

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Использование волноводно - диэлектрического резонанса для
определения параметров тонких нанометровых металлических
слоев**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса**

направления 210601 «Электроника и нано-электроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Ручкина Виктора Юрьевича

Научный руководитель

профессор,
доктор физ.- мат. наук

А.В. Скрипаль

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, доктор физ.-
мат. наук.

Д.А. Усанов

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов, 2017

Введение

Определение электрофизических параметров полупроводниковых материалов в нанометровом диапазоне их толщин возможно с применением резонаторных методов. С их помощью, в отличие от классических волноводных методов, обеспечиваются большая разрешающая способность и меньшая погрешность измерений. Традиционные резонаторные методы измерений основаны на использовании металлических объемных резонаторов различных типов. Реализация традиционных резонаторных методов на практике оказывается не всегда возможной ввиду сложности изготовления самих металлических резонаторов. Кроме того, из-за достаточно большого коэффициента температурного расширения у металлических структур характеристики металлических изготовленных резонаторов достаточно критичны к изменениям температуры внешней окружающей среды. Значительный научный и практический интерес представляет поиск новых решений, позволяющих реализовывать методики измерений параметров металлодиэлектрических структур с использованием СВЧ-схем, содержащих минимальное число элементов и обеспечивающих реализацию резонансных особенностей амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), обладающих высокой чувствительностью к вариации параметров сверхтонких проводящих пленок с толщинами, составляющими единицы нанометров.

Одним из таких решений может быть реализация волноводно-диэлектрического резонанса с использованием одиночных элементов, позволяющего реализовать методы определения параметров материалов и структур при возбуждении в электродинамической системе волн высших типов, которые обеспечивают возникновение высокодобротных резонансных особенностей.

Отдельный класс составляют резонансные методы, основанные на эффектах диэлектрического (ДР) и волноводно-диэлектрического (ВДР)

резонансов. Отличительной особенностью этих методов является то, что для их реализации не требуется изготовление специальных металлических резонаторов, так как лежащие в их основе резонансные явления наблюдаются в обычных линиях передачи при помещении в них диэлектрика или полупроводника.

В настоящей работе для реализации высокочувствительного СВЧ-метода измерения параметров нанометрового металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку, рассмотрена возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса при размещении исследуемой структуры симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам латунного волновода.

Выпускная квалификационная работа содержит 3 главы:

1. Анализ СВЧ-методов измерений параметров полупроводниковых и металлодиэлектрических структур.
2. Теоретическое исследование волноводно-диэлектрического резонанса в СВЧ диапазоне при различных параметрах нанометрового металлического слоя
3. Экспериментальное исследование АЧХ резистивно-диэлектрической структуры при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в СВЧ диапазоне.

1 Анализ СВЧ-методов измерений параметров полупроводниковых и металлодиэлектрических структур

Разработка приборов современной твердотельной микро и наноэлектроники достаточно сильно зависит от текущего уровня развития технологии изготовления полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев со значениями толщины в интервале от нескольких нанометров до десятков микрометров. Таким образом появляется

потребность создания высокоточных методов измерений электрофизических параметров входящих в их состав диэлектрических и полупроводниковых материалов и слоёв, для обеспечения технологии производства полупроводниковых структур высокой степенью совершенства.

Одно из требований, предъявляемых к современным методам измерения параметров полупроводниковых материалов, заключается в использовании возможности проводить их бесконтактно, не разрушая материал и не изменяя при этом его свойства. СВЧ-методы относятся к таким бесконтактным методам измерений, являясь при этом оптимальными при исследовании материалов и структур, используемых для создания приборов полупроводниковой СВЧ-электроники.

Резонаторные (резонансные) методы исследований параметров полупроводниковых материалов широко применяются для прецизионных измерений во всех частотных диапазонах. Каждый диапазон диктует свои характерные особенности при построении резонаторной техники.

Для большинства распространенных методов измерений параметров, для расчёта величин n и $\operatorname{tg}\delta$, требуется информация о величине толщины слоя диэлектрика и его точном расположении в резонаторе. Следует отметить что именно механически измеряемые длины и толщины в результате и ограничивают точность измерений.

Для расчёта величины потерь на отражение требуется значение величины связи резонатора с возбуждающим трактом, а также необходимо использовать эталонный отражатель, относительно которого определяются ПО. Конкретные величины коэффициента поглощения рассчитываются только из резонансных частот и ширин резонансной кривой пустого и нагруженного резонатора.

Мостовые методы измерения, основанные на сравнении сигналов в измерительном и опорном каналах, по сравнению с волноводными методами, отличаются высокой чувствительностью, что позволяет повысить точность

измерений и расширить диапазон измеряемых параметров. В качестве основного элемента мостовых схем широкое применение нашел двойной волноводный тройник, представляющий собой соединение прямоугольных металлических волноводов в трех перпендикулярных друг другу направлениях.

Среди методов, позволяющих контролировать электрофизические параметры структур, содержащих полупроводниковые и нанометровые металлические слои, важное место занимают СВЧ-методы, основанные на исследовании характеристик распространения электромагнитного излучения в волноведущих системах при введении в них металлических, диэлектрических и полупроводниковых элементов. Эти методы являются наиболее предпочтительными для определения параметров материалов и структур, используемых при создании приборов СВЧ-электроники, так как информация, полученная с помощью низкочастотных методов, при переходе в СВЧ-диапазон может оказаться недостаточной для конструирования СВЧ-устройств с заданными характеристиками.

С целью повышения чувствительности СВЧ-методов используются электродинамические системы, в которых частотная зависимость коэффициентов отражения и прохождения для измеряемых слоистых структур резко изменяется при вариации параметров входящих в их состав металлических и полупроводниковых слоев. К такого рода системам относятся одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы.

Актуальным является разработка и реализация методов многопараметровых измерений электрофизических характеристик эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов, в частности, одновременное измерение трех и более параметров полупроводниковых слоистых структур, включая параметры полупроводниковой подложки. В том числе для разработки полупроводниковых приборов несомненный интерес

представляет усовершенствование методов определения подвижности свободных носителей заряда в тонких слоях полупроводниковых эпитаксиальных структур.

Характер резонанса диэлектрического включения в волноводе определяется как величиной диэлектрической проницаемости, так и соотношением поперечных размеров образца и волновода. При больших ε ($\varepsilon > 20$) и одновременно малых размерах образца, значительно меньших поперечных размеров волновода, наблюдается чисто диэлектрический резонанс за счет полного внутреннего отражения электромагнитной волны, сконцентрированной в диэлектрике. Электродинамические характеристики линии передачи в данном случае существенной роли не играют. Условие полного внутреннего отражения можно записать в виде

$$\sin \Theta = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}, \quad (2)$$

где ε_1 - диэлектрическая проницаемость среды, в которую помещен диэлектрический резонатор (ДР), ε_2 - диэлектрическая проницаемость диэлектрического резонатора, Θ - угол падения электромагнитной волны на границу раздела. При $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$ полное внутреннее отражение можно получить, согласно (1), при очень малых величинах угла падения, то есть даже при почти нормальном падении волны на границу раздела сред.

2. Теоретическое исследование волноводно-диэлектрического резонанса в СВЧ диапазоне при различных параметрах нанометрового металлического слоя

Исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с образцом, представляющим собой двухслойную структуру, состоящую из пластины поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9.6$) размерами $23 \times 10 \times 1$ мм и $23 \times 10 \times 2$ мм с нанесенным нанометровым

металлическим слоем в виде никелевой пленки толщиной t и электропроводностью σ , имеющей форму прямоугольника размерами $10 \times b$ мм. (см. рис. 1).

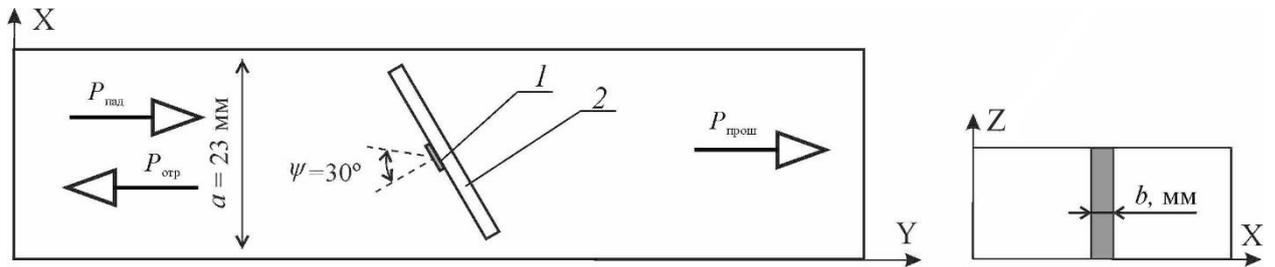


Рис.1. Расположение исследуемой структуры в волноводе: 1 — Ni, 2 — Al_2O_3 . $P_{пад}$ — падающая мощность, $P_{прош}$ — прошедшая мощность, $P_{отр}$ — отраженная мощность.

Исследуемая структура размещалась в волноводе сечением 23×10 мм, перпендикулярно широкому и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) исследуемой структуры было проведено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

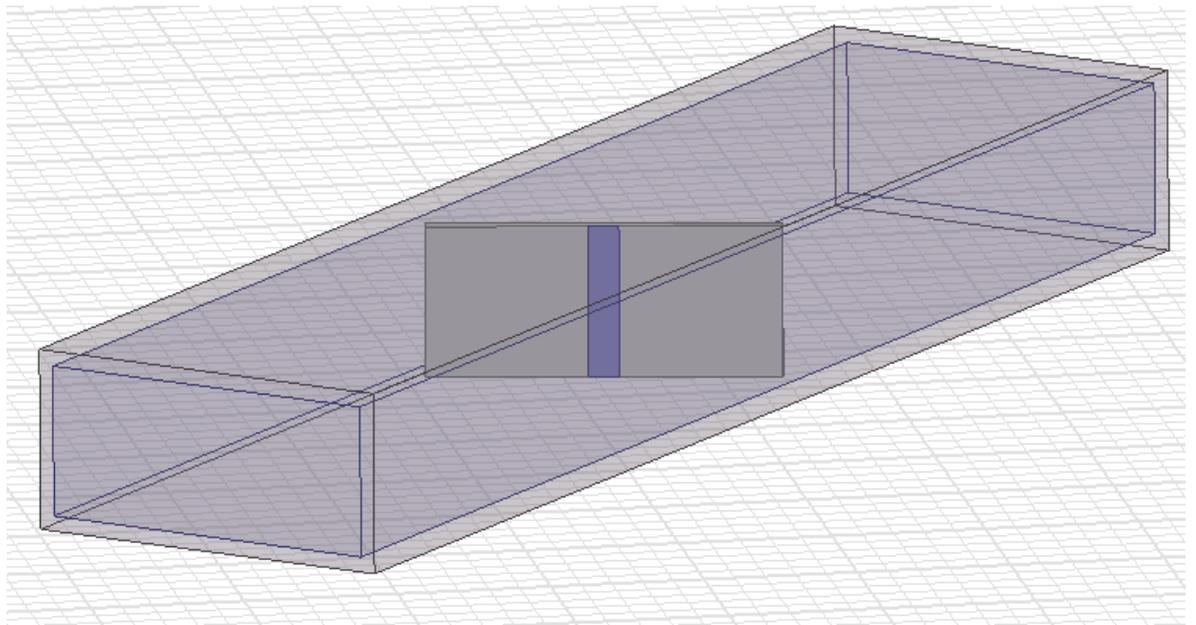


Рис.2 Внешний вид модели исследуемой структуры в системе электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

При размещении диэлектрической пластины перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси на частотных зависимостях коэффициентов отражения электромагнитной волны наблюдается резонансная особенность, характерная частота которой определяется геометрическими размерами и электрофизическими параметрами диэлектрической пластины, и углом её поворота ψ относительно продольной оси волновода.

Геометрические размеры диэлектрической пластины и угол её поворота ψ подбирались таким образом, чтобы пик, соответствующий резонансу волны высшего типа H_{s0} ($s = 1, 2, 3, \dots$), располагался вблизи середины трехсантиметрового диапазона длин волн.

Результаты расчета частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой при различных значениях толщины пленки t и толщиной пластины полукора $G = 0.5$ мм представлены на рис.9

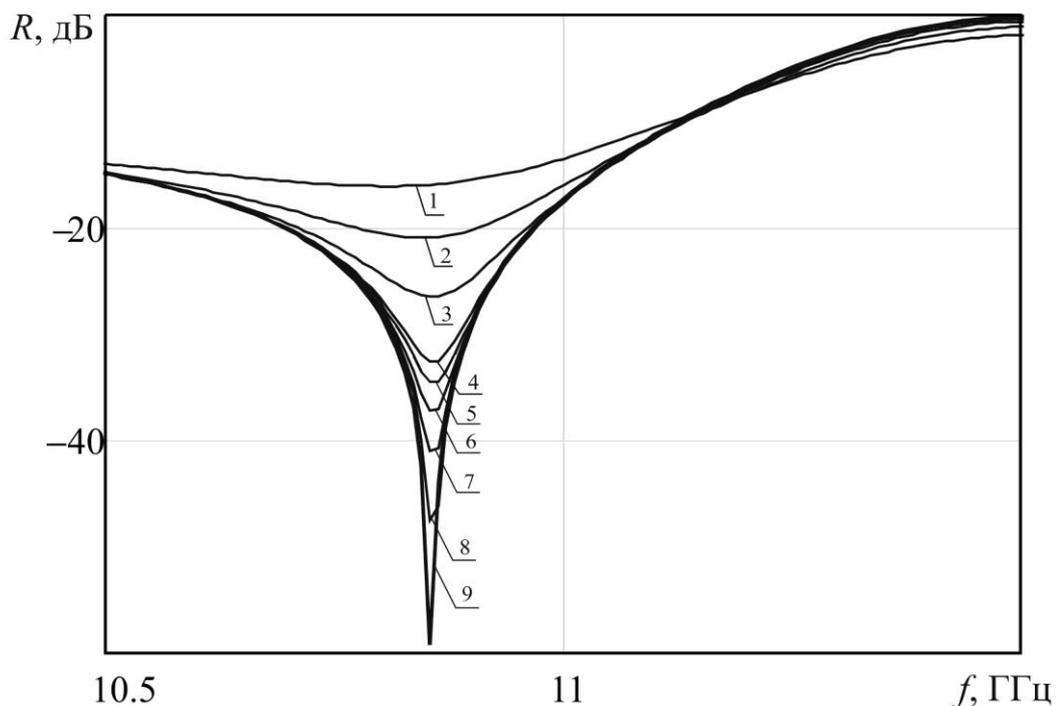


Рис. 3. Расчетные частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, с толщиной поликоровой подложки $G = 0,5$ мм: 1 – $t = 80$ нм, 2 – $t = 60$ нм, 3 – $t = 40$ нм, 4 – $t = 10$ нм, 5 – $t = 20$ нм, 6 – $t = 10$, 7 – $t = 6$ нм, 8 – $t = 2$ нм, 9 – пластина поликора без металлической пленки, $\psi = 30^\circ$

На рис.10 приведены результаты расчета частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой при различных значениях толщины пленки t и толщиной поликоровой подложки $G = 1$ мм .

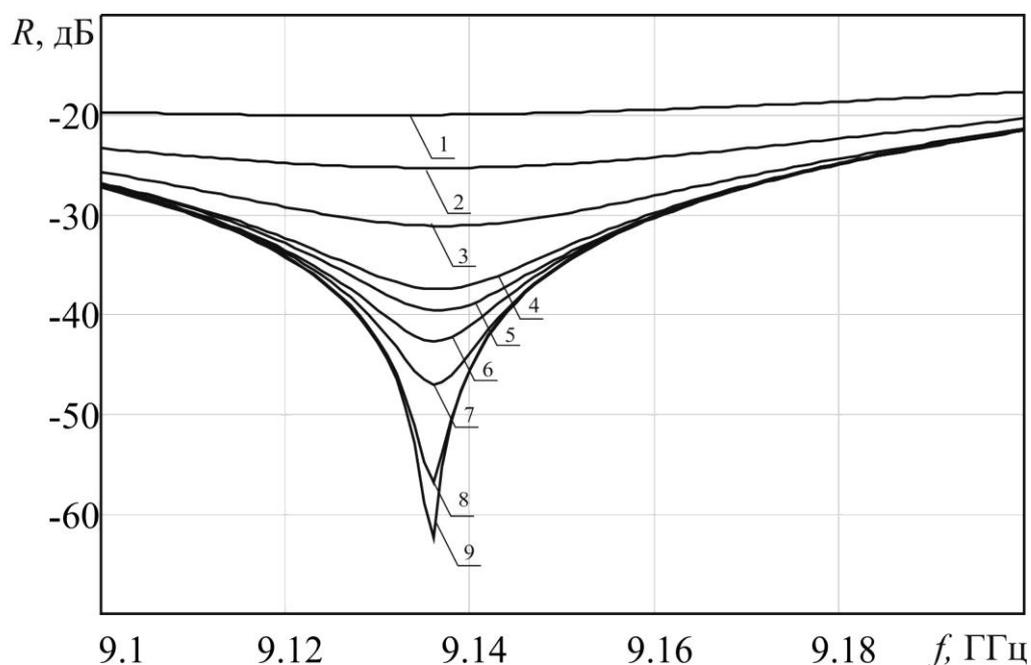


Рис. 4. Расчетные частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, с толщиной поликоровой подложки $G = 1$ мм: 1 – $t = 80$ нм, 2 – $t = 60$ нм, 3 – $t = 40$ нм, 4 – $t = 10$ нм, 5 – $t = 20$ нм, 6 – $t = 10$ нм, 7 – $t = 6$ нм, 8 – $t = 2$ нм, 9 – пластина поликора без металлической пленки, $\psi = 30^\circ$

На рис.5 приведены результаты расчета частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения,

взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой при различных значениях толщины пленки t и толщиной поликоровой подложки $G = 2$ мм.

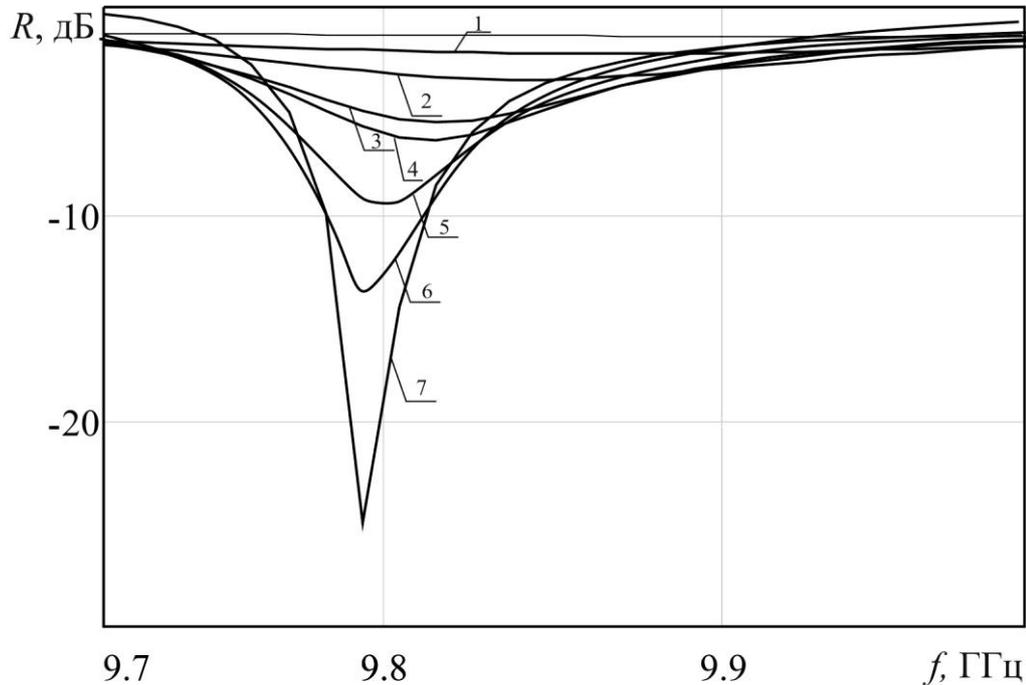


Рис. 5. Расчетные частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, с толщиной поликоровой подложки $G = 2$ мм: 1 – 80 нм, 2 – $t = 60$ нм, 3 – $t = 40$ нм, 4 – $t = 20$ нм, 5 – $t = 10$ нм, 6 – $t = 4$ нм, 7 - пластина поликора без металлической пленки, $\psi = 30^\circ$

Также был проведен расчет чувствительности металлодиэлектрической системы с различной толщиной поликоровой подложки G , Рис. 6.

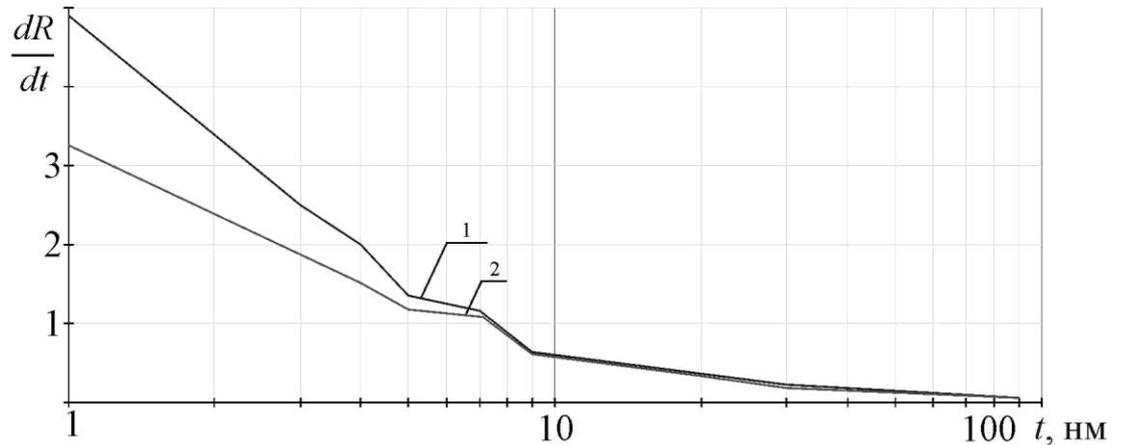


Рис. 6. Расчетные частотные зависимости чувствительности металлодиэлектрической структуры: 1 - $P = 1$ мм, 2 - $P = 0.5$ мм.

Как следует из результатов расчета пластины поликора толщиной 1 мм и 0.5 мм с нанесенным нанометровым металлическим слоем в диапазоне толщин последнего $0 \div 2$ нм, расчетная чувствительность $\partial(|R|^2)/\partial t$ коэффициента отражения к изменению толщины металлического слоя достигает значения 4.9 дБ/нм и 3,7 дБ/нм соответственно.

3 Экспериментальное исследование АЧХ резистивно-диэлектрической структуры при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в СВЧ диапазоне

Экспериментальные значения коэффициента отражения представлены на рис.17 . На этом же рисунке представлены расчетные зависимости коэффициента отражения для исследуемой структуры при геометрических размерах и электрофизических параметрах слоев, соответствующих используемым в эксперименте.

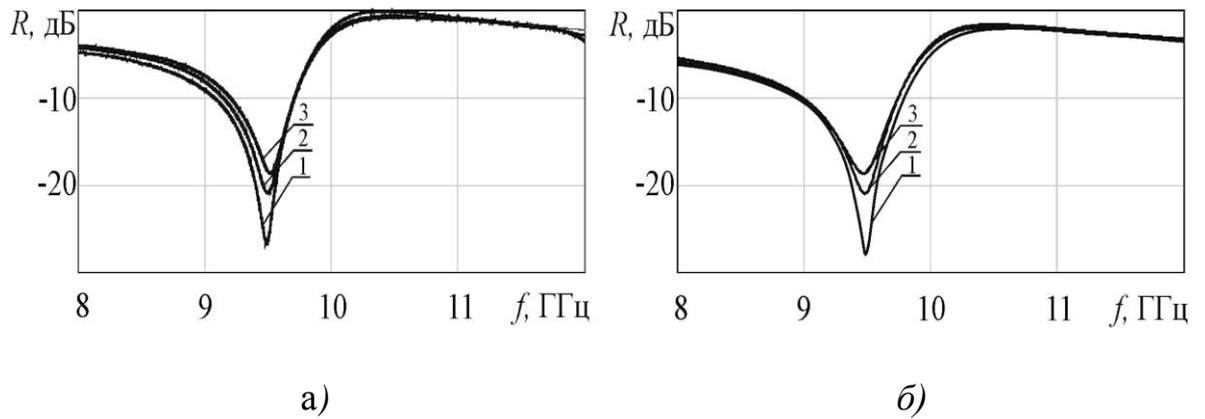


Рис.17. Экспериментальные (а) и расчетные (б) частотные зависимости коэффициента отражения металлодиэлектрической структуры от толщины металлического включения t при фиксированной ширине $b=2$ мм: 1 – без проводящего слоя, 2 - $t = 30$ мкм, 3 – $t = 40$ мкм

На рис.18 представлены также экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента прохождения для исследуемой структуры.

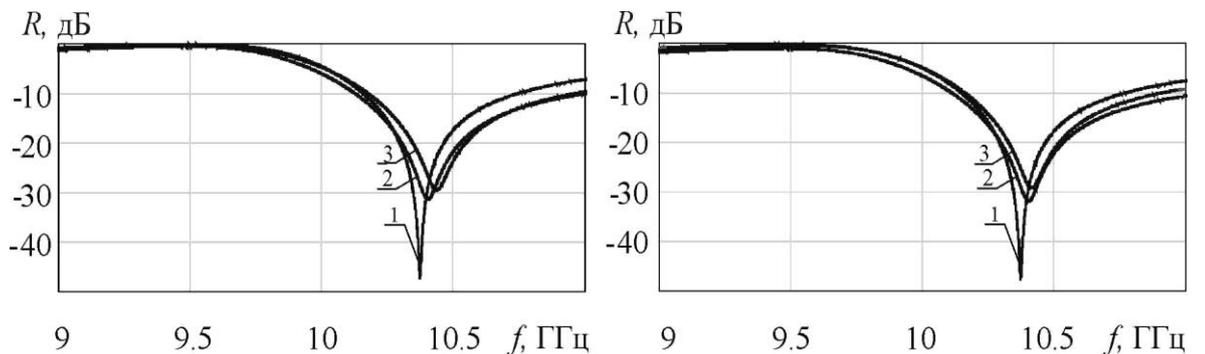


Рис.18. Экспериментальные (а) и расчетные (б) частотные зависимости коэффициента прохождения металлодиэлектрической структуры от толщины металлического включения t при фиксированной ширине $b=2$ мм: 1 – без проводящего слоя, 2 - $t = 30$ мкм, 3 – $t = 40$ мкм

Заключение

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

1) Проведен анализ современного состояния исследований в области СВЧ-измерений параметров полупроводниковым и металлодиэлектрических структур.

2) С использованием системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS построена модель волноводной линии передачи, содержащей расположенный под углом 30° к узким стенкам волновода образец, представляющий собой двухслойную структуру, состоящую из пластины поликора с нанесенным нанометровым проводящим слоем в виде узкой полосы.

3) Проведен расчет амплитудно-частотных характеристик исследуемой структуры при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса.

4) Исследованы особенности амплитудно-частотных характеристик образца с нанометровым проводящим слоем в виде узкой полосы при различных значениях толщины поликоровой подложки и толщины проводящего слоя.

5) Установлена чувствительность зависимости амплитудно-частотных характеристик от толщины нанометрового проводящего слоя в виде узкой полосы к толщине диэлектрической подложки, выявлено значение толщины диэлектрической подложки, при которой чувствительность является максимальной.

6) Экспериментально исследованы АЧХ резистивно-диэлектрической структуры при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в СВЧ диапазоне.

7) Показана возможность определения параметров проводящих слоев в виде узкой полосы, нанесенных на диэлектрическую подложку при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в случае размещения исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.