

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Кафедра физики твердого тела

**Тема: Измерение электропроводности нанометровых слоёв металла в
структурах металлическая наноплётка-диэлектрик по спектрам
отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ- диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления

факультета нано- и биомедицинских технологий

наименование факультета

Шаронова Василия Евгеньевича

фамилия, имя, отчество

Научные руководители

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

Д.В. Пономарев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2020

Тема работы актуальна в настоящее время, т.к. в СВЧ-электронике применяют слоистые структуры, которые создаются методами молекулярно-лучевой эпитаксии с различными материалами разной толщины, применение которых определяется их способностью отражать на различных частотах электромагнитное излучение.

Целью работы является нахождение особенностей отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего со слоистыми структурами, а также решение обратной задачи по нахождению исходных электрофизических параметров структуры.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Получение амплитудно-частотных характеристик квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения от данной слоистой структуры и их исследование.
2. Определение электрофизических параметров многослойной структуры с помощью решения обратной задачи, основанной на использовании спектров отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

Методы исследования: метод матриц передачи, метод наименьших квадратов, метод измерения электропроводности нанометровых слоев металла в структурах металлическая наноплёнка–диэлектрик в слоистых структурах по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения.

Данная бакалаврская работа состоит из пяти разделов: введение, трёх глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, задачи, описана структура работы.

В первой главе рассмотрены основные методы измерения параметров материалов и структур на СВЧ.

Во второй главе описывается моделирование многослойной структуры с помощью метода матриц передачи, а также получение уравнений для нахождения квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения.

Исследуемая структура состоит из слоя диэлектрика толщиной d_d , диэлектрической подложки толщиной d_n , металлического слоя толщиной d_m с электропроводностью σ . (Рис.1).

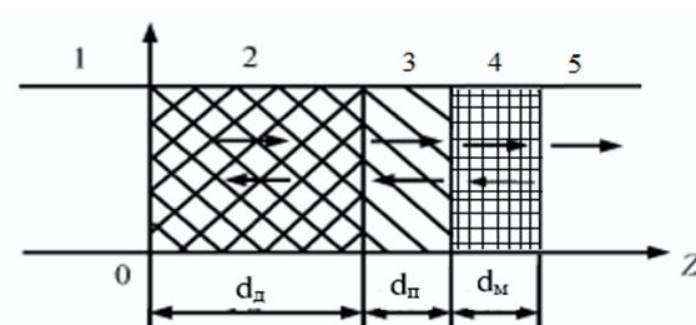


Рисунок 1 - Схема заполнения волновода трёхслойной структурой. 1, 5 – незаполненные области волновода; 2 – диэлектрический слой толщиной d_d ; 3 – диэлектрическая подложка толщиной d_n , 4 – металлический слой толщиной d_m

Модель имела следующие параметры:

- материалом диэлектрического слоя являлся фторопласт с $\epsilon_d = 2$, $d_d = 0.02$ м; - в качестве подложки использовался слой поликора (Al_2O_3) с $\epsilon_n = 9.6$, $d_n = 0.0005$ м;
- в качестве проводящего слоя использовался слой с удельной электропроводностью в диапазоне от 10^3 до 10^5 Ом⁻¹м⁻¹ и толщиной от 0 до 10 мкм. Расчеты проводились в диапазоне частот 6.8-13 ГГц.

Используя метод матриц передач, произведем расчет частотных зависимостей коэффициентов отражения $R(\omega)$ и прохождения $T(\omega)$ при нормальном падении электромагнитной волны на многослойную структуру.

Рассмотрим амплитудно - частотные характеристики квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от трёхслойной структуры при различных физических значениях полупроводникового слоя. Рис 2 (а, б).

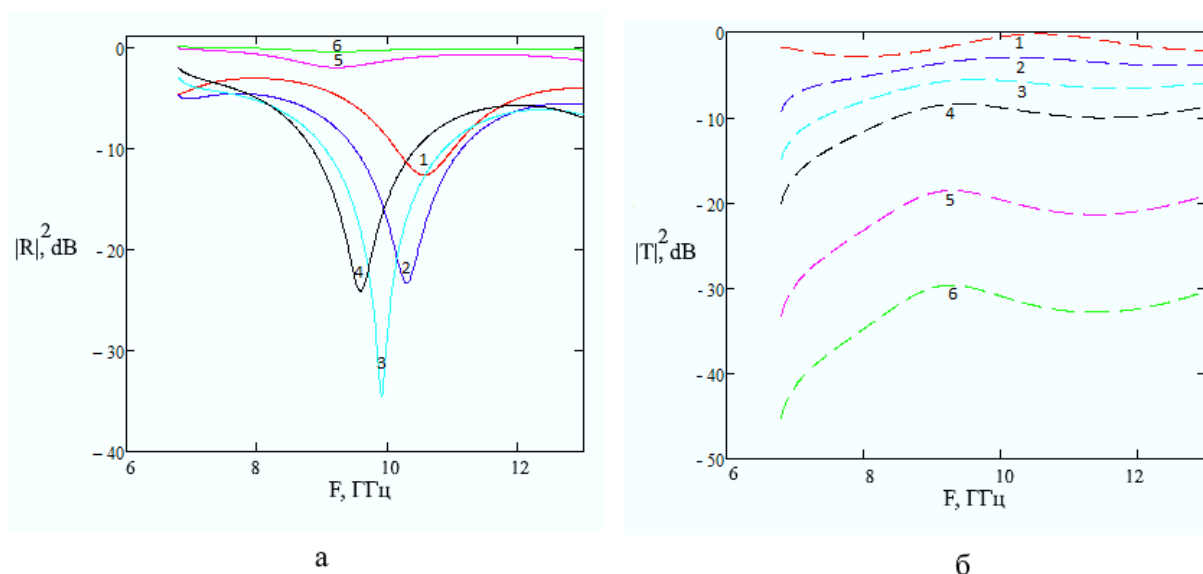


Рисунок 2 - Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) электромагнитной волны от трёхслойной структуры при различных значениях толщины металлической плёнки

Анализируя график, мы видим, что:

- Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с исследуемой структурой, имеют резонансный характер
- При фиксированной величине удельной электропроводности коэффициент отражения на резонансной частоте достигает минимального значения при определенной толщине металлического слоя.

Для того, чтобы можно было точно сказать какая часть непрошедшей волны отражается, а какая поглощается, необходимо рассчитать коэффициент поглощения.

Из результатов расчета получено, что на частоте резонанса при минимальном значении коэффициента отражения наблюдается максимальное значение не только коэффициента прохождения, но и максимальное значение коэффициента поглощения электромагнитного излучения.

На рисунке 3 (а, б) представлены расчетные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения и прохождения электромагнитной волны трёхслойной структуры от электропроводности σ при нескольких фиксированных частотах.

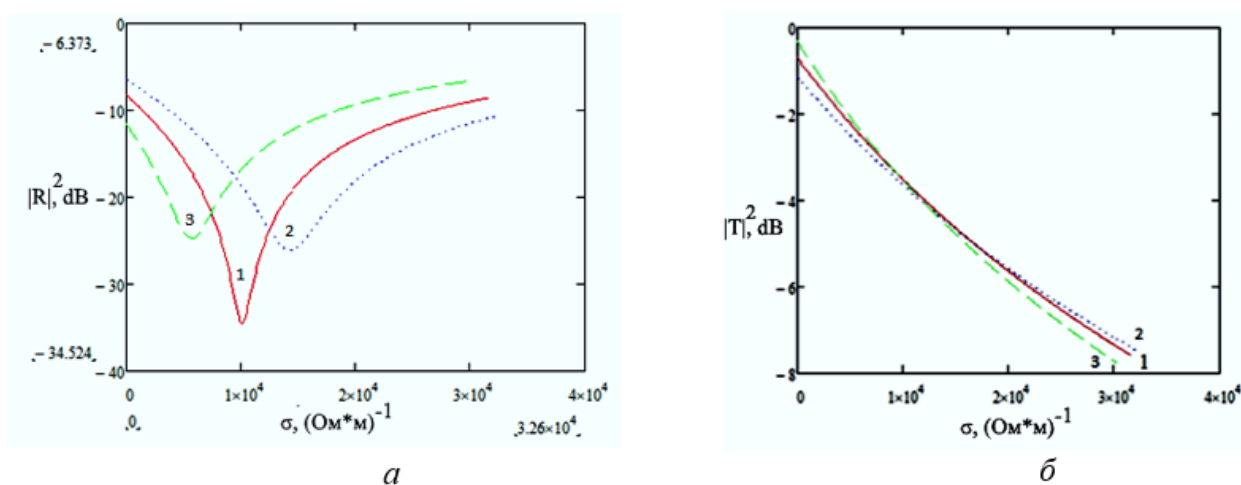


Рисунок 3 - Расчетные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения (а) и прохождения (б) электромагнитной волны от трёхслойной структуры от электропроводности σ

Сделаны выводы:

- Рассчитанные квадраты модуля коэффициентов отражения электромагнитной волны от данной структуры имеют выраженный резонансный характер (см. рис 3, а).
- На частоте $F = 9.9$ ГГц наблюдается минимальное значение коэффициента отражения.

- С увеличением фиксируемой частоты, минимум квадрата модуля коэффициента отражения сдвигается в область более низких значений электропроводности σ .
- При заданной толщине металлического слоя нанопленка частично прозрачна для электромагнитного излучения, что позволяет реализовать полуволновый резонанс, при условии, когда на всей длине структуры укладывается целое количество полуволн.
- Квадраты модуля коэффициентов прохождения при заданных параметрах трёхслойной структуры с увеличением удельной электропроводности металлического слоя в диапазоне значений от 0 до $30000 \text{ (Ом*м)}^{-1}$ монотонно уменьшаются (см. рис 3, а).

На рис. 4 (а, б) представлены расчетные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения и прохождения электромагнитной волны от трёхслойной структуры от электропроводности σ при нескольких толщинах металлического слоя d_M .

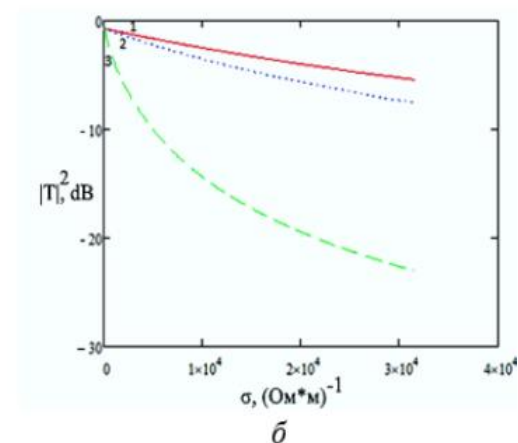
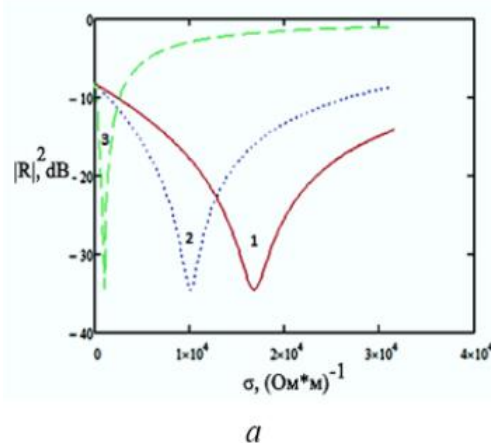


Рисунок 4 - Расчетные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения(а) и прохождения (б) электромагнитной волны от трёхслойной структуры от удельной электропроводности σ при нескольких толщинах металлического слоя d_M

Получаем, что:

- При малой толщине металлического слоя возможна реализации полуволнового резонанса, когда на длине структуры укладывается целое число полуволн.
- При увеличении толщины металлической нанопленки реализуются уже условия четвертьволнового резонанса, когда на длине структуры укладывается нечетное число четвертей волн.
- Минимум квадрата модуля коэффициента отражения, с увеличением толщины металлического слоя, сдвигается в область более малых значений электропроводности σ .
- При больших толщинах металлического слоя квадрат модуля коэффициента отражения достигает высоких значений при существенно меньших величинах удельной электропроводности металлического слоя.

На рис. 5 (а, б) представлены расчетные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения и прохождения электромагнитной волны от трёхслойной структуры от толщины d_M при нескольких значениях электропроводности σ на фиксированной частоте F .

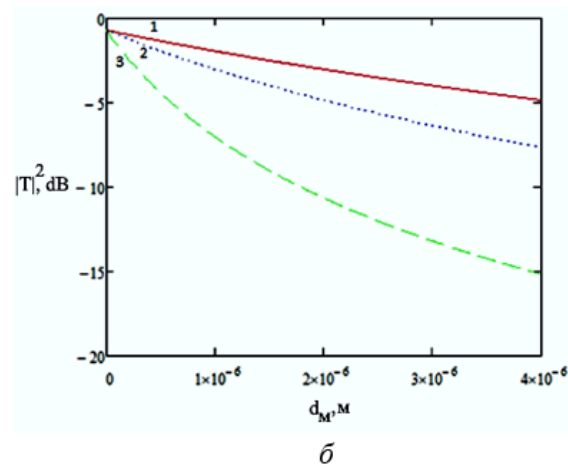
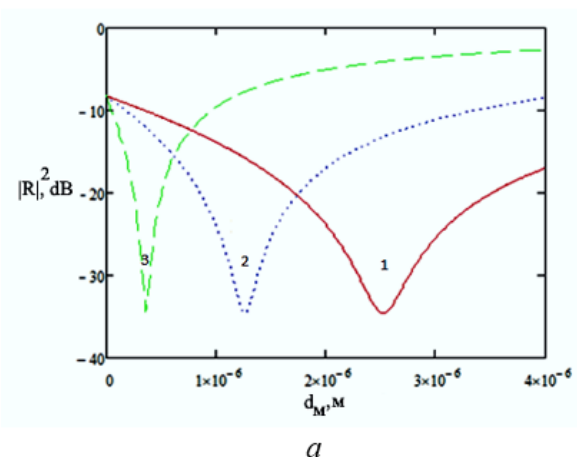


Рисунок 5 - Расчетные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения (а) и прохождения (б) электромагнитной волны от трёхслойной структуры от толщины d_m металлического слоя

Проанализировав графики, видим, что:

- С увеличением толщины металлического слоя и электропроводности σ значение квадрата модуля коэффициента отражения изменяется немонотонно.
- Минимум квадрата модуля коэффициента отражения, с увеличением электропроводности, сдвигается в область меньших значений толщины металлического слоя.
- При увеличении толщины металлического слоя и его электропроводности σ значение квадрата модуля коэффициента прохождения уменьшается (см. 5, б).

В третьей главе представлена модель для решения обратной задачи по нахождению исходных параметров многослойной структуры.

Для нахождения электропроводности σ наноплёнки металлического слоя по частотным зависимостям *коэффициентов отражения* $R(f)$ использовался метод наименьших квадратов. При реализации данного метода находится такое значение параметров σ , при котором сумма $S(\sigma)$ квадратов разностей расчетных значений квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(f, \sigma, d_m)|^2$ и экспериментальных (исходных) $|R_{исх}|^2$, измеренных при различных конфигурациях, становится минимальной.

Для отработки метода измерений было произведено решение тестовой задачи.

Для этого задавались толщины диэлектрического d_d , полупроводникового d_p , металлического d_m слоёв и значение удельной электропроводности металлического слоя рассчитывались частотные характеристики коэффициентов пропускания и отражения данной структуры,

полученные частотные зависимости из решения прямой задачи, выбирались в качестве исходных.

На рис. 6, 7 представлены тестовые (исходные) и рассчитанные с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения для многослойной структуры.

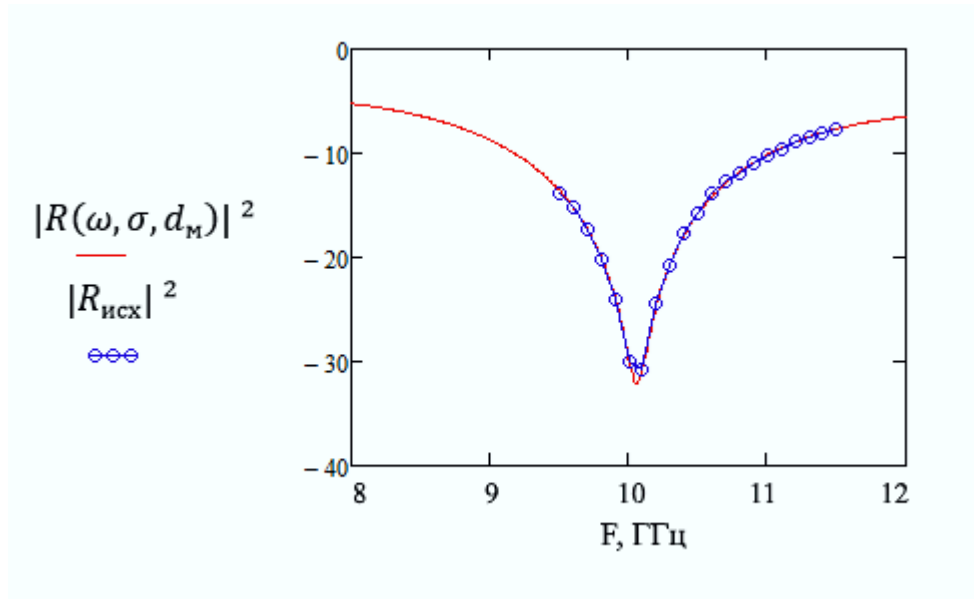


Рисунок 6 - Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения исходные (точки) и рассчитанные (сплошные кривые) с использованием значения удельной электропроводности $\sigma = 9936 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, полученного в результате решения обратной задачи. Исходное значение удельной электропроводности $\sigma = 10000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

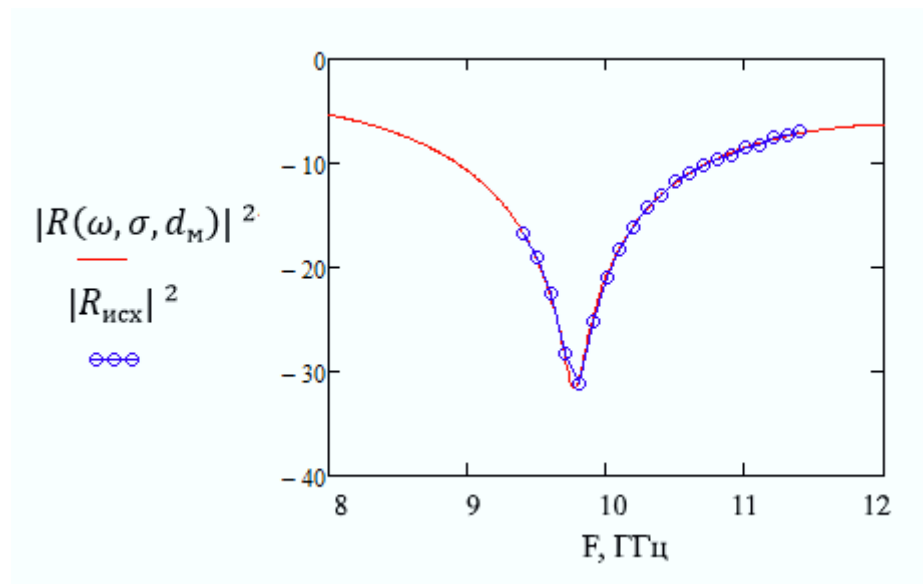


Рисунок 7 - Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения исходные (точки) и рассчитанные (сплошные кривые) с использованием значения удельной электропроводности $\sigma = 19950 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, полученного в результате решения обратной задачи. Исходное значение удельной электропроводности $\sigma = 20000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

В таблице 1 приведены значения сравнения результатов решения обратной задачи с исходными значениями толщин и удельных электропроводностей металлических слоёв, с помощью которых мы осуществили оценку погрешности предложенного метода измерений.

Таблица 1 - Сравнение результатов обратной задачи с исходными значениями, для оценки погрешности предложенного метода измерений

Толщина диэлектрика, м	Толщина Al2O3, м	Толщина металла, м	Задаваемая удельная электропроводность, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	Вычисленная электропроводность в результате решения обратной задачи, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	Задаваемый разброс значений коэффициента отражения	Относительная погрешность результатов вычислений, %

0.02	0.0005	$100 \cdot 10^{-9}$	10000	9900	0.1	1
0.02	0.0005	$200 \cdot 10^{-9}$	10000	9936	0.1	0.64
0.02	0.0005	$300 \cdot 10^{-9}$	10000	9994	0.1	0.06
...						
0.02	0.0005	$100 \cdot 10^{-9}$	20000	19840	0.1	0.8
0.02	0.0005	$200 \cdot 10^{-9}$	20000	19950	0.1	0.25
0.02	0.0005	$300 \cdot 10^{-9}$	20000	19980	0.1	0.1
...						
0.02	0.0005	$100 \cdot 10^{-9}$	27000	26790	0.1	0.778
0.02	0.0005	$200 \cdot 10^{-9}$	27000	26890	0.1	0.407
0.02	0.0005	$300 \cdot 10^{-9}$	27000	27180	0.1	0.667
...						
0.02	0.0005	$100 \cdot 10^{-9}$	5000	4943	0.1	1.14
0.02	0.0005	$200 \cdot 10^{-9}$	5000	4957	0.1	0.86
0.02	0.0005	$300 \cdot 10^{-9}$	5000	5090	0.1	1.8
...						
0.02	0.0005	$1000 \cdot 10^{-9}$	1000	994,3	0.1	0.57

В ходе выполнения бакалаврской работы получены следующие выводы:

1. Рассмотрено взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона со структурой металлическая наноплёнка–диэлектрик. Построены амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего со структурой металлическая наноплёнка–диэлектрик, зависящей от электропроводности и от толщины металлической нанопленки.

2. Из полученных амплитудно-частотных характеристики видно, что значение квадрата модуля коэффициента отражения и прохождения зависит в первую очередь от толщины металлического слоя, значения его электропроводности и фиксируемой частоты. Оперирруя этими параметрами, можно добиться необходимых значений коэффициентов отражения и прохождения исследуемой структуры.
3. Представлено решение измерения удельной электропроводности металлических нанослоев, используя частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Результаты решения отражены в таблице 1.

Список использованных источников

1. Батавин В.В., Концевой, Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур - М.: Радио и связь, 1985. - 264 с., ил. (Измерения в электронике).
2. Валитов Р. А., Сретенский В. Н. Радиоизмерения на сверхвысоких частотах. - М., 1958
3. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов - М.: Энергоатомиздат, 1989 - 208 с.
4. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М. Радиотехника, 2008. - 184с.
5. Ковтонюк Н. Ф., Концевой Ю. А. Измерения параметров полупроводниковых материалов. - М., 1970.
6. Микроэлектронные устройства СВЧ. / Под ред. Г.И. Веселова. – М., 1988. - 280с.
7. Павлов Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. - М., 1975.
8. Силаев М.А. Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. - М.: Сов.Радио, 1970.
9. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981. - 295с.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. - 376 с.
11. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Феклистов В.Б., Скрипаль А.В. Лабораторные работы по курсу «Измерение параметров полупроводников на СВЧ» - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1997. - 140 с.
12. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. - 55 с.
13. Гершензон Е. М., Литвак – Горская Л. Б., Плохова Л. А., Зарубина Т. С. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых

пленок на СВЧ. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Е. А. Федотов - М., 1970, вып. 23. - С. 3 – 48.

14. Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // Доклады Академии Наук. - Т. 448, - № 1, январь, - 2013. - С. 35-37.

15. Усанов Д.А, Скрипаль А.В, Абрамов А.В, Боголюбов А.С. Изменение типа резонансного отражения электромагнитного излучения в структурах,, нанометровая металлическая пленка–диэлектрик // Письма в ЖТФ - 2007 - том 33, вып. 2. – С. 13-22.

16. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. - 2006. Т. 76, вып. 5. - С. 112–117.

17. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В., Феклистов В.Б. Волноводно-диэлектрический резонанс в системе с нанометровым металлическим слоем на диэлектрической подложке // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. -2016. - Т. 16. Вып. 2, I ISSN 1814-733X, ISSN 1817- 3020. - С. 24–28.

18. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В., Феклистов В.Б. Использование волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров нанометровых металлических пленок в слоистых структурах // Труды V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 30 мая–2 июня 2016 г. - С. 290–294.

19. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения

электромагнитного излучения// Известия вузов. Электроника. - 2006. - №6.
- С. 27–35.

20. Усанов Д. А., Коротин Б. Н. Устройство для измерения толщины металлических пленок, нанесенных на диэлектрическую основу // ПТЭ. - 1985 - № 1. - С. 254.

21. Усанов Д.А., Постельга А.Э, Сысоев Н.Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА - № 4(90) - 2011. - С. 71-77.

22. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Изменение типа резонансного отражения электромагнитного излучения в структурах нанометровая металлическая пленка – диэлектрик// Письма в ЖТФ. - 2007. Т. 3 - вып. 2 - с. 13–22.