

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР
НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ВОЛНОВОДНЫМ МЕТОДОМ**

Автореферат

студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Матиева Артема Батыровича

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., старший преподаватель

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Е.В. Латышева

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2020

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В производстве современной электроники необходимо максимально точно определять параметры и физические характеристики различных материалов. Обычно бесконтактным методам отдают предпочтения, когда стоит задача исследования полупроводниковых материалов и структур.

Одним из важнейших этапов в технологии производства современных устройств микро- и нанoeлектроники является осуществление контроля электрофизических характеристик слоёв полупроводниковых структур.

Целью настоящей работы было показать возможность одновременного нахождения значений толщины и удельной электропроводности слоев в полупроводниковых структурах в случае, когда в системе реализуются условия для возникновения полуволнового резонанса.

Определить диэлектрическую проницаемость ε_L диэлектрических материалов по спектрам электромагнитного излучения на частоте полуволнового резонанса ω_0 можно по формуле

$$\varepsilon_L = \frac{(\pi/L)^2 + (\pi/a)^2}{\omega_0^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (1)$$

и из решения обратной задачи с использованием метода наименьших квадратов. Для выполнения этого метода сначала находится значение ε_L , при котором сумма $S(\varepsilon_L)$ квадратов разностей экспериментальных $|R_{\text{эксп}}|^2$ и расчётных $|R(\omega, \varepsilon_L)|^2$ и прохождения $|D(\omega, \varepsilon_L)|^2$ значений квадратов модулей коэффициента отражения для двух конфигураций является наименьшей из всех возможных.

$$S(\varepsilon_L) = \sum \left(|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, \varepsilon_L)|^2 + |D_{\text{эксп}}|^2 - |D(\omega, \varepsilon_L)|^2 \right)^2 \quad (2)$$

Выражения для R и D для волновода, содержащего образец, полностью заполняющий его по поперечному сечению:

$$R = \frac{(\gamma_0^2 - \gamma^2)sh(\gamma L)}{(\gamma_0^2 + \gamma^2)sh(\gamma L) + 2\gamma\gamma_0ch(\gamma L)}; \quad (3)$$

$$D = \frac{2\gamma\gamma_0}{(\gamma_0^2 + \gamma^2)sh(\gamma L) + 2\gamma\gamma_0ch(\gamma L)}; \quad (4)$$

Искомое нами значение диэлектрической проницаемости можно рассчитать численными методом с помощью решения следующего уравнения на компьютере:

$$\frac{\partial S(\varepsilon_L)}{\partial \varepsilon_L} = 0 \quad (5)$$

На рис. 1 показаны частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения для диэлектрика (фторопласт), полученные как экспериментальным, так и расчётным путём при значении $\varepsilon_L = 1.974$, определённым из решения обратной задачи с использованием уравнения (2).

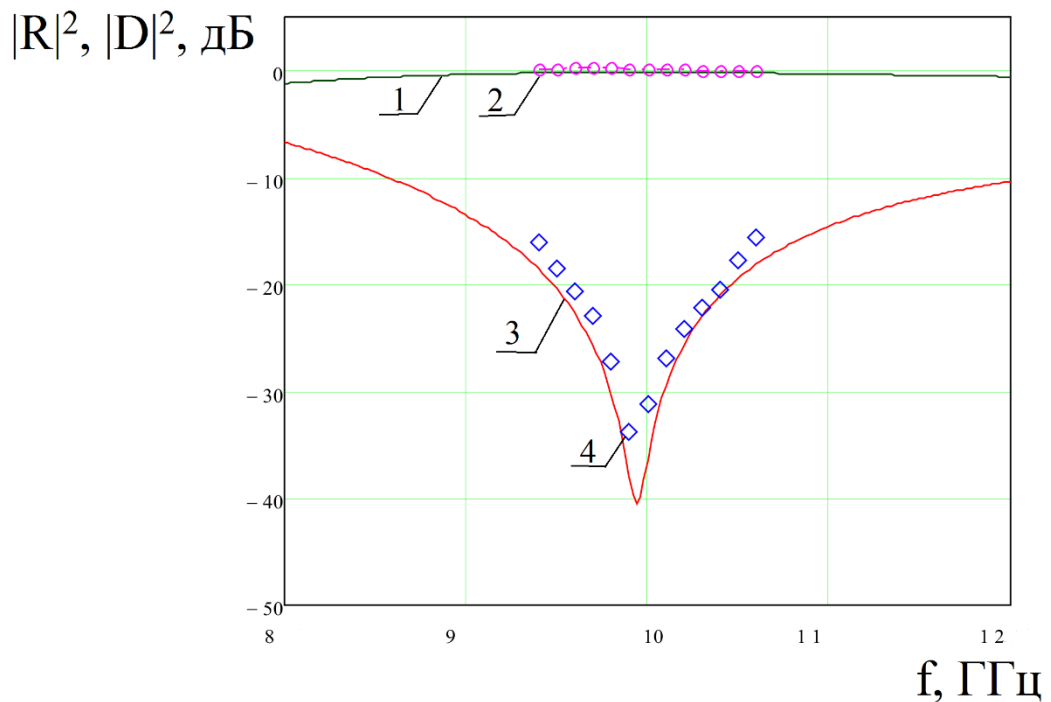


Рис. 1. Экспериментальные (2, 4) и расчётные (кривые 1, 3) частотные зависимости $|D|^2$ (1, 2) и $|R|^2$ (3, 4).

В таблице 1 указаны используемые в ходе работы материалы, их толшины, резонансные частоты, полученные значения диэлектрической

Материал	Толщина	Частота резонанса	ε_L (МНК)	ε_L	σ
Фторопласт	12.16 мм	9.924 ГГц	1.923	1.975	$1.63914 \cdot 10^{-4}$
Текстолит	9.9 мм	8.508 ГГц	3.801	3.755	$1.8014 \cdot 10^{-4}$
Винипласт	9.16 мм	9.932 ГГц	3.088	3.146	$1.85898 \cdot 10^{-4}$

Таблица 1. Характеристики исследуемых материалов.

проницаемости для данных структур, рассчитанные по формуле (2) и полученные с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Параметры полупроводниковых материалов могут быть определены при размещении исследуемой структуры после образца, размеры которого сравнимы с половиной длины волны излучения, распространяющегося в волноводе (рис. 2а).

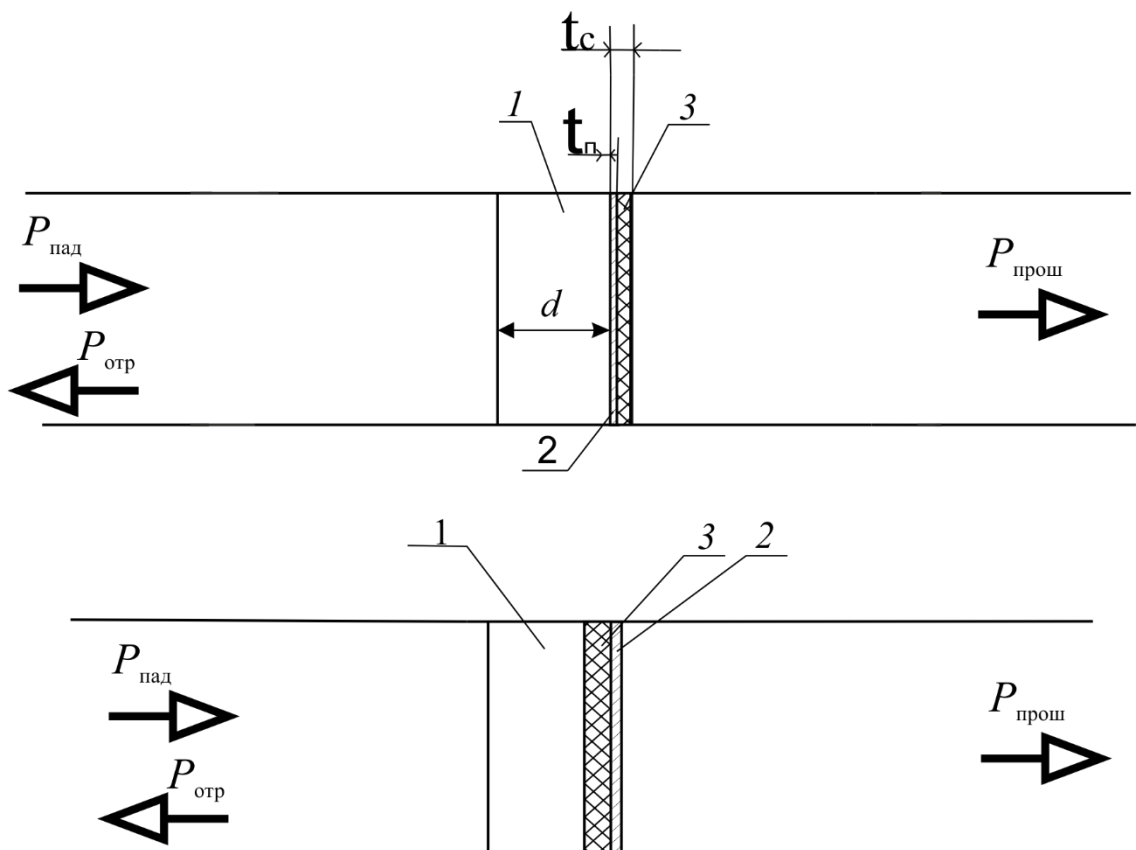


Рис. 2. Схематическое изображение расположения измеряемой структуры в волноводе ($P_{\text{пад}}$, $P_{\text{отр}}$ и $P_{\text{прош}}$ — СВЧ-мощности падающей, отражённой и прошедшей электромагнитной волны). 1 — диэлектрик, 2 — полупроводниковый слой, 3 — полупроводниковая подложка.

Коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с многослойной структурой, выражаются через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N :

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]} \quad (6)$$

Исследуемая структура устанавливалась в прямоугольном волноводе и полностью заполняла его по поперечному сечению. Для этого случая постоянные распространения электромагнитной волны $\gamma_0, \gamma_d, \gamma_n, \gamma_{np}$ соответственно в пустом волноводе, в диэлектрических и полупроводниковых слоях, полностью заполняющих волновод по поперечному сечению, рассчитываются с использованием выражений:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_d \varepsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{np,n} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{np,n}^* \varepsilon_0 \mu_{np,n} \mu_0}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{n, под}^* = \varepsilon_{n, под}' - j\varepsilon_{n, под}''$ – комплексные диэлектрические проницаемости сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

На рис. 3 показаны расчетные частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от частоты зондирующего сигнала для полупроводниковой структуры с различными значениями удельной электропроводности.

Из полученных результатов можно сделать соответствующий вывод: для определённого интервала проводимостей полупроводника при увеличении значений удельной электропроводности уменьшается резонансная частота и значение $|R|^2$. При увеличении толщины материала наблюдается уменьшение значения $|R|^2$. Следовательно, по частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения на СВЧ можно

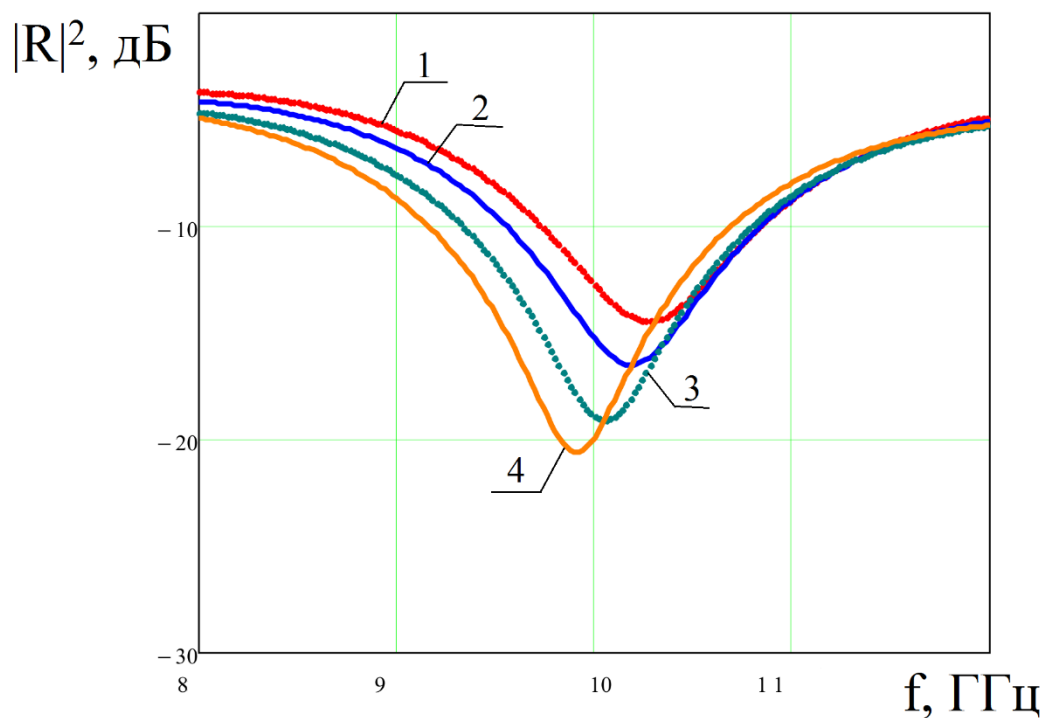


Рис. 3. Частотные зависимости $|R|^2$ для системы диэлектрик – полупроводниковая структура. Значения удельной электропроводности полупроводникового слоя: 1 — $\sigma = 20 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 2 — $\sigma = 40 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 3 — $\sigma = 70 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; 4 — $\sigma = 100 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

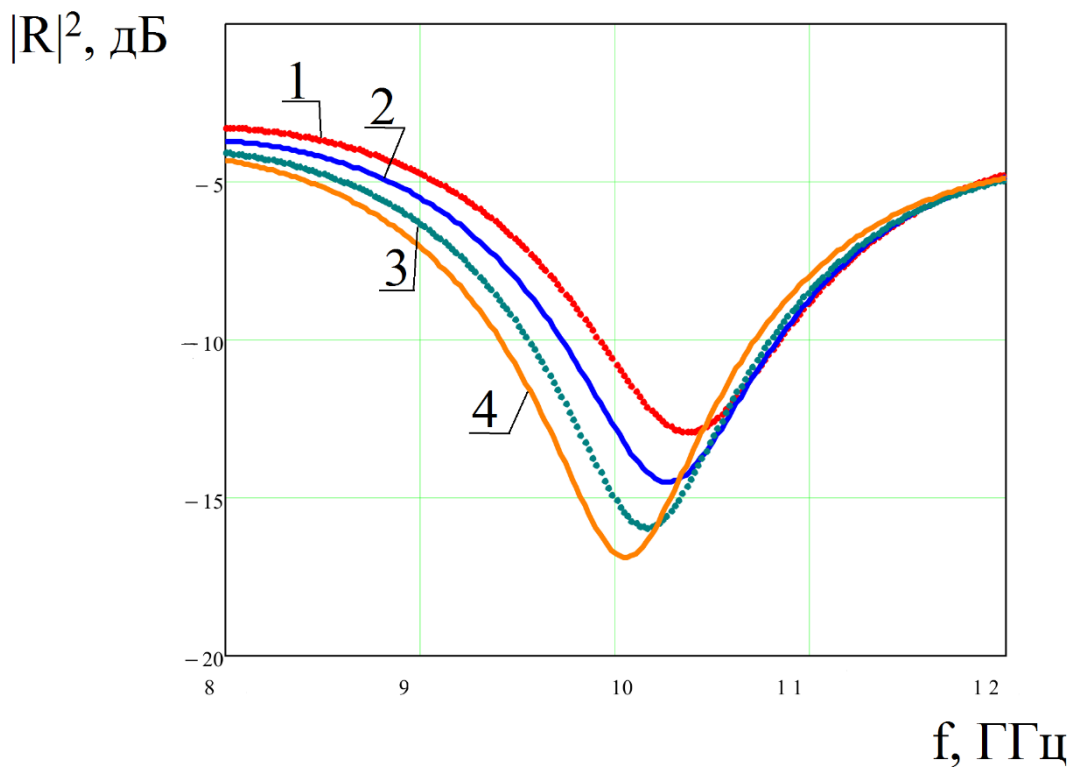


Рис. 4. Частотные зависимости $|R|^2$ для системы диэлектрик — полупроводниковая структура. Значение удельной электропроводности здесь постоянно — $\sigma = 20 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

Значения толщин полупроводникового слоя: 1 — 2 мкм, 2 — 20 мкм, 3 — 40 мкм, 4 — 60 мкм.

определить толщину или удельную электропроводность.

Пусть, мы имеем две конфигурации исследуемой структуры, включающей образец арсенид-галлиевой структуры с эпитаксиальным слоем, выращенным на высокоомной подложке (рис. 2).

Для определения толщины и удельной электропроводности σ_{Π} полупроводникового слоя по спектрам электромагнитного излучения, воспользуемся методом наименьших квадратов: найдем значения σ_{Π} и t_{Π} при котором сумма $S(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})$ квадратов разностей экспериментальных $|R_{\text{эксп}}|^2$ и расчётных $|R(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})|^2$ значений квадратов модулей коэффициента отражения и прохождения ($|D_{\text{эксп}}|^2$ и $|D(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})|^2$) для двух конфигураций—является наименьшей из всех возможных:

$$S(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi}) = \sum (|R_{1\text{эксп}}|^2 - |R_1(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})|^2 + |D_{1\text{эксп}}|^2 - |D_1(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})|^2)^2 + (|R_{2\text{эксп}}|^2 - |R_2(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})|^2 + |D_{2\text{эксп}}|^2 - |D_2(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})|^2)^2 \quad (8)$$

Искомое нами значение электропроводности можно рассчитать численными методом с помощью решения системы уравнений на компьютере:

$$\frac{\partial S(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})}{\partial \sigma_{\Pi}} = 0, \quad \frac{\partial S(t_{\Pi}, \sigma_{\Pi})}{\partial t_{\Pi}} = 0 \quad (9)$$

Для того, чтобы «отработать» метод измерений, выполнялась тестовая задача. Сначала были заданы удельные электропроводности и толщины слоёв структуры, размещаемой в волноводе. Значение толщины фторопласта выбиралось равным 19.8 мм, толщина полупроводниковой подложки — 482 мкм, толщина полупроводникового слоя $t_{\Pi} = 19.2$ мкм и его удельная электропроводность $\sigma_{\Pi} = 70 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Далее решалась прямая задача — был произведен расчёт частотных зависимостей коэффициентов пропускания и отражения исследуемой нами структуры, при этом были использованы

выражения (3) и (4). Полученные «начальные» частотные зависимости с погрешностью в 2% были взяты в качестве экспериментальных при решении обратной задачи по нахождению величин полупроводникового материала, которые принимаются в данном случае за неизвестные и подлежат нахождению.

На рисунке 5 продемонстрированы «начальные» и рассчитанные при значениях параметров, определенных с помощью решения обратной задачи, частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения для двух конфигураций исследуемой структуры.

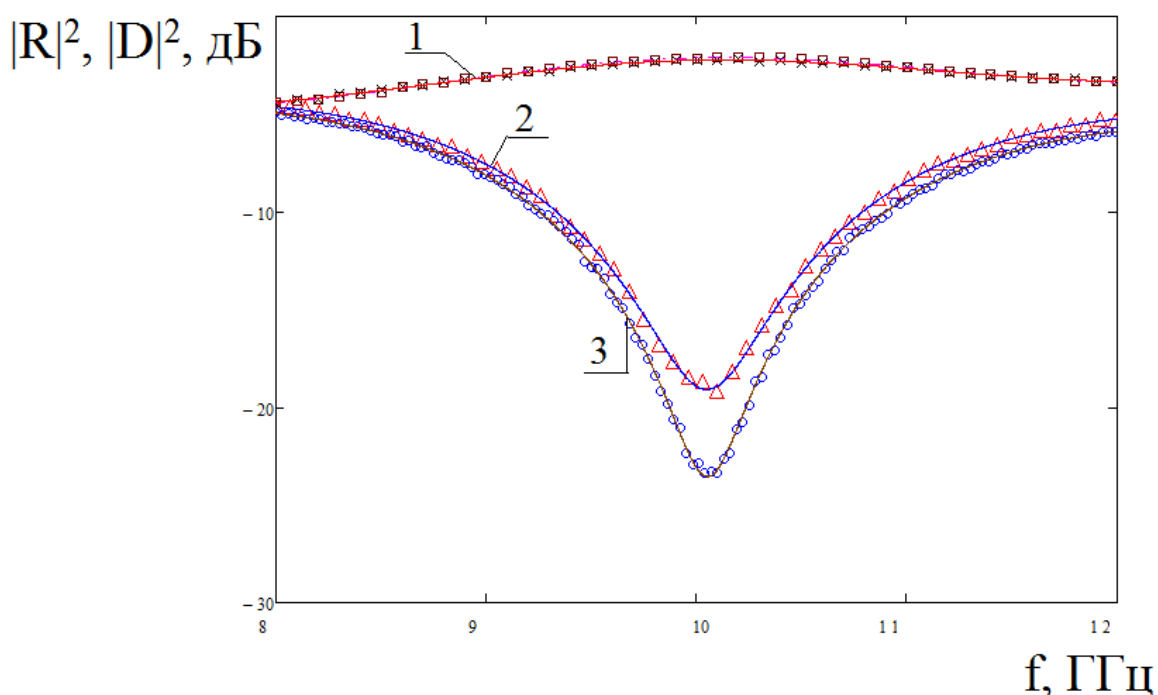


Рис. 5. Частотные зависимости $|R|^2$ (2,3) и $|D|^2$ (1), полученные с погрешностью в 2% , выбранные в качестве экспериментальных ($\circ\square\Delta$) и полученные с помощью расчёта (кривые) при значениях толщины полупроводникового слоя $t_{п} = 17$ мкм и удельной электропроводности $\sigma_{п} = 78.6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, определённых из решения обратной задачи с использованием системы уравнений (9).

Измеряемая полупроводниковая структура помещалась в волновод, полностью заполняя его по поперечному сечению после слоя фторопласта, толщина которого выбиралась равной 19.8 мм. Образцы, которые исследовались в ходе эксперимента, представляли собой эпитаксиальные арсенид-галлиевые структуры, состоящие из сильнолегированного

эпитаксиального слоя и полупроводниковой подложки. Толщина полупроводниковой подложки составляла 482 мкм. Посредством векторного анализатора цепей Agilent PNA N5230A определялись частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с исследуемой структурой.

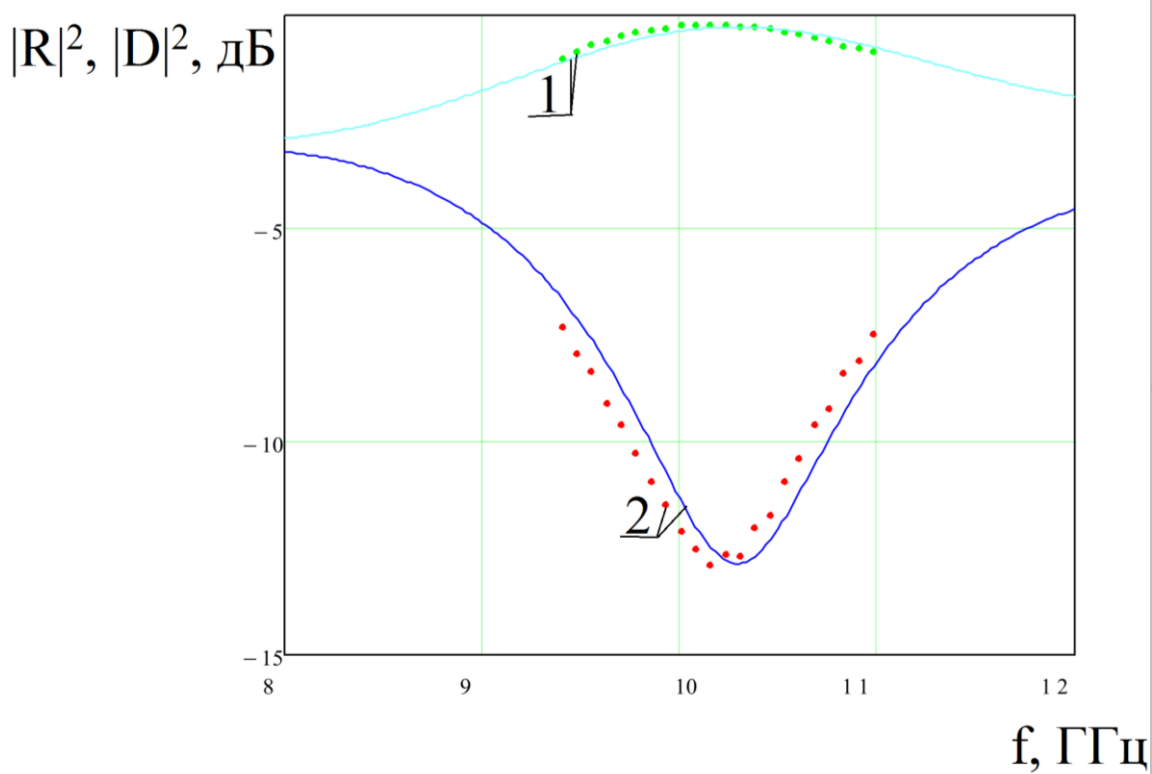


Рис. 6. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) частотные зависимости $|D|^2$ (точки и кривая 1) и $|R|^2$ (точки и кривая 2).

На рисунке 6 продемонстрированы экспериментальные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения и частотные зависимости, рассчитанные при значениях толщины полупроводникового слоя $t_{\text{п}} = 2.6$ мкм и удельной электропроводности $\sigma_{\text{п}} = 8.8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Как видно из графика, наилучший диапазон частот для измерений вблизи интервала от 10 до 10.5 ГГц, в котором явно выражен резонансный характер спектров отражения и прохождения для данной структуры при заданных условиях.

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

1) В диапазоне частот 8-12 ГГц экспериментально исследованы образцы диэлектрических материалов, получены значения диэлектрических проницаемостей методом полуволнового резонанса и с помощью метода наименьших квадратов.

2) Построена математическая модель и проведено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения для структуры, состоящей из трех слоев при различных значениях удельной электропроводности и толщины полупроводникового слоя.

3) В диапазоне частот 8-12 ГГц экспериментально исследованы образцы, представляющие собой эпитаксиальные арсенид-галлиевые структуры, состоящие из сильнолегированного эпитаксиального слоя и полупроводниковой подложки и расположенные двумя способами относительно направления распространения электромагнитной волны.

4) В ходе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований была проанализирована и подтверждена возможность одновременного нахождения значений толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя в полупроводниковых структурах в случае, когда в системе выполняются условия для возникновения полуволнового резонанса.

Список использованных источников

1. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 55 с.
2. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 45–53.
3. Ю.А. Чаплыгин, Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, А.В.Абрамов, А.С.Боголюбов. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения // Известия ВУЗов. Электроника №5. 2006. С. 25-33.
4. Усанов Д.А. Измерение параметров полупроводников, микро-и наноструктур на СВЧ / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б // учебное пособие – Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2012. – 91 с.: ил.
5. Усанов Д.А. Измерение параметров полупроводников, микро-и наноструктур на СВЧ / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б // учебное пособие – Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2012. – 55 с.: ил.
6. Фаддеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента: Учебное пособие. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2002. — 108 с.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В. Использование волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров структуры «нанометровая металлическая пленка – диэлектрик» //Радиотехника. 2016. № 7. С. 10–16.