

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

Исследование таммовских состояний на границе фотонного  
кристалла при его контакте с нанометровым металлическим слоем

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ  
студента 4 курса  
по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
факультета нано- и биомедицинских технологий  
Дорониной Светланы Васильевны

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

А.В. Скрипаль

доцент, к.ф.-.м.н.

Д.В. Пономарев

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

Д.А. Усанов

Саратов 2018

**Введение.** В 1932 г. И.Е.Тамм на основе квантовой механики впервые показал, что наряду с известными в то время зонными состояниями электронов в кристалле у поверхности кристалла могут существовать также состояния электронов совершенно иного типа. Эти поверхностные состояния электронов обладают дискретным энергетическим спектром и волновыми функциями, экспоненциально затухающими по мере удаления от поверхности в глубину и в сторону вакуума. За прошедшие с тех пор более 80 лет теория поверхностных состояний была основательно развита в отношении методики расчета и анализа их проявления в различных кристаллах. В связи с развитием науки о нанообъектах проблема поверхностных состояний приобретает еще большую актуальность.

При рассмотрении одномерных периодических структур, называемых одномерными фотонными кристаллами, на границе фотонного кристалла возможна локализация электрического поля при контакте фотонного кристалла с однородным слоем, характеризующимся отрицательной диэлектрической проницаемостью (проводящая среда на частотах ниже плазменной) или отрицательной магнитной проницаемостью (магнитная среда на частоте в окрестности ферромагнитного резонанса). Такая локализация электрического поля трактуется как поверхностное таммовское состояние в фотонном кристалле. При этом на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем, наблюдается узкий пик коэффициента прохождения электромагнитной волны, связанный с её прохождением через таммовское состояние.

Целью бакалаврской работы было исследование возникновения фотонных таммовских состояний на границе фотонного кристалла при его контакте с нанометровым металлическим слоем.

Бакалаврская работа содержит 8 глав:

1. Исследование таммовских состояний на границе фотонного кристалла
2. Аналог таммовских поверхностных состояний
3. Распределение напряженности электрического поля
4. Контакт фотонных кристаллов со средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью
5. Исследование таммовских состояний фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем с отрицательной диэлектрической проницаемостью
6. Теоретическая модель фотонного кристалла
  - 6.1. Волноводный фотонный кристалл с диэлектрическим заполнением
  - 6.2. Модель волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой
7. Компьютерное моделирование
8. Экспериментальная часть

**1. Исследование таммовских состояний на границе фотонного кристалла.** И.Е.Тамм показал, что нарушение периодичности решетки за счет ее обрыва на поверхности может приводить к появлению разрешенного энергетического уровня в запрещенной зоне.

Тамм рассматривал простейшую одномерную модель полубесконечного кристалла с потенциалом вида Кронига-Пенни и потенциальной ступенькой на его границе.

Рассмотрим уравнение Шредингера вида:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [W - U(x)]\Psi = 0 \quad (1)$$

где  $U = U_0$  — константа при  $x < 0$  и  $U(x)$  — функция, характеризующаяся периодом решетки при  $x > 0$ .

Будем считать, что ширина барьера стремится к нулю, а высота к бесконечности, но так, что величина  $\frac{mU_1}{\hbar^2} ab = p$  остается постоянной величиной.

Общее решение уравнения Шредингера записывается в виде:

$$\psi = e^{ikx} u_1(x) + e^{-ikx} u_2(x) \quad (2)$$

где  $u_{1,2}(x)$  — периодические по  $x$  функции с периодом  $d$ , а  $k$  — коэффициент определенной функции энергии электрона ( $k=k(E)$ ).

Данный вид решения можно рассматривать как суперпозицию двух блоховских волн, причем коэффициент  $k$  в этом случае является блоховским волновым числом. Коэффициент  $k$  определяется из условий непрерывности волновой функции и ее производной. После вычислений можно прийти к уравнению:

$$\cos ka = p \frac{\sin \chi a}{\chi a} + \cos \chi a, \quad \text{где } \chi = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (3)$$

Если правая часть этого уравнения по абсолютной величине не превышает единицы, то  $k$  становится действительным и соответствующее значение энергии электрона  $W$  лежит в разрешенной энергетической зоне. Если же правая часть по абсолютной величине превышает единицу, то  $k$  становится комплексным и соответствующее значение энергии принадлежит запрещенной зоне. Для каждого значения энергии существует два корня  $k$ , отличающиеся знаком. Эти два корня соответствуют двум частным решениям волнового уравнения, представленным первым и вторым членами формулы (2).

При  $0 \leq x < a$  волновая функция электрона имеет вид:

$$\psi = A_1(e^{i\chi x} + \beta e^{-i\chi x}) \quad (4)$$

$$\text{где } \beta = -\frac{1 - e^{-i(k-\chi)a}}{1 - e^{-i(k+\chi)a}} \quad (5)$$

При  $x < 0$  потенциал имеет постоянное значение  $U_0$ , тогда волновая функция примет вид:

$$\psi = A e^{\chi x} \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar} x \quad (6)$$

Сшивая (4) и (6) так, чтобы  $\psi$  и  $\frac{d\psi}{dx}$  в точке  $x=0$  были непрерывны, получим соотношения для  $A_1$  и  $A$ :

$$A_1(1 + \beta) = A \quad (7)$$

$$A_1 i\chi(1 - \beta) = A \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar} \quad (8)$$

Приравнивая определитель системы уравнений (7) и (8) нулю и подставляя  $\beta$ , получим:

$$e^{-\mu a + i n \pi} = \frac{a}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} \frac{\sin \chi a}{\chi a} + \cos \chi a \quad (9)$$

$$k = i\mu + n\pi \quad \mu > 0$$

Зависимость  $k$  (или  $\mu$ ) от энергии определяется уравнением (3), которое в рассматриваемом случае комплексного  $k$  принимает вид:

$$(-1)^n \operatorname{ch} \mu a = p \frac{\sin \chi a}{\chi a} + \cos \chi a \quad (10)$$

Исключение  $\mu$  из уравнений (9) и (10) приводит к уравнению для энергии:

$$\xi \operatorname{ctg} \xi = \frac{q^2}{2p^2} - \sqrt{q^2 - \xi^2} \quad (11)$$

$$\text{где } \xi = \chi a = \frac{a}{\hbar} \sqrt{2mE} \quad q = \frac{a}{\hbar} \sqrt{2mU_0} \quad (12)$$

Корни уравнения (11) являются таммовскими поверхностными уровнями электрона, если соответствующее значение  $\mu$  оказывается положительным.

Концентрация таммовских поверхностных состояний равна поверхностной концентрации атомов в кристалле, т.е. величине порядка  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . При такой высокой концентрации состояний в поверхностной зоне, если эта зона заполнена частично, возможно появление металлической проводимости вдоль поверхности кристалла.

**2. Аналог таммовских поверхностных состояний.** Резонансные состояния в фотонных кристаллах граничащие с проводящей средой являются аналогом таммовских уровней.

Фотонные кристаллы представляют собой искусственно созданные периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения. В таких структурах создается периодическое изменение как диэлектрической проницаемости слоев, так и их геометрических размеров.

В системе двух сопряжённых фотонных кристаллов наличие таммовского состояния можно экспериментально обнаружить по пику коэффициента прохождения через образец, состоящий из конечных кусков фотонного кристалла, на частотах перекрывания запрещённых зон кристаллов.

**3. Распределение напряженности электрического поля.** Проводя дальнейшую аналогию между фотонными и реальными кристаллами, соединение двух фотонных кристаллов, имеющих различные размеры элементарных ячеек, можно трактовать как фотонную брэгговскую гетероструктуру. При этом слой, соединяющий фотонные кристаллы, играет роль интерфейсного слоя. С целью выяснения особенностей локализации таммовских состояний на интерфейсной границе брэгговской гетероструктуры был выполнен расчет распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны на частоте  $f_{\text{Тамм}}$ , соответствующей пику коэффициента прохождения электромагнитной волны через таммовское состояние. Результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны демонстрировали чередование узлов и пучностей внутри брэгговской гетероструктуры вдоль направления ее распространения. Анализ распределения поля в плоскостях поперечного сечения волновода, проходящих через пучности стоячей волны на отрезках волноводно-щелевой линии первой и второй последовательно соединенных брэгговских структур и через пучность на интерфейсной границе, свидетельствует о существенной локализации поля в середине широкой стенки волновода.

**4. Контакт фотонных кристаллов со средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью.** Экспериментально таммовское состояние можно обнаружить, измеряя коэффициент прохождения волн через слой фотонного кристалла конечной толщины, сопряженный со слоем вещества с отрицательной дифференциальной проницаемостью. На частоте, соответствующей таммовскому состоянию, наблюдается узкий пик коэффициента прохождения, связанный с туннелированием света через таммовское состояние. Действительно, коэффициенты прохождения через один фотонный кристалл (который работает в запрещенной зоне) и только через один однородный слой оказываются много меньше, чем коэффициент прохождения через сопряженную систему так как свет в среднем экспоненциально затухает, проходя по фотонному кристаллу или по материалу с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

**5. Исследование таммовских состояний фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем с отрицательной диэлектрической проницаемостью.** Рассмотрела случай, когда фотонный кристалл контактирует с однородным образцом, характеризующимся отрицательной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = -10$ ) и толщиной 2 мм.

На амплитудно-частотной характеристике фотонного кристалла, контактирующего с слоем, характеризующимся отрицательной диэлектрической проницаемостью, наблюдается пик коэффициента прохождения. В этом случае в запрещенной зоне появляется резонансная особенность с коэффициентом пропускания, близким к единице, т.е. примесная мода колебаний, местоположение которой можно регулировать, изменяя толщину слоя диэлектрика. А также наблюдается резкий минимум коэффициента отражения электромагнитной волны связанный с возникновением поверхностного фотонного таммовского состояния в системе фотонный кристалл – образец с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

**6. Теоретическая модель фотонного кристалла. 6.1 Волноводный фотонный кристалл с диэлектрическим заполнением.** Требования, предъявляемые к параметрам слоев, могут быть сформулированы в результате расчетов коэффициента отражения электромагнитной волны при её нормальном падении на слоистую металлодиэлектрическую структуру с использованием матрицы передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны.

**6.2 Модель волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой.** Была построена модель волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой: перед диэлектрической пластиной с нанесенным на нее тонким и частично пропускающим излучение металлическим слоем помещался одномерный 11-слойный волноводный фотонный кристалл. Рассматриваемая структура фотонного кристалла состояла из слоев поликора толщиной 0,5 мм и фторопласта толщиной 14 мм, полностью заполняющих волновод по поперечному сечению.

**7. Компьютерное моделирование.** В ходе компьютерного моделирования был выполнен расчет амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) волноводного фотонного кристалла с нанометровой металлической пленкой и распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны на частоте соответствующей пику коэффициента прохождения и минимуму коэффициента отражения электромагнитной волны через фотонное таммовское состояние.

Рассматривала 3 случая с разной толщиной металлического слоя при удельной электропроводности  $50\,000\ \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  :

1.  $d = 700\ \text{нм}$
2.  $d = 760\ \text{нм}$
3.  $d = 1200\ \text{нм}$

При наличии нанометровой металлической пленки на поверхности фотонного кристалла на амплитудно-частотной характеристике наблюдается резкий минимум коэффициента отражения электромагнитной волны, связанный с возникновением поверхностного фотонного таммовского состояния в системе фотонный кристалл – тонкая металлическая пленка.

При этом на границе фотонного кристалла и металлической пленки наблюдается максимум напряженности электрического поля.

Величина минимума коэффициента отражения и распределение напряженности электрического поля на частоте этого минимума зависит от толщины электропроводности металлической пленки. Резкий минимум коэффициента отражения наиболее ярко выражен при толщине металлической пленки равной  $d = 760$  нм. Этот минимум можно трактовать как фотонные таммовские состояния.

**8. Экспериментальная часть.** Экспериментально исследовался волноводный фотонный кристалл при наличии на его поверхности нанометровой металлической пленки, полностью или частично заполняющей поперечное сечение волновода.

Были измерены амплитудно-частотные характеристики волноводного фотонного кристалла с разной степенью заполнения  $S$  нанометровой металлической пленки поперечного сечения волновода:

1-  $S=1.0$                       2-  $S=0.65$                       3-  $S=0.52$

Вывод: Наблюдалось минимумы коэффициента отражения на АЧХ волноводного фотонного кристалла при разных степенях заполнения  $S$  нанометровой металлической пленки поперечного сечения волновода.

Как следует из результатов эксперимента и компьютерного моделирования, резкий минимум коэффициента отражения наиболее ярко выражен при степени заполнения  $S = 1.0$  и толщине нанометровой металлической пленки  $d = 760$  нм. Этот минимум можно трактовать как фотонные таммовские состояния.

**Заключение.** В результате выполнения бакалаврской работы были решены следующие задачи:

- 1) Проанализированы исследования таммовских состояний на границе фотонного кристалла.

- 2) Показана возможность описания амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения и прохождения исследуемого фотонного кристалла.
- 3) Проведено компьютерное моделирование характеристик фотонного кристалла с нанометровым металлическим слоем.
- 4) Проведено исследование таммовских состояний фотонного кристалла, контактирующего с однородным слоем с отрицательной диэлектрической проницаемостью.
- 5) Экспериментально исследован фотонный кристалл с нанометровым металлическим слоем, созданный в соответствии с описанной выше моделью. Экспериментально исследованы амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения и прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с фотонным кристаллом, состоящим из периодически чередующихся слоев поликора и фторопласта, и контактирующим с нанометровым металлическим слоем.
- б) Установлено, что на границе фотонного кристалла при его контакте с нанометровым металлическим слоем возникают фотонные таммовские поверхностные состояния.

Таким образом, экспериментально исследовано возникновение фотонных таммовских поверхностных состояний в фотонном кристалле, составленном из одномерного 11-слойного волноводного фотонного кристалла, граничащего с нанометровой металлической пленкой.

## Список использованных источников

1. Тамм И.Е. О возможности связанных состояний электронов на поверхности кристалла // Журнал экспериментально и теоретической физики. 1933. Т.3. С.34–43.
2. Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Мерзликин А.М., Лисянский А.А. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах// Успехи физических наук. 2010. Том 180. № 3. С. 249–263.
3. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. СВЧ фотонные кристаллы-новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике: учеб. пособие для студентов, магистрантов и аспирантов, обучающихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Физика» - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016.-84 с.
4. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Рязанов Д.С. Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях// Радиотехника и электроника. 2016. Том. 61. № 4. С. 321–326.
5. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Рязанов Д.С. Новые области применения СВЧ фотонных кристаллов// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. №3, часть 2. С. 6–19.
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов: Учеб. Пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» –Саратов, 2014. –32 с.: ил. Электронное издание.
7. Лифшиц И.М., Пикар С.И. Таммовские поверхностные состояния электронов на поверхности кристалла и поверхностные колебания атомов решетки// Успехи физических наук. 1955 г. Август Т.LVI, вып.4
8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Волноводные фотонные кристаллы с

- характеристиками, управляемыми р-і-п-диодами // Изв. вузов Электроника. 2010. №1. С. 24-29.
9. Дэвисон С., Левин Дж. Поверхностные (таммовские) состояния. Пер. с англ. / Под ред. Д.А. Киржница. М.: Мир, 1973. 232 с.
  10. Тамм И.Е. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1975. Т. 1. 440 с.
  11. Гуняков В.А., Герасимов В.П., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Ветров С.Я., Камаев Г.Н., Шабанов А.В., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Термооптическое переключение в одномерном фотонном кристалле // ПЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 21. С. 76-83.
  12. Гуняков В.А., Мысливец С.А., Паршин А.М., Зырянов В.Я., Архипкин В.Г., Шабанов В.Ф. Управление пропусканием многослойного фотонного кристалла с жидкокристаллическим дефектом с помощью магнитного поля // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 10. С. 95-100.
  13. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 112–117.
  14. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. // Известия вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 27–35.
  15. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. // Известия вузов. Электроника. 2007. № 6. С. 25–32.
  16. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушением периодичности // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 11. С. 1071-1076.
  17. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла // Доклады Академии Наук. 2005. Т. 403, № 3. С. 319-324.