

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

Кафедра физики твердого тела

**Таммовские состояния на границе СВЧ фотонного кристалла при его  
контакте с высокопроводящим слоем**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 2251 группы института физики

направления 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»

профиля «Диагностика нано- и биомедицинских систем»

Лада Никиты Олеговича

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

доцент, к.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Д.В. Пономарёв

инициалы, фамилия

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2021 г.

## Введение

Процесс распространения электромагнитной волны через однородный (пространственно-неограниченный) фотонный кристалл (ФК) на сегодня достаточно хорошо изучен [1, 2]. При прохождении через такой кристалл излучения с длиной волны, сравнимой с размерами единичного элемента кристалла в спектре излучения образуются так называемые запрещенные и разрешенные зоны. Волновой процесс для разрешенных зон характеризуется действительными значениями волнового вектора, а для запрещенных зон – мнимыми.

Однако практический интерес представляют неоднородные (пространственно-ограниченные) фотонные кристаллы, в частности – фотонные кристаллы с нарушением периодичности, поскольку «дефектные» моды формирующиеся в таких структурах могут быть весьма высокочастотными. Процесс распространения электромагнитной волны через пространственно-ограниченный фотонный кристалл с нарушением периодичности изучался многими авторами [3, 4, 9]. При этом выявлено много явлений, представляющих огромный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Важным моментом является формирование (при особых условиях) в запрещенной частотной зоне узких пиков [3], которые оказываются проявлением электродинамического аналога «Таммовского состояния» (ТС), хорошо известного в квантовой механике [5, 6].

Отметим, что классическое ТС [7] – это квантово-механическое состояние нерелятивистского электрона, находящегося в кристаллической решетке природного кристалла. В этом состоянии электроны: а) «концентрируются» вблизи поверхности ограниченного кристалла и б) их энергия, характеризующаяся узким уровнем, лежит в запрещенной энергетической зоне этого кристалла. Явление электродинамического ТС сводится к тому, что в пространственно-ограниченном фотонном кристалле:

а) электромагнитная энергия, проходящая через ФК в виде волнового пакета, концентрируется вблизи границы такого фотонного кристалла и б) ширина волнового пакета весьма мала и основная частота его лежит в запрещенной частотной зоне этого кристалла. В результате, в запрещенной зоне возникает узкий пик пропускания «Таммовский пик» (ТС-пик).

Сегодня, классические ТС, которые возникают на плоской границе раздела полубесконечного кристалла и какой-либо среды – диэлектрик, газ, вакуум, металл и т.д. хорошо изучены [5–7]. Поэтому, феномен классических ТС широко используется для теоретического описания процесса распространения и пространственного распределения электромагнитной волны в ограниченных ФК [3, 4], в широком диапазоне частот – от радиодиапазона до оптического. Это обусловлено тем, что математический аппарат, описывающий проявление классического ТС на границе кристалла [5] очень близок к математическому аппарату распространения волны в пространственно-ограниченном ФК [3].

## Цель магистерской работы

Целью данной магистерской работы является исследование особенностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с фотонным кристаллом, граничащим с высокопроводящим слоем, и возникновения фотонных таммовских состояний.

Магистерская работа содержит 4 главы:

1. Основные характеристики фотонных кристаллов.
2. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах.
3. Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла, граничащего с высокопроводящим слоем.
4. Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла, граничащего с высокопроводящим слоем.

## **1. Основные характеристики фотонных кристаллов.**

Фотонные кристаллы, из-за периодического изменения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны, позволяют получить разрешенные и запрещенные диапазоны для энергии самой волны. В спектрах отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с такими структурами, наблюдается ярко выраженное чередование разрешенных и запрещенных для распространения электромагнитной волны частотных диапазонов. Практически, это означает, что если на фотонный кристалл падает электромагнитная волна, обладающая энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует запрещенной зоне данного фотонного кристалла, то она не может распространяться в фотонном кристалле и отражается. И наоборот, это означает, что если на фотонный кристалл падает волна, обладающая энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует разрешенной зоне данного фотонного кристалла, то она может распространяться в фотонном кристалле. По аналогии с реальными кристаллами, частотная область, в которой запрещено распространение электромагнитной волны, получила название фотонной запрещенной зоны. Другими словами, фотонный кристалл выступает в качестве фильтра [6].

Если излучение с частотой запрещённой зоны было сгенерировано внутри фотонного кристалла, то оно не может распространяться в нём, если же такое излучение падает на фотонный кристалл извне, то оно просто отражается от кристалла. [8].

## 2. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах.

Реальная поверхность кристалла, с которой приходится работать, отличается от идеальной, так как на ней в большинстве случаев всегда имеют место быть различного рода макроскопические и микроскопические структурные дефекты, связанные с условиями обработки (резка, полировка, шлифовка) и роста кристалла (огранка кристалла и другого рода особенности рельефа поверхности макроскопических и микроскопических размеров). Вдобавок, реальная поверхность кристалла находится в постоянном контакте с окружающей средой, различного типа химическими соединениями, применяемыми в качестве травителей, после чего на поверхности возможна адсорбция посторонних атомов и молекул их этих источников, возникновение окисных пленок как результат окислительно-растворительных реакций при травлении. Все это приводит к появлению локализованных на поверхности кристалла состояний, которые зависят от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми и на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные центры захвата или рекомбинационные ловушки электронно – дырочных пар. Если на поверхности находятся донорные состояния, которые, как известно, могут быть нейтральными, либо заряженными положительно при отдаче электрона в зону проводимости, поверхность полупроводника будет заряжена положительно. А при наличии акцепторных состояний поверхность кристалла будет заряжена отрицательно, так как акцепторные состояния могут быть либо нейтральны (когда пусты), либо отрицательно заряжены (когда заполнены электронами). Величина заряда  $Q_{ss}$  на поверхности зависит от концентрации поверхностных состояний  $N_S$  и функций распределения для ловушек захвата, которые определяются значением электрохимического потенциала на поверхности полупроводника относительно к энергетическому положению уровня ловушки захвата [15].

### **3. Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла, граничащего с высокопроводящим слоем.**

Численные расчеты производились в математическом пакете Mathcad.

С помощью компьютерного моделирования производились вычисления коэффициентов прохождения  $R$  и  $T$  отражения электромагнитной волны СВЧ-диапозона, основанные на использовании в качестве преобразовательного элемента 11-ти слойного фотонного кристалла (ФК) со структурами поликор–фторопласт, граничащим с высокопроводящим слоем в диапазоне частот 7–14 ГГц, поликор–нитрид бора и нитрид бора–фторопласт, граничащими с высокопроводящим слоем в диапазоне частот 26–40 ГГц. В процессе исследования использовался поликоровый слой толщиной  $d_{\Pi} = 1$  мм и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\Pi} = 9.6$ , фторопластовый слой толщиной  $d_{\Phi} = 6$  мм и  $\varepsilon_{\Phi} = 2$ , слой нитрид бора толщиной  $d_{НБ} = 2$  мм и  $\varepsilon_{НБ} = 4,3$ . Для исследования особенностей фотонного таммовского резонанса использовались высокопроводящие слои с удельной электропроводностью  $\sigma = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \dots \sigma = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  и толщиной  $d = 1$  мкм,  $d = 2$  мкм,  $d = 5$  мкм,  $d = 10$  мкм.

#### **4 Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла, граничащего с высокопроводящим слоем**

При проведении эксперимента исследовался СВЧ фотонный кристалл с 11-ти слойной периодической структурой, помещенной в волновод, структура которой состоит из чередующихся слоев поликор–нитрид бора и с толщинами соответственно  $d_{\text{П}} = 2$  мкм,  $d_{\text{НБ}} = 2$  мкм и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\text{П}} = 9.6$ ,  $\varepsilon_{\text{НБ}} = 4.3$ , через которую пропусклась СВЧ – электромагнитная волна частотой от 26 до 40 ГГц.

Исследования проводились с использованием анализатора цепей Agilent Technologies PNA-X.

Экспериментально удалось показать существование разрешенных и запрещенных зон в фотонном кристалле с периодической структурой поликор–нитрид бора.

Для исследования особенностей фотонного таммовского резонанса в фотонном кристалле использовались высокопроводящие слои различных толщин, которые служили средой для полного отражения электромагнитной волны СВЧ-диапазона. При исследовании амплитудно–частотной характеристики коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $T$  удалось определить особенность зависимости резонансного пика от удельной электропроводности и толщины высокопроводящего слоя в диапазоне частот 26–40 ГГц.

## Заключение

В ходе выполнения магистерской работы получены следующие результаты.

Теоретически были рассмотрены фотонные кристаллы в СВЧ-диапазоне. С помощью компьютерного моделирования была исследована амплитудно-частотная характеристика и резонансные особенности разрешенных и запрещенных зон СВЧ фотонного кристалла со структурой поликор–фторопласт, поликор–нитрид бора и нитрид бора–фторопласт в волноводе на частотах 7–14 ГГц и 26–40 ГГц.

С помощью компьютерного моделирования было доказано существование фотонных таммовских состояний на периодической структуре поликор–фторопласт, поликор–нитрид бора и нитрид бора–фторопласт, граничащей с высокопроводящим слоем различной электропроводности и различной толщины.

Для получения ярко выраженного фотонного таммовского резонанса в исследуемых структурах в диапазоне частот 26–40 ГГц требуется использовать высокопроводящие слои с большим значением удельной электропроводности и толщины слоя, чем в диапазоне частот 7–14 ГГц.

Экспериментально был создан 11-ти слойный фотонный кристалл на основе периодической структуры поликор–нитрид бора. С помощью эксперимента было доказано существование фотонного таммовского резонанса в созданной структуре, граничащей с высокопроводящим слоем. Были исследованы характеристики фотонного кристалла со структурой поликор–нитрид бора, граничащего с высокопроводящим слоем и особенности возникновения фотонных таммовских состояний.

В диапазоне частот 7–14 ГГц фотонный таммовский резонанс наблюдается при значениях поверхностного сопротивления высокопроводящего слоя около  $25 \text{ Ом}/\square$ , а на частотах 26–40 ГГц

резонансный пик наблюдается при значениях поверхностного сопротивления высокопроводящего слоя  $5 \text{ Ом}/\square$ .

Сравнение результатов эксперимента с результатами компьютерного показывает их хорошее качественное и количественное совпадение.

## Список использованных источников

1. Yablonovitch, E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics / Yablonovitch E. // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – P. 2059.
2. Булгаков, А.А. Сравнительная характеристика зонных спектров периодических структур, образованных слоями различных материалов во внешнем магнитном поле / Булгаков А.А., Ханкина С.И., Шрамкова О.В., Яковенко В.М. // Радиопизика и электроника. – 2008. – Т. 13, №2. – С. 190-199.
3. Bush R., John. S. Liquid crystal photonic band gap materials: the tunable electromagnetic vacuum // Phys. Rev. Lett. – 1999. – V. 83, N 5. – P. 967–970.
4. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987.– 616с.
5. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. – М.: Наука, 1978. – 384 с.
6. Плачек Г. Рэлеевское рассеяние и раман-эффект. / ОНТИ – Харьков, 1935.
7. Д. А. Усанов, М. К. Мерданов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Е.В. Латышева.Использование СВЧ фотонных кристаллов для измерения параметров материалов // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами / Под ред. Д.А. Усанова. – М.: «Всероссийская научнаяшкола-семинара», 2015. – 50 с.
8. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушением периодичности / Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 11. – С. 1071-1076.

9. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Скворцов В.С., Мерданов М.К. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – Т. 11, № 3. – 51 с.
10. Фролов А.П. Структуры с фотонной запрещенной зоной и их использование в ближнеполевой СВЧ-микроскопии: Дис. на соиск. учен. степ. канд. ф.-м. наук. – Саратов, 2014, – Л. 14-17.
11. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения / Усанов Д.А., Мерданов М.К., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: физика, – 2015, – Т. 15, № 1. – С. 57-58.
12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов (учебное пособие) – Саратов: Электронное издание Саратов. Ун-та, 2015. – С. 6-8.
13. К.В. Шалимова. Физика полупроводников (учебник) - М.: Энергоатомиздат, 1985. — 392 с., ил.
14. А.П. Виноградов, А. В. Дорофеев, А.М. Мерзликин, А.А. Лисянский. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах, УФН, 2010, том 180, номер 3, 249–261.
15. И.М. Лифшиц, С.И. Пекар. Таммовские связанные состояния электронов на поверхности кристалла и поверхностные колебания атомов решетки, УФН, 1955, том 56, вып. 4, 531 – 568.
16. 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, ISSN 1814-733X, ISSN 1817-3020.

17. 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.
18. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В.  
Контроль параметров структуры нанометровая металлическая пленка-диэлектрик методом волноводно-диэлектрического резонанса // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2016.