции невязок от эффективных масс [8]

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование проводилось на установке, схема которой приведена на рисунке 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.

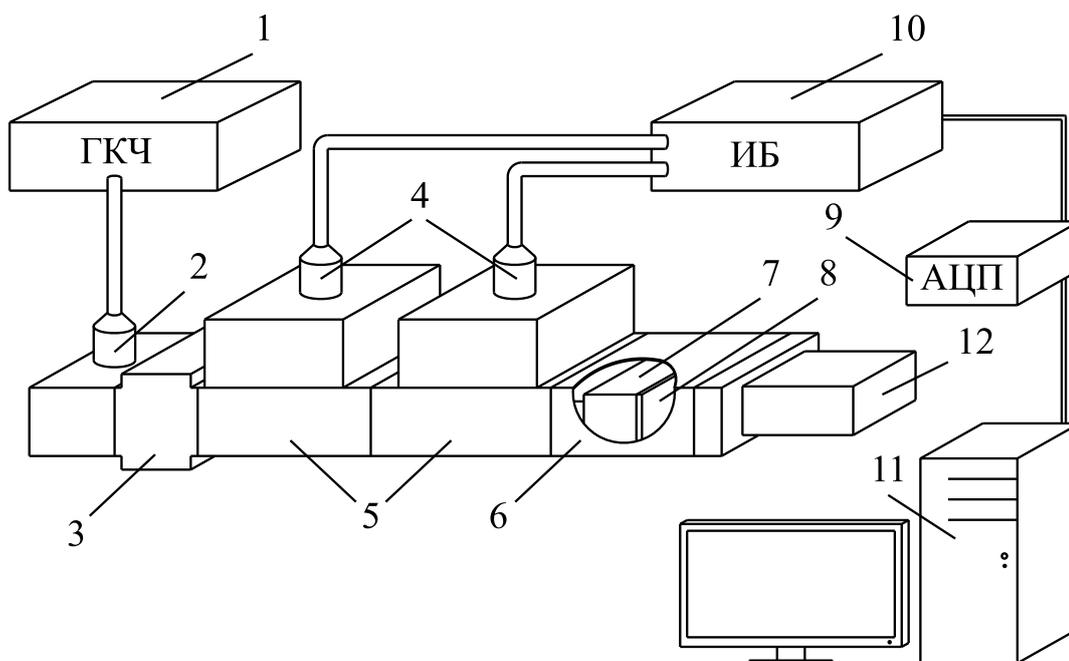


Рисунок 3- Схема установки для измерения частотной зависимости коэффициента отражения: 1 – генератор качающейся частоты, 2 – коаксиально–волноводный преобразователь, 3 – вентиль, 4 – детекторы, 5 – направленные ответвители, 6 – волновод, 7 – слой диэлектрика, 8 – слой полупроводника, 9 – аналогово–цифровой преобразователь, 10 – индикатор КСВН и ослабления, 11 –компьютер, 12 – согласованная нагрузка [8]

Для экспериментального исследования были выбраны два образца: кремний толщиной 400 мкм, легированный галлием ($\Delta W_{Ga} = 0.072$ эВ[20]) и кремний толщиной 360 мкм, легированный сурьмой ($\Delta W_{Sb} = 0.043$ эВ[20]), 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 [2], в котором для каждой из температур проводилось измерение спектра отражения СВЧ-излучения, а затем, в ходе решения обратной задачи, вычислялось значение электропроводности.

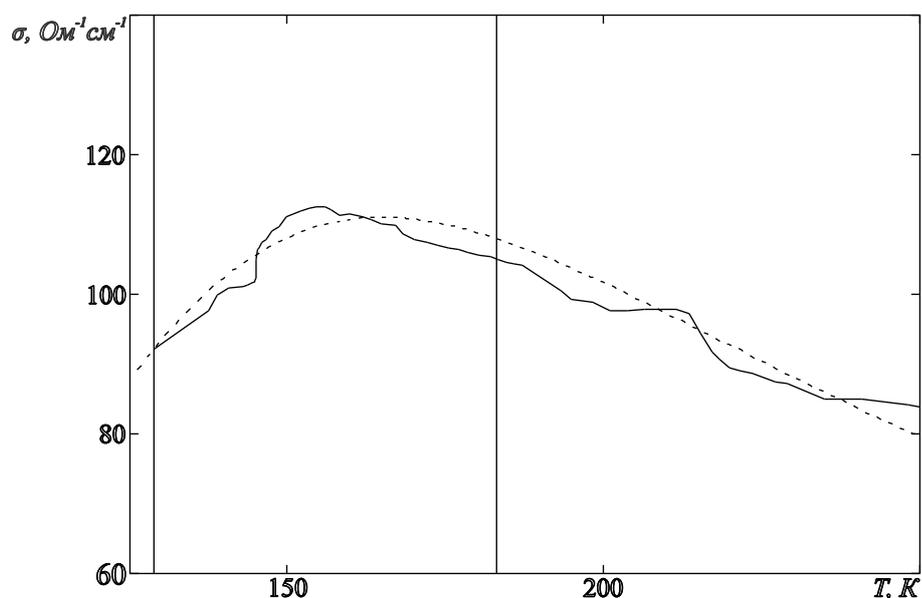


Рисунок 4 - Температурные зависимости электропроводности: сплошная линия – экспериментальная зависимость; прерывистая линия – теоретическая зависимость [9]

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

В результате решения обратной задачи предлагаемым методом были найдены следующие значения параметров: для образца р – типа: эффективная масса плотности состояний – $0.58 \cdot m_e$, эффективная масса электропроводности – $0.39 \cdot m_e$; для образца n – типа: эффективная масса плотности состояний – $1.06 \cdot m_e$, эффективная масса электропроводности – $0.27 \cdot m_e$, что в пределах погрешности соответствует табличным значениям эффективных масс, приведенным в [10]: $0.59 \cdot m_e$, $0.38 \cdot m_e$, $1.08 \cdot m_e$, $0.26 \cdot m_e$ соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения настоящей работы проведён критический анализ методов измерения параметров полупроводников на СВЧ по частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения, показаны их основные преимущества и недостатки перед другими методами, проведены измерения электропроводности при различных температурах.

Таким образом, полученные в работе результаты как компьютерного, так и натурального эксперимента свидетельствуют о возможности бесконтактного определения значений эффективных масс электропроводности и плотности состояний носителей заряда в полупроводниках р- и n-типа с использованием стандартной аппаратуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ильинская Л.С., Подмарьков А. Н. Полупроводниковые тензодатчики.– М. –Л.: Энергия, 1966.– 120 с.
2. Белова И.М., Белов А.Г., Каневский В.Е., Лысенко А.П. Определение концентрации свободных электронов в n-InSb по спектрам отражения в дальней инфракрасной области с учетом плазмон-фононного взаимодействия // Известия вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – № 3. – С. 201–210.
3. Мадьяров В. Р. Измерение параметров электронного переноса в полупроводниках с помощью эффекта Фарадея в миллиметровом диапазоне // Труды БГТУ. – 2016. – № 6. – С.101–105.
4. 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.
5. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Советское радио, 1971. - 376 с.
6. Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. Semiconductor Opto-Electronics. Butterworth&Co (Publishers) Ltd, 1973
7. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников, 2–е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 1984.– 352 с.
8. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Гуров К.А. Измерение эффективных масс электропроводности и плотности состояний бесконтактными сверхвысокочастотными методами. Известия высших учебных заведений. Электроника. 2018. Т. 23. № 1. С. 5-14.
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Измерение параметров полупроводников и диэлектриков на СВЧ – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. – С. 4-11.
10. Бонч–Бруевич В. Л., Калашников К. Г., Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 672 с.