



Рузанов Олег Михайлович

**РЕЗОНАНСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА С
КОАКСИАЛЬНЫМИ БРЭГГОВСКИМИ СТРУКТУРАМИ С
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах**

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

**Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор А.В. Скрипаль**



РЕЗОНАНСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА С КООКСИАЛЬНЫМИ БРЭГГОВСКИМИ СТРУКТУРАМИ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Введение
- 1 Анализ современного состояния исследования брэгговских структур СВЧ-диапазона, их характеристик и возможностей применения для измерения параметров материалов
- 2 Резонансные особенности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с коаксиальными брэгговскими структурами с диэлектрическим заполнением
- 3 Теоретическое обоснование метода многопараметровых измерений диэлектриков на СВЧ с использованием одномерных коаксиальных брэгговских структур
- 4 Результаты экспериментального определения параметров диэлектриков на СВЧ с использованием одномерных коаксиальных брэгговских структур
- Заключение
- Список использованных источников

Введение

- *Брэгговские структуры СВЧ-диапазона, также называемые фотонными кристаллами или структурами с запрещенной зоной, являются разновидностью метаматериалов с периодической модуляцией геометрических размеров и электрофизических параметров в одном или нескольких пространственных направлениях.*
- **Целью диссертационной работы** *являлось исследование резонансных особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с коаксиальными брэгговскими структурами с диэлектрическим заполнением и их использование для измерения параметров диэлектриков.*

Введение

- Для достижения поставленной цели были **решены следующие задачи:**
- Построена математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными коаксиальными брэгговскими структурами.
- Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения и прохождения одномерных СВЧ коаксиальных брэгговских структур без нарушения и с нарушением периодичности брэгговской структуры.

Введение

- *Исследование резонансных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода, ограниченного штыревой металлической структурой.*
- *Теоретическое обоснование метода многопараметровых измерений диэлектриков на СВЧ с использованием одномерных коаксиальных брээговских структур.*
- *Экспериментальное определение параметров диэлектриков на СВЧ с использованием одномерных коаксиальных брээговских структур.*

Введение

- *Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем:*
- *Показано, что в случае, когда электрические длины каждого из отрезков, являющихся структурной единицей двухкомпонентной, симметричной относительно центрального слоя коаксиальной брэгговской структуры, равны друг другу, число резонансов, формирующих разрешенные зоны ненарушенных КБС, равно общему числу отрезков КБС. При этом каждый из отрезков КБС представляет собой элементарную брэгговскую ячейку.*
- *Установлено, что в случае, когда электрические длины структурных единиц не совпадают, но при этом кратны друг другу, в спектре прохождения возникают дополнительные наборы запрещенных зон и разрешенных зон с количеством резонансов неравным общему числу отрезков КБС. Это позволяет рассматривать КБС как несколько вложенных друг в друга брэгговских решеток с различным числом ячеек.*

Введение

- *Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально, что частотное положение дефектной моды в запрещенной зоне КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением практически не зависит от местоположения нарушения внутри КБС, а определяется электрофизическими параметрами слоя, нарушающего периодичность, такими как толщина и диэлектрическая проницаемость.*
- *Установлено, что одновременное введение нескольких одинаковых нарушений, расположенных в разных местах КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением приводит, вследствие взаимодействия нескольких резонансов, частоты которых близки друг к другу, к расщеплению дефектной моды на отдельные резонансы, число которых равно количеству нарушений в структуре КБС.*

Введение

- *Показано, что существует оптимальный угол наклона медных стержней в штыревой металлической структуре и оптимальное расположение структуры относительно центрального проводника микрокоаксиального зонда, при которых на АЧХ микрокоаксиального зонда проявляется наиболее ярко выраженная резонансная особенность.*
- *Предложена и теоретически обоснована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков с использованием КФК, основанная на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне.*

Введение

- Показано, что в качестве запрещенной зоны с дефектной модой при решении обратной задачи следует выбирать дефектную моду, на частоте которой в области расположения дефекта наблюдается максимум стоячей волны.
- Показана возможность проведения трехпараметровых измерений диэлектрических образцов, включающих измерение диэлектрической проницаемости, тангенса диэлектрических потерь и толщины слоя диэлектрика с использованием КФК, основанных на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в первой и второй запрещенных зонах.

Введение

- Показана возможность проведения многопараметровых измерений диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и толщины диэлектрических слоев при смещении измеряемой структуры из центрального в боковой слой коаксиального фотонного кристалла.
- Реализованы методики многопараметровых измерений параметров ряда диэлектриков с использованием КФК, основанные на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне.
- Новизна проведенных исследований подтверждается также полученным патентом РФ на изобретение RU 2716600 C1, 13.03.2020. Способ определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрической структуры/ Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Феклистов В.Б., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. Заявка № 2019119672 от 25.06.2019.

Введение

- **Основные положения, выносимые на защиту:**
- 1. *В случае, когда электрические длины каждого из отрезков, являющихся структурной единицей двухкомпонентной, симметричной относительно центрального слоя коаксиальной брэгговской структуры, равны друг другу, число резонансов, формирующих разрешенные зоны ненарушенных КБС, равно общему числу отрезков КБС. При этом каждый из отрезков КБС представляет собой элементарную брэгговскую ячейку.*
- 2. *В случае, когда электрические длины структурных единиц не совпадают, но при этом кратны друг другу, в спектре прохождения возникают дополнительные наборы запрещенных зон и разрешенных зон с количеством резонансов неравным общему числу отрезков КБС. Это позволяет рассматривать КБС как несколько вложенных друг в друга брэгговских решеток с различным числом ячеек.*

Введение

- 3. Частотное положение дефектной моды в запрещенной зоне КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением практически не зависит от местоположения нарушения внутри КБС, а определяется электрофизическими параметрами слоя, нарушающего периодичность, такими как толщина и диэлектрическая проницаемость.
- 4. Одновременное введение нескольких одинаковых нарушений, расположенных в разных местах КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением приводит, вследствие взаимодействия нескольких резонансов, частоты которых близки друг к другу, к расщеплению дефектной моды на отдельные резонансы, число которых равно количеству нарушений в структуре КБС.

Введение

- 5. Величина расщепления увеличивается при сближении дефектов и достигает максимального значения при нахождении дефектов в близко расположенных к друг другу слоях.
- 6. Вследствие конечной величины добротности дефектной моды при расположении дефектов в слоях, отстоящих друг от друга на большом расстоянии, расщепление дефектной моды не наблюдается, а возникает лишь уширение резонансной кривой с дальнейшим уменьшением амплитуды.
- 7. Оптимальный угол наклона медных стержней в штыревой металлической структуре и оптимальное расположение структуры относительно центрального проводника микрокоаксиального зонда позволяет реализовать на АЧХ микрокоаксиального зонда ярко выраженную резонансную особенность.

Введение

- 8. Для реализации методики измерения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков с использованием КФК, основанной на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне, следует выбирать дефектную моду, на частоте которой в области расположения дефекта наблюдается максимум стоячей волны.
- 9. Для реализации трехпараметровых измерений диэлектрических образцов, включающих измерение диэлектрической проницаемости, тангенса диэлектрических потерь и толщины слоя диэлектрика с использованием КФК, основанных на решении обратной задачи, необходимо использовать частотные зависимости коэффициентов пропускания и отражения, измеренные одновременно на частотах дефектной моды как в первой, так и во второй запрещенных зонах.

Введение

- **Апробация работы:**
- Основные результаты диссертационной работы доложены на:
- • VI и VII Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». Саратов, 2019 г., 2020 г.
- • IX Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». С.-Петербург, 2019 г.
- • XIV Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». Саратов, 2019 г.
- • 30-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2020). Севастополь, 2020 г. (КрыМиКо'2020).

Публикации

В научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science)

- 1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О. М., Тимофеев И.О. Использование СВЧ коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков// Радиотехника и электроника, 2020, Том 65 номер 5 стр. 495-503 DOI: 10.31857/S0033849420040099
- 2. Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Рузанов О. М., Тимофеев И. О. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгговских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 1. С. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-1-29-41>

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

- 3. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. Измерение параметров диэлектриков с использованием СВЧ коаксиальной брэгговской структуры// Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7 (10). С. 6–12.

В других изданиях

- 4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. СВЧ коаксиальный фотонный кристалл с нарушением периодичности в виде диэлектрической структуры// В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей шестой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова.– Саратов: Изд-во «Саратовский источник» , 2019. – 204 с.: ил. ISBN 978-5-91879-927-7 С. 18-21.
- 5. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. СВЧ коаксиальные брэгговские структуры и их использование для измерения диэлектриков// Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1. № 1. С. 194-198.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

- 6. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. Измерение параметров диэлектриков с использованием коаксиального СВЧ фотонного кристалла// В сборнике: Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика Сборник трудов XIV Всероссийской конференции молодых ученых. 2019. С. 243-244.
- 7. Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. Резонансы в коаксиальных брэгговских структурах с диэлектрическим за-полнением // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. А.В. Скрипаля.– Саратов: Изд-во «Саратовский источник» , 2020. – 180 с.: ил. ISBN 978-5-6044944-6-2. С. 57-62.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

- 8. Скрипаль А.В., Никитов С.А., Пономарев Д.В., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. Использование дефектных мод в СВЧ коаксиальной брегговской структуре для измерения параметров диэлектриков// В сборнике: *Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. А.В. Скрипаля.* – Саратов: Изд-во «Саратовский источник» , 2020. – 180 с.: ил. ISBN 978-5-6044944-6-2. С. 84-88.
- 9. Скрипаль А.В., Фролов А.П., Рузанов О.М. Исследование микрокоаксиального зонда ближнеполевого свч-микроскопа с резонатором в виде штыревой металлической структуры и коаксиального фотонного кристалла// В сборнике: *Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. А.В. Скрипаля.* – Саратов: Изд-во «Саратовский источник» , 2020. – 180 с.: ил. ISBN 978-5-6044944-6-2. С. 153-157.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Патенты на изобретения РФ

- 10. Патент на изобретение RU 2716600 C1, 13.03.2020. СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ/ Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Феклистов В.Б., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. Заявка № 2019119672 от 25.06.2019.

Краткое содержание

- **Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 112 страницах, содержит 47 рисунков и список литературы из 135 наименований.
- **Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.
- **В первом разделе** проведен критический анализ современного состояния исследований СВЧ-фотонных кристаллов.
- **Во втором разделе** теоретически описаны и экспериментально исследованы резонансные особенности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с коаксиальными брэгговскими структурами с диэлектрическим заполнением.
- Построена математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными коаксиальными брэгговскими структурами.

Краткое содержание

- *Представлены результаты компьютерного моделирования частотных характеристик коэффициентов отражения и прохождения одномерных СВЧ коаксиальных брэгговских структур без нарушения периодичности структуры.*
- *Исследования АЧХ ненарушенных КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением показали, что в случае, когда электрические длины каждого из отрезков, являющихся структурной единицей двухкомпонентной, симметричной относительно центрального слоя КБС, равны друг другу, число резонансов, формирующих разрешенные зоны КБС, равно общему числу отрезков КБС.*
- *Установлено, что в случае, когда электрические длины структурных единиц не совпадают, но при этом кратны друг другу, в спектре прохождения возникают дополнительные наборы запрещенных зон и разрешенных зон с количеством резонансов неравным общему числу отрезков КБС. Это позволяет рассматривать КБС как несколько вложенных друг в друга брэгговских решеток с различным числом ячеек.*

Краткое содержание

- *Рассмотрены случаи, когда электрические длины структурных единиц не совпадают, но при этом кратны друг другу. Установлено, что в спектре прохождения возникают дополнительные наборы запрещенных зон и разрешенных зон с количеством резонансов неравным общему числу отрезков КБС. Это позволяет рассматривать КБС как несколько вложенных друг в друга брэгговских решеток с различным числом ячеек.*
- *Исследовано влияние местоположения нарушения внутри КБС на АЧХ фотонного кристалла, а также влияние введения нескольких нарушений, расположенных в разных местах КБС на АЧХ фотонного кристалла.*
- *Исследованы резонансные характеристики микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода, ограниченного штыревой металлической структурой.*

Краткое содержание

- **В третьем разделе** предложена и теоретически обоснована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков с использованием КФК, основанная на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне.
- Показано, что в качестве запрещенной зоны с дефектной модой при решении обратной задачи следует выбирать дефектную моду, на частоте которой в области расположения дефекта наблюдается максимум стоячей волны.
- Показана возможность проведения трехпараметровых измерений диэлектрических образцов, включающих измерение диэлектрической проницаемости, тангенса диэлектрических потерь и толщины слоя диэлектрика с использованием КФК, основанных на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в первой и второй запрещенных зонах.

□ .

Краткое содержание

- **В четвертом разделе** реализованы методики многопараметровых измерений параметров ряда диэлектриков с использованием КФК, основанные на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне.
- **В заключении** приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Благодарю за внимание