### 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

# АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

### по направлению

### факультета нано- и биомедицинских технологий

## Ткаченко Екатерина Алексеевна

Научный руководитель		
профессор, д.фм.н.		Скрипаль А.В
должность, уч. степень, уч. звание	подпись, дата	инициалы, фамилия
Зав. кафедрой		
профессор, д.фм.н.		Усанов Д
должность, уч. степень, уч. звание	подпись, дата	инициалы, фамилия

Введение. Среди новых типов твердотельных структур, применяемых в технике СВЧ, можно выделить периодические структуры, получившие название фотонных кристаллов. Эти структуры состоят из периодически расположенных составляющих, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. При наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут возникать резонансные частотные особенности – узкие «окна» прозрачности.

На основе СВЧ-фотонных кристаллов разрабатываются полосовые фильтры, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны.

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft исследовалось взаимодействие электромагнитного поля с фотонной структурой.

Проводилось компьютерное моделирование одномерного фотонного кристалла из диафрагм. Нарушение периодичности создается отличием формы средней диафрагмы от остальных диафрагм

Целью бакалаврской работы являлось создание фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм без нарушений и с нарушением в виде измененной ширины щели или измененного расстояния между диафрагмами и исследование их амплитудно-частотных характеристик

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft исследовалось взаимодействие электромагнитного поля с фотонной структурой.

Проводилось компьютерное моделирование одномерного фотонного кристалла, созданного на основе резонансных диафрагм. Исследовались фотонные кристаллы без нарушения периодичности структуры и с нарушением периодичности структуры фотонного кристалла. Нарушение периодичности создавалось отличием формы средней диафрагмы от остальных диафрагм.



Рис.1 Металлическая диафрагма со сквозной щелью



Рис. 2 Фотонная структура из семи диафрагм

С использованием программы трехмерного электродинамического моделирования HFSS была создана модель фотонного кристалла, состоящего из 7-ми и 6-ти диафрагм

В случае фотонного кристалла, состоящего из 7-ми диафрагм, в качестве нарушения периодичности фотонного кристалла из семи диафрагм было использовано уменьшение ширины щели центральной (четвертой) диафрагмы, а также была рассмотрена структура фотонного кристалла с измененной шириной щели одной из боковых диафрагм (пятая диафрагма).



Рис. 3 Фотонная структура из шести диафрагм

В случае фотонного кристалла, состоящего из 6-и диафрагм в качестве нарушения периодичности фотонного кристалла было использовано увеличение расстояния между соседними диафрагмами.

В ходе компьютерного моделирования был проведен расчет частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождении электромагнитной волны через фотонный кристалл при различных видах нарушений фотонных кристаллов, состоящих из 7-ми и 6-ти диафрагм.

На рис. 4–6 представлены результаты расчета АЧХ коэффициентов отражения и прохождении фотонного кристалла при различных нарушениях фотонного кристалла, состоящего из 7-ми диафрагм.



Рис.4 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (1) и отражения (2) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах без нарушения диафрагмами размерами *a*=18 мм, *b*=2 мм



Рис.5 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (1) и отражения (2) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушения в центральной диафрагмы размером *a*=18 мм, *b*=1 мм



Рис. 6 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в боковой диафрагме размером *a*=18 мм, *b*=1 мм

На рис. 7–11 представлены АЧХ коэффициентов отражения и прохождении фотонных кристаллов при различных значениях нарушениях фотонного кристалла, состоящего из 6-ти диафрагм.



Рис.7 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 5мм



Рис.8 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 10 мм



Рис.9 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 15 мм



Рис.10 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 20 мм



Рис.11 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 25мм

Как следует из результатов эксперимента, при небольшом увеличении расстояния между двумя центральными диафрагмами у низкочастотного края запрещенной зоны появляется пик пропускания, при дальнейшем увеличении расстояния пик смещается в высокочастотную область, после того как пик достигнет высокочастотного края запрещенной зоны он снова появляется у низкочастотного края запрещенной зоны. Экспериментальное исследование фотонной структуры на резонансных диафрагмах. Измерение частотных зависимости коэффициентов отражения и прохождения фотонной структуры проводилось с использованием векторного анализатора цепей N5230A Agilent PNA-L Network Analyzer.

Диафрагмы изготавливались с помощью нанесения алюминиевой фольги на пенопластовую подложку, диэлектрическая проницаемость которой близка к единице. Толщиной пенопласта задавалось расстояние между диафрагмами, образующими фотонный кристалл. В наклеенной фольге вырезалась щель нужного размера.

На рис. 21–23 представлены АЧХ коэффициентов отражения и прохождении фотонного кристалла при различных нарушениях фотонного кристалла, состоящего из 7-ми диафрагм.



Рис.12 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах без нарушения с диафрагмами размерами *a*=18 мм, *b*=2 м



Рис. 13 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (1) и отражения (2) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в центральной диафрагме размером *a*=18 мм, *b*=1 мм



Рис. 14 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в боковой диафрагме размером *a*=18 мм, *b*=1 мм

На рисунках 24–28 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождении СВЧ-излучения при различных значениях расстояниях между диафрагмами для фотонного кристалла, состоящего из 6-и диафрагм.



Рис.15 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 5 мм



Рис.16 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 10 мм



Рис.17 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 15 мм



Рис.18 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 20 мм



Рис.19 Экспериментальные АЧХ коэффициентов прохождения (2) и отражения (1) фотонного кристалла на резонансных диафрагмах с нарушением в виде измененного расстояния между центральными диафрагмами равного 25 мм

Как следует из результатов эксперимента, которые подтверждают расчетные данные, при небольшом увеличении расстояния между двумя центральными диафрагмами у низкочастотного края запрещенной зоны появляется пик пропускания, при дальнейшем увеличении расстояния пик смещается в высокочастотную область, после того как пик достигнет высокочастотного края запрещенной зоны он снова появляется у низкочастотного края запрещенной зоны.

#### Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

проведен анализ современного состояния исследований СВЧ-фотонных кристаллов;

в среде HFSS проведено компьютерное моделирование АЧХ коэффициентов прохождения и отражения фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм в диапазоне от 8 ГГц до 12 ГГц без нарушений и с нарушением в виде уменьшенной длины одной из щелей или увеличенным расстоянием между двумя центральными диафрагмами;

экспериментально исследованы АЧХ прохождения и отражения фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм в диапазоне от 8 ГГц до 12 ГГц без нарушений и с нарушением в виде уменьшенной длины одной из щелей или увеличенным расстоянием между двумя центральными диафрагмами;

установлено, что в фотонном кристалле с нарушением периодичности при увеличении расстояния между двумя центральными диафрагмами у низкочастотного края запрещенной зоны появляется пик пропускания, при дальнейшем увеличении расстояния пик смещается в высокочастотную область, после того как пик достигнет высокочастотного края запрещенной зоны он снова появляется у низкочастотного края запрещенной зоны. Список использованных источников

1 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные структуры на резонансных диафрагмах// Радиотехника. 2015. № 10. С. 108–113.

2 Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов. Характеристики дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность // Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 6

3 Г. Жувкин. Лабиринты фотонных кристаллов [Электронный ресурс] Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова: М.,1997-2012

4 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.

5 Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбулин А.Р., Севастьянов А.А., Фархутдинов А.Р. Коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65–70.

6 Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, В.О. Горлицкий. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями. // Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2

7 Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Романов. Характеристики дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность. // Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 6

8 Д.А. Усанов, В.П. Мещанов, А.В. Скрипаль, Н.Ф. Попова, Д.В. Пономарев,1 М.К. Мерданов 3. Согласованные нагрузки сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на СВЧ фотонных кристаллах. // Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 2

9 Д.А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Е. В. Латышева. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов. // Радиотехника и электроника ,2016, том 61, №1, с.1-9

10 Д. А. Усанов, С. А. Никитов, З, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушениями периодичности.

// РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2013, том 58, № 11, с. 1071–1076

11 Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.К. Мерданов, В.О. Горлицкий. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями. // Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2 12 Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49. N 2. P. 297–306.

13. 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.

14 Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Семёнов А.А., Абрамов А.В., Голишников А.А. Радиоволновые и оптические измерения толщины и электропроводности металлических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках // Известия вузов. Электроника. 2005. №1. С. 68–77.

15 Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.

16 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей// Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 8, с. 143–148

17 А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, В.С. Скворцов,
М.К. Мерданов. Широкополосная волноводная согласованная нагрузка. //
Пат. РФ № 2360336, 2009. БИ № 18.

18 Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметровполупроводников. Саратов: Изд-во СГУ, 1985.

19 Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур// Радиотехника и электроника. 2012, том. 57. № 2. С. 230–236.

20 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.

21 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.