

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**Особенности амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных
кристаллов при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ
студента 2 курса 201 группы
направление 11.04.04 «Диагностика нано- и биомедицинских систем»
факультета нано- и биомедицинских технологий
Ручкина Виктора Юрьевича

Научные руководители

Профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Старший преподаватель, к.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Е.В. Латышева

инициалы, фамилия

И. о. зав. кафедрой

Профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Введение

Определение электрофизических параметров полупроводниковых и диэлектрических структур возможно при применении 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 [1]. 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.

Отдельный класс составляют резонансные методы, основанные на эффектах диэлектрического (ДР) [2] и волноводно-диэлектрического (ВДР) резонансов [3,4]. 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 работе [1] авторами для измерения параметров нанометровых металлических слоев на диэлектрических подложках было предложено использование волноводно-диэлектрического резонанса, возникающего при размещении исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.

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.[5]

К такого рода системам относятся одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы. При наличии дефекта в такой структуре, нарушающего периодичность, в фотонной запрещенной зоне может проявляться резонансная особенность, называемая примесной модой колебаний и обладающая высокой чувствительностью к параметрам дефекта.

В случае, когда слой исследуемого материала играет роль нарушения периодичности СВЧ фотонного кристалла, возможна реализация методов измерения, в основе которых лежит взаимодействие электромагнитного излучения с фотонными кристаллами, при условии, что известны электрофизические и геометрические параметры элементов периодической структуры.

В настоящей работе для реализации СВЧ-метода измерения электрофизических параметров элементов фотонного кристалла, рассмотрена возможность использования волноводно-диэлектрического резонанса при размещении фотонной структуры симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам латунного волновода.

Целью данной работы является исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения электромагнитного излучения при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в системах с фотонным кристаллом при различных углах поворота систем по отношению к узким стенкам волновода. Выпускная квалификационная работа содержит 3 главы:

- 1) Анализ современного состояния исследований материалов в СВЧ-диапазоне с использованием фотонных кристаллов.
- 2) Математическое моделирование взаимодействия структур с использованием фотонного кристалла с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона.
- 3) Экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в системе с фотонным кристаллом.

Математическое моделирование взаимодействия фотонных структур с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона.

Известно, что одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы используются для реализации методов одновременного определения одного или двух параметров полупроводниковых структур, например, толщины и удельной электропроводности высоколегированного полупроводникового слоя, нанесенного на полуизолирующую подложку, или толщины металлического слоя, нанесенного на полупроводниковую подложку, и удельной электропроводности подложки.

В то же время эти методы предполагают использование независимых способов для определения электрофизических и геометрических параметров элементов периодической структуры.

Например, в работе [10] авторами было предложено определять параметры металлодиэлектрических структур с нанометровыми металлическими слоями с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов, элементы которых частично заполняли поперечное сечение прямоугольного волновода по ширине, располагаясь параллельно узкой стенке волновода симметрично относительно его продольной оси.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик систем с использованием фотонного кристалла при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса было выполнено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (High Frequency Structure Simulator), которой реализуется метод конечных элементов. Основная идея этого метода заключается в разбиении всего объема трехмерной модели на небольшие подобласти, называемые элементами и имеющие форму тетраэдров. При решении электродинамической задачи размер этих элементов должен быть подобран так, чтобы обеспечить незначительное изменение полей в границах элемента, и это в свою очередь позволяет аппроксимировать решение внутри элемента

простой функцией с неизвестными коэффициентами. Вне границ элемента аппроксимирующая функция обращается в 0. Отличительной чертой метода конечных элементов является выбор в качестве неизвестных коэффициентов значений искомой функции в узлах тетраэдров, которые поначалу не известны.

Следующим шагом является создание системы линейных алгебраических уравнений для каждого из элементов посредством минимизации соответствующего функционала относительно значений функции решения в узлах тетраэдра. Выбор функционала зависит от физических особенностей моделируемой электродинамической системы. Полученные для каждого элемента системы линейных алгебраических уравнений компонуются в одну общую систему, оптимизирующуюся с учетом того факта, что расположенные непосредственно рядом тетраэдры имеют общие точки. Матрица, соответствующая полученной объединенной системе уравнений, имеет разреженный вид, что как следствие заметно ускоряет расчет.

Последним шагом является учет граничных условий, что позволяет связать значения функции решения в узлах тетраэдров, лежащих внутри модели, с ее значениями на границах модели. Таким образом, значения во внутренних узловых точках оказываются связаны со значениями на границах модели. Решение скорректированной системы линейных алгебраических уравнений легко находится на ЭВМ с помощью широко используемых численных методов.

Основными достоинствами метода конечных элементов являются его способность анализа структур произвольной пространственной геометрии, в также анизотропных диэлектрических и магнитных материалов с потерями, возможность получения расчетных параметров в любой точке модели, учет одновременно всех возможных воздействий на модель при одном расчете. К недостаткам метода можно отнести большое количество времени, требуемого для проведения расчетов, необходимость в высокопроизводительных ЭВМ,

отличающихся, в частности, наличием многоядерных процессоров и большого объема оперативной памяти, высокой профессиональной подготовки пользователей для понимания особенностей данного метода и самих физических принципов, лежащих в основе построенной модели, и получения надежных результатов.

При расчете модели по методу конечных элементов особое внимание должно уделяться сходимости решений, которая связана непосредственно с построением трехмерной сетки. При обработке модели небольшие отклонения или неточности могут в значительной степени исказить конечные результаты, например, в резонаторных системах при решении электродинамических задач. Решением такой проблемы может служить увеличение итераций разбиения сетки, однако, при этом резко увеличиваются время расчета и используемые вычислительные ресурсы. Если пользователь может пожертвовать временем ожидания ради получения надежного результата, то возможности даже самых современных ЭВМ крайне ограничены, что приводит к использованию кластеров или вычислительных сетей для проведения важных расчетов. Таким образом, результат успешного решения трехмерной электромагнитной задачи напрямую зависит от компромисса между временем расчета, вычислительной мощностью ЭВМ и требованием к сходимости расчета.

Для решения указанных проблем могут применяться инструменты оптимизации самой модели и модернизированные алгоритмы расчета. В частности, для создания трехмерной сетки используется специальный алгоритм адаптивного разбиения на конечные элементы, заключающийся в измельчении сетки и уменьшении размера тетраэдров, только в тех местах, где это необходимо. Например, при решении электродинамических задач такого рода областями выступают места резкого изменения электрического поля. В местах, где поле меняется незначительно, размер ячейки остается достаточно большим.

На начальном этапе данной работы в ходе математического моделирования исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с образцом, представляющим собой однослойную структуру, состоящую из пластины поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9.6$) размером $60 \times 10 \times 2$ мм (рис. 10).

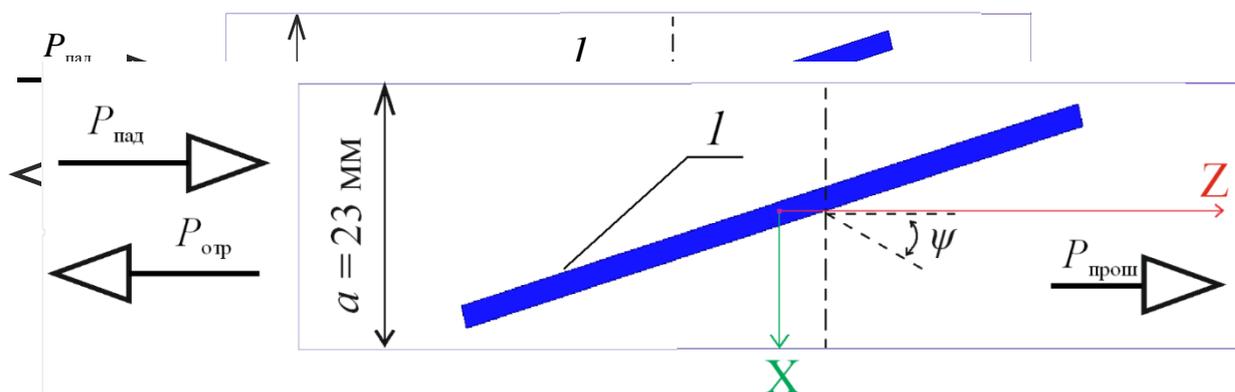


Рис. 10 Расположение моделируемой структуры в волноводе: 1 — Al_2O_3 . $P_{\text{пад}}$ —падающая мощность, $P_{\text{прош}}$ —прошедшая мощность, $P_{\text{отр}}$ —отраженная мощность.

Данная структура размещалась в волноводе сечением 23×10 мм, перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси. При таком расположении структуры на частотных зависимостях коэффициентов отражения электромагнитной волны наблюдаются пики ослабления. Характерные частоты этих пиков определяются 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 пики прохождения и ослабления располагались вблизи середины трехсантиметрового диапазона длин волн.

Результаты расчета частотных зависимостей квадратов модулей коэффициентов отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с металлодиэлектрической структурой, при различных значениях угла поворота по отношению к узким стенкам волновода представлены на рис. 11.

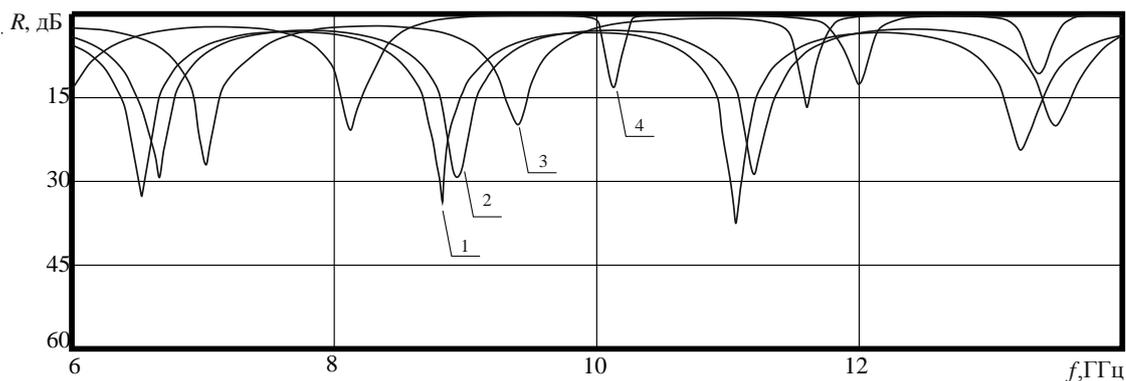


Рис.11 Расчетная зависимость коэффициента отражения от частоты в структуре с пластиной поликора длиной в 60 мм, расположенной симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам волновода: 1- $\psi=0^\circ$, 2 - $\psi=5^\circ$, 3 - $\psi=10^\circ$, 4 - $\psi=15^\circ$.

Представляет интерес расчет распределения напряженности электрического поля на фиксированных частотах вдоль широкой стороны поликоровой пластины в поперечном сечении волновода, при различных углах поворота ψ к узким стенкам волновода.

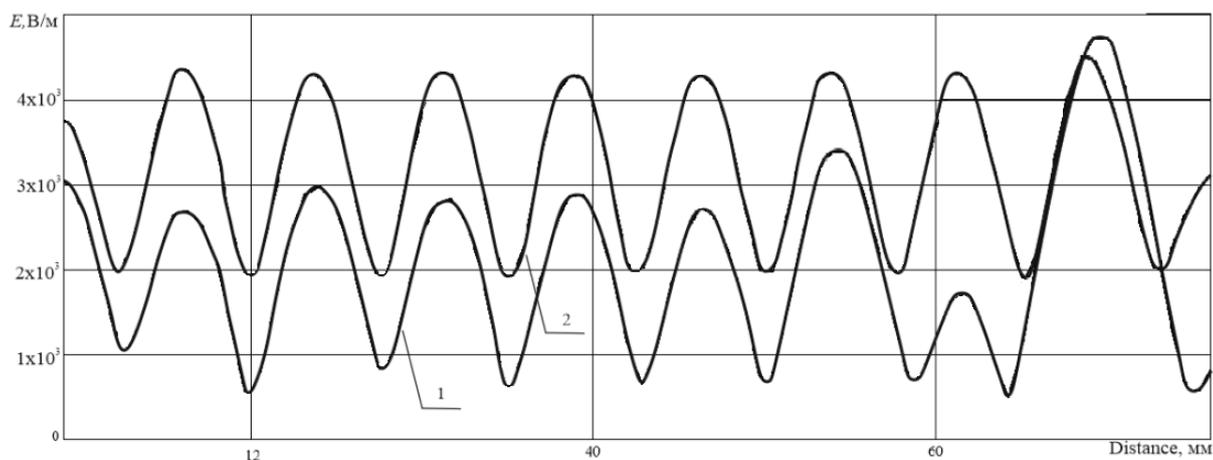


Рис. 12 Расчетная зависимость распределения напряженности электрического поля E для структуры, состоящей из пластины поликора от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1 – $\psi=10^\circ$, 2 - $\psi=0^\circ$.

Как следует из результатов расчета на частотах, соответствующих минимальному значению коэффициента отражения, вдоль продольной оси волновода возникает распределение поля, соответствующее стоячей волне с чередующимися узлами и пучностями.

Следом исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с образцом, представляющим собой многослойную структуру, состоящую из 6 слоев поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9.6$) размером $3 \times 10 \times 2$ мм и 5 слоев фторопласта (Ф-4, $\varepsilon = 1.9$) размером $10 \times 10 \times 2$ мм (рис. 13).

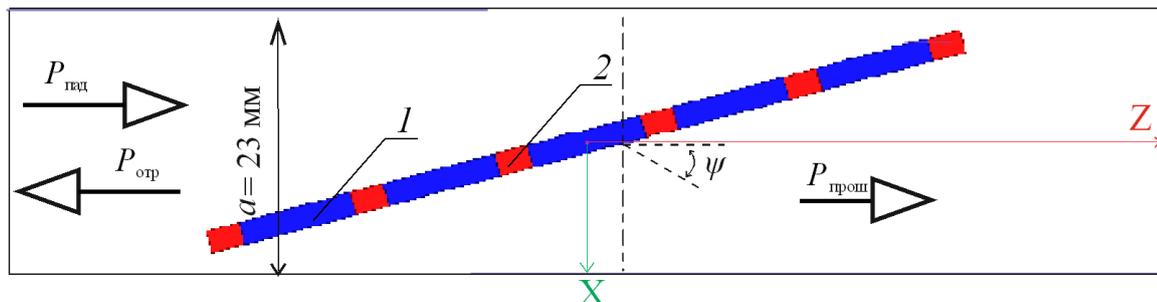


Рис. 13 Расположение моделируемой структуры в волноводе: 1 – слой фторопласта (Ф-4), 2 слой — Al_2O_3 . $P_{\text{пад}}$ – падающая мощность, $P_{\text{прош}}$ – прошедшая мощность, $P_{\text{отр}}$ – отраженная мощность.

Далее были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики данной системы с СВЧ фотонным кристаллом. Структура располагалась симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам волновода. Была построена расчетная зависимость коэффициента отражения от угла поворота ψ данной структуры по отношению к узким стенкам волновода (рис.14).

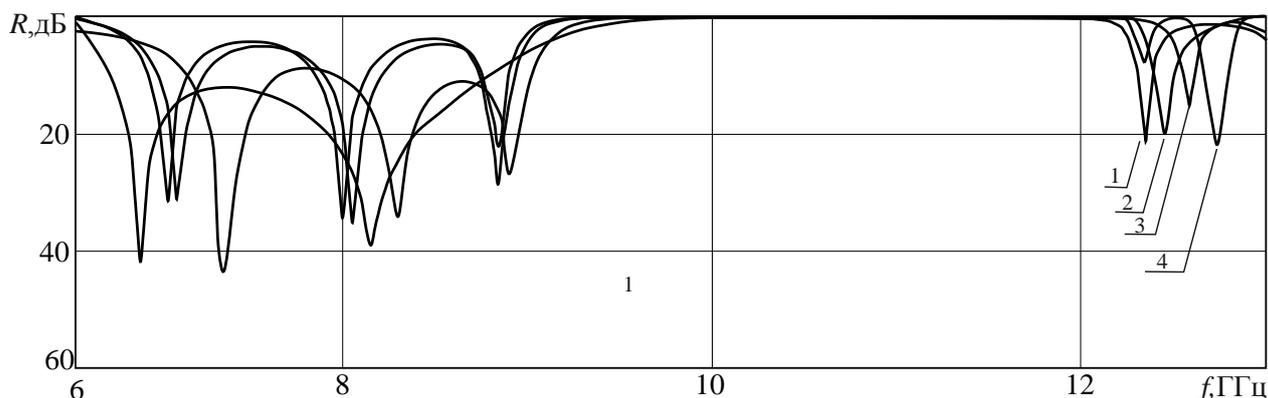


Рис.14 Расчетная зависимость коэффициента отражения от частоты для структуры с СВЧ фотонным кристаллом, нечётные слои которой были выполнены из фторопласта, а чётные из поликора, от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1- $\psi=0^\circ$, 2 - $\psi=15^\circ$, 3 - $\psi=5^\circ$, 4 - $\psi=10^\circ$.

Как видно из рис. 14, на частотных зависимостях коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонными кристаллами возникают разрешенные и запрещенные зоны.

Также исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с образцом, представляющим собой многослойную структуру, состоящую из 6 слоев поликора (Al_2O_3 , $\varepsilon = 9.6$) размером $3 \times 10 \times 2$ мм, 8 слоев фторопласта (Ф-4, $\varepsilon = 1.9$) размером $10 \times 10 \times 2$ мм. Нарушение периодичности СВЧ фотонного кристалла было получено изменением геометрических размеров центрального слоя, выполненным из фторопласта (Ф-4, $\varepsilon = 1.9$) размером $1.5 \times 10 \times 2$ мм (рис. 15).

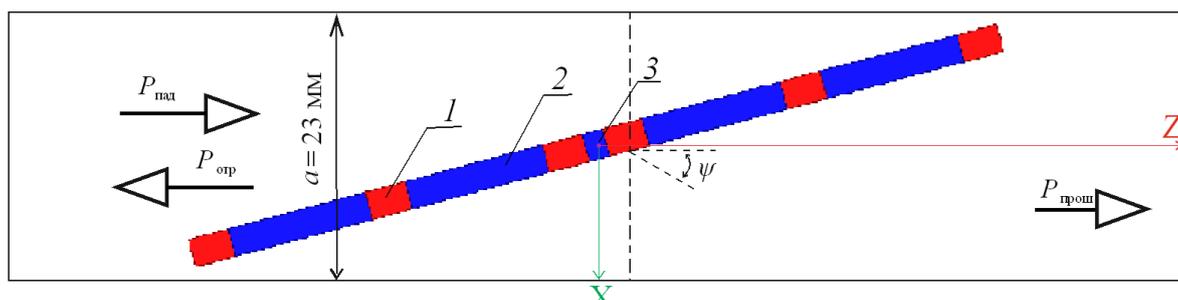


Рис. 15 Расположение моделируемой структуры в волноводе: 1 – слой фторопласта (Ф-4), 2 слой — Al_2O_3 , 3 – нарушение периодичности, выполненное из фторопласта (Ф-4). $P_{\text{пад}}$ –падающая мощность, $P_{\text{прош}}$ –прошедшая мощность, $P_{\text{отр}}$ –отраженная мощность.

Также были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики данной структуры с 11-слойным фотонным кристаллом, нечётные слои которого были выполнены из фторопласта размерами $10 \times 10 \times 2$ мм, а чётные из поликора размерами $3 \times 10 \times 2$ мм. Нарушение периодичности СВЧ фотонного кристалла было получено изменением геометрических размеров центрального слоя, выполненным из фторопласта размером $1.5 \times 10 \times 2$ мм. Данная структура располагалась симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам

волновода. Была построена расчетная зависимость коэффициента отражения от угла поворота ψ данной структуры по отношению к узким стенкам волновода (рис 16).

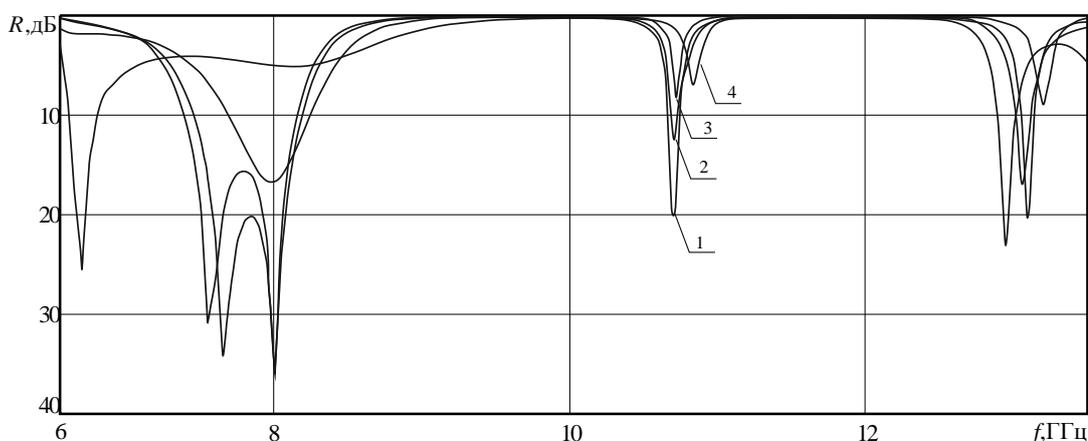


Рис.16 Расчетная зависимость коэффициента отражения от частоты для структуры с СВЧ фотонным кристаллом, нечётные слои и дефект которой были выполнены из фторопласта а чётные из поликора, от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1- $\psi=0^\circ$, 2 - $\psi=5^\circ$, 3 - $\psi=10^\circ$, 4 - $\psi=15^\circ$.

Как следует из результатов расчета частотная зависимость коэффициента прохождения при наличии в структуре фотонного кристалла нарушения периодичности (рис.15), расположенной перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси, характеризуется наличием пиков прохождения на частотах 10.7 ГГц, 10.72 ГГц, 10.75 ГГц, и 10.85 ГГц для значений $\psi=0^\circ$, 5° , 10° , 15° соответственно.

Был произведён расчёт распределения поля вдоль СВЧ фотонного кристалла для структуры, состоящей из 6 слоев поликора размером 3x10x2 мм, 4 слоев фторопласта размером 10x10x2 мм и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из фторопласта размером 1.5x10x2 мм, при различных углах поворота ψ данной структуры по отношению к узким стенкам волновода. (рис. 167).

Как следует из результатов расчета на частотах, соответствующих минимальному значению коэффициента отражения, вдоль продольной оси

волновода возникает распределение поля (см. рис. 17), соответствующее стоячей волне с чередующимися узлами и пучностями.

При этом количество пучностей зависит от структуры, количества элементов и соотношения диэлектрических проницаемостей слоев фотонного кристалла.

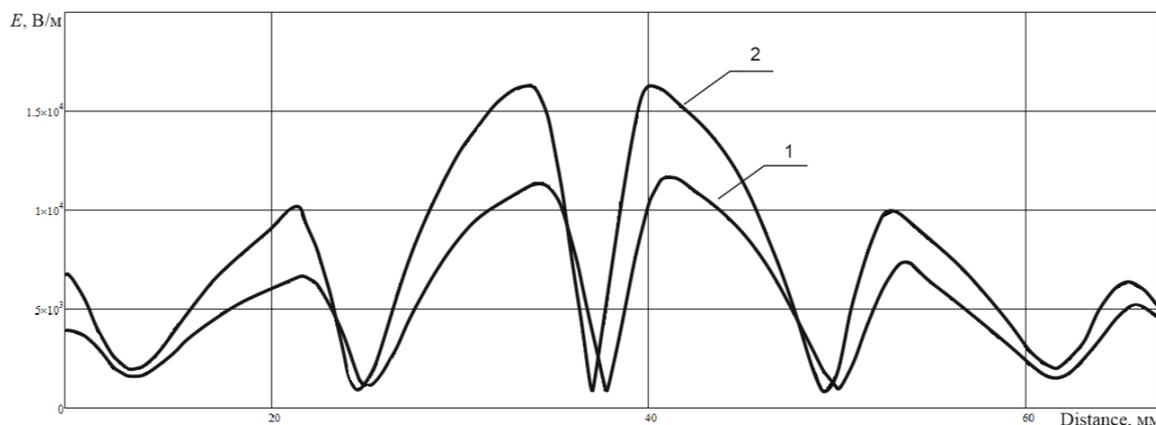


Рис. 17 Расчетная зависимость распределения напряженности электрического поля E для структуры, состоящей из слоев поликора, слоев фторопласта и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из фторопласта, от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1 – $\psi=0^\circ$, 2 – $\psi=10^\circ$.

На зависимости распределения напряженности электрического поля E , представленной на рисунке 17 количество пучностей соответствует числу элементов с большей диэлектрической проницаемостью.

В заключительном этапе данной работы исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения трехсантиметрового диапазона длин волн с фотонным кристаллом, элементы которого расположены на подложке, выполненной из диэлектрического материала ФЛАН ($\epsilon = 8.8$) размерами $60 \times 10 \times 1$ мм (рис 18). СВЧ фотонный кристалл представлял собой многослойную структуру, состоящую из 8 слоев диэлектрического материала ФЛАН ($\epsilon = 8.8$) размером $4 \times 10 \times 2$ мм, 6 слоев пенопласта ($\epsilon = 1,1$) размером $8.5 \times 10 \times 2$ мм (см. рис. 10), и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из пенопласта ($\epsilon = 1,1$) размером $2 \times 10 \times 2$ мм.

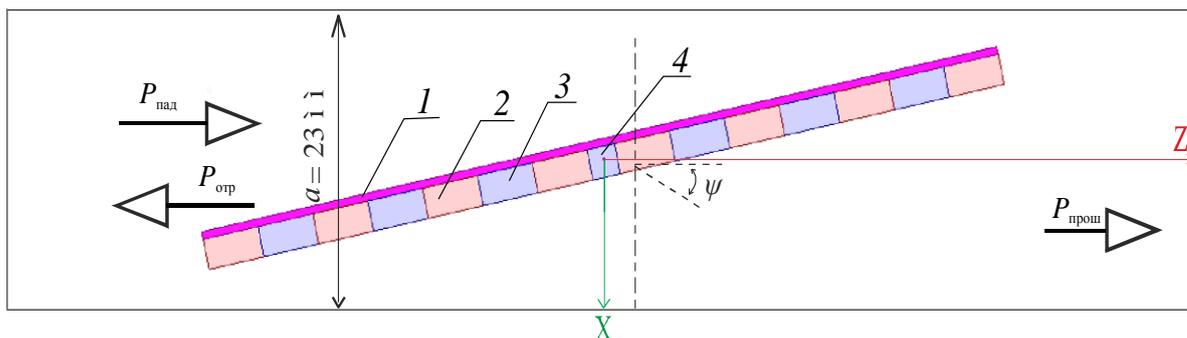


Рис. 18 Расположение моделируемой структуры в волноводе: 1 – подложка из материала ФЛАН, 2 – слой, выполненный из материала ФЛАН, 3 – слой выполненный из пенопласта, 4 - нарушение периодичности, выполненное из пенопласта. $P_{пад}$ –падающая мощность, $P_{прош}$ –прошедшая мощность, $P_{отр}$ –отраженная мощность.

Были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики структуры с СВЧ фотонным кристаллом, элементы которого расположены на подложке. Подложка была выполнена из диэлектрического материала ФЛАН размерами 60x10x1 мм. Нечётные слои структуры были выполнены из пенопласта размерами 8.5x10x2 мм, а чётные из ФЛАН размерами 4x10x2 мм. Нарушение периодичности СВЧ фотонного кристалла было получено изменением геометрических размеров центрального слоя, выполненным из пенопласта размером 2x10x2 мм. Данная структура располагалась симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам волновода. Была построена расчетная зависимость коэффициента отражения от угла поворота ψ данной структуры по отношению к узким стенкам волновода (рис.19).

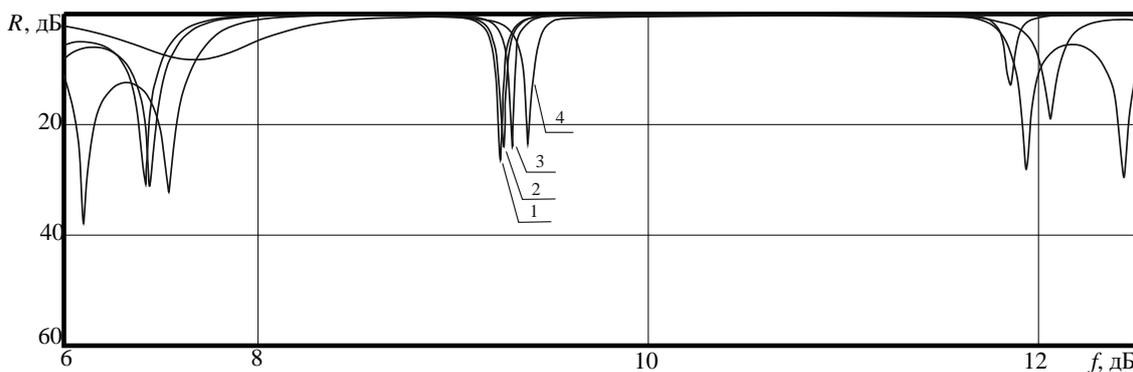


Рис.19 Расчетная зависимость коэффициента отражения от частоты для структуры с СВЧ фотонным кристаллом, нечётные слои и дефект которой были выполнены из пенопласта, а чётные и подложка из материала ФЛАН, от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1 - $\psi=0^\circ$, 2 - $\psi=5^\circ$, 3 - $\psi=10^\circ$, 4 - $\psi=15^\circ$.

Был произведён расчёт распределения поля вдоль СВЧ фотонного кристалла для структуры, состоящей из 8 слоев ФЛАНа размером 4x10x2 мм, 6 слоев пенопласта размером 8.5x10x2 мм и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из пенопласта размером 2x10x2 мм при различных углах поворота ψ данной структуры по отношению к узким стенкам волновода (рис. 20).

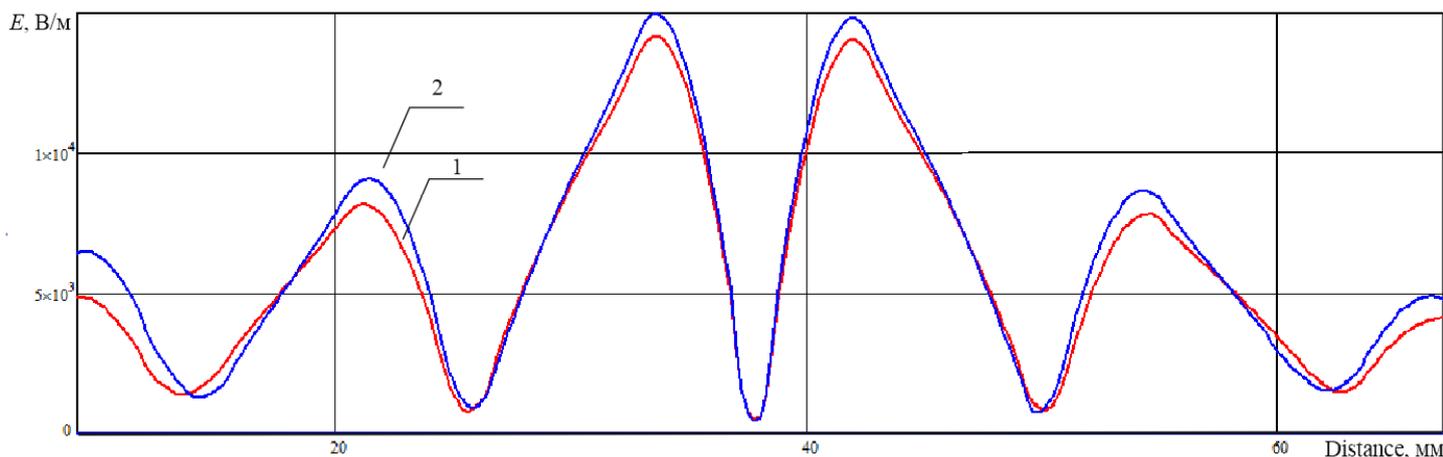


Рис. 20 Расчетная зависимость распределения напряженности электрического поля E для структуры, состоящей из слоев ФЛАНа, слоев пенопласта и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из пенопласта, от координаты внутри фотонного кристалла: 1 - $\psi=0^\circ$, 2 - $\psi=10^\circ$.

Результаты расчета на частотах, соответствующих минимальному значению коэффициента отражения, показывают, что аналогично фотонному кристаллу, содержащему элементы поликора (см. рис. 17), числу элементов с большей диэлектрической проницаемостью соответствует количество пучностей стоячей волны в распределении поля вдоль продольной оси волновода.

Было рассчитано распределение поля внутри исследуемой структуры в поперечном сечении волновода (см. рис. 21) на координате $X=18$ мм, соответствующей узлу стоячей волны.

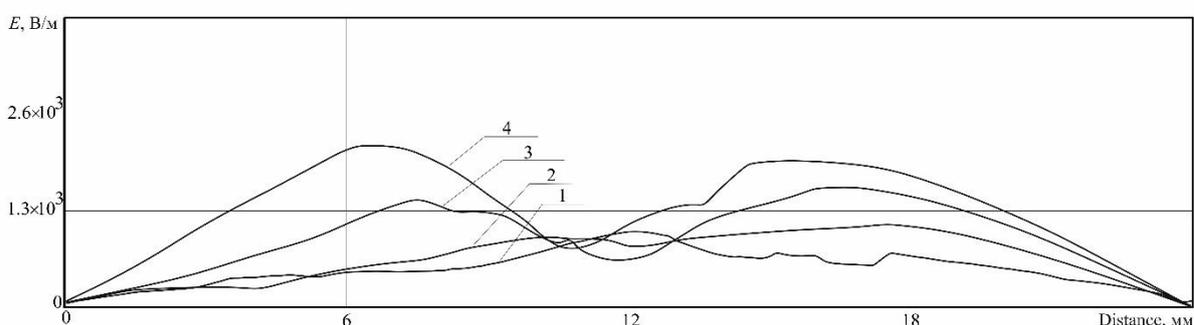


Рис. 21 Расчетная зависимость распределения электрического поля E в поперечном сечении волновода в точке минимума вдоль координаты X для фотонного кристалла, расположенного на поликоровой подложке, с включенным в него дефектом. Нечётные слои фотонного кристалла и дефект были выполнены из фторопласта, а чётные слои и подложка из поликора, от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1- $\psi = 0^\circ$, 2 - $\psi = 5^\circ$, 3 - $\psi = 10^\circ$, 4 - $\psi = 15^\circ$.

Распределение электрического поля E в поперечном сечении волновода в точке минимума R для фотонного кристалла характеризуется нарастанием напряженности в центральном сечении образца и её спадом на его границах при $\psi = 0^\circ$, при увеличении угла поворота фотонной структуры относительно узких стенок волновода до 5° максимум напряженности поля смещается вправо. При дальнейшем увеличении ψ в поперечном сечении волновода возникает распределение поля, соответствующее стоячей волне с двумя пучностями (преимущественному возбуждению волны H_{20} в отрезке волновода, содержащем волноводную фотонную структуру).

Было рассчитано распределение поля внутри исследуемой структуры в поперечном сечении волновода (см. рис. 21) на координате $X=28$ мм, соответствующей пучности стоячей волны.

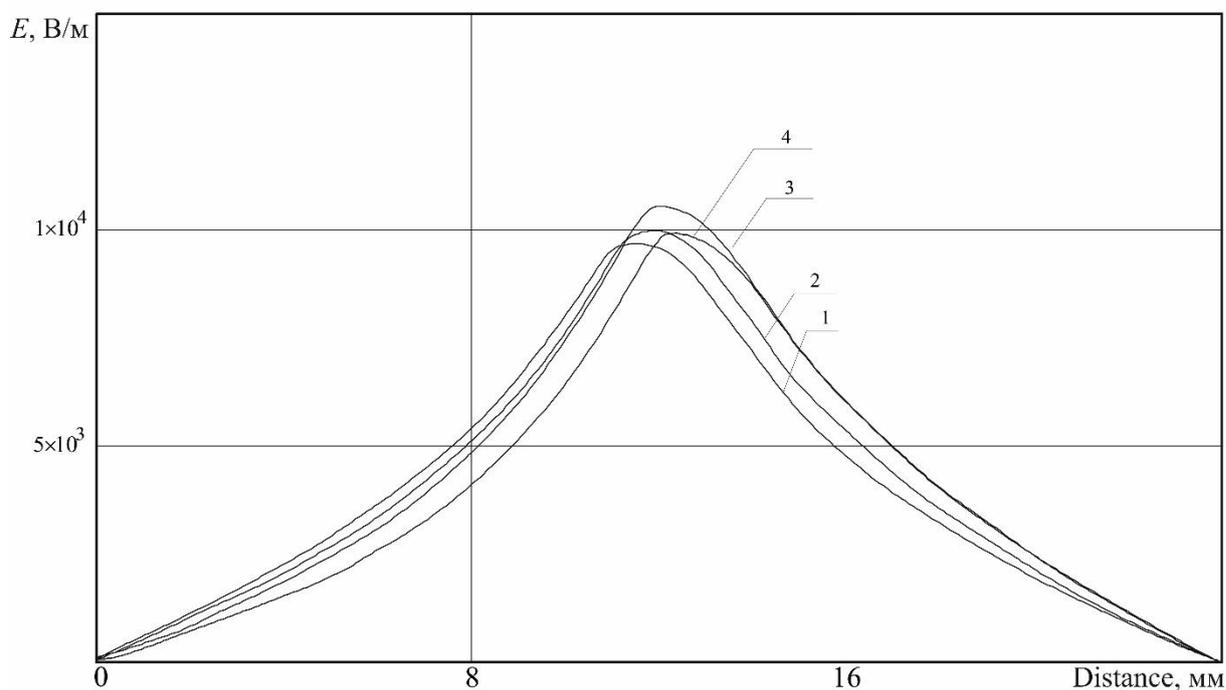


Рис. 22 Расчетная зависимость распределения электрического поля E в поперечном сечении волновода в точке максимума вдоль координаты X для фотонного кристалла, расположенного на поликоровой подложке, с включенным в него дефектом. Нечётные слои фотонного кристалла и дефект были выполнены из фторопласта, а чётные слои и подложка из поликора, от угла поворота ψ к узким стенкам волновода: 1- $\psi = 0^\circ$, 2 - $\psi = 5^\circ$, 3 - $\psi = 10^\circ$, 4 - $\psi = 15^\circ$.

Распределение электрического поля E в поперечном сечении волновода в точке минимума R для фотонного кристалла характеризуется нарастанием напряженности в центральном сечении образца и её спадом на его границах при $\psi = 0^\circ$, при увеличении угла поворота фотонной структуры относительно узких стенок волновода максимум напряженности поля немонотонно изменяется.

Экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения при возникновении волноводно-диэлектрического резонанса в системе с фотонным кристаллом.

Измерения частотных зависимостей квадратов модулей коэффициентов отражения $R^2(f)$ электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонной структурой, состоящей из слоев ФЛАНа размером 4x10x2 мм, слоев пенопласта размером 8.5x10x2 мм и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из пенопласта размером 2x10x2 мм, расположенной асимметрично относительно середины волновода, полностью заполняя его по высоте и частично по ширине, проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA N5230A.

Экспериментальные зависимости амплитудно-частотных характеристик при различных значениях угла поворота ψ структуры по отношению к узким стенкам волновода представлены на рис. 21.

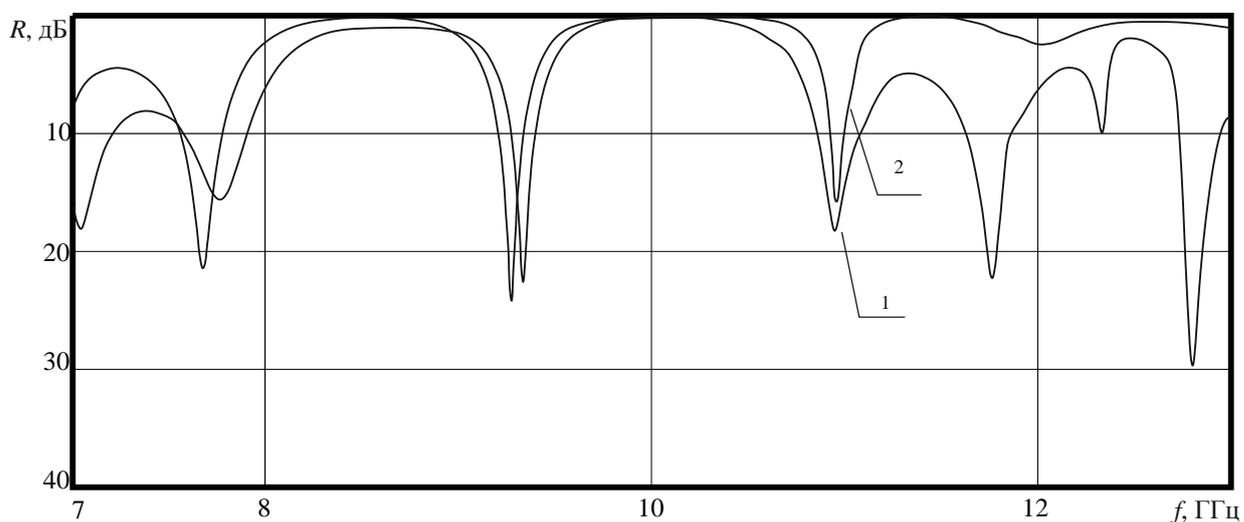


Рис. 21 Экспериментальные частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов прохождения электромагнитного излучения, взаимодействующего со структурой, состоящей из слоев ФЛАНа, слоев пенопласта и нарушения периодичности центрального слоя фотонного кристалла (дефекта) выполненного из пенопласта, от координаты внутри фотонного кристалла: 1 – $\psi=0^\circ$, 2 - $\psi=10^\circ$.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем количественном совпадении. Следует отметить, что некоторое расхождение между расчетными и экспериментальными данными может быть обусловлено пренебрежением конечной проводимостью стенок волновода и неконтролируемой неоднородностью геометрических и электрофизических параметров используемых структур.

Как следует из результатов эксперимента на частоте $f=9,27$ ГГц, соответствующей пику ослабления в отсутствие угла поворота по отношению к узким стенкам волновода, увеличение значения угла поворота по отношению к узким стенкам волновода от 0° до 10° приводит к сдвигу резонансного пика ослабления в высокочастотную область с частотой в $f=9,34$ ГГц.

Полученные расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования волноводно-диэлектрического резонанса для измерения параметров элементов фотонного кристалла, при размещении исследуемой структуры перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам волновода симметрично относительно его продольной оси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы с использованием программного обеспечения Mathcad и Ansoft Hfss были смоделированы различные СВЧ фотонные структуры, а также рассмотрено возникновение волноводно-диэлектрического резонанса в данных периодических структурах.

Были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики для пластины поликора и для различных волноводных фотонных структур, расположенных симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам волновода.

Было построено распределение поля вдоль смоделированного СВЧ фотонного кристалла для пластины поликора и для различных волноводных фотонных структур, расположенных симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам волновода.

Было построено распределение поля в поперечном сечении волновода в точках максимума и минимума для системы с фотонным кристаллом, расположенным на поликоровой подложке, с включенным в него дефектом, нечётные слои и дефект которого были выполнены из фторопласта, а чётные из поликора, расположенной симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом ψ к узким стенкам волновода.

Показана возможность реализации СВЧ-метода измерения электрофизических параметров элементов фотонного кристалла с использованием волноводно-диэлектрического резонанса при размещении фотонной структуры симметрично относительно продольной оси волновода и перпендикулярно широким и под углом к узким стенкам латунного волновода.