

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики твердого тела

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ  
СОЗДАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СОГЛАСОВАННЫХ НАГРУЗОК**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы  
направления «Электроника и наноэлектроника»  
факультета нано- и биомедицинских технологий  
Михайленко Дмитрия Алексеевича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Д.В. Пономарев

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	3
1	АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ СВЧ-ДИАПАЗОНА	5
2	КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ ТОНКИЕ РЕЗИСТИВНЫЕ СЛОИ	13
3	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ ТОНКИЕ РЕЗИСТИВНЫЕ СЛОИ	30
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	35

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря прогрессу электроники и стремительному развитию теории и техники СВЧ-устройств открываются широкие возможности для их применения. Волноводная техника с каждым годом всё глубже внедряется в научные исследования в областях атомной физики, радиоспектроскопии, радиоэлектроники, медицины и биологии.

Бурное развитие СВЧ-устройств началось с зарождением радиолокации в 40-50-х годах, что связано как с модернизацией ранее известных устройств (согласующих элементов, делителей мощности, линий передачи и т.д.) для работы на более высоких частотах, так и с созданием новых устройств на основе достижений физики твёрдого тела (микрорезонаторы, интегральные схемы СВЧ, полупроводниковые управляющие устройства СВЧ и т.д.) [1].

Интенсивное развитие техники СВЧ продолжается и в современном мире, когда одним из самых перспективных и актуальных направлений стало создание поглощающих электромагнитное излучение материалов (например, технология «Стелс»). И наиболее актуальным является создание малогабаритных согласованных нагрузок, т.к. они имеют обширную область применения как в качестве самостоятельных поглотителей электромагнитных волн, так и в качестве элементов более сложных функциональных устройств.

Целью данной работы является исследование взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона со слоистыми резистивно-диэлектрическими плёночными структурами и создание на их основе широкополосной согласованной нагрузки для терагерцового диапазона частот.

**Положение, выносимое на защиту:**

с использованием слоистых резистивно-диэлектрических плёночных структур могут быть созданы широкополосные согласованные нагрузки в диапазоне 140-220 ГГц с КСВН $<1,2$ , толщина рабочей области которых составляет менее 1.0 мм

# 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Создание периодических фотонных структур СВЧ-диапазона и изучение их свойств имеют важное практическое значение в виду быстрого развития современных систем связи и телекоммуникации, антенн и радарной техники, измерительного оборудования и разнообразного рода датчиков [4]. Физические особенности взаимодействия электромагнитного излучения с периодической структурой фотонного кристалла вынашивают схожий характер для различных частотных диапазонов, но в то же время СВЧ фотонные кристаллы владеют рядом важных преимуществ

Исследование периодических СВЧ фотонных кристаллов представляет также особое внимание в связи с перспективой их применения при создании различных устройств, материалов и композитов, изначально предназначенных для работы в СВЧ-диапазоне.

одной из областей применения СВЧ фотонных кристаллов является создание широкополосных согласованных нагрузок, являющихся неотъемлемой частью широкого класса измерительных систем. Было предложено использовать для этого СВЧ фотонные кристаллы, содержащие включения в виде нанометровых металлических слоёв.

В СВЧ-диапазоне тонкие пленки могут применяться в качестве поглотителей СВЧ-излучения, что позволяет организовывать на их основе измерители СВЧ-мощности и слоистые согласованные нагрузки. В частности, в работе [12] предлагается конструкция слоистой согласованной нагрузки на основе нанометровых металлических пленок и диэлектрических слоев. Такая нагрузка имеет малые габариты, однако обладает недостаточно широким рабочим диапазоном частот, не перекрывающим стандартные поддиапазоны сверхвысокочастотного диапазона длин волн.

## 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛА МИ, СОДЕРЖАЩИМИ ТОНКИЕ РЕЗИСТИВНЫЕ СЛОИ

Слоистая волноводная металлодиэлектрическая слоистая структура имеет вид набора диэлектрических и металлических слоев, целиком заполняющих по поперечному сечению короткозамкнутый участок прямоугольного волновода и расположенных перпендикулярно направлению падения электромагнитной волны.

Число слоёв, их толщины, диэлектрические проницаемости и электропроводности подбираются или получаются численным решением задачи по оптимизации, чтобы в выбранном частотном диапазоне величина коэффициента стоячей волны была меньше заданной величины. Сама структура имеет несколько слоёв, некоторые из них – металлические наноплёнки, а другие – диэлектрики с различной диэлектрической проницаемостью [12]. Металлические пленки выполняют роль поглотителей СВЧ-излучения, а диэлектрические слои употребляются для согласования. Изменением толщин и электрофизических свойств слоев достигается необходимый вид частотной зависимости КСВН.

Коэффициенты  $A_j$ ,  $B_j$  и  $A_{j+1}$ ,  $B_{j+1}$ , определяют амплитуды упавшей и отраженной волны, по обе стороны от границы  $z_{j,j+1}$ , соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}$$

Коэффициенты отражения  $R = B_0/A_0$  электромагнитной волны, определяются через матрицу передачи  $\mathbf{T}_N$  с помощью соотношений:

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1})$$

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}$$

Величина эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{eff}}$  композитного материала определена с использованием известных моделей «эффективной» среды, описываемых соотношениями:

Бруггемана [20]

$$f_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{\text{eff}}}{2\epsilon_{\text{eff}} + \epsilon_1} + f_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{\text{eff}}}{2\epsilon_{\text{eff}} + \epsilon_2} = 0,$$

А также весьма производительное аналитическое описание Бергмана

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_1 \left( 1 - (1 - p) \int_0^1 \frac{g(x,p)}{\epsilon_1 / (\epsilon_1 - \epsilon_2) - x} dx \right),$$

Проведя компьютерное моделирование, можно сделать следующие выводы:

-Используя фотонных кристаллов с нанометровыми металлическими слоями и композиционными материалами можно создать согласованную нагрузку в широком диапазоне частот 140 – 220 ГГц

-С использованием метода эффективной среды (использование соотношений Бруггемана) было рассчитано значение эффективной диэлектрической проницаемости композитного материала, использование которого необходимо для реализации согласованной нагрузки с требуемыми параметрами в диапазоне частот 140–220 ГГц.

-Было получено КСВН < 1,15 согласованной нагрузки при использовании материалов, со стандартными значениями диэлектрической проницаемости.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ ТОНКИЕ РЕЗИСТИВНЫЕ СЛОИ

В ходе эксперимента удалось получить широкий частотный диапазон, в котором значение КСВН не превышает 1,3.

Достигнутый КСВН может быть улучшен в случае подбора экспериментальных образцов, которые имеют параметры, точно совпадающие с расчетными.

Результаты эксперимента показывают, что предложенная нами модель построена правильно, с её помощью могут быть созданы достаточно широкополосные согласованные нагрузки, толщина рабочей области которых составляет 0.82 мм

С использованием фотонных кристаллов, содержащих тонкие резистивные слои, могут быть построены согласованные нагрузки в диапазоне 140-220 ГГц с КСВН менее 1,2.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной магистерской работы была достигнута цель работы и получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современных исследований в области согласованных нагрузок для диапазона сверхвысоких частот.
2. Проведен анализ различных моделей эффективной среды для реализации СВЧ-нагрузок, содержащих диэлектрические слои с нестандартным значением диэлектрической проницаемости.
3. Разработана математическая модель слоистой согласованной СВЧ-нагрузки с использованием диэлектрических и резистивных слоев
4. Создана малогабаритная волноводная согласованная нагрузка с использованием диэлектрических и резистивных слоев размером 0,82мм.
5. Экспериментально получено значение КСВН  $<1,3$  в широком диапазоне частот 140—220 ГГц.
6. Результаты эксперимента показывают, что предложенная нами модель построена правильно, с её помощью могут быть созданы достаточно широкополосные согласованные нагрузки в диапазоне 140-220 ГГц с КСВН порядка 1,2, толщина рабочей области которых составляет 0.82 мм

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сазонов, Д.М., Гридин, А.Н., Мишустин, Б.А., Устройства СВЧ // М: Высшая школа, 1981.
2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., М.Ю. Куликов, Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для Измерения электрофизических свойств жидких диэлектриков: Учеб. Пособие для студентов факультета nano- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» –Саратов, 2014. –35 с.: ил. Электронное издание.
3. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure// Phys. Rev. Lett. 1991. Vol.67
4. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, №6. С. 694—701.
5. Temelkuran B., Ozbay E., Kavanaugh J. P., Tuttle G., and Ho K. M. Resonant cavity enhanced detectors embedded in photonic crystals// Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72, issue 19. pp. 2376-2378.
6. Радиоэлектроника. Устройства СВЧ [Электронный ресурс] / tarefer.ru [Электронный ресурс] – URL: <http://cor.edu.27.ru/dlrstore/1876f38d-fa4c-17f3-e5d3-32bdb5a0a216/1001255A.htm> (дата обращения: 19.04.2017). Загл.
7. Баранов, С.А., Наймушин, М.П., Исследование полоснопропускающих волноводных фильтров СВЧ и методов узкополосного согласования в волноводных трактах // Свердловск, 1987.
8. Малков, Н.А., Устройства сверхвысоких частот: учеб. пособие // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 92 с.
9. Кравченко, Н.И., Неварикаша, Ю.И., Меры отражения миллиметровых волн // Харьков: Институт метрологии, 2014.
10. Веселов, Г.И., Раевский, С.Б., Слоистые металлодиэлектрические волноводы // М.: Радио и связь, 1988. — 248 с.3.

11. Патент 2030138 Касимов Р. М. (AZ) // Поглотитель электромагнитного излучения, 1995
12. Усанов, Д.А., Скрипаль, А.В. и др., Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе слоистых металлодиэлектрических структур / Физика и технические приложения волновых процессов, с. 222-223.
13. Усанов, Д.А., Скрипаль, А.В., Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ // Изд. Сарат. ун-та, 1999, 376 с.
14. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.А., Боголюбов А.С. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 112–117.
15. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. // Изв. вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 27–35.
16. Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Kalinina N.V. // Proc. of 36rd European Microwave Conf. Manchester, UK, 2006. P. 921–924.
17. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. // Изв. вузов..
18. Эффективная диэлектрическая проницаемость в печатном монтаже – часть 1 [Электронный ресурс] / Все про печатные платы [Электронный ресурс] – URL: [http://pplaty.ru/news/ehffektivnaja\\_dielektricheskaja\\_pronicaemost\\_v\\_pечатnom\\_montazhe\\_chast\\_1/2014-01-19-233](http://pplaty.ru/news/ehffektivnaja_dielektricheskaja_pronicaemost_v_pечатnom_montazhe_chast_1/2014-01-19-233) (дата обращения: 19.04.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
19. Головань Л.А., В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров, "Оптические свойства нанокompозитов на основе пористых систем" // УФН, 2007, Т.177, № 6, С. 619-622.
20. Венгер, Е. Ф., Гончаренко А. В., Дмитрук М. Л. Оптика малих частинок і дисперсних середовищ / Е. Ф. Венгер, А. В. Гончаренко, М. Л. Дмитрук. Київ: Наукова думка, 1999. 432 с.
21. Ландау, Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Физматлит, 1982. 621 с.