

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

УДК 533.9.004.14; 537.872.31

**УСАЧЁНОК
МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

**ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА В ОДНОМЕРНЫХ И
ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – Физика плазмы**

Минск, 2015

Работа выполнена в лаборатории физики газового разряда Государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель: **Симончик Леонид Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физики газового
разряда Государственного научного учреждения
«Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Гринчик Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник отделения
теплофизики Государственного научного
учреждения «Институт тепло- и массообмена
имени А.В.Лыкова Национальной академии наук
Беларуси»

Смягликов Игорь Петрович,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией физики плазменных
процессов Государственного научного
учреждения «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация: **Научно-исследовательское учреждение
"Институт ядерных проблем"
Белорусского государственного университета**

Защита состоится «9» июня 2015 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при Государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, пр-т Независимости, 68, г. Минск, Республика Беларусь; тел.: 284-25-95, факс: 284-08-79, e-mail: ifanbel@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «8» мая 2015 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук

А.Н. Понявина

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные кристаллы для СВЧ диапазона длин волн являются аналогами фотонных кристаллов в оптике. В широком смысле слова электромагнитными кристаллами называют трехмерные объекты, ограничивающие распространение волн СВЧ в некотором частотном диапазоне во всех направлениях для любой их поляризации. Наличие полосовых спектров пропускания в диапазоне СВЧ позволяет создавать на основе электромагнитных кристаллов различные частотно-избирательные системы и элементы СВЧ (фильтры, волноводы, резонаторы и др.).

Неоднородности, формирующие кристалл, обладают отрицательной диэлектрической проницаемостью и положительной магнитной проницаемостью для падающего электромагнитного излучения. Большинство устройств на основе электромагнитных кристаллов, предлагаемых в литературе, имеют в своей основе фиксированную структуру элементарной ячейки (неоднородности), что проявляется в узкополосности спектра пропускания и в отсутствии возможности перестройки. Это является проблемой при создании сложных скоростных систем приема-передачи СВЧ излучения, управляемых с помощью компьютера. Для изготовления широкополосных и электрически перестраиваемых электромагнитных полосовых устройств некоторые из их пассивных неоднородностей должны быть заменены на активные элементы. Такого рода элементом может выступить плазма благодаря своей изменчивости по размеру, плотности и геометрии при изменении разрядного тока. Плазма положительного столба тлеющего разряда обладает большим потенциалом для использования в качестве управляющих элементов в таких структурах.

В общем случае, диэлектрическая проницаемость плазмы является функцией частоты падающего микроволнового излучения, частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и концентрации электронов, и может меняться от единицы до отрицательных значений. В настоящее время в литературе имеется немного работ, посвященных вопросу использования газовых разрядов в качестве образующих или управляющих элементов электромагнитных кристаллов. Однако, остаются неразрешенными вопросы применения плазменных электромагнитных кристаллов при большой мощности (десятки киловатт) излучения СВЧ. Электромагнитные кристаллы, созданные с использованием плазменных технологий, позволят создать на их основе ряд быстродействующих электрически перестраиваемых элементов СВЧ (волноводные переключатели, ключи, модуляторы, селекторы и др.).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в следующие программы и проекты:

ГПНИ «Конвергенция», задание “Исследование оптических, электрических и комбинированных разрядов и волновых взаимодействий, разработка на их основе новых плазменных и лазерных устройств, методов и технологий обработки и создания новых материалов” (Конвергенция 2.4.02) 2011 – 2013 гг., номер государственной регистрации 20110587;

ГПНИ «Конвергенция», задание “Неравновесные процессы в оптических, электрических и комбинированных разрядах в применении к разработкам инновационных плазменных и лазерных устройств обработки и создания новых материалов” (Конвергенция 2.4.05), 2014 – 2015 гг., номер государственной регистрации 20140837;

Проект БРФФИ-НЦНИ Ф11Ф-002 «Несамостоятельные тлеющие разряды: моделирование и применение в электромагнитных полосовых устройствах», 2011-2013 гг., номер государственной регистрации 20113236;

Проект БРФФИ Ф11М-044 «Разработка волноводного полосового СВЧ фильтра, управляемого несамостоятельными тлеющими разрядами атмосферного давления», 2011-2013 гг., номер государственной регистрации 20113230;

Грант Президиума НАН Беларуси на выполнение научно-исследовательских работ докторантами и аспирантами «Распространение электромагнитных волн СВЧ диапазона в периодических структурах с плазмой», 2012-2013 гг., номер государственной регистрации 20131317;

Проект БРФФИ-НЦНИ Ф13Ф-005 «Динамическое плазменное управление мощными микроволнами с помощью электромагнитных полосовых устройств», 2013-2014 гг., номер государственной регистрации 20132157.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является создание одно- и двумерных электромагнитных кристаллов с плазменными неоднородностями, изучение их свойств и применение для динамического управления распространением мощного электромагнитного излучения СВЧ диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- выполнить численное моделирование характеристик одномерных электромагнитных кристаллов, сформированных металлическими и плазменными неоднородностями в волноводе;
- определить наиболее приемлемые варианты расположения разрядов в электромагнитных кристаллах и необходимые параметры плазмы (плотность, частота столкновений, геометрия и число плазменных неоднородностей) для получения контрастных спектров кристаллов;
- создать одномерные и двумерные электромагнитные кристаллы из металлических (диэлектрических) неоднородностей в комбинации с плазменными столбами низкого давления;
- экспериментально установить закономерности изменения характеристик электромагнитных кристаллов от диаметра плазменных неоднородностей и плотности плазмы в них;
- разработать импульсные разряды при атмосферном давлении в различных газах для их интеграции в одномерные и двумерные электромагнитные полосовые устройства и определить параметры плазмы;
- продемонстрировать возможность динамического управления мощным (десятки киловатт) излучением СВЧ с помощью одно- и двумерных электромагнитных кристаллов с плазменными неоднородностями.

Объектом исследования является газоразрядная плазма и одномерные и двумерные плазменные электромагнитные кристаллы.

Предмет исследования – параметры плазмы, спектры пропускания и отражения электромагнитных кристаллов и их зависимости от параметров плазменных неоднородностей.

Методы исследования. При выполнении работы для исследования параметров плазмы и свойств разрядов использовались спектроскопические и электрофизические методы диагностики плазмы, для изучения электромагнитных свойств плазменных электромагнитных кристаллов применялись методы регистрации спектральной плотности мощности СВЧ сигналов, использовалось сравнение экспериментальных результатов с результатами электродинамического расчета с использованием известного программного обеспечения.

Научная новизна

Представленные в диссертации результаты являются новыми и находятся в русле мировых исследований электромагнитных кристаллов на основе плазменных технологий и их применений в технике СВЧ с целью создания волноводных элементов СВЧ с электрически перестраиваемыми характеристиками.

Научная новизна работы состоит в применении разрядов при атмосферном давлении для создания плазменных электромагнитных кристаллов, установлении зависимостей их спектров пропускания и отражения от параметров плазмы. Применение разрядов при атмосферном давлении позволяет повысить порог СВЧ-пробоя на неоднородностях, в результате чего становится возможным осуществление динамического управления мощным СВЧ излучением. Результаты исследований позволяют сформулировать концепции создания одномерных и двумерных электромагнитных кристаллов, управляемых плазмой.

Отличительной чертой данного исследования является объединение трех элементов: плазмы, электромагнитных кристаллов и мощного излучения СВЧ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

➤ Три газовых разряда с диаметром плазменных столбов 1,5–3 мм и длиной более 10 мм, эквидистантно расположенные с периодом 38 мм в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ перпендикулярно его широким стенкам, формируют одномерный плазменный электромагнитный кристалл с полосовым спектром пропускания в диапазоне частот 7-12 ГГц, которым можно управлять изменением концентрации электронов - при увеличении концентрации до 10^{17} см^{-3} уровень сигнала СВЧ в полосе заграждения (8–9 ГГц) уменьшается на 4 порядка, в то время как в полосе пропускания (около 10 ГГц) сигнал уменьшается не более чем в 2 раза, что позволяет создать электрически перестраиваемые волноводные фильтры.

➤ Одномерный плазменный электромагнитный кристалл, сформированный импульсными газовыми разрядами в волноводе, позволяет изменять длительность импульса СВЧ излучения, мощность которого меньше мощности СВЧ пробоя газа, а частота соответствует полосе заграждения кристалла, от десятков микросекунд до десятков наносекунд путем вариации времени задержки между передним фронтом импульса СВЧ и моментом зажигания разрядов.

➤ Применение тлеющих разрядов атмосферного давления в качестве неоднородностей в электромагнитном кристалле в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ позволяет расширить диапазон мощностей падающего СВЧ излучения до 50 кВт и производить переключение пропускания кристалла за время около 20 наносекунд.

➤ Треугольный двумерный электромагнитный кристалл, состоящий из длинных медных стержней (диаметр 5 мм), расположенных параллельно в вершинах квадратов с основанием 22 мм, в комбинации с плазменным столбом в качестве дополнительного дефекта, позволяет отклонять падающий на

кристалл луч мощного (около 50 кВт) излучения СВЧ частотой 9,15 ГГц на угол $(45,0 \pm 2,5)^\circ$.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад соискателя в исследования, выполненные авторским коллективом. Научным руководителем профессором доктором физ.-мат. наук Л.В. Симончиком были постановлены цель и задачи исследования, совместно с ним проводились эксперименты, анализировались и интерпретировались полученные результаты. Доктор физ.-мат. наук В.И. Архипенко участвовал в обсуждении и интерпретации полученных результатов и в постановке отдельных экспериментов. Доктора философии (Ph. D.) Th. Callegari, J. Sokoloff, J. Lo участвовали в обсуждении полученных результатов и оказали консультативную помощь в моделировании.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Представленные в диссертационной работе результаты доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях:

40th, 41th European Physical Society Conferences on Plasma Physics (Espoo, Finland, 2013; Berlin, Germany, 2014); XXXVI, XXXVIII, XXXIX Международные (Звенигородские) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2010, 2011, 2012); 8th International workshop on "Microwave discharge: fundamentals and applications" (Zvenigorod, Russia, 2012); VII, VIII Симпозиум Беларуси и Сербии по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы (Минск, Беларусь, 2008, 2012); VI, VII International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology (Minsk, Belarus, 2009, 2012); III, IV Конгрессы физиков Беларуси (Минск, Беларусь, 2011, 2013); Международные школы-конференции молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики" (Минск, Беларусь, 2010, 2012, 2014); II Международная научно-практическая молодежная конференция «Научные стремления» (Минск, Беларусь, 2011); 2-ая Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, Беларусь, 2013); V Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, Россия, 2013).

Результаты диссертации докладывались на заседаниях Научного совета по проблеме " Физика фундаментальных взаимодействий, ядерная физика, физика плазмы " Института физики НАН Беларуси.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 32 работах [1-32]: среди них 4 статьи в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,5 авторских листа), 14 статей в сборниках трудов конференций, 10 тезисов докладов на научных конференциях, 4 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, библиографического списка и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 145 страниц, из них иллюстрации занимают 34 страницы, таблицы - 1 страницу, приложения – 5 страниц, список использованных источников из 149 наименований (включая собственные публикации соискателя) занимает 13 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертация содержит краткий обзор работ, относящихся к исследованиям электромагнитных кристаллов. Для изготовления широкополосных и электрически перестраиваемых устройств на основе электромагнитных кристаллов некоторые из их пассивных неоднородностей должны быть заменены на активные элементы, способные варьировать свои электрические свойства под воздействием внешних полей.

Как следует из цитируемых литературных источников, реализация электромагнитного кристалла из плазменных неоднородностей возможна при условиях, когда концентрация электронов n_e в них существенно превышает «критическую» n_c [см⁻³] = $1,24 \cdot 10^{10} \cdot f_0^2$ [ГГц] для падающего излучения на частоте f_0 . Полученные экспериментальные результаты указывают на наличие полосового спектра пропускания у плазменного электромагнитного кристалла. Однако, его контрастность, необходимая для практических применений, остается невысокой.

Таким образом, задачи создания и исследования электромагнитных кристаллов с плазменными элементами, обладающих возможностью быстрого динамического управления их параметрами, и их применение для управления распространением мощного СВЧ излучения к настоящему времени являются актуальными и слабоизученными, что определило постановку цели и задач представленного диссертационного исследования.

Во второй главе дано описание одно- и двумерных электромагнитных кристаллов 3-сантиметрового диапазона длин волн, сформированных металлическими (диэлектрическими) неоднородностями. Представлены применяемое оборудование и схемы регистрации спектров пропускания и диаграмм направленности кристаллов, а также источники газоразрядной плазмы, на основе которых были реализованы электромагнитные кристаллы.

В качестве модели одномерного электромагнитного кристалла используется полосно-пропускающий волноводный фильтр СВЧ с непосредственными связями, образованный металлическими (медными) или диэлектрическими (диоксид алюминия) неоднородностями диаметром 4 мм в волноводной секции сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ (рисунок 1, а).

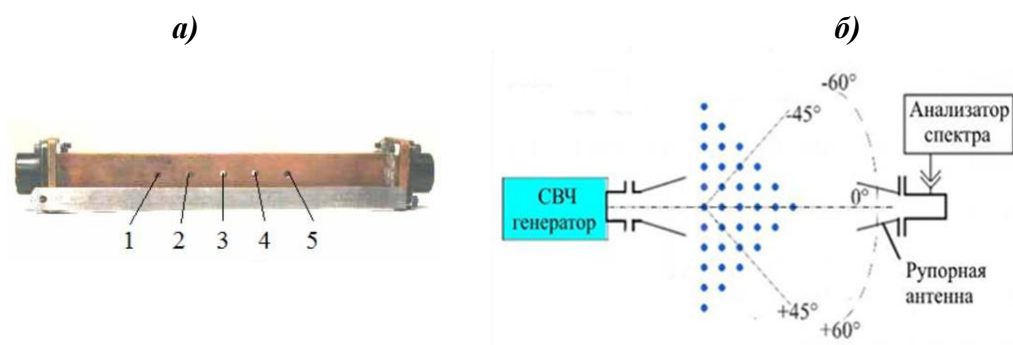


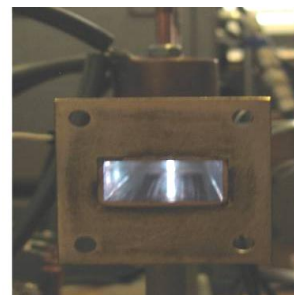
Рисунок 1. – (а) Фотография волноводной секции с отверстиями и (б) схема облучения и регистрации диаграммы направленности двумерного электромагнитного кристалла

Двумерный электромагнитный кристалл был образован длинными (140 мм) медными стержнями диаметром 3 мм, расположенными параллельно друг другу в узлах решетки, состоящей из квадратных ячеек со сторонами, равными 24 мм. В основании треугольной периодической структуры находится 11 стержней, на боковых гранях – по 6. Схема облучения и регистрации диаграммы направленности двумерного электромагнитного кристалла представлена на рисунке 1, б. Дефекты в кристалле создавались путем удаления одного или двух соседних стержней, расположенных во фронтальном ряду структуры рядом с центральным стержнем, либо добавлением дополнительного стержня между центральным стержнем и одним из соседних. Структура без дефектов ослабляет падающее излучение в направлениях от -60° до $+60^\circ$ более чем на 2 порядка величины. Наличие дефекта в основании структуры приводит к увеличению пропускания на 15–20 дБ в направлении $\pm 45^\circ$. Это изменение наибольшее для излучения на частоте около 8,8 ГГц, которая определяется указанным выше периодом расположения медных стержней.

Численное моделирование свойств электромагнитных кристаллов осуществлялось в среде программы Ansoft HFSS, позволяющей определять методом конечных элементов многомодовые S-параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах произвольной формы.

В качестве неоднородностей в электромагнитных кристаллах использовались газоразрядные источники как при пониженном давлении (генераторы шума ГШ с наполнением неоном при давлении 10 кПа), так и специально разработанные устройства с разрядами при атмосферном давлении. Выполнена оценка концентрации электронов в плазме положительных столбов ламп ГШ-5 (внутренний диаметр 3 мм) и ГШ-6 (внутренний диаметр 1,5 мм) как по значениям приведенной напряженности электрического поля, так и непосредственно из измерений с помощью 8-мм интерферометра. При рабочем постоянном токе около 60 мА лампы ГШ-5, например, концентрация электронов в ней составляет около $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что более чем на порядок превышает критическую концентрацию для частоты 10 ГГц. Частота столкновений, при этом, имеем величину около $3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. В импульсном режиме при токах в несколько ампер концентрация электронов в лампах ГШ достигает 10^{14} см^{-3} , что на 2-3 порядка превышает критическую для диапазона частот 7–12 ГГц.

Представлены устройства для зажигания несамостоятельных тлеющих разрядов с плазменным катодом (трехэлектродная конфигурация) и импульсных разрядов (двухэлектродная конфигурация) в гелии и аргоне при атмосферном давлении (рисунок 2), позволяющие получать в волноводе плазменные неоднородности с концентрацией электронов до 10^{17} см^{-3} (аргон). Разряды инициируются в кварцевых трубках с внутренним диаметром 3 мм. Оценка величины концентрации электронов в плазме импульсных разрядов проводилась по уширению линии водорода H_α .



**Рисунок 2. –
Фотография тлеющего
разряда атмосферного
давления в волноводе**

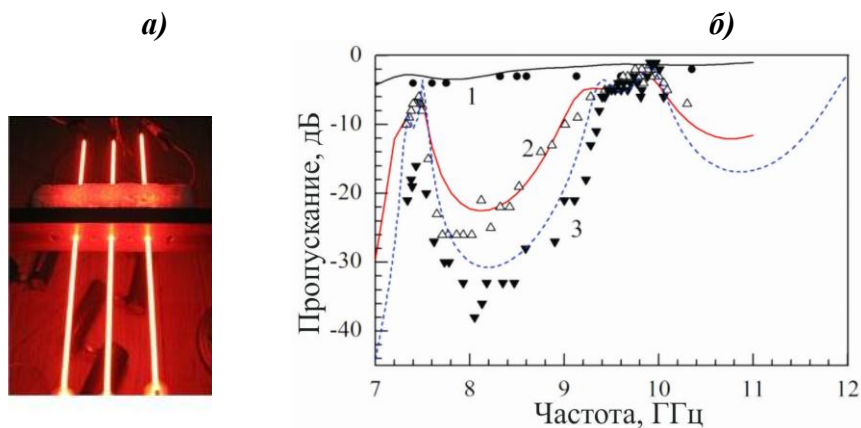
В третьей главе представлены результаты исследований одномерных электромагнитных кристаллов, сформированных в волноводе $23 \times 10 \text{ мм}^2$ только плазменными неоднородностями или плазменными неоднородностями в комбинации с твердотельными.

В результате численного моделирования в среде программы Ansoft HFSS было показано, что полосовой спектр пропускания плазменного электромагнитного кристалла в диапазоне частот 7–12 ГГц формируется при условии, что концентрация электронов в плазменных неоднородностях превышает на 2–3 порядка критическую концентрацию. Для приемлемой величины ослабления проходящего СВЧ излучения вследствие его поглощения плазмой неоднородностей (не более 5 дБ) частота столкновений электронов с нейтральными частицами должна составлять около 10^{10} с^{-1} , а число неоднородностей должно быть минимально необходимым (3–5) и их диаметр

не должен превышать 3 мм.

Используя данные моделирования, были созданы плазменные одномерные электромагнитные кристаллы, сформированные в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ 3-мя либо 5-ю положительными столбами разрядных ламп типа ГШ-6, расположенных друг от друга на одинаковом расстоянии, равном длине волны в волноводе или ее половине, соответственно.

При рабочих значениях тока в лампах ГШ концентрация электронов в них составляет около 10^{13} см^{-3} . При использовании 3-х ламп ГШ-6 с разрядами на постоянном токе (рисунок 3, а) не удается получить сколь-нибудь заметный полосовой спектр электромагнитного кристалла (рисунок 3, б, кружки). Увеличение диаметра плазменных столбов позволяет увеличить контрастность спектра пропускания структуры, но при этом уровень пропускания в полосах пропускания уменьшается более чем на порядок величины.



Значки – эксперимент; линии – расчет.

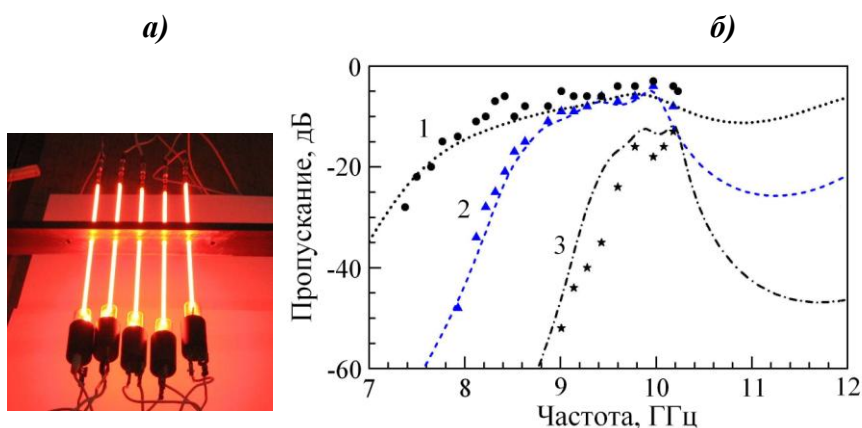
1 – постоянный ток 25 мА ($1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$); 2 и 3- импульсные токи 1А ($4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и 2 А ($1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), соответственно

Рисунок 3. – (а) Фотография волноводной секции с тремя лампами ГШ-6, расположенными с периодом 38 мм, и (б) её спектры пропускания

При импульсном режиме питания ламп ГШ-6 (длительность импульса тока 2–3 микросекунды) концентрация электронов в положительном столбе в максимуме импульса составляет около 10^{15} см^{-3} . При этом время распада плазмы, а следовательно, и время существования плазменного электромагнитного кристалла, составляет 20–30 мкс. Измеренные спектры пропускания плазменного кристалла для двух значений импульсного тока в них представлены на рисунке 3, б (треугольники). Спектры регистрировались с помощью анализатора импульсных СВЧ сигналов С4-80 с окном анализа 3 мкс. Видно, что спектр в этом случае полосовой и контрастный – проходящий сигнал СВЧ в полосе заграждения подавляется более чем на три порядка по уровню мощности, в то время как в полосе пропускания уменьшение составляет не более чем в три раза.

В случае электромагнитного кристалла из пяти ламп ГШ-6 (рисунок 4, а) при постоянном рабочем токе, расположенных с периодом 19 мм, формируется

широкая полоса пропускания со снижением сигнала в ней более чем на 5 дБ (рисунок 4, б, кружки). Однако при импульсном токе 1 А полоса пропускания более четко выражена (рисунок 4, б, треугольники), а уровень пропускания в ней около -5 дБ. Увеличение диаметра плазменных неоднородностей (использованы лампы ГШ-5) в импульсном режиме питания при сохранении плотности тока приводит к дальнейшему сужению полосы пропускания и увеличению подавления сигнала СВЧ в полосе заграждения до 20 дБ, что может быть нежелательным для практических применений.



Значки – эксперимент; линии – расчет.

1 и 2 – лампы ГШ-6 при постоянном токе 85 мА ($6,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и импульсном токе 1 А ($4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$); 3 – лампы ГШ-5 при импульсном токе 4 А ($4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$)

Рисунок 4. - (а) Фотография волноводной секции с пятью лампами ГШ-6, расположенными с периодом 19 мм, и (б) ее спектры пропускания

Расчетные спектры пропускания плазменных электромагнитных кристаллов для параметров режимов, представленных на рисунках 2 и 3 (сплошные кривые) удовлетворительно согласуются с экспериментальными (значки). При этом полагалась, что частота столкновений неизменна и равна $3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, а использованные в расчетах значения концентрации электронов примерно в два раза меньше, чем дают экспериментальные оценки. Это может быть связано с радиальной неоднородностью плазмы в положительных столбах и неучетом скин-слоя.

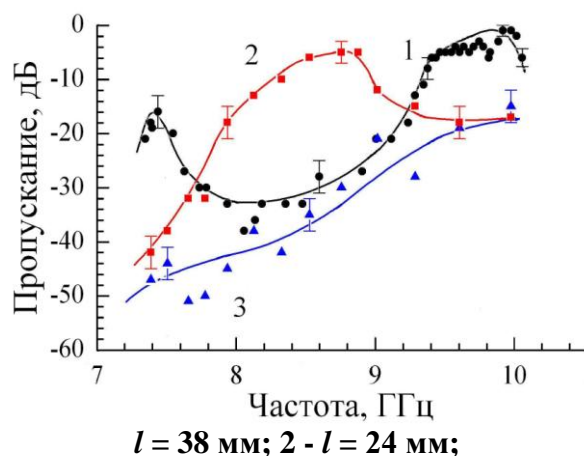
Показано, что, при следовании импульсов питания ламп с периодом близким к времени распада плазмы (около 30 мкс), плазменный кристалл существует квазинепрерывно, и нагрев трубок ламп при этом незначителен (около 50 °С), что исключает нагрев волноводной секции.

Продемонстрировано, что плазма может выступать в качестве ключевых активных управляющих элементов в электромагнитных кристаллах, образованных комбинацией твердотельных и плазменных неоднородностей. На примере электромагнитных кристаллов из 3-х металлических (либо диэлектрических) стержней и 2-х плазменных столбов показано, что управление их спектрами пропускания возможно и при электронных концентрациях 10^{12} см^{-3} – 10^{13} см^{-3} . Достаточность небольших значений

концентрации электронов в управляющих плазменных неоднородностях объясняется тем, что в данном случае они выступают как неоднородности внутри резонаторов, образованных твердотельными неоднородностями.

В четвертой главе рассмотрено поведение спектров плазменных электромагнитных кристаллов при распространении через них мощного (десятки киловатт) излучение СВЧ.

На примере одномерного плазменного электромагнитного кристалла из плазменных столбов ламп ГШ-6, помещенных с переменным периодом в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$, продемонстрирована возможность создания электрически управляемого широкополосного волноводного фильтра. В этом



$l = 38 \text{ мм}; 2 - l = 24 \text{ мм};$
3 - комбинированная структура
Рисунок 5. –Спектры пропускания
комбинированной структуры

случае, три лампы расположены с периодом 38 мм и две дополнительные - с периодом 24 мм. При выключенных лампах излучение через волноводную секцию проходит без ослабления. При зажигании импульсных разрядов в трех лампах, расположенных с периодом 38 мм, спектр пропускания волноводной секции имеет две полосы пропускания с центральными частотами 7,5 ГГц и 9,7 ГГц (кривая 1 на рисунке 5). Подавление СВЧ сигнала в полосе заграждения (7,8-9,0 ГГц) составляет более 30 дБ и в высокочастотной полосе пропускания около 2 дБ. Спектр пропускания кристалла, образованного тремя лампами, размещенными с периодом 24 мм, имеет одну полосу пропускания с центральной частотой около 8,5 ГГц (кривая 2). Спектр пропускания комбинированной структуры (все пять ламп включены) показан кривой 3. Видно, что уровень проходящего сигнала не превышает минимальный для каждого из плазменных электромагнитных кристаллов из трех ламп в отдельности.

Плазменный электромагнитный кристалл, образованный тремя разрядами в лампах ГШ-5, расположенными с периодом $l = 38 \text{ мм}$, применен для управления длительностью проходящего импульса мощного СВЧ излучения. Запрещенная зона в этом случае находится в диапазоне 8–9 ГГц (см. рисунок 5, кривая 1). При выключенных лампах ГШ-5 СВЧ импульс длительностью около 10 мкс на частоте 8,5 ГГц проходит через волноводную секцию без искажений (рисунок 6, осциллограмма 1). Импульсы напряжения питания ламп подавались с некоторой задержкой по отношению к началу СВЧ импульса. Так при задержке 7 мкс длительность прошедшего СВЧ сигнала составила только 7 мкс (осциллограмма 2). Уменьшая задержку можно сократить время прохождения

сигнала через волноводную секцию до нескольких десятков наносекунд (осциллограмма 4). Длительность заднего фронт проходящего импульса СВЧ определяется временем нарастания концентрации электронов в плазме ламп и составляет менее 200 нс.

Контролируемое сокращение длительности импульса в зависимости от времени задержки зажигания разрядов низкого давления возможно в случае, если мощность импульса излучения СВЧ, проходящего через волноводную секцию, будет меньше пороговой мощности, необходимой для СВЧ пробоя газа в трубках. Величина напряженности электрического поля, необходимая для пробоя газа в лампах ГШ равна около 0,5 кВ/см, что соответствует мощности излучения СВЧ 270 Вт. В случае, когда мощность падающего излучения СВЧ (50 кВт) превосходит порог СВЧ пробоя, то плазменный электромагнитный кристалл формируется СВЧ разрядами в трубках за время около 20 нс.

Для повышения уровня мощности излучения СВЧ, проходящего через плазменный электромагнитный кристалл в волноводе, при котором возможно контролируемое управление спектром пропускания кристалла, предложено в качестве формирующих его неоднородностей использовать плазму положительных столбов разрядов при атмосферном давлении (рисунок 7, а).

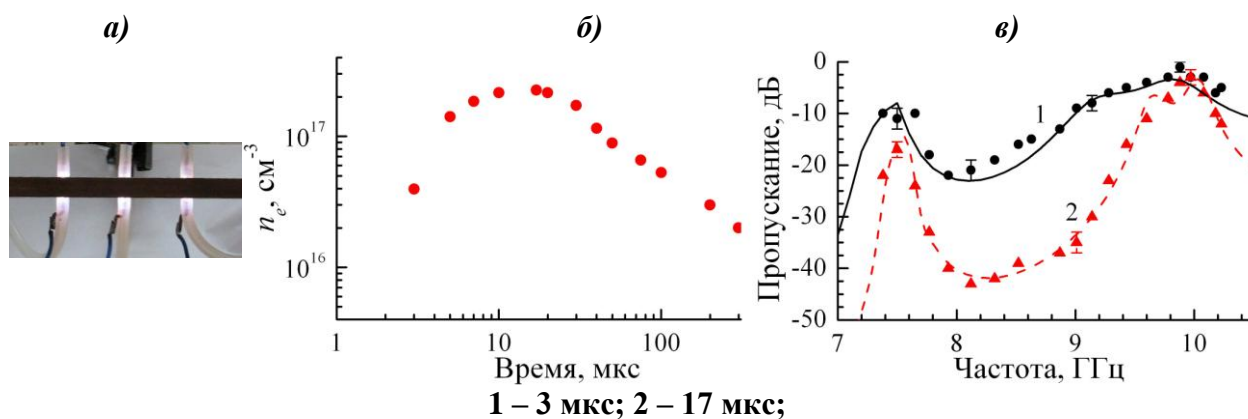
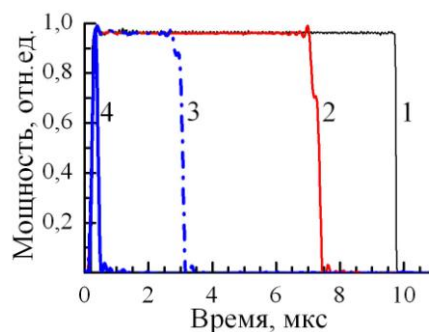


Рисунок 7. – (а) Фотография волноводной секции с тремя разрядами, (б) временная эволюция концентрации электронов в разряде в аргоне и (в) спектры пропускания плазменного электромагнитного кристалла

Импульсные разряды зажигались в потоке аргона (2 л/мин) в кварцевых трубках с внутренним диаметром 2,5 мм в двухэлектродной конфигурации (разрядный промежуток 10 мм). Максимальная концентрация электронов в плазменных неоднородностях в соответствии с оценкой, полученной из

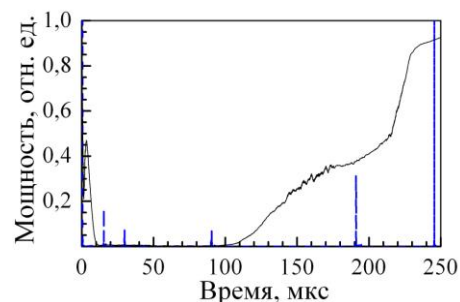


1 – лампы выключены; 2, 3, 4 – задержки 7 мкс, 3 мкс и 50 нс, соответственно

Рисунок 6. – Осциллограммы прошедших импульсов СВЧ излучения

полуширин контуров линии H_α , при выбранных электрических параметрах (емкость конденсатора 4 мкФ, напряжение 1,5 кВ) составляет $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и достигается в интервале 15–20 мкс (рисунок 7, б). Подавление СВЧ сигнала в полосе заграждения плазменного электромагнитного кристалла, сформированного тремя такими разрядами, достигает более чем 40 дБ, при этом подавлении в полосе пропускания составляет не более 4 дБ (рисунок 7, в, треугольники). Эти измерения выполнены с помощью анализатора спектра импульсных сигналов С4-80 на 17-ой микросекунде. На 3-ей микросекунде, где концентрация меньше, подавление в полосе заграждения на 2 порядка меньше (рисунок 7, в, кружки).

На рисунке 8 показано прохождение через плазменный кристалл мощных (50 кВт) и коротких (200 нс) СВЧ импульсов на частоте 9,15 ГГц (вертикальные штриховые линии). В период времени существования плазменного электромагнитного кристалла (около 200 мкс) уменьшение амплитуды мощных импульсов составляет более одного порядка величины.

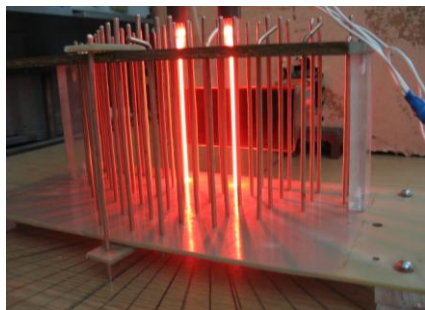


Сплошная кривая – 5 мВт,
штриховые – 50 кВт

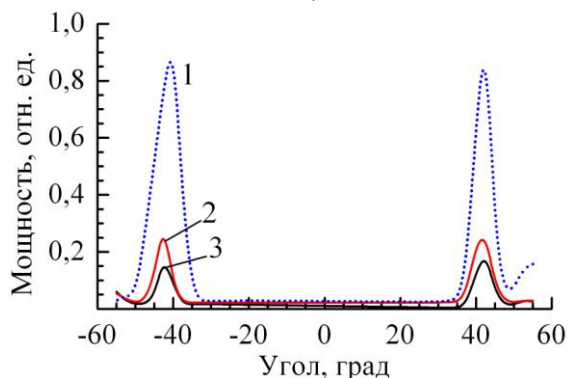
Рисунок 8. - Пропускание кристалла на частоте 9,15 ГГц

Создан двумерный электромагнитный кристалл с плазменными неоднородностями, изменением параметров плазмы которых можно управлять диаграммой направленности кристалла и уровнем прошедшего излучения. Например, в случае, когда лампы ГШ-5 выполняли роль компенсаторов дефектов (рисунок 9, а), изменение концентрации в их плазменных столбах до $3,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ позволило уменьшить уровень проходящего сигнала СВЧ в направлениях $\pm 45^\circ$ в 5 раз (рисунок 9, б).

а)



б)

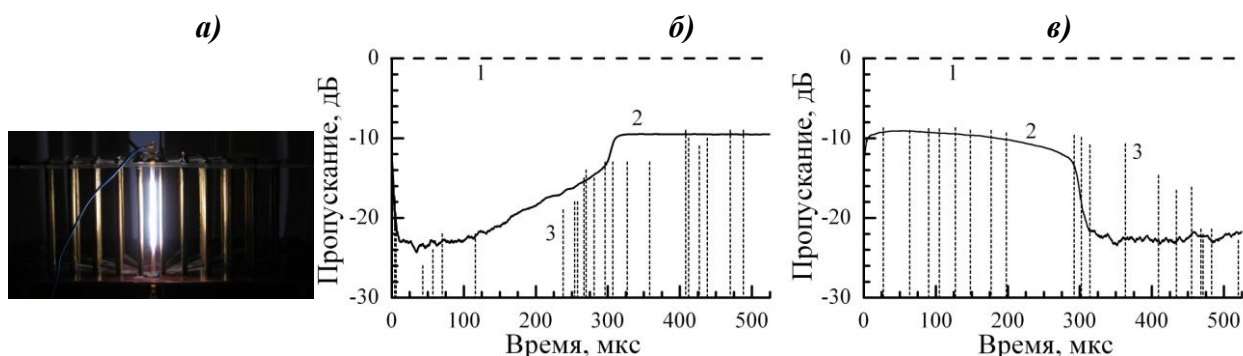


1 – 0 мА; 2 – 60 мА; 3 – 120 мА

Рисунок 9. – (а) Фотографии двумерного электромагнитного кристалла с лампами ГШ-5 и (б) его диаграммы направленности при различных значениях разрядных токов

Применение в качестве плазменной неоднородности двумерного электромагнитного кристалла импульсного разряда при атмосферном давлении

в аргоне позволяет контролируемо управлять диаграммой направленности кристалла при мощности СВЧ излучения до десятков киловатт. Импульсный разряд зажигался в кварцевой трубке внутренним диаметром 3 мм, в межэлектродном промежутке 5,5 см (вертикальный размер апертуры рупорной антенны), при потоке аргона 1-2 л/мин (рисунок 10, а). Максимум тока в разряде составляет около 23 А и приходится на 22-ю микросекунду относительно начала разряда. Далее ток плавно уменьшается и к 400-ой микросекунде разряд прекращается. Оценка величины концентрации электронов, выполненная по полуширине контура линии H_{α} , дала максимальное значение $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.



1 - уровень падающего излучения СВЧ; 2 – около 5 мВт; 3 – около 50 кВт;

б) плазма – компенсатор дефекта; в) плазма – дополнительный дефект

Рисунок 10. – (а) Фотография двумерного электромагнитного кристалла с плазменной неоднородностью и (б, в) временные зависимости его пропускания в направлении 45°

На рисунке 10, б и в представлены осциллограммы мощных (около 50 кВт) и коротких (200 нс) СВЧ импульсов (вертикальные штриховые отрезки линий), случайным образом многократно зарегистрированных в направлении 45° при размещении плазменной неоднородности на месте вакансии и на месте дополнительного дефекта. Изменение пропускания электромагнитного кристалла для обоих типов дефектов максимально в фазе разряда, когда концентрация электронов больше 10^{16} см^{-3} , и нивелируется к 400 мкс, что несколько позже, чем при малой мощности (кривые 2 на рисунках 10, б и в). По-видимому, это связано с поддержанием концентрации электронов в плазменной неоднородности за счет столкновительного поглощения в плазме проходящего мощного СВЧ излучения. Следует заметить, что максимальное изменение проходящего сигнала СВЧ в направлении 45° со стороны дефекта на $(14 \pm 2) \text{ дБ}$, наблюдаемое, примерно, с 5 мкс до 100 мкс относительно переднего фронта импульса тока разряда, является таким же, как и в случае использования металлических неоднородностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Выполнено численное моделирование спектров пропускания в диапазоне частот 7–12 ГГц одномерных электромагнитных кристаллов, образованных металлическими, диэлектрическими либо плазменными цилиндрическими неоднородностями, размещенными в волноводной секции прямоугольного сечения $23 \times 10 \text{ мм}^2$ с периодом, кратным половине длины волны в волноводе. Установлено, что полосовой спектр пропускания у плазменного электромагнитного кристалла формируется при условии, что концентрация электронов в плазменных столбах превышает 10^{14} см^{-3} , частота столкновений электронов с нейтральными частицами имеет величину около 10^{10} с^{-1} , диаметр плазменных столбов составляет 1,5–3 мм, а изменение концентрации электронов до 10^{14} см^{-3} позволяет изменять уровень СВЧ сигнала в полосе заграждения от 0 до -60 дБ [3, 4, 15, 18, 24–27].

2. Выбраны и созданы конструкции непрерывных и импульсных газоразрядных устройств при пониженном и атмосферном давлении, которые интегрированы в одномерные и двумерные электромагнитные кристаллы, определены параметры плазмы в них: пределы изменения концентрации электронов при различных разрядных токах, оценены электронная температура, частота столкновений и толщина скин-слоя. Наибольшие значения концентрации электронов (около 10^{17} см^{-3}) получены в импульсном разряде в аргоне при атмосферном давлении [1–8, 11, 12, 29, 30].

3. Впервые реализован плазменный электромагнитный кристалл в диапазоне частот 7–12 ГГц в волноводе, сформированный тремя разрядами при пониженном давлении (10 кПа) в неоне с диаметром положительного столба 1,5 мм. Показано, что при увеличении разрядного тока в них от 0 до 2 А, что соответствует изменению концентрации электронов до $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, пропускание плазменного электромагнитного кристалла непрерывно изменяется от полного пропускания до пропускания с контрастным полосовым спектром с подавлением около 40 дБ в полосе заграждения (8–9 ГГц) и ослаблением около 2 дБ в полосе пропускания (9,5–10 ГГц) [3, 4, 9, 10, 24–27, 31, 32].

4. Показано, что одномерный плазменный электромагнитный кристалл в волноводе, сформированный тремя импульсными разрядами в газе (гелий, аргон, неон), позволяет изменять длительность импульса СВЧ излучения, мощность которого меньше мощности СВЧ пробоя газа, а частота соответствует полосе заграждения кристалла, от десятков микросекунд до десятков наносекунд путем вариации времени задержки между передним

фронтом импульса СВЧ и моментом зажигания разрядов. При мощности падающего СВЧ излучения большей порога СВЧ пробоя газа плазменный электромагнитный кристалл формируется СВЧ разрядами за время около 20 нс, которое определяется скоростью роста концентрации электронов в разрядах в зависимости от мощности излучения [3, 4, 10, 13-15, 18, 22, 25-27, 31, 32].

5. Впервые импульсные разряды при атмосферном давлении применены в качестве неоднородностей, формирующих плазменный электромагнитный кристалл в волноводе. Показано, что при максимуме концентрации электронов около $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в плазме разрядов в аргоне плазменный электромагнитный кристалл ослабляет мощное излучения СВЧ (около 50 кВт) в полосе заграждения более чем на 2 порядка величины [4, 10, 18, 26, 27].

6. Разряды при пониженном и атмосферном давлении применены в качестве управляющих элементов двумерного электромагнитного кристалла, образованного длинными медными стержнями (140 мм) диаметром 5 мм, расположенными параллельно в вершинах квадратов с основанием 22 мм. Показано, что при использовании импульсного разряда (разрядный промежуток 5,5 см, диаметр столба 2-3 мм) при атмосферном давлении в качестве дополнительного дефекта во фронтальном ряду кристалла, падающий на структуру луч мощного (около 50 кВт) излучения СВЧ частотой 9,15 ГГц распространяется в направлении $(45,0 \pm 2,5)^\circ$, либо пропускание в данном направлении исчезает, если разряд является компенсатором дефекта. Изменение пропускания структуры при этом составляет (14 ± 2) дБ при концентрации электронов $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [4, 7, 10, 16-23, 25, 28].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Получены патенты РБ и РФ на изобретение «Способ управления характеристиками волноводного полосового фильтра и устройство для его реализации».

Разработан способ и устройство сокращения длительности импульса мощного СВЧ излучения, позволяющие осуществлять сокращение длительности микросекундных импульсов до десятков наносекунд путем вариации задержки между передним фронтом импульса СВЧ и импульсами токов разрядов, формирующих электромагнитный кристалл. Получен патент РФ на изобретение «Способ сокращения длительности импульса мощного СВЧ излучения и устройство для его реализации».

Полученные результаты могут быть использованы для разработки электрически управляемых антенных элементов техники СВЧ, работающих при повышенных уровнях СВЧ излучения, и систем защиты от радиоатак.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Сафронов, Е.А. Определение энергии электронов в неравновесной плазме несамостоятельного тлеющего разряда атмосферного давления / Е.А. Сафронов, Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // Приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» – 2010. – часть 5, серия физико-математических наук. – С.59–64.
2. Сафронов, Е.А. Управление пропусканием волноводного полосно-пропускающего СВЧ фильтра с помощью тлеющих разрядов / Е.А. Сафронов, М.С. Усачёнок // Приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». – 2013. – часть 3, серия физико-математических наук. – С. 65-70.
3. Симончик, Л.В. Одномерная электромагнитная полосовая структура из плазменных столбов / Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // «Доклады Национальной академии наук Беларуси». – 2014. – Том 58, № 3. – С. 26 – 31.
4. One-dimensional electromagnetic band gap structures formed by discharge plasmas in a waveguide / V.I. Arkhipenko, Th. Callegari, L.V. Simonchik, J. Sokoloff, M.S. Usachonak // Journal of applied physics. – 2014. – Vol. 116, № 12. - 123302 (11 pp.)

Статьи в материалах конференций и сборниках статей

5. Применение ленгмюровского зонда для диагностики плазмы тлеющего разряда атмосферного давления / В.И. Архипенко, А.А. Кириллов, В.В. Овсянников, Е.А. Сафронов, Л.В. Симончик, Г.Ф. Стельмах, М.С. Усачёнок // Труды VII Симпозиума Беларуси и Сербии по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы, Минск, Беларусь, 22-26 сентября 2008 / Институт физики, редкол: В.И. Архипенко [и др.] –Минск, 2008. - С. 94 – 97.
6. Determination of electron concentration in the nonequilibrium plasma of non-self-sustained dc glow discharge in atmospheric pressure air / L.V. Simonchik, G.F. Stelmach, M.S. Usachonak // Materials VI International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, September 28 – October 2, 2009 / Inst. of Physics – Minsk, 2009. – V.1, P. 307-310.
7. Сафронов, Е.А. Периодическая структура с газоразрядной плазмой для управления СВЧ излучением 3-см диапазона / Е.А. Сафронов, М.Р. Серглазов, М.С. Усачёнок // Сборник трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики - 2010", Минск, Беларусь, Июнь 9–11, 2010 г./ Институт физики НАН Б – Минск, 2010. С. 360 – 364.

8. Сафронов, Е.А. Создание активного элемента волноводного СВЧ-фильтра на основе несамостоятельного тлеющего разряда атмосферного давления / Е.А. Сафронов, Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // Сборник материалов II Международной научно-практической молодежной конференции «Научные стремления – 2011», Минск, 14-18 ноября 2011 г. / Издательство «Белорусская наука» ; редкол.: А.Н. Волченко [и др.]. – Минск, 2011. –Т. 1. С. 604-608.

9. Сафронов, Е.А. Управление пропусканием волноводного СВЧ фильтра с помощью тлеющих разрядов / Е.А. Сафронов, М.С. Усачёнок // Сборник трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики - 2012", Минск, Беларусь, Июнь 13-15, 2012 г./ Институт физики НАН Б : редкол. В.В. Машко [и др.]. – Минск, 2012. – С. 184-189.

10. Control of electromagnetic band gap devices by discharge plasmas / V.I. Arkhipenko, Th. Callegari, J. Lo, L.V. Simonchik, J. Sokoloff, M.S. Usachonak // Proceedings of the 8th International workshop on “Microwave discharge: fundamentals and applications” Zvenigorod, Russia, September 10-14, 2012/ Yanus-K ; edited by: Yu.A. Lebedev, V.A. Ivanov. – Moscow, 2012. - P.275-280.

11. Simonchik, L.V. Determination of electron density in plasma used for the waveguide band-pass filter control / L.V. Simonchik Th. Callegari, J. Lo, J. Sokoloff, M.S. Usachonak // Труды IX белорусско-сербского симпозиума "Физика и диагностика лабораторной и астрофизической плазмы" (ФДП-9): Минск, 16–21 сентября 2012 г. / Под ред. В.И. Архипенко, В.С. Буракова и В.К. Гончарова – Минск : Ковчег, 2012 г. С. 172 – 175.

12. Safronau, Y.A. Atmospheric pressure glow discharge as control element of 10-centimeter waveguide filter at high microwave power // Y.A. Safronau, L.V. Simonchik, M.S. Usachonak // Contributed papers of VII International Conference “Plasma physics and plasma technology” (PPPT-7) Minsk, Belarus, September 17 – 21, 2012/ “Kovcheg”, 2012. – V.2, P. 624-627.

13. Симончик, Л.В. Сокращение импульса мощного СВЧ излучения с помощью 1D EBG структуры в волноводе / Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // Материалы второй Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» Минск, Беларусь, 27-28 февраля, 2013 г. / НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Беларус. гос. ун-та ; редкол. : В.И. Попечиц, Ю.И. Дудчик. – Минск, 2013. – С. 156-158.

14. Симончик, Л.В. Одномерная плазменная электромагнитная полосовая структура / Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // Сборник научных трудов IV Конгресса физиков Беларуси, 24–26 апреля 2013 г., Минск Беларусь / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред) [и др.]. – Минск : Ковчег, 2013. – С. 309-310.

15. Simonchik, L.V. 1D electromagnetic band gap structure formed by plasma / L.V. Simonchik, M.S. Usachonak // Proceedings of the 40th EPS Conference on Plasma Physics, 1 - 5 July 2013, Espoo, Finland, [Electronic resource] / – Mode of access: <http://ocs.ciemat.es/EPS2013PAP/pdf/O2.304.pdf> – Date of access : 01.09.2014.

16. Симончик, Л.В. Исследование треугольной двухмерной электромагнитной полосовой структуры с управляющими плазменными элементами / Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // Сборник трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики - 2014", Минск, Беларусь, Июнь 11-13, 2014 г./ Институт физики НАН Б : редкол. В.В. Машко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 156-161.

17. Simonchik, L.V. 2D electromagnetic band gap structure controlled by plasma / L.V. Simonchik, M.S. Usachonak // Proceedings of the 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, 23—27 June 2014. [Electronic resource] / – Mode of access: <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P2.126.pdf> – Date of access : 01.09.2014.

18. Powerful microwave control by the 1D EBG plasma structure in a waveguide / V.I. Arkhipenko, Th. Callegari, L.V. Simonchik, J. Sokoloff, M.S. Usachonak / Contributed paper and abstracts of invited lectures, topical invited lectures, progress reports and workshop lectures of the 27th Summer school and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Belgrade, Serbia, August 26-29, 2014/ CICERO ; edited by: D. Maric, A.R. Milosavljevic, Z. Mijatovic. – Belgrade, 2014. – P. 463-466.

Тезисы докладов

19. Сафронов, Е.А. Периодическая структура с газоразрядной плазмой для управления СВЧ излучением 3-см диапазона / Е.А. Сафронов, М.Р. Сероглазов, М.С. Усачёнок // Тезисы докладов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики»-2010, Минск, Беларусь, 9-11 июня 2010/ Институт физики НАН Беларуси – Минск, 2010. - С. 3.

20. Электромагнитные полосовые устройства управляемые газоразрядными лампами низкого давления / В.И. Архипенко, Т. Калегари, Ж.Ло, Л.В. Симончик, Ж. Соколоф, М.С. Усачёнок // Тезисы докладов Международной XXXVIII (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, Россия, 14 – 18 февраля 2011/ ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, редкол.: Л.М. Коврижных [и др.] – Москва, 2011. - С. 314.

21. Electromagnetic band gap devices controlled by glow discharges / V.I.

Arkhipenko, Th. Callegari, J. Lo, L.V. Simonchik, J. Sokoloff, M.S. Usachonak // Proceedings of 8th International workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, Nizhny Novgorod 9-16 July 2011, Nizhny Novgorod, 2011, pp. 345-346.

22. Плазма в структурах метаматериала / Т. Каллегари, Ж. Ло, Л.В. Симончик, Ж. Соколоф, М.С. Усачёнок // Сборник тезисов и программа III Конгресса физиков Беларуси, 25-27 сентября 2011, Минск Беларусь / Институт физики НАН Беларуси; под ред. С.Я. Килина – Минск, 2011. – С. 32.

23. Усачёнок, М.С. Управление диаграммой направленности периодической структуры с помощью разрядной плазмы / М.С. Усачёнок // Программа и краткие тезисы докладов Международной школы-конференции молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» – 2012, Минск, 13–15 июня 2012, Беларусь. С. 7.

24. Сафронов, Е.А. Управление пропусканием волноводного СВЧ фильтра с помощью тлеющих разрядов / Е.А. Сафронов, М.С. Усачёнок // Программа и краткие тезисы докладов Международной школы-конференции молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» – 2012, Минск, 13–15 июня 2012, Беларусь. С. 7.

25. Control of electromagnetic band gap devices by discharge plasmas / V.I. Arkhipenko, Th. Callegari, J. Lo, L.V. Simonchik, J. Sokoloff, M.S. Usachonak // Book of abstracts of the 8th International workshop on “Microwave discharge: fundamentals and applications” Zvenigorod, Russia, September 10-14, 2012 / PLASMAIOFAN Co. Ltd. Sci.&Techn. Center; edited by: Yu.A. Lebedev, V.A. Ivanov. – Moscow, 2012. – P. 57.

26. Simonchik, L.V. 1D electromagnetic band gap structure formed by plasma / L.V. Simonchik, M.S. Usachonak // Proceedings of the 40th EPS Conference on Plasma Physics, 1 - 5 July 2013, Espoo, Finland, [Electronic resource] / – Mode of access: <http://ocs.ciemat.es/EPS2013PAP/pdf/O2.304.pdf> – Date of access : 01.09.2014.

27. Симончик, Л.В. Одномерная электромагнитная плазменная структура / Л.В. Симончик, М.С. Усачёнок // Сборник трудов V Всероссийской молодежной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, 10-15 ноября 2013/ ФИАН, Учебно-Научный Комплекс ФИАН, редкол.: В.Н. Очкин [и др.] – Москва, 2013. - С. 180.

28. Simonchik, L.V. 2D electromagnetic band gap structure controlled by plasma / L.V. Simonchik, M.S. Usachonak // Proceedings of the 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, 23—27 June 2014. [Electronic resource] / – Mode of access: <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P2.126.pdf> – Date of access : 01.09.2014.

Патенты на изобретение

29. Способ управления характеристиками волноводного полосового фильтра и устройство для его реализации: пат. 2422953 Рос. Федерация, МПК8 Н 01Р 1/00 / Архипенко В.И., Симончик Л.В., Усачёнок М.С. ; заявитель ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси». – № 2010118210/07 ; заявл. 05.05.10 ; опубл. 27.06.11 // Официальный бюл. – 2011. - № 18.

30. Способ управления волноводным полосовым фильтром и устройство для его реализации: пат. 15457 Респ. Беларусь, МПК8 Н 01Р 1/00 / Архипенко В.И., Симончик Л.В., Усачёнок М.С. ; заявитель ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси». – № а 20100480 ; заявл. 25.03.2010 ; опубл. 28.02.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. - № 1. – С. 173.

31. Способ сокращения длительности импульса мощного СВЧ излучения и устройство для его реализации: пат. 2520374 Рос. Федерация, МПК8 Н 03К 5/04 / Симончик Л.В., Усачёнок М.С. ; заявитель ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси». – № 2013107567/08 ; заявл. 20.02.13 ; опубл. 27.06.14 // Официальный бюл. – 2014. - № 18.

32. Способ сокращения длительности импульса СВЧ излучения и устройство для его реализации: пат. 2531559 Рос. Федерация, МПК8 Н 03К 5/04 / Симончик Л.В., Усачёнок М.С. ; заявитель ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси». – № 2013129657/08 ; заявл. 27.06.2013 ; опубл. 20.10.14 // Официальный бюл. – 2014. - № 29.

РЭЗІЮМЭ

Усачонак Максім Сяргеевіч

Газаразрадная плазма ў аднамерных і двухмерных электрамагнітных крышталях

Ключавыя словы: электрамагнітны крышталёў, метаматэрыял, тлеючы разрад атмасфернага ціску, хваляводны фільтр, дыяграма накіраванасці.

Мэта работы: стварэнне адна-і двухмерных электрамагнітных крышталёў з плазменнымі неаднастайнасцямі, вывучэнне іх уласцівасцяў і ўжыванне для дынамічнага кіравання распаўсюджваннем магутнага электрамагнітнага выпраменьвання ЗВЧ дыяпазону.

Аб'ект даследавання: газаразрадная плазма і аднамерныя і двухмерныя плазменныя электрамагнітныя крышталі.

Прадмет даследавання: параметры плазмы, спектры прапускання і адлюстравання электрамагнітных крышталёў і іх залежнасці ад параметраў плазменных неаднастайнасцяў.

Метады даследавання: спектраскапічныя, электрафізічныя, метады рэгістрацыі спектральнай шчыльнасці магутнасці ЗВЧ сігналаў, электрадынамічны разлік.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: на падставе вынікаў колькаснага мадэлявання спектраў прапускання і адлюстравання плазменных электрамагнітных крышталёў у хваляводе вызначаны патрабаванні да параметраў плазменных неаднастайнасцяў (канцэнтрацыі электронаў, дыяметраў плазменных слупоў, ліку неаднастайнасцяў) для атрымання спектраў з кантраснасцю больш за 40 дБ. Распрацаваны канструкцыі разрадаў пры атмасферным ціску, якія інтэграваны ў электрамагнітныя крышталі. Створаны адна- і двухмерныя электрамагнітныя крышталі з плазменнымі неаднастайнасцямі. Даследаваны спектры прапускання плазменных электрамагнітных крышталёў у залежнасці ад параметраў неаднастайнасцяў і вызначан час іх пераключэння пры вялікай (каля 50 кВт) магутнасці ЗВЧ выпраменьвання пры хуткай змене параметраў плазмы.

Вобласць прымянення вынікаў: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі элементаў тэхнікі ЗВЧ з электрычным кіраваннем, здольных працаваць пры павышаных узроўнях ЗВЧ выпраменьвання, а так сама для сістэм абароны ад радыёатак.

РЕЗЮМЕ

Усачёнок Максим Сергеевич

Газоразрядная плазма в одномерных и двумерных электромагнитных кристаллах

Ключевые слова: электромагнитный кристалл, метаматериал, тлеющий разряд атмосферного давления, волноводный фильтр, диаграмма направленности.

Цель работы: создание одно- и двумерных электромагнитных кристаллов с плазменными неоднородностями, изучение их свойств и применение для динамического управления распространением мощного электромагнитного излучения СВЧ диапазона.

Объект исследования: газоразрядная плазма и одномерные и двумерные плазменные электромагнитные кристаллы.

Предмет исследования: параметры плазмы, спектры пропускания и отражения электромагнитных кристаллов и их зависимости от параметров плазменных неоднородностей.

Методы исследования: спектроскопические, электрофизические, методы регистрации спектральной плотности мощности СВЧ сигналов, электродинамический расчет.

Полученные результаты и их новизна: на основании результатов численного моделирования спектров пропускания и отражения плазменных электромагнитных кристаллов в волноводе определены требования к параметрам плазменных неоднородностей (концентрации электронов, диаметрам плазменных столбов, числу неоднородностей) для получения спектров с контрастностью более 40 дБ. Разработаны конструкции разрядов при атмосферном давлении, которые интегрированы электромагнитные кристаллы. Созданы одно- и двумерные электромагнитные кристаллы с плазменными неоднородностями. Исследованы спектры пропускания плазменных электромагнитных кристаллов в зависимости от свойств плазменных неоднородностей и установлено время их переключения при большой (около 50 кВт) мощности СВЧ излучения при быстром изменении параметров плазмы.

Область применения результатов: полученные результаты могут быть использованы для разработки электрически управляемых элементов техники СВЧ, способных работать при повышенных уровнях СВЧ излучения, и систем защиты от радиоатак.

SUMMARY

Usachonak Maksim Syargeevich

Gas discharge plasma in one- and two-dimensional electromagnetic band gap structures

Keywords: electromagnetic band gap structure, metamaterial, atmospheric pressure glow discharge, waveguide filter, directional pattern.

Aim of research: creation of one- and two-dimensional electromagnetic band gap structures with plasma inhomogeneities, investigation of their properties and their application to dynamic control of propagation of powerful microwave radiation.

Object of investigation: gas discharge plasma and one-dimensional and two-dimensional plasma electromagnetic band gap structures.

Subject of investigation: plasma parameters, transmission and reflection spectra of electromagnetic band gap structures and their dependences on plasma inhomogeneities parameters.

Methods of investigation: spectroscopic, electrophysical, methods of the microwave signals spectral power density detection, electrodynamic calculations.

Results obtained and their novelty: requirements for the plasma inhomogeneities parameters (electron density, plasma column diameter, number of inhomogeneities) to obtain transmission spectra with contrast range more than 40 dB are defined based on the numerical simulation results of the transmission and reflection spectra of electromagnetic band gap structures in waveguide. Designs of atmospheric pressure discharges which are integrated into electromagnetic band gap structures are developed. The one- and two-dimensional electromagnetic band gap structures with plasma inhomogeneities are created. The transmission spectra of the plasma electromagnetic band gap structures depending on the plasma inhomogeneities properties are investigated and their switching time at high (about 50 kW) microwave power and fast plasma parameters variation was determined.

Field of application: the obtained results can be used in development of electrically controlled microwave elements, which are capable to work at increased microwave power levels, and for protection systems from radio attacks.

**УСАЧЁНОК
МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

**ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА В ОДНОМЕРНЫХ И
ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Подписано в печать 06.05.2015 г. Формат 60х90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать
Объем: 1,6 усл. печ. л.; 1,3 уч.-изд. л.
Тираж 60 экз. Заказ № 8.

Государственное научное учреждение «Институт физики
имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»
220072, Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе Института физики НАН Беларуси