

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ
С ЧАСТИЧНЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ
ВОЛНОВОДА**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)
аспиранта 4 курса 401 группы
направления 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи
факультета нано- и биомедицинских технологий

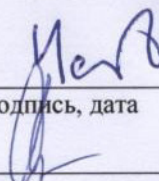
Романова Артема Александровича

Научные руководители
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Новые возможности при создании СВЧ-устройств открываются при использовании периодических структур, получивших название фотонных кристаллов [1–3]. Эти структуры состоят из периодически расположенных элементов, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. Введение нарушения в периодичности слоистой структуры приводит к появлению в запрещенной зоне фотонного кристалла резонансных частотных особенностей – узких «окон» прозрачности [4, 5]. В этом случае говорят о существовании дефектной моды.

Возникновение дефектной моды в запрещенной зоне фотонного кристалла дает возможность создания различных устройств, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне. Возможности практического применения СВЧ фотонных кристаллов рассматривались в [1, 6–8]. В качестве примеров приводятся высоконаправленные резонансные антенны, резонансные полости для размещения полупроводниковых детекторов, различные типы СВЧ-фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками.

Описанные в работах [9–11] методы измерения параметров полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов предполагали, что измеряемая структура полностью заполняет поперечное сечение волновода. Авторы определяли параметры исследуемых структур с помощью полученных амплитудно-частотных характеристик коэффициентов прохождения и отражения. Помещаемая в волновод структура перед фотонным кристаллом вызывает достаточно резкое изменение его амплитудно-частотных характеристик. При этом обеспечивается высокая разрешающая способность и чувствительность к изменению параметров измеряемых структур. Однако локальность

измерений при этом ограничивается площадью поперечного сечения волновода и для повышения локальности измерений требуется использовать волноводы более высокочастотного диапазона, что вызывает, как правило, определенные технические трудности.

Таким образом авторами не рассматривалось когда вносимая в фотонный кристалл исследуемая структура лишь частично заполняет поперечное сечение волновода. Для усиления отклика амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фотонного кристалла на параметры структуры представляет интерес изучение влияния её размеров и местоположения внутри предварительно созданной неоднородности, выполняющей роль микрорезонатора в фотонном кристалле.

Цель научной квалификационной работы:

Теоретическое и экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных структур с частичным заполнением поперечного сечения волновода.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

Исследование характеристик СВЧ фотонных структур с периодически расположенными элементами, частично заполняющими поперечное сечение волновода.

Исследование влияния наличия металлического включения, частично заполняющего поперечное сечение волновода, внутри нарушенного слоя волноводного фотонного кристалла на характеристики дефектной моды.

Исследование влияния местоположения и размеров проводящего включения на АЧХ фотонного кристалла с учетом конфигурации структуры кристалла.

Исследование особенностей распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны в продольном и поперечном

сечении волновода при наличии элементов фотонного кристалла, частично заполняющих его поперечное сечение.

Исследование эффективности управления АЧХ фотонного кристалла с частичным заполнением поперечного сечения волновода с использованием $n-i-p-i-n$ -диодных структур.

Новизна исследований, проведенных в ходе научной квалификационной работы состоит в следующем:

Установлено, что при внесении проводящего включения малых размеров частота дефектной моды смещается в сторону низких частот.

Теоретически и экспериментально показано, что характер изменения положения частоты дефектной моды от местоположения проводящего включения зависит от выбранной конфигурации структуры фотонного кристалла с нарушенным слоем.

Максимальный сдвиг наблюдается при расположении металлического включения на границе нарушения при толщине нарушенного слоя $d_{\text{def}} < \lambda_{\text{res}}/2$ и в центре нарушения при $\lambda_{\text{res}}/2 < d_{\text{def}} < \lambda_{\text{res}}$.

Теоретически и экспериментально доказано, что смещение включения в плоскости нарушенного слоя от центра к узкой стенке волновода вызывает сдвиг резонансного пика на АЧХ коэффициента пропускания структуры в сторону более коротких волн.

Достоверность результатов научной квалификационной работы обеспечивается качественным и количественным соответствием результатов теоретического анализа и компьютерного моделирования, с использованием численных методов, результатам, полученным экспериментально. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением современной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных результатов с использованием стандартных методов.

Практическая значимость

Полученные результаты могут быть использованы для создания СВЧ фильтров с управляемыми характеристиками.

Основные положения, вносимые на защиту:

При внесении проводящего включения малых размеров в нарушенный слой фотонного кристалла частота дефектной моды смещается в сторону низких частот.

Максимальный сдвиг частоты дефектной моды фотонного кристалла наблюдается при расположении металлического включения на границе нарушения при толщине нарушенного слоя $d_{\text{def}} < \lambda_{\text{res}}/2$ и в центре нарушения при $\lambda_{\text{res}}/2 < d_{\text{def}} < \lambda_{\text{res}}$.

Смещение включения в плоскости нарушенного слоя от центра к узкой стенке волновода вызывает сдвиг частоты дефектной моды фотонного кристалла в сторону более коротких волн.

В фотонном кристалле, выполненном на основе структуры, частично заполняющей поперечно сечение волновода, на частоте дефектной моды волна основного типа претерпевает максимальную трансформацию в высшие типы волн в сечениях волновода, соответствующих узлам стоячей волны внутри фотонного кристалла.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены на:

26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4–10 сентября 2016 г.

Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 18–19 мая 2017 г.

Исследования выполнялись в рамках проекта «Разработка технологии формирования нанокompозитов на основе диэлектрических матриц с включениями в виде углеродных нанотрубок с управляемыми

характеристиками в СВЧ-диапазоне и создание сканирующего зондового ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающего локальное измерение СВЧ-характеристик нанокompозитов» Государственный контракт № 16.740.11.0512 от 16 мая 2011 г. и Дополнению от 07 октября 2011 г. № 1, Дополнению от 15 марта 2013 г. № 2 Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.

Публикации. По материалам научной квалификационной работы опубликовано работ 3, в том числе 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК; 2 работы опубликованы в трудах международных и Всероссийских конференций.

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, в предложении теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, в проведении компьютерного эксперимента и анализе полученных результатов.

Структура и объем работы научной квалификационной работы. Научная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 70 страниц основного текста, 47 рисунков. Список использованной литературы включает 88 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы научной квалификационной работы, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первом разделе проведен критический анализ современного состояния исследования характеристик СВЧ-фотонных кристаллов, изобретений на их основе и методов исследования материалов с использованием фотонных кристаллов.

Во втором разделе приведены результаты исследований амплитудно-частотных характеристик коэффициента пропускания структуры на основе СВЧ фотонного кристалла с металлическим включением внутри нарушенного слоя.

Рассмотрена модель, которая описывает взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими проводящие включения.

Описано исследование влияния металлического включения, помещаемого внутрь нарушенного слоя, на АЧХ фотонного кристалла.

Исследовался СВЧ волноводного фотонного кристалла, состоящего из 11 чередующихся слоев пенопласта, размерами 10мм, и керамики, размерами 1мм. В предварительно созданный нарушенный центральный слой структуры помещали металлическую пленку толщиной 100мкм со сторонами квадрата 1мм, 2мм, 4мм. При внесении металлического включения внутрь наблюдалось изменение пика окна прозрачности коэффициента пропускания в запрещенной зоне фотонного кристалла в сторону низких частот.

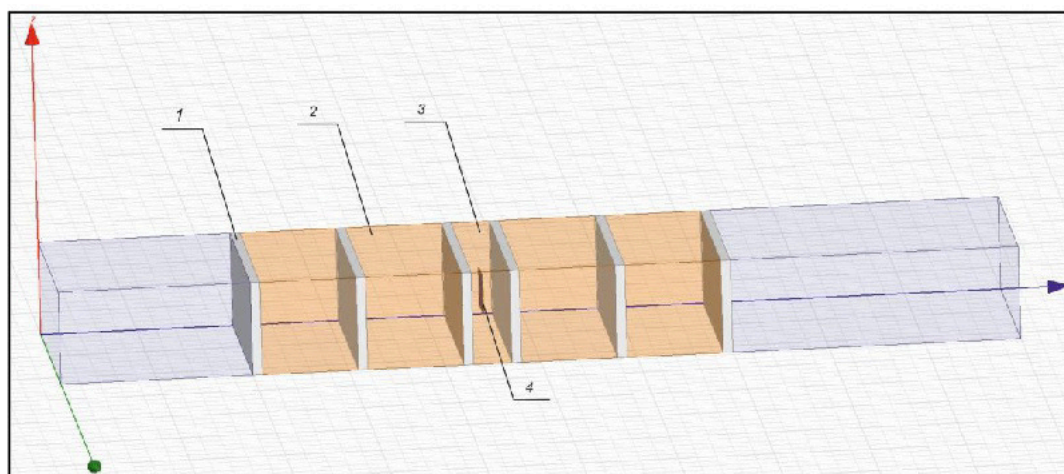


Рис.1 3D модель фотонной структуры. 1 – слои поликора толщиной 1мм, 2 – слои пенопласта толщиной 10мм, 3 – нарушенный слой толщиной 4мм, 4 – металлическое включение в нарушенном слое.

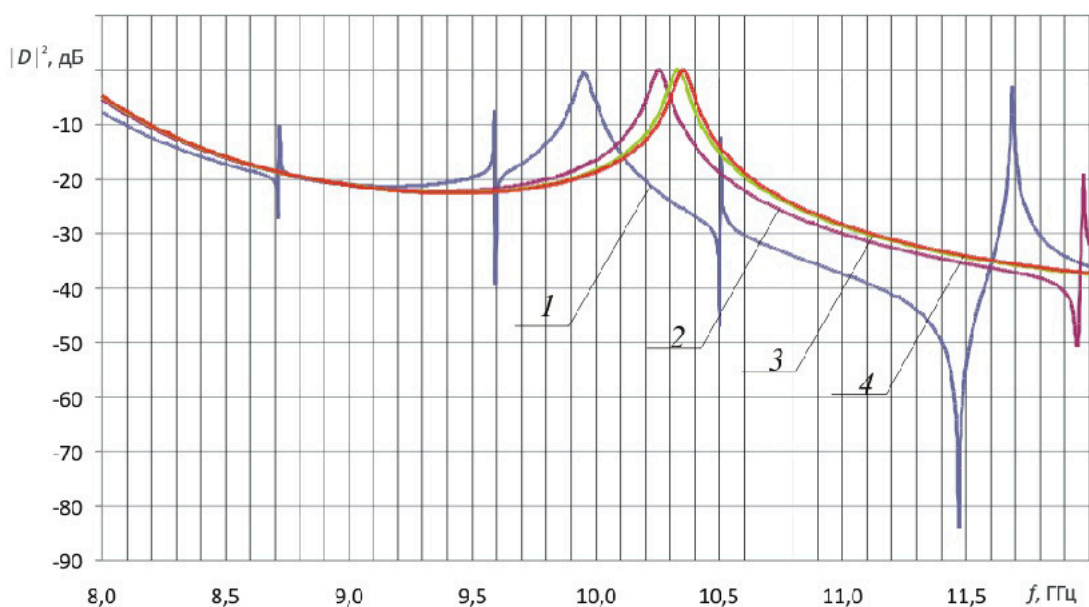


Рис. 2 Зависимость положения пика АЧХ коэффициента пропускания структуры от размера включения при его расположении вплотную к границе нарушенного слоя и по центру сечения в плоскости нарушения. Линия 1 – размер включения 4мм×4мм×0.1мм, 2 – размер включения 2мм×2мм×0.1мм, 3 – размер включения 1мм×1мм×0.1мм, 4 – включение отсутствует.

Дальнейшие исследования проводились на волноводном фотонном кристалле состоящем из 11 слоев фторопласта, толщиной 22мм, и керамики, толщиной 1мм. Для создания окна прозрачности в центре запрещенной зоны фотонного кристалла было создано нарушение путем изменения толщины центрального слоя, которая составила 2.3мм.

Исследовалось влияние металлического включения внутри нарушенного слоя фотонного кристалла на распределение электромагнитного поля вдоль и поперек волновода.

При внесении металлического включения в нарушенный слой происходит заметное искажение электромагнитного поля. При этом, искажение тем сильнее, чем ближе металлическое включение к границе неоднородности.

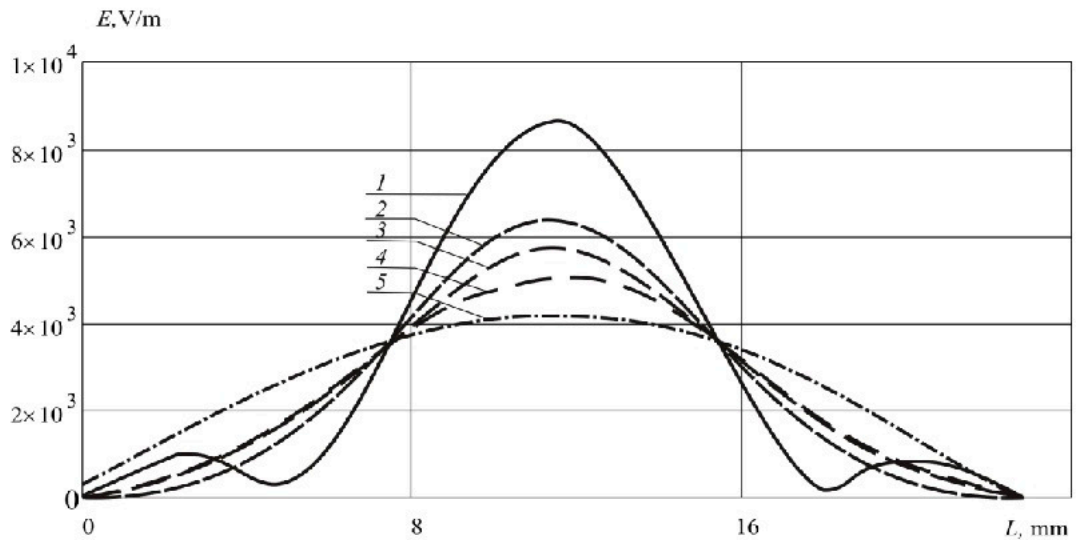


Рис.2.3.3 Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла для различного положения металлического включения d внутри неоднородности и без включения: a – вдоль направления распространения электромагнитной волны; b – в поперечной плоскости волновода (A–A) на рис.2.3.2. $f_{\text{res}} = 10.095$ GHz. Толщина нарушенного слоя $d_{\text{tief}} = 2.3$ мм. d , μm : 1 – 0 μm (на поликоре), 2 – 100 μm , 3 – 200 μm , 4 – 300 μm , 5 – структура без металлического включения.

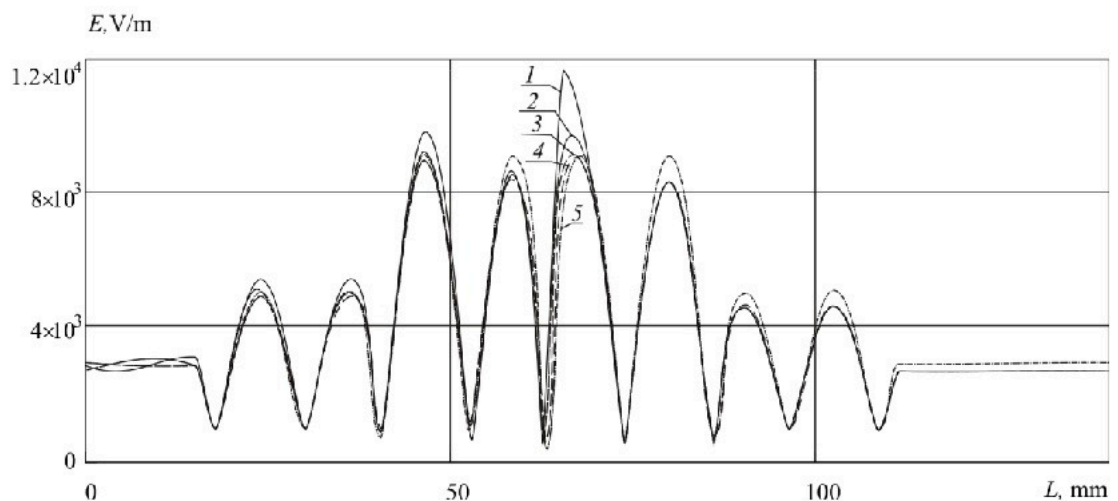


Рис.3 Распределение напряженности электрического поля электромагнитной волны внутри фотонного кристалла для различного положения металлического включения d внутри неоднородности и без включения вдоль направления распространения электромагнитной волны на частоте $f_{\text{res}} = 10.095$ GHz. Толщина нарушенного слоя $d_{\text{tief}} = 2.3$

мм. d , μm : 1 – 0 μm (на поликоре), 2 – 100 μm , 3 – 200 μm , 4 – 300 μm , 5 – структура без металлического включения.

В ходе работы исследовался волноводный фотонный кристалл состоящий из 11 слоев фторопласта, толщиной 22мм, и керамики, толщиной 1мм, с нарушенным центральным слоем 14мм. В этом случае в центре запрещенной зоны возникало окно прозрачности как и в случае со структурой 2.3мм. Производилось компьютерное моделирование распределения электромагнитных полей в структуре, в результате которого выяснилось, что в центре нарушенного слоя возникает пучность, а не узел, как в структуре 2.3мм.

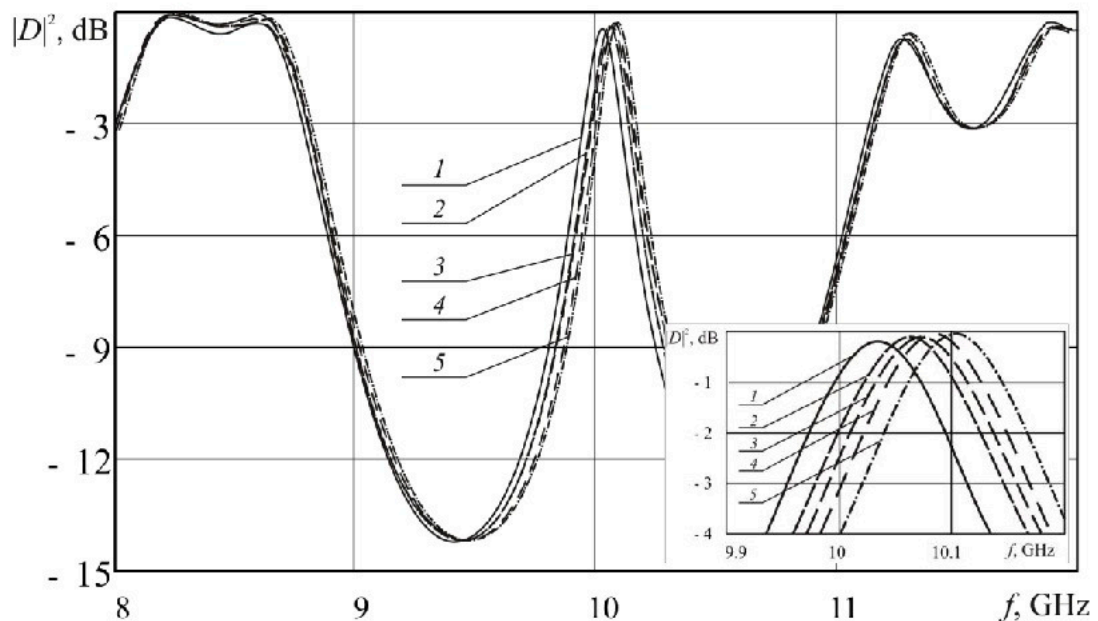


Рис. 4 АЧХ структуры с металлическим включением $a=3\text{мм}$. Кривая 1 — АЧХ структуры с металлическим включением, расположенным на слое керамики, кривая 2 — АЧХ структуры с металлическим включением, расположенным на расстоянии 100 μm от слоя керамики, кривая 3 — АЧХ структуры с металлическим включением, расположенным на расстоянии 200 μm ; кривая 4 — АЧХ структуры с металлическим включением, расположенным на расстоянии 300 μm . кривая 5 — АЧХ структуры без металлического включения.

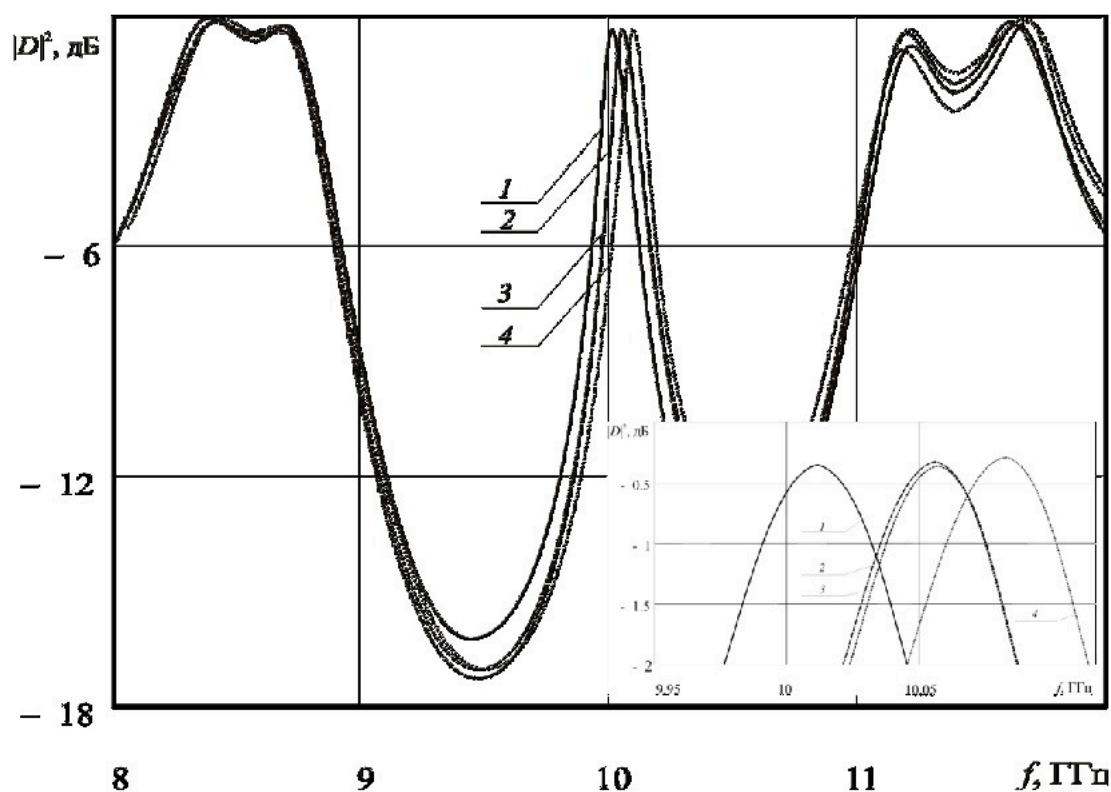


Рис.5 АЧХ структуры с максимумом напряженности электрического поля в центре нарушенного слоя. Кривая 1 — металлическое включение располагается в центре нарушенного слоя; кривая 2 - металлическое включение располагается на расстоянии 3мм от границы нарушенного слоя; кривая 3 — металлическое включение располагается на слое поликора; кривая 4 — металлическое включение отсутствует

В ходе работы исследовалось влияние положения в поперечном сечении волновода. Металлическая пленка перемещалась от центра к узкой стенке волновода. При изменении положения металлического включения в поперечной плоскости волновода внутри нарушенного слоя приводит к изменению положения частоты дефектной моды на АЧХ коэффициента пропускания фотонного кристалла. При этом максимальный сдвиг частоты дефектной моды относительно структуры без включения, наблюдается при расположении металлического включения в центре поперечной плоскости волновода на границе нарушенного слоя.

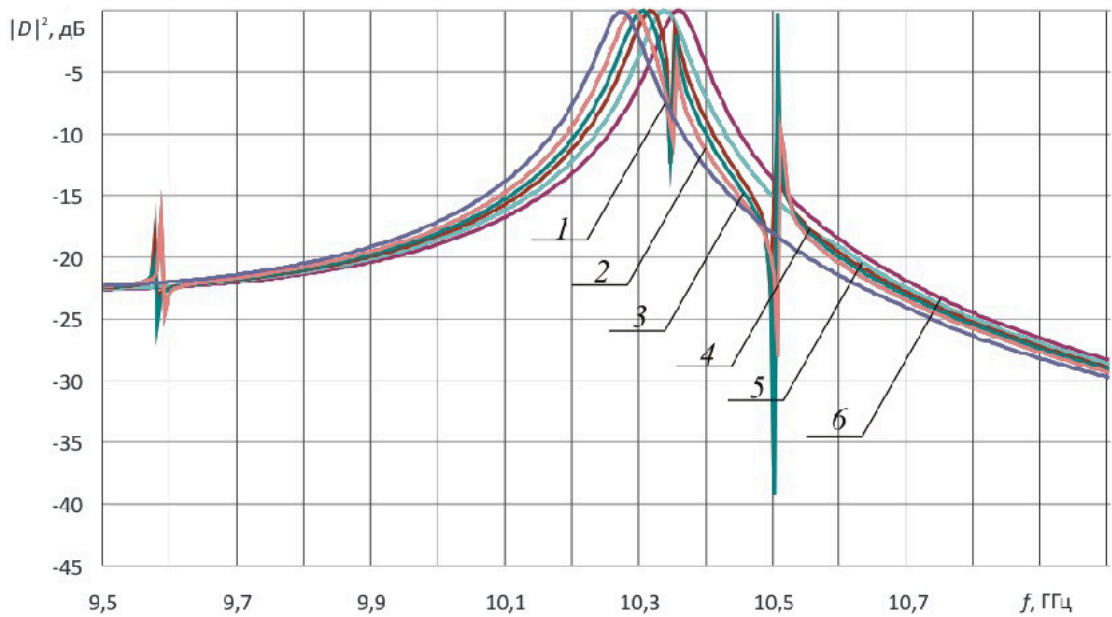


Рис.6 Зависимость частоты пика пропускания от положения металлического включения в плоскости нарушения. Кривая 1 – $b=7.5\text{мм}$, кривая 2 – $b=6.0\text{мм}$, кривая 3 – $b=4.5\text{мм}$, кривая 4 – $b=3.0\text{мм}$, кривая 5 – $b=1.5\text{мм}$, кривая 6 – $b=0.0\text{мм}$ (включение находится вплотную к узкой стенке волновода)

Измерения частотных зависимостей электромагнитного излучения, взаимодействующего с фотонно-кристаллической структурой, проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA N5230A.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик и распределения электромагнитного излучения проводилось с использованием программного обеспечения Ansoft HFSS.

В третьей части описано исследование волноводного фотонного кристалла с частичным заполнением поперечной плоскости волновода. Был исследован волноводный фотонный кристалл из 13 слоев с неполным заполнением поперечного сечения волновода. Толщина структуры составила 2мм. При создании нарушенного слоя в запрещенной зоне возникает окно прозрачности.

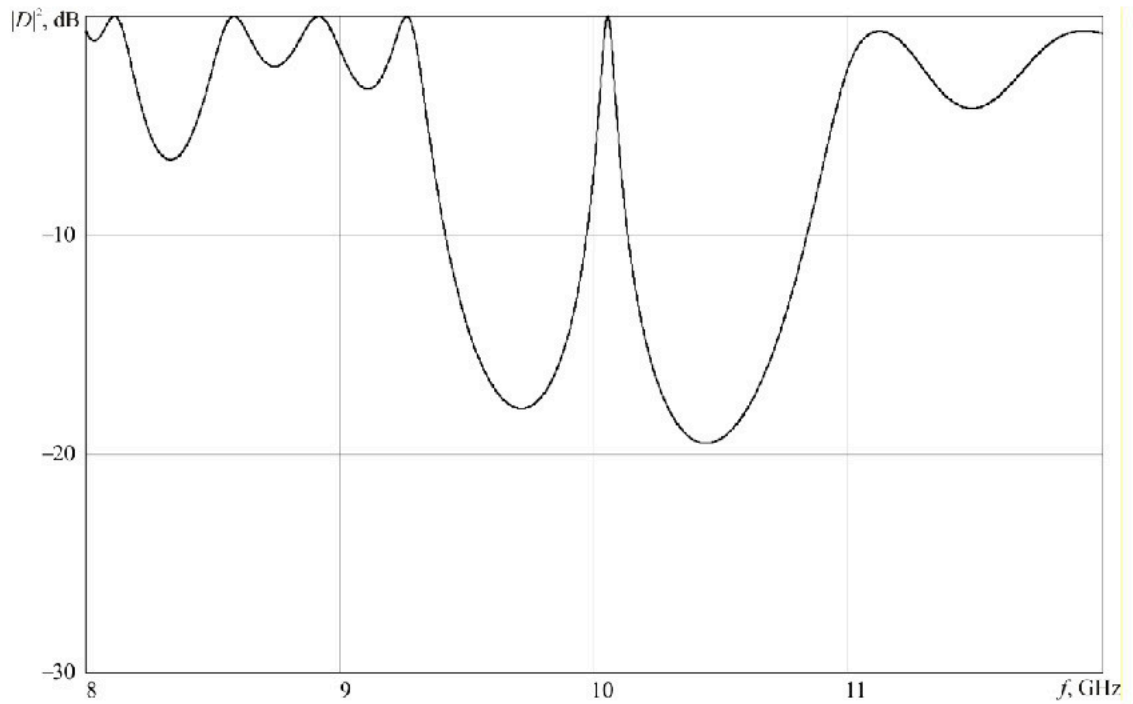


Рис.7 Амплитудно-частотная зависимость коэффициента прохождения 13-слойной фотонной структуры с нарушенным центральным слоем, не полностью заполняющей поперечное сечение волновода.

Исследовано влияние проводящего включения малых размеров, а именно образца кремния, помещаемого внутрь нарушенного слоя на характеристики фотонного кристалла.

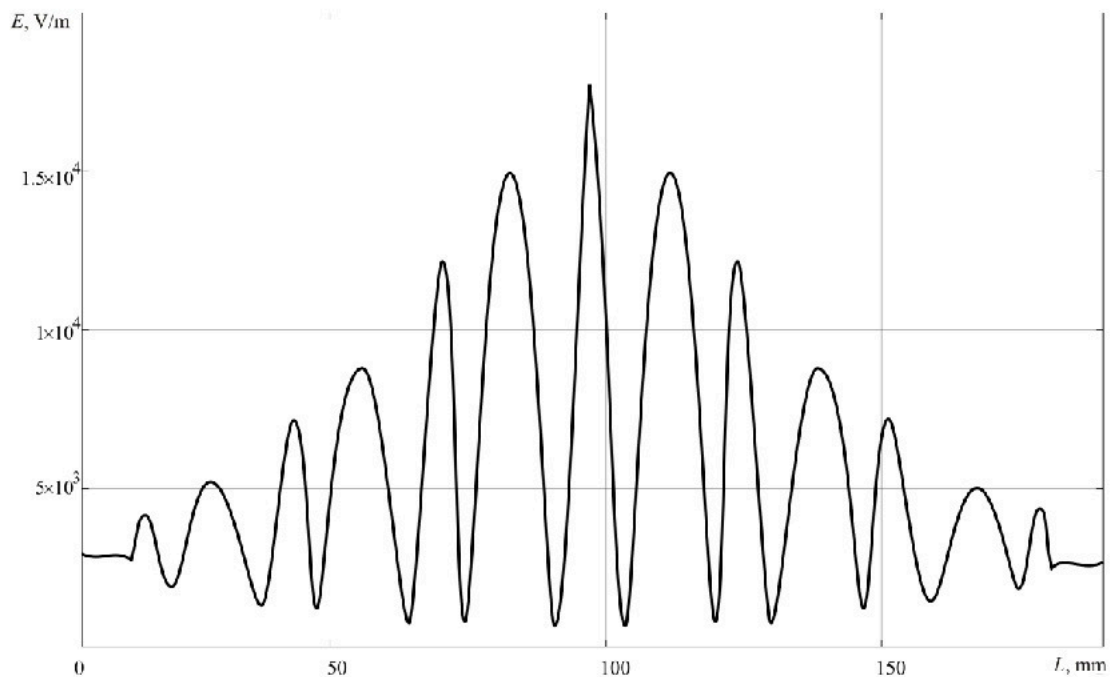


Рис. 8 Результаты расчета электромагнитного поля вдоль направления распространения электромагнитной волны

На рис. 9 представлены результаты расчета распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны в поперечных сечениях волновода, соответствующих узлам стоячей волны в продольном направлении волновода

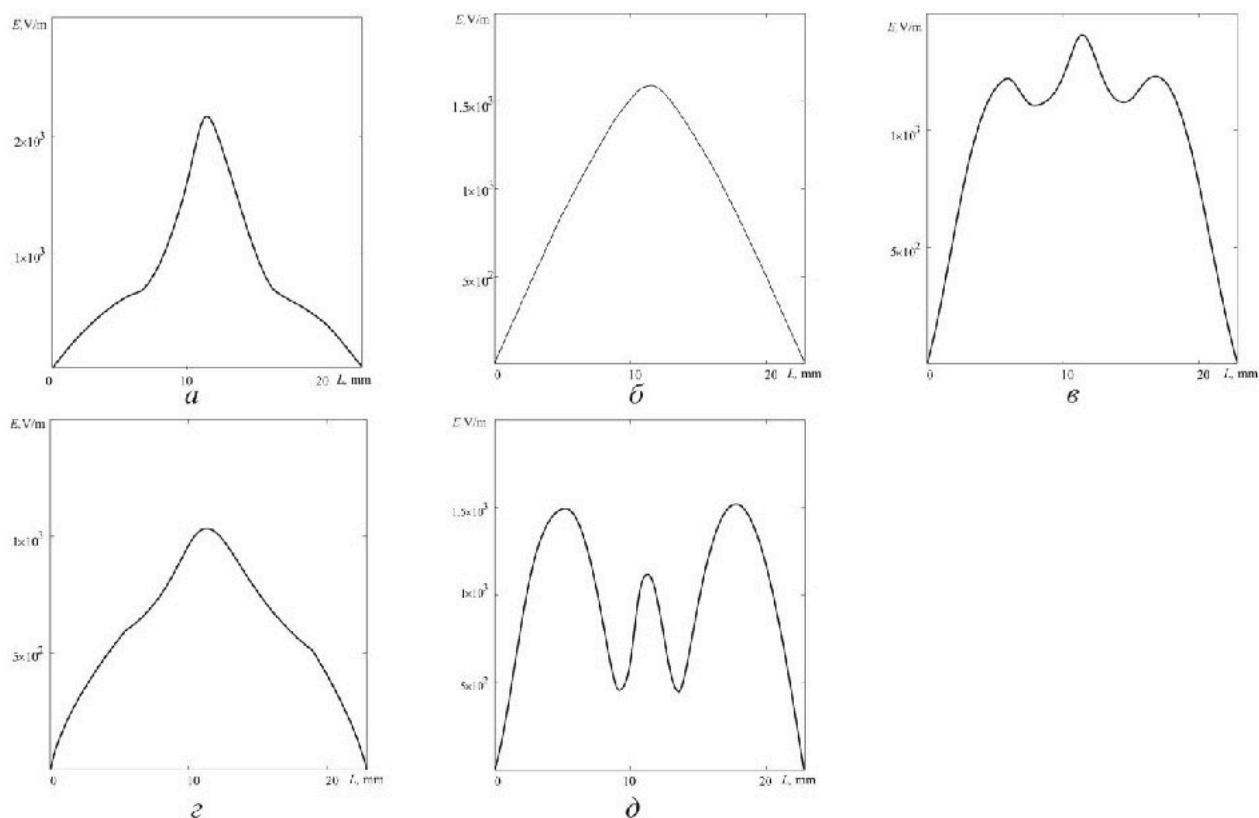


Рис. 9 Результаты расчета распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны в поперечных сечениях волновода, соответствующих узлам стоячей волны в продольном направлении волновода. *a* - 1 узел, расположенный в 1 слое из поликора, *б* - второй узел, расположенный во втором слое из фторопласта, *в* - третий узел, расположенный в третьем слое из поликора, *г* - четвертый узел, расположенный в четвертом слое из фторопласта, *д* - пятый узел, расположенный в пятом слое из поликора.

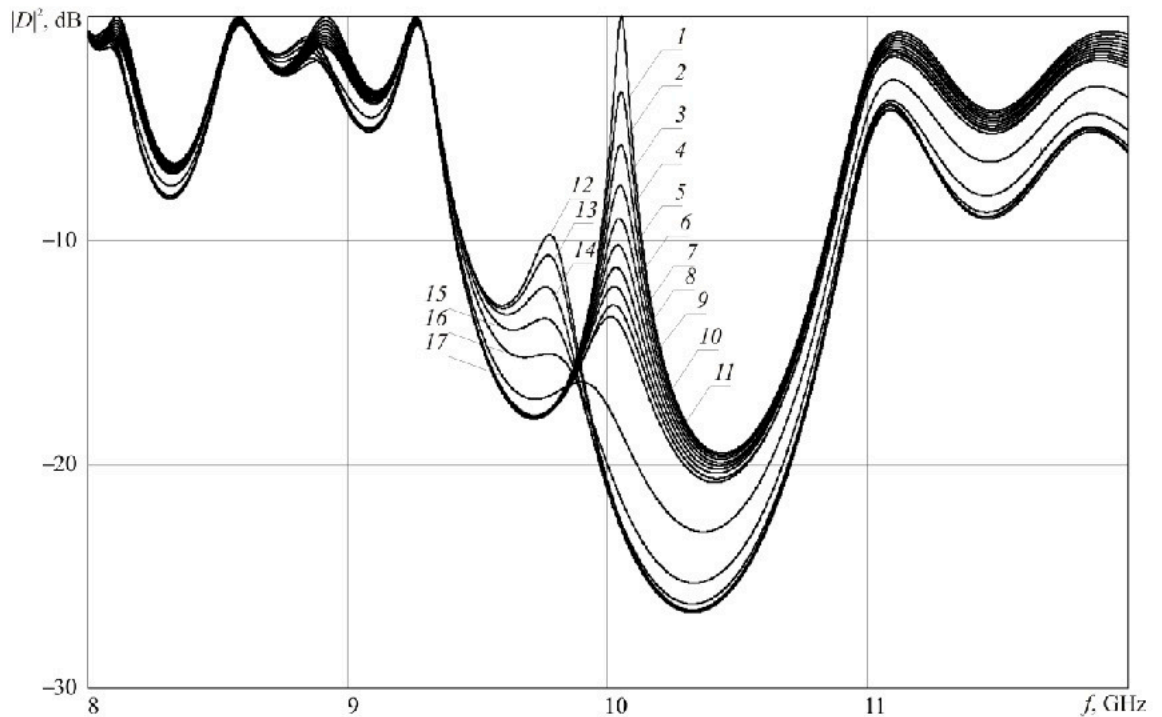


Рис. 10 АЧХ коэффициента пропускания фотонного кристалла в зависимости от величины проводимости кремния.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено компьютерное моделирование спектров прохождения одномерных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в волноводном исполнении при наличии внутри нарушенного слоя металлического включения.

Установлено, что при внесении металлического включения внутрь нарушенного слоя волноводного фотонного кристалла происходит сдвиг частоты дефектной моды в сторону низких частот.

Проведено компьютерное моделирование распределения электромагнитных полей в фотонном кристалле, содержащем металлическое включение.

Теоретически и экспериментально показано, что характер изменения положения частоты дефектной моды от местоположения проводящего включения зависит от выбранной конфигурации структуры. Максимальный сдвиг частоты дефектной моды относительно структуры без металлического

включения, в одном случае, наблюдается при расположении металлического включения на границе нарушения при толщине нарушенного слоя $d_{\text{def}} < \lambda_{\text{res}}/2$, а в другом случае, при расположении металлического включения в центре нарушения при $\lambda_{\text{res}}/2 < d_{\text{def}} < \lambda_{\text{res}}$.

Теоретически и экспериментально доказано, что смещение включения в плоскости нарушенного слоя от центра к узкой стенке волновода вызывает сдвиг резонансного пика на АЧХ коэффициента пропускания структуры в сторону более коротких волн.

Исследованы распределения электромагнитных полей, а также, спектры отражения и прохождения фотонного кристалла, частично заполняющего поперечное сечение волновода.

В фотонном кристалле, выполненном на основе структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода, на частоте дефектной моды волна основного типа претерпевает максимальную трансформацию в высшие типы волн в сечениях волновода, соответствующих узлам стоячей волны внутри фотонного кристалла.

Список опубликованных работ по теме научной квалификационной работы.

[1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.А. Характеристики дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность // Журнал технической физики, 2017, том 87, вып.6, С. 884-887.

[2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.А. Управление характеристиками дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла металлическим включением // Материалы 26-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2016). Севастополь, 4—10 сентября 2016 г.: Материалы конференции. В 2 т. Севастополь: «Вебер», 2016, Т. 2, С. 906–907.

[3] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.А. Амплитудно-частотные характеристики одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2017. С. 42–45.

[4] D. A. Usanov*, A. V. Skripal’, and A. A. Romanov Parameters of Defect Mode of 1D Microwave Waveguide Photonic Crystal with Metal Inclusions in the Element That Destroys Periodicity// Technical Physics, 2017, Vol. 62, No. 6, pp. 899–902.

Цитируемая литература

[1] Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress in Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, P. 185.

[2] Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies// *Electromagnetics*. 2005. Vol. 25, issue 5. P. 437.

[3] Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// *Радиотехника*. 2003. №8. С. 26–30.

[4] Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure// *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67, N. 24. P. 3380–3383.

[5] Usanov D., Skripal A., Abramov A., Bogolubov A., Skvortsov V., Merdanov M. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // *Proc. of 37rd European Microwave Conference*. Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.

[6] Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// *Доклады Академии Наук*. Т. 443, № 5, Апрель 2012. С. 564-566.

[7] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках// *Известия вузов. Электроника*. 2007. №6. С. 25–32.

[8] Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов/ С.А. Никитов, Ю.В. Гуляев, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев// *Доклады Академии Наук*. Т. 448, № 1, Январь 2013. С. 35-37.

[9] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Использование волноводных фотонных

структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках// Известия вузов. Электроника. 2007. №6. С. 25–32.

[10] Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// Доклады Академии Наук. Т. 443, № 5, Апрель 2012. С. 564-566.

[11] D.A. Usanov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev, E.V. Latysheva, S.A. Nikitov Microwave Photonic Structures and their Application for Measurements of Parameters of Thin Semiconductor Layers// Proceedings of the 44th European Microwave Conference. 6-9 Oct 2014, Rome, Italy. P. 984–987. 978