

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию

Евтеева Сергея Геннадиевича

«СВЧ фотонный кристалл с электрически управляемыми характеристиками и возможность его использования в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Разработка высокоэффективных функциональных устройств СВЧ-диапазона связана с развитием высокотехнологичного производства, обеспечивающего изготовление полупроводниковых, диэлектрических и металлических структур с размерами от единиц до десятков нанометров.

Среди новых типов твердотельных структур, применяемых в технике СВЧ-диапазона, можно выделить периодические структуры, получивших название фотонных кристаллов или брэгговских структур. Отличительной особенностью периодических структур, используемых при создании функциональных устройств СВЧ-диапазона, является разнообразие повторяющихся элементов, в качестве которых могут применяться стандартные СВЧ-элементы различной формы и конфигурации.

Периодические структуры на основе резонаторов в качестве замедляющих систем для вакуумных СВЧ-приборов и СВЧ-фильтров были описаны еще в 60-е годы прошлого века. Они предназначались для использования в качестве замедляющих систем в этих приборах, обеспечивающих оптимальное взаимодействие электронного потока с электромагнитной волной.

В настоящее время одним из широко применяемых типов резонансных элементов, которые используются при создании устройств твердотельной СВЧ-электроники, являются резонансные волноводные диафрагмы. В конструкциях аттенуаторов и выключателей на $p-i-n$ -диодах малые геометрические размеры щели резонансной диафрагмы обеспечивают эффективное взаимодействие полупроводниковых элементов, имеющих малые габариты, с полем волновода.

Одним из современных диагностических устройств, применяемых для исследования характеристик полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники является сканирующая ближнеполевая СВЧ-микроскопия. Для повышения чувствительности метода ближнеполевой СВЧ-микроскопии при сохранении высокой локальности измерений используются резонаторы различной конфигурации. В качестве нового типа электродинамической системы, используемой для создания СВЧ-резонатора могут быть применены СВЧ фотонные кристаллы на основе резонансных диафрагм с нарушением периодичности.

Другой актуальной проблемой, решение которой относится к физике структур с фотонной запрещенной зоной, является поиск возможностей создания узкополосных фильтров пропускания и заграждения с электрически управляемыми в широком диапазоне значений амплитудно-частотными характеристиками.

Создание фотонных кристаллов на основе упорядоченно расположенных элементов различной формы и конфигурации, открывает возможность решения другой актуальной проблемы радиофизики и твердотельной электроники: создания фильтров пропускания и заграждения с электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками, обеспечивающими достижение значительной величины диапазона регулировки мощности выходного сигнала.

Ещё одной актуальной проблемой, решение которой необходимо для совершенствования современных радиолокационных систем и систем спутниковой связи, является разработка, наряду с полосовыми фильтрами, предназначенными для

распространения сигналов на выбранных частотах, широкой номенклатуры СВЧ-фильтров загораждения, необходимых для подавления нежелательных ложных сигналов, субгармоник и более высоких гармоник. Современные СВЧ-фильтры загораждения, наряду с высоким коэффициентом ослабления в выбранной полосе частот, должны характеризоваться коэффициентом прохождения электромагнитного излучения близким к единице вне полосы загораждения. Такие фильтры могут быть реализованы с использованием брэгговских структур с электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками.

В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание нового типа СВЧ фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм, электродинамические характеристики которых управляются с помощью $n-i-p-i-n$ -структур, и его использование для достижения рекордной чувствительности при измерениях параметров диэлектрических материалов методами ближнеполевой СВЧ-микроскопии является актуальным для радиофизики и твердотельной электроники.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 129 страницах и содержит обширный список литературы из 153 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, решаемые задачи, определена новизна исследований и обоснована практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первом разделе диссертации проведен критический анализ современного состояния исследования структур с фотонной запрещенной зоной, особенностей их электродинамических характеристик. В результате проведенного анализа сформулированы новые задачи по теме диссертационного исследования.

Автором сделан вывод, что одномерные СВЧ фотонные кристаллы могут быть использованы для создания электродинамических систем, характеризующихся наличием запрещенных и разрешенных зон, и совершенствования методов измерений параметров материалов и структур СВЧ-методами. При этом отмечено, что СВЧ-методы, использующие такой тип электродинамических систем, обладают более высокой чувствительностью к изменению параметров контролируемых структур по сравнению с известными устройствами.

Для управления амплитудно-частотными характеристиками фотонных кристаллов автором используются элементы, нарушающие его периодичность. Ясно, что в качестве таких управляющих элементов наиболее перспективным является использование полупроводниковых структур с электрически управляемой электропроводностью.

Сделан вывод о том, что для повышения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при сохранении высокой локальности измерений является применение резонансной системы на основе брэгговской структуры рассматриваемого в работе типа.

Во втором разделе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводной брэгговской структуры с нарушением периодичности с целью его использования в ближнеполевом СВЧ-микроскопе при измерениях диэлектрической проницаемости материалов.

С использованием программного обеспечения ANSYS HFSS выполнены расчеты амплитудно-частотных характеристик зонда в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла. Автором описано возникновение высокоселективного резонанса на АЧХ, что обеспечило достижение величины чувствительности коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости в окрестности значений $\epsilon \approx 2.0$, превышающей 100 дБ/ε.

Для достижения максимальной чувствительности зонда в диапазоне больших значений диэлектрической проницаемости ширина диафрагмы должна быть уменьшена.

В качестве образцов с различной диэлектрической проницаемостью были использованы пластины из фторопласта, в которых были созданы отверстия. Величина эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{ef} фторопластовых образцов с воздушными включениями рассчитывалась с использованием моделей «эффективной» среды.

Как следует из результатов экспериментов, автором подтверждена возможность достижения чувствительности коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости, превышающей 100 дБ/ε, при измерениях с использованием предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Тем самым предсказания теории получили экспериментальное подтверждение.

Третий раздел диссертации посвящен теоретическому и экспериментальному исследованиям нового типа СВЧ фотонного кристалла, представляющего собой периодически расположенные в волноводе металлические резонансные диафрагмы на диэлектрических подложках.

С использованием программного обеспечения ANSYS HFSS выполнены расчеты амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонного кристалла, из которых следует эвристический вывод о том, что увеличение ширины щелей диафрагм и величины диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего щель диафрагмы, приводит к увеличению ширины и глубины запрещенной зоны. Показано, что расширение запрещенной зоны происходит за счет смещения высокочастотного края запрещенной зоны в высокочастотную область. Приведенные результаты сравнения экспериментальных данных с расчетными данными, свидетельствуют об их хорошем качественном и количественном соответствии.

Проанализировано влияние нарушения в волноводной брэгговской структуре на основе резонансных диафрагм в виде уменьшенного расстояния между центральными диафрагмами на изменение вида АЧХ фотонного кристалла, выражающееся в возникновении пика пропускания в запрещенной зоне СВЧ фотонного кристалла и увеличении ширины запрещенной зоны.

В четвертом разделе представлены результаты исследований волноводных фотонных кристаллов на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками.

Исследуемый фотонный кристалл представлял собой структуру, состоящую из периодически расположенных прямоугольных металлических резонансных диафрагм на расстоянии $L=20$ мм друг от друга в прямоугольном волноводе трехсантиметрового диапазона. Расчет АЧХ исследуемого фотонного кристалла проводился на основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в ANSYS HFSS.

Были разработаны конструкции фотонных кристаллов на резонансных диафрагмах, в которых вблизи одного из краев центральной диафрагмы с щелью уменьшенной ширины или на противоположных краях этой диафрагмы расположены $n-i-p-i-n$ -структуры.

Установлено, что $n-i-p-i-n$ -диодная структура при больших прямых токах выполняет роль проводящего включения, уменьшающего ширину щели диафрагмы и смещающего положение примесной моды колебаний фотонной структуры из девяти резонансных диафрагм на величину, равную 0.5 ГГц, в сторону высокочастотного края запрещенной зоны при использовании одной $n-i-p-i-n$ -структуры и на величину, равную 1.0 ГГц, при использовании двух $n-i-p-i-n$ -структур.

Проанализированы АЧХ фотонного кристалла с $n-i-p-i-n$ -матрицей, состоящей из четырех диодных элементов и выполняющей роль нарушения периодичности. Автором установлено, что изменение величины удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры от 0 до 10^4 См/м приводит к монотонному уменьшению коэффициента прохождения на частоте примесной моды колебаний от -0.65 дБ до -40.6 дБ.

При этом увеличение удельной электропроводности i -слоя $n-i-p-i-n$ -структуры до значений, больших 20.0 См/м, приводило к исчезновению примесной моды колебаний на частоте $f_{1\text{теор}} = 8.91$ ГГц, и возникновению ее на частоте $f_{2\text{теор}} = 9.47$ ГГц, отличной от $f_{1\text{теор}}$.

Таким образом, автором экспериментально подтверждена возможность создания на основе СВЧ фотонного кристалла на резонансных диафрагмах электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала.

В пятом разделе представлены результаты исследований использования отражательных свойств фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм в схеме с Y -циркулятором.

Автором исследованы характеристики разрешенной зоны фотонного кристалла с частотно-независимой передаточной характеристикой, реализуемой при использовании СВЧ-схемы с Y -циркулятором, в одно из плеч которого включается исследуемый фотонный кристалл на резонансных диафрагмах. Установлено, что при включении в фотонный кристалл в качестве элемента, выполняющего роль нарушения периодичности, $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы или одиночного $n-i-p-i-n$ -диода вблизи одного из краев центральной диафрагмы с щелью уменьшенной ширины возникают примесные моды затухания колебаний.

На основе фотонного кристалла с частотно-независимыми характеристиками автором экспериментально реализованы фильтры заграждения на основе фотонных кристаллов с резонансными диафрагмами в схеме с Y -циркулятором, обладающих высоким уровнем запирания в полосе заграждения и малыми потерями вне полосы.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Считаю, что результаты, полученные диссертантом, являются новыми, хорошо обоснованными и имеющими важное значение для радиофизики и твердотельной электроники. Можно отметить, что новизна конструкции предложенного фотонного кристалла подтверждена полученным автором патентом РФ на изобретение.

Среди *новых наиболее значимых* с научной точки зрения результатов, полученных автором, можно выделить следующие:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик предложенного автором зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением, который обеспечивал достижения чувствительности при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

2. Описание особенностей АЧХ СВЧ фотонного кристалла, представляющего собой периодически расположенные в волноводе металлические резонансные диафрагмы на диэлектрических подложках, при изменении ширины щелей диафрагм и диэлектрической проницаемости подложек.

3. Исследование эффекта возникновения примесных мод колебаний на двух частотах в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении тока в $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя с регулируемой проводимостью в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах.

4. Возможность создания СВЧ-системы с плоской разрешенной зоной при использовании СВЧ-схемы с Y -циркулятором, в одно из плеч которого включается исследуемый фотонный кристалл на резонансных диафрагмах и создания фильтров заграждения, обладающих уровнем запирания в полосе заграждения более 43 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

Следует отметить, что результаты работы имеют несомненную **ценность для практики**.

Впервые предложен зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла в виде резонансной диафрагмы, изменением

размера которой может быть получена чувствительность коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости, превышающая 100 дБ/ε, в требуемом диапазоне измерений диэлектрических проницаемостей.

Автором впервые разработан и создан переключатель СВЧ-сигнала на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах, в котором в качестве электрически управляющего элемента используются *n-i-p-i-n*-диодная матрица, выполняющая роль проводящего слоя с регулируемой проводимостью, или диафрагма со щелью уменьшенной ширины, вблизи одного из краев которой расположена *n-i-p-i-n*-структура.

Впервые показана возможность создания СВЧ-системы с плоской разрешенной зоной при использовании СВЧ-схемы с *Y*-циркулятором, в одно из плеч которого включается исследуемый фотонный кристалл на резонансных диафрагмах и создания фильтров заграждения, обладающих высоким уровнем запираения в полосе заграждения и малыми потерями вне полосы.

Полученные автором диссертации результаты, защищаемые научные положения, научная новизна, практическая значимость полученных автором результатов, согласие теоретического описания и результатов экспериментов, сочетание методов, характерных для радиофизики, с представлениями типичными для твердотельной электроники позволяют сделать вывод об обоснованности представления диссертации на стыке специальностей: радиофизика и твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Обоснованность и достоверность полученных диссертантом результатов, положений и сделанных им выводов обеспечивается обоснованностью выбранного метода расчета характеристик исследованных фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм с электрически управляемыми характеристиками, использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений при выполнении экспериментальных исследований, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов, качественным и количественным соответствием расчетных данных основным результатам, полученным экспериментально.

Диссертация содержит хорошо оформленный иллюстративный материал.

Отмечая несомненную научную и практическую ценность диссертационной работы, необходимо сделать ряд **замечаний**:

Работа не лишена отдельных недостатков:

1. В разделе 2 диссертационной работы было бы интересно привести результаты сравнения измерений диэлектрической проницаемости с помощью зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла при фиксированной апертуре зонда и различных параметрах слоя, нарушающего периодичность структуры фотонного кристалла.

2. В разделе 3 диссертации при рассмотрении амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм установлено, что введение нарушения в структуру фотонного кристалла в виде уменьшенного расстояния между центральными диафрагмами приводит к возникновению пика пропускания в запрещенной зоне СВЧ фотонного кристалла и увеличению ширины запрещенной зоны. Однако причины такого изменения амплитудно-частотных характеристик подробно обсуждены не были.

3. В разделе 5 при рассмотрении СВЧ-схемы с *Y*-циркулятором, в одно из плеч которого включается фотонный кристалл на резонансных диафрагмах, для создания полосы заграждения с управляемым уровнем запираения использовались элементы в виде *n-i-p-i-n*-диодной матрицы или одиночного *n-i-p-i-n*-диода вблизи одного из краев центральной диафрагмы, выполняющие роль нарушения периодичности, было бы желательно обсудить достижение столь высокого уровня запираения в полосе заграждения, более 43 дБ, и малых потерь вне полосы, менее 0.8 дБ.

Сделанные замечания не являются принципиальными и поэтому не снижают ценности и значимости проведенных автором исследований.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Диссертация написана хорошим литературным и профессиональным языком.

По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России. Одна статья опубликована в научном издании, входящем в базы данных Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ на изобретение.

В целом, научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для радиофизики и твердотельной электроники, связанной с разработкой нового типа электродинамических систем – СВЧ фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм и их использованием в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе для повышения его чувствительности при сохранении высокой локальности измерений.

Работа Евтеева С.Г. является законченным научным исследованием. Работу выгодно отличает сочетание теоретического обоснования защищаемых положений с детальными экспериментальными исследованиями, находящимися в хорошем согласии с теорией. Характеристики предложенных устройств соответствуют самым высоким требованиям, предъявляемым к приборам рассматриваемого класса.

Проведенные исследования открывают перспективу создания новых типов устройств твердотельной СВЧ-электроники на основе СВЧ фотонных кристаллов с ещё более высокими основными характеристиками.


Таким образом, считаю возможным сделать следующее заключение: диссертационная работа С.Г. Евтеева «СВЧ фотонный кристалл с электрически управляемыми характеристиками и возможность его использования в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе» соответствует критериям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Евтеев Сергей Геннадиевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки РФ
ведущий научный сотрудник
АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон»


Коломейцев Вячеслав Александрович

Подпись профессора Коломейцева Вячеслава Александровича
ЗАВЕРЯЮ

Начальник отдела управления персоналом
АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон»


Семёнова Дарья Алексеевна


Акционерное общество «Научно-производственный центр «Алмаз-Фазотрон»
Россия, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, д. 1
Тел. 89063074550 E mail: afazotron@volgaline.ru

Научная специальность, докторской диссертации Коломейцева Вячеслава Александровича – 05.12.21 Радиотехнические системы специального назначения, включая технику СВЧ и технологию их производства.

30 ноября 2018 г.