

На правах рукописи

Арсеничев Сергей Павлович

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНКАХ  
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ВОЛНОВОДЕ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2017

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники Физико-технического института (структурное подразделение) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского».

Научный руководитель: **Таран Евгений Павлович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Физико-технический институт ФГАОУ ВО  
«Крымский федеральный университет имени В.И.  
Вернадского».

Официальные  
оппоненты: **Копытов Геннадий Филиппович**,  
доктор физико-математических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
университет», заведующий кафедрой радиофизики  
и нанотехнологий физико-технического  
факультета.

**Шокова Юлия Александровна**,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет», доцент кафедры  
радиоэлектроники.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Ростовский-на-Дону научно-  
исследовательский институт радиосвязи» (ФГУП  
«РНИИРС»)

Защита состоится «23» июня 2017 г. в 14-00 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном федеральном университете  
по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, Южный федеральный  
университет, физический факультет, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке  
им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу:  
г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 21 Ж и на сайте:  
<http://hub.sfedu.ru/diss/announcements/council/20/>

Автореферат разослан «        » апреля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.208.10  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Г.Ф. Заргано

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В настоящее время большое внимание уделяется работоспособности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при воздействии электромагнитных полей (ЭМП), как специального, так и природного происхождения. В современной аппаратуре обработка сигналов сосредоточена в интегральных микросхемах (ИМС), поэтому вопросы её надежного функционирования сводятся к исследованию физических явлений в ИМС при воздействии ЭМП.

Основой современной полупроводниковой электроники являются пленочные нанотехнологии. Так на сегодняшний день ведущие фирмы по производству ИМС смогли наладить производство с применением новых 14 и 16 нм FinFET-техпроцессов.

С учетом существующих тенденций развития полупроводниковой электроники естественными являются исследования стойкости нанометровых пленок к воздействию ЭМП. Физические явления в нанометровых проводящих пленках (толщиной менее 50 нм) при воздействии таких полей практически не исследованы экспериментально, отсутствует теория, описывающая процессы преобразования энергии электромагнитных и электрических полей в энергии, разрушающие эти пленки.

Тонкие проводящие пленки являются объектом внимания не только в полупроводниковой электронике, но и в области защиты радиотехнических устройств от воздействия внешних СВЧ-излучений. Современные методы диагностики (электронные, туннельные, атомные микроскопы и т.д.) дают возможность провести детальные исследования свойств проводящих пленок, однако, и до настоящего времени отсутствует теория, описывающая физические процессы в нанометровых проводящих пленках и процессы преобразования энергии при воздействии ЭМП.

Таким образом, исследования физических явлений в нанометровых проводящих пленках при воздействии ЭМП являются актуальными и

представляют интерес для специалистов, работающих в области полупроводниковой электроники и электронной аппаратуры.

**Целью диссертационной работы** являются теоретические и экспериментальные исследования физических явлений в тонких проводящих пленках при воздействии ЭМП.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- экспериментальные исследования по определению влияния материала и толщины пленок на коэффициенты отражения, прохождения и поглощения металлодиэлектрических структур (МДС) в волноводе;
- исследования влияния местоположения МДС в волноводе на дифракционные характеристики, в частности, на резонансные явления системы «МДС-волновод»;
- исследования влияния параметров проводящих пленок и МДС на аномально высокое поглощение ЭМП при толщине пленок менее 15 нм (пространственный резонанс);
- исследования свойств пространственного резонанса в диапазоне частот от 3,0 до 25,5 ГГц;
- численный расчет интегральных дифракционных характеристик МДС в волноводе с использованием метода минимальных автономных блоков (МАОБ) и сравнение с экспериментальными данными;
- использование численных расчетов распределения плотностей токов в проводящих пленках МДС в волноводе с учетом 60 типов волн в ближней зоне;
- исследования особенностей развития необратимых процессов и пробоя в нанометровых проводящих пленках при воздействии мощного СВЧ-излучения, постоянного и низкочастотного переменного напряжений;
- физическое обоснование специфики пробоя тонких проводящих пленок МДС при воздействии ЭМП исходя из распределения плотности тока в проводящих пленках.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется поставленными задачами и впервые полученными результатами:

1) Экспериментальными методами исследовано явление сильного поглощения энергии электромагнитных волн нанометровыми проводящими пленками из меди, алюминия, никрома и титана в диапазоне частот от 3,0 до 25,5 ГГц.

2) Определены значения толщин для нанометровых проводящих пленок, при которых происходит преобразование энергии ЭМП в акустическую энергию в диапазоне частот от 3,0 до 25,5 ГГц.

3) Обоснована возможность использования нанометровых проводящих пленок в качестве диапазонных поглощающих покрытий.

4) Исследованы влияния поляризационного фактора, способа напыления и материала пленок на пространственный резонанс.

5) Экспериментально исследованы резонансные свойства системы «МДС–волновод». Полученные данные совпадают с расчетами численной модели.

6) Проведены расчеты распределения плотности тока в металлизации МДС, которые позволяют объяснить динамику развития необратимых процессов и пробоя в пленках перпендикулярно вектору напряженности электрической компоненты ЭМП.

7) Проведены исследования физических процессов пробоя нанометровых проводящих пленок при воздействии мощного СВЧ-излучения, постоянного и низкочастотного переменного напряжений, на основании которых установлен характер разрушения пленок и его зависимость от параметров МДС и воздействующего фактора.

**Практическая значимость** результатов работы, полученных в диссертации, заключается в определении значения толщин нанометровых проводящих пленок с преобразованием энергии ЭМП в акустическую, что представляет интерес для разработчиков ИМС, приборов и модулей СВЧ, другой электронной аппаратуры. Предложено использовать нанометровые проводящие пленки в качестве поглощающего покрытия электронной

аппаратуры от воздействия внешних СВЧ-излучений. Результаты исследований позволяют дать рекомендации по созданию диапазонных поглощающих покрытий с проводящими пленками нанометровых толщин. Показана возможность использования МДС, расположенной вблизи узкой стенки волновода, в качестве фильтров и аттенуаторов. Проведенные исследования пробоя в проводящих пленках представляют интерес для специалистов, занимающихся изучением физических процессов в металлизации микросхем и других электронных приборов при воздействии электромагнитных полей, при работе приборов в напряженных токовых и тепловых режимах, при коммутациях напряжений.

### **Методология и методы исследований.**

Основными методами исследований являлись:

- экспериментальные исследования дифракционных характеристик МДС в волноводном тракте панорамными измерителями;
- экспериментальные исследования необратимых процессов и пробоев тонких проводящих пленок МДС мощными ЭМП, постоянным и переменным низкочастотным напряжениями;
- экспериментальные исследования структур поверхностей подложек и подложек с пленками методами атомно-силовой микроскопии;
- компьютерное моделирование с использованием метода минимальных автономных блоков (МАОБ) распределения плотностей тока в проводящих пленках МДС;
- численное моделирование интегральных дифракционных характеристик МДС в волноводе в дальней зоне методом МАОБ;
- сопоставление и анализ расчетных дифракционных характеристик с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Теоретическая база включает законы распространения и поглощения электромагнитных волн, уравнения электродинамики, законы сохранения, апробированные численные методы решения волноводных задач.

Экспериментальная база включает стандартную измерительную аппаратуру, сканирующий зондовый микроскоп атомно-силовой микроскопии, специальную установку по воздействию мощных ЭМП на МДС, разработанную автором лично.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- результаты и анализ экспериментальных исследований дифракционных характеристик МДС с тонкими проводящими пленками в волноводном тракте;
- результаты исследований явления аномально высокого поглощения энергии электромагнитных волн нанометровыми проводящими пленками из меди, алюминия, никрома и титана;
- результаты исследований влияния толщины и других характеристик пленок и МДС на преобразование энергии ЭМП в акустическую энергию;
- обоснование возможности создания диапазонных поглощающих покрытий с проводящими пленками нанометровых толщин;
- результаты экспериментальных исследований по развитию необратимых процессов и пробую тонких проводящих пленок МДС мощными ЭМП в волноводе, постоянными и низкочастотными переменными напряжениями;
- полученные численными методами распределения плотностей тока в проводящих пленках МДС, объясняющие специфику пробоя при воздействии ЭМП и физическую модель пробоя в тонких проводящих пленках МДС.

**Личный вклад автора.**

В процессе выполнения работы автором разработаны измерительные схемы для проведения экспериментальных исследований, изготовлена установка по воздействию мощных ЭМП на МДС. Получены экспериментальные данные по дифракционным характеристикам МДС с проводящими пленками из меди, алюминия, никрома и титана в волноводе с использованием панорамных измерителей. Автором проведены исследования по пробую нанометровых проводящих пленок мощными ЭМП, постоянным и низкочастотным переменным напряжениями. С использованием численной

компьютерной модели, автором были получены интегральные дифракционные характеристики МДС в волноводе и распределения плотности токов в проводящих пленках.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием стандартной измерительной аппаратуры. Математические модели и расчеты, использованные в ходе работы, базируются на апробированных математических и численных методах. Ряд численных результатов, полученных в настоящей работе, хорошо согласуются с данными, полученными экспериментально.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы обсуждались и докладывались на:

- 21 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2011 г. (1 доклад);
- 22 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2012 г. (2 доклада);
- 23 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2013 г. (2 доклада);
- 24 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2014 г. (1 доклад);
- 25 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2015 г. (2 доклада);
- 26 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2016 г. (1 доклад).

### **Публикации.**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе в журналах из перечня ВАК – 2 статьи, в журналах из перечня ВАК Украины (до 01 января 2015 г.) – 3 статьи, в наукометрической базе Scopus – 1 статья и 5 материалов конференций, 4 доклада на международных конференциях. Получены 4 патента Российской Федерации. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### Структура диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 129 страниц, 92 рисунка, 1 таблицу и список использованной литературы из 106 наименований.

### Основное содержание работы

Во *введении* приводится обоснование актуальности диссертационной работы, показана степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных в работе результатов, приведено количество печатных работ, в которых отражены основные результаты диссертации.

*Первая глава* посвящена обоснованию использования волноводных методов исследования физических процессов в проводящих пленках металлодиэлектрических структур. Основными приборами, используемыми в работе для экспериментальных исследований, являлись панорамные измерители коэффициента стоячей волны ( $K_{СВ}$ ) и ослабления ( $A$ ). С их помощью решается волноводная дифракционная задача в приближении основной волны. Из баланса мощностей  $P_{ПАД} = P_{ОТР} + P_{ПРОШ} + P_{ПОГЛ}$ , или  $P_{ОТР}/P_{ПАД} + P_{ПРОШ}/P_{ПАД} + P_{ПОГЛ}/P_{ПАД} = 1$ , можно выразить относительные мощности  $P_{ОТР}/P_{ПАД}$  – отраженной,  $P_{ПРОШ}/P_{ПАД}$  – прошедшей и  $P_{ПОГЛ}/P_{ПАД}$  – поглощенной волн через  $K_{СВ}$  и  $A$ :

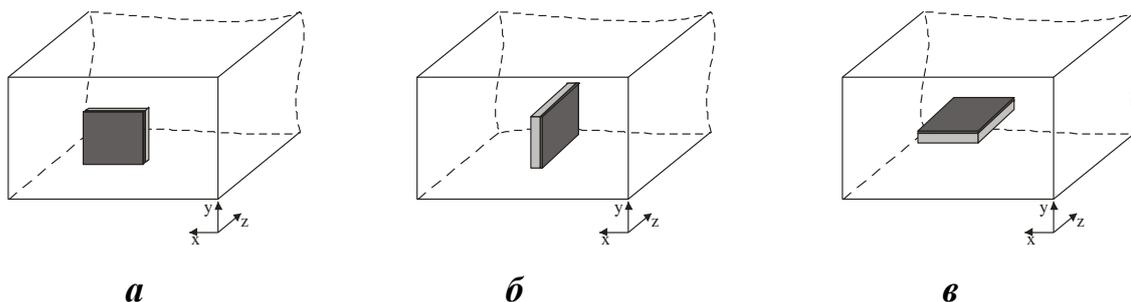
$$\frac{P_{ОТР}}{P_{ПАД}} = \frac{(K_{СВ} - 1)^2}{(K_{СВ} + 1)^2} ;$$

$$\frac{P_{ПРОШ}}{P_{ПАД}} = 10^{0,1A} ;$$

$$\frac{P_{ПОГЛ}}{P_{ПАД}} = \left[ 1 - 10^{0,1A} - \frac{(K_{СВ} - 1)^2}{(K_{СВ} + 1)^2} \right].$$

Величины  $R = P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}}$ ,  $T = P_{\text{прош}}/P_{\text{пад}}$  и  $L = P_{\text{погл}}/P_{\text{пад}}$  представляют собой оптические коэффициенты, характеризующие дифракционные свойства объекта в волноводе в соответствующем приближении.

В работе выделены основные характерные ориентации МДС в волноводном тракте (рисунок 1) с учетом поляризационного фактора (ориентации МДС по отношению к вектору электрической компоненты поля  $\vec{E}$  волны  $H_{10}$ ), рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований, рассмотрены основные характеристики МДС.



**а** **б** **в**  
Рисунок 1 – Характерные ориентации МДС в волноводном тракте

В разделе 1.3 приводятся основные положения авторского пакета программ (автор Таран Е.П.) с использованием метода минимальных автономных блоков (МАБ). Данный метод решения волнового уравнения можно отнести к быстрым для расчета интегральных дифракционных характеристик неоднородностей в волноводе, таких как  $K_{\text{св}}$  и ослабление. Отличительной особенностью пакета являются программные фильтры, позволяющие выделять типы волн в составе суммарного поля.

Во *второй главе* приведены результаты исследования дифракции в волноводе на МДС с тонкими проводящими пленками. Были исследованы зависимости дифракционных характеристик с МДС в волноводе от частоты ЭМП, от материала пленки и способа её напыления, от материала подложки и местоположения МДС в волноводе.

Измерения  $K_{\text{св}}$  и ослабления производились по стандартным методикам в частотных диапазонах панорамных измерителей Р2-56, Р2-61 и Р2-66. При проведении экспериментальных исследований было задействовано 157 МДС с пленками из меди, алюминия и никрома толщиной от 5 нм до 1 мкм, с

площадью металлизации  $22 \times 22$ ,  $18 \times 18$  мм и меньше, полученных магнетронным способом напыления. Также в исследованиях использовались 114 МДС с пленками из меди, алюминия и титана толщиной от 5 до 160 нм, с площадью металлизации  $18 \times 18$ ,  $15 \times 15$  мм и меньше, полученных ионным способом напыления. В качестве подложек использовались боросиликатное стекло и ситалл с плазменной обработкой (шлифовкой) перед напылением.

На рисунке 2,а приведены зависимости  $R = P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}}(f)$  для пленок из алюминия различной толщины в диапазоне частот панорамного измерителя  $K_{\text{СВ}}$  и ослабления P2-56.

Как видно из рисунка 2,а значения величин, характеризующих отраженную волну, при стремлении толщины пленки  $d \rightarrow 0$ , естественно:  $K_{\text{СВ}} \rightarrow 1$ ,  $\Gamma \rightarrow 0$  (коэффициент отражения по полю) и  $R \rightarrow 0$ . Было установлено, что для пленок толщиной более 50 нм, величина толщины пленки и способ её напыления мало сказываются на оптических коэффициентах. На рисунке 3 приведены зависимости  $L = P_{\text{погл}}/P_{\text{пад}}(f)$  для тонких пленок из алюминия различной толщины.

Из зависимостей, приведенных на рисунке 2,б следует, что коэффициент  $L$ , характеризующий поглощающие свойства нанометровой пленки из алюминия с  $d=10$  нм в несколько раз превышает значения  $L$  для пленок толщиной  $d=50$  нм и более.

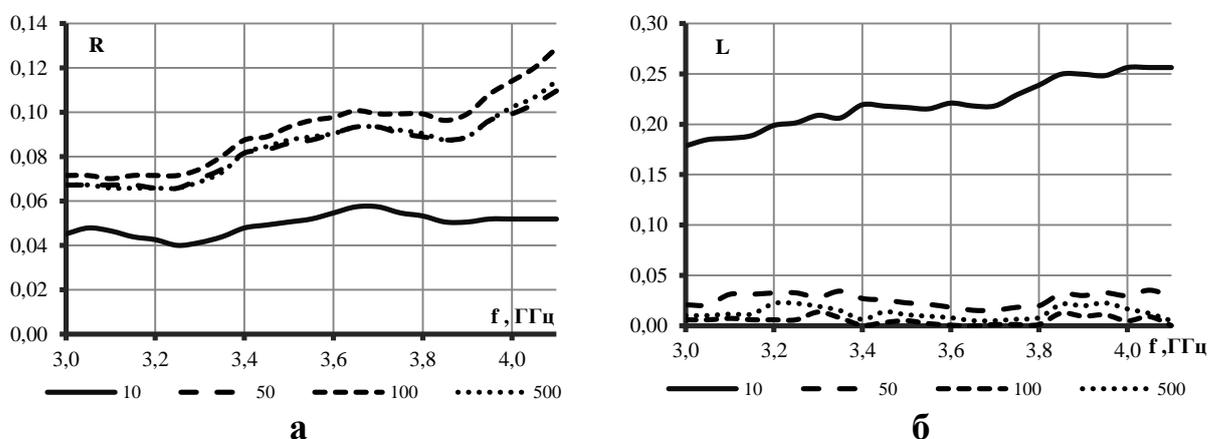


Рисунок 2 - Зависимость  $R(f)$  и  $L(f)$  для пленок различной толщины (Al,  $S_{\text{МДС}}=18 \times 18$  мм,  $d$ , нм): а -  $R = P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}}(f)$ ; б -  $L = P_{\text{погл}}/P_{\text{пад}}(f)$

В процессе экспериментов было установлено, что при расположении МДС (ориентация а, рисунок 1) вблизи узкой стенки волновода проявляются резонансные свойства МДС в волноводе. На рисунках 3,а и б приведены зависимости  $K_{CB}=K_{CB}(f)$  и  $A=A(f)$  для МДС в волноводе.

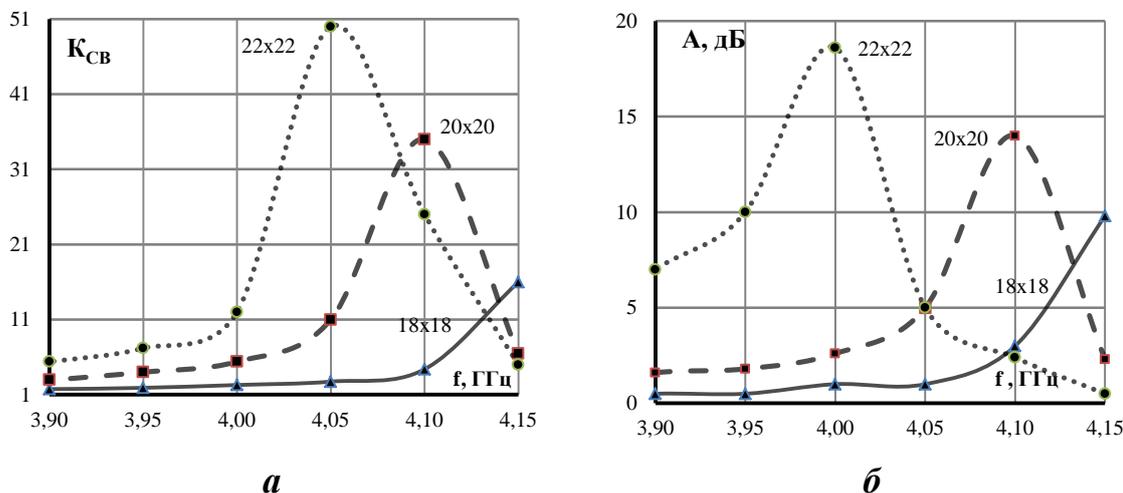


Рисунок 3 – Зависимости  $K_{CB}$  и ослабления для МДС разных размеров, расположенных вблизи узкой стенки волновода:  
 а -  $K_{CB}=K_{CB}(f)$ ; б -  $A=A(f)$

Резонанс на МДС в волноводе вблизи узкой стенки волновода обусловлен емкостью МДС относительно широкой и индуктивностью относительно узкой стенок волновода. Для волновода сечением  $34 \times 72$  мм максимальное значение добротности имеет место при МДС с площадями проводящих поверхностей от  $18 \times 18$  мм до  $22 \times 22$  мм и расстояниях от узкой стенки от 0 до 5 мм. При толщине проводящей пленки менее 50 нм резонанс в системе «МДС – волновод» практически отсутствует. Сравнительный анализ показал, что расхождения между экспериментальными и расчетными данными не превосходят 10%. МДС с проводящей пленкой можно использовать для различных СВЧ устройств, например, в качестве аттенюаторов, фильтров и т.д.

Численное решение задачи дифракции ЭМП на МДС в ближней зоне с использованием метода МАБ и учетом 60 типов волн в ближней зоне МДС позволило получить распределение плотности тока на поверхности

проводящей пленки. На рисунке 4 представлены характерные распределения плотности тока в зависимости от ширины медной пленки.

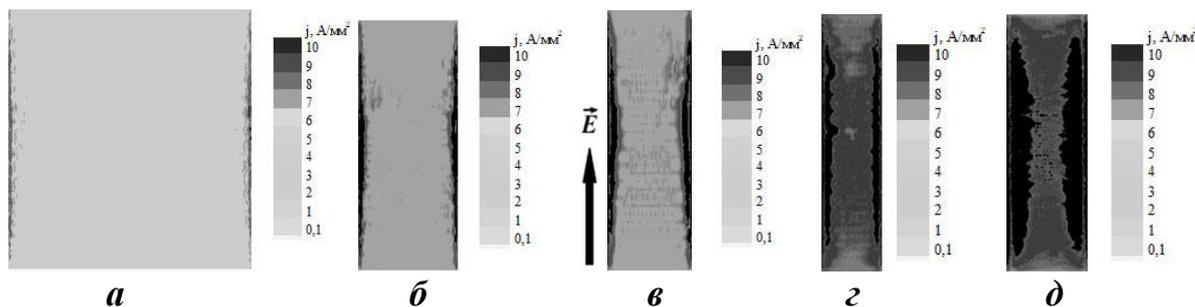


Рисунок 4 - Распределение плотности тока на поверхности проводящей медной пленки в зависимости от ее размеров в поперечном сечении:  
 а - 10x10 мм; б - 1x10 мм; в - 0,5x10 мм; г - 0,1x10 мм; д - 0,05x10 мм

Анализ полученных распределений плотностей токов показывает, что в плёнках с конечной проводимостью в ЭМП электроны распределяются таким образом, что ток сосредоточен на вертикальных краях пленки. Такое распределение тока обусловлено действием силы Лоренца токов на ребрах пленки на электроны, расположенные ближе к центру - сила Лоренца направлена от центра пленки к боковым ребрам. При больших значениях воздействующих ЭМП такое распределение токов приводит к пробую посередине пленки перпендикулярно вектору электрического поля.

**Третья глава** посвящена особенностям преобразования энергии ЭМП в нанометровых пленках МДС. В этой главе рассмотрены структуры поверхностей нанометровых проводящих пленок МДС, явление пространственного резонанса в пленках, исследовано влияние способа напыления пленки на пространственный резонанс, изучена зависимость пространственного резонанса от частоты ЭМП. Кроме того в данной главе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия на тонкие пленки МДС мощных ЭМП, а также постоянного и переменного низкочастотного напряжений.

Исследование нанометровых пленок МДС, проведенные с помощью атомно-силовой микроскопии, дают возможность наглядно представить структуру поверхности подложки и пленки на подложке (рисунок 5).

Анализ рельефов поверхности подложек позволяет проследить принципы “наследования” профилей поверхности слоев металла. Поверхности и профилограммы подложек из ситалла и боросиликатного стекла практически идентичны.

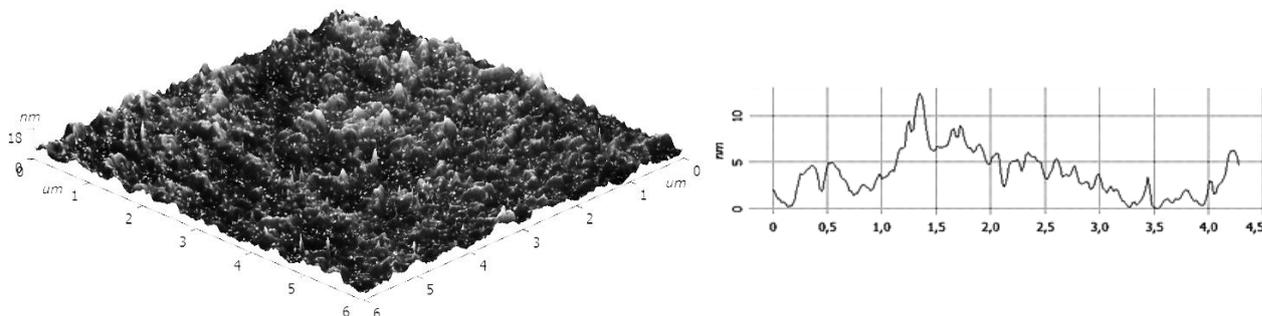


Рисунок 5 – Структура поверхности пленки из алюминия и профилограмма по оси «х», посредине участка пленки ( $S = 6 \times 6$  мкм,  $d = 5$  нм)

В работе подробно исследовано явление резонансного рассеяния мощности падающей волны нанометровыми пленками, зависимости аномально высокого поглощения от толщины и материала пленки, а также от частоты ЭМП. В работе было установлено, что в наибольшей степени пространственный резонанс выражен для МДС с нанометровыми пленками из алюминия. На рисунке 6,а приведена типичная резонансная зависимость ослабления от толщины пленки алюминия ( $A=A(d)$ ), а на рисунке 6,б – зависимости относительной поглощенной мощности от частоты ( $L = L(f)$ ) для пленок из алюминия различной толщины.

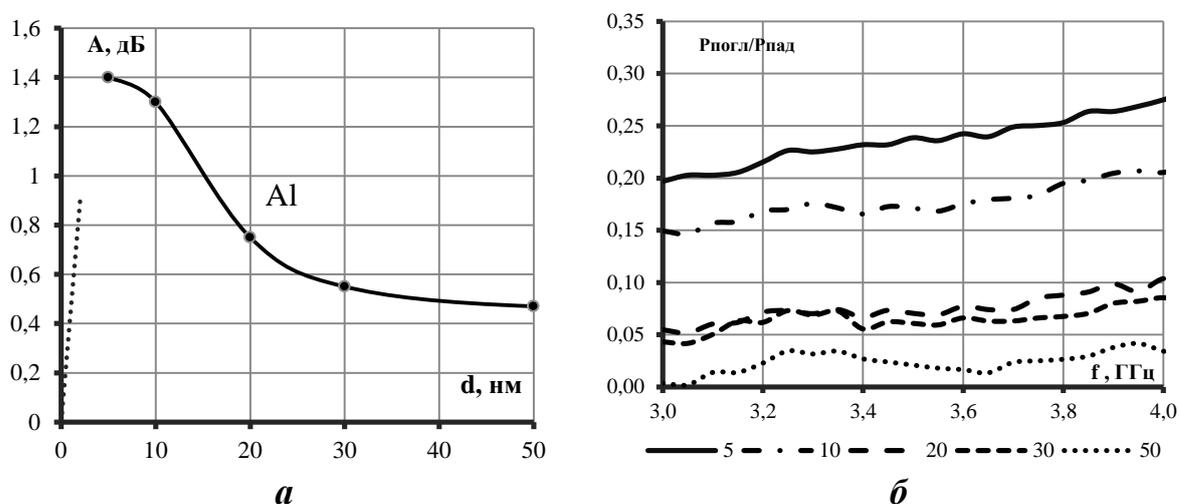


Рисунок 6 – Зависимости ослабления и  $L$  для пленок из алюминия ( $S_{\text{МДС}} = 18 \times 18$  мм):  
**а** -  $A = A(d)$ ,  $f = 3.5$  ГГц; **б** -  $L = R_{\text{ПОГЛ}}/R_{\text{ПАД}}(f)$ ,  $d$  от 5 до 50 нм

Процесс преобразования энергии ЭМП в акустическую энергию иллюстрируют зависимости удельного коэффициента поглощения  $Q_{уд} = Q_{уд}(d)$  (рисунок 7), где  $Q_{уд} = L/V$ ,  $L$  – коэффициент поглощения МДС мощности падающей  $H_{10}$  волны,  $V$  – объем пленки.

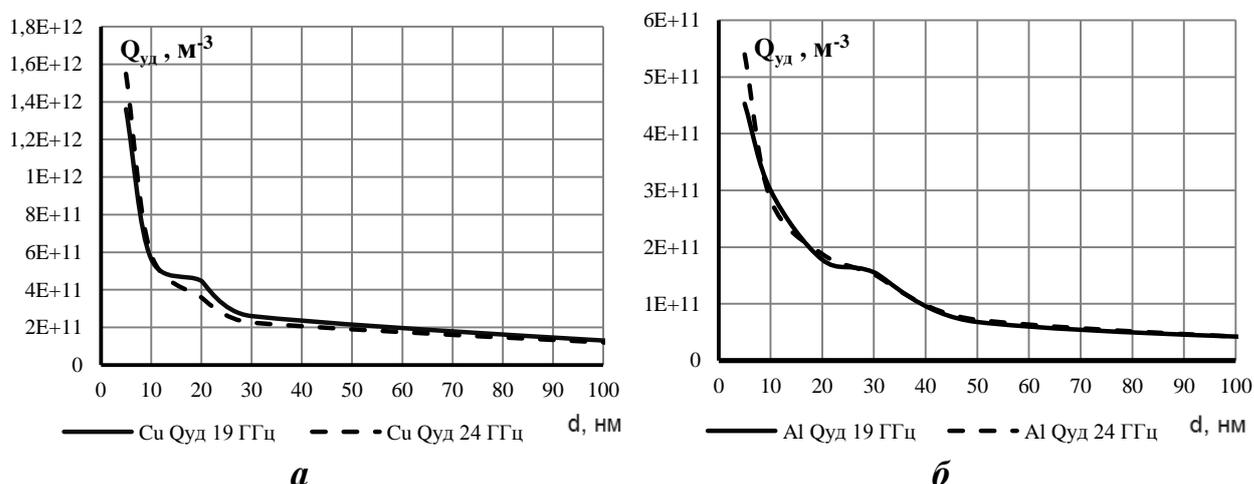


Рисунок 7 - Зависимость  $Q_{уд} = Q_{уд}(d)$ :  
а - для медной пленки; б - для пленки из алюминия

В достаточной мере преобразование энергий проявляется, начиная с толщин пленок  $d < 20$  нм, достигая максимума при  $2 \text{ нм} < d < 10$  нм.

Следует отметить, что в соответствие с данными, приведенными рядом авторов, удельное сопротивление пленок при толщине в 10 нм возрастает на порядок, а при толщине в 5 нм увеличивается на 2 порядка. Это приводит на частотах в диапазоне от 3 до 25,5 ГГц к преобразованию энергии ЭМП в тепловую энергию за счет скин-эффекта не более 1...2%.

Пространственный резонанс (аномально высокое поглощение) практически не зависит от частоты и определяется только подложкой, толщиной проводящей пленки, материалом и способом нанесения пленок. Это свойство пространственного резонанса проводящих пленок привлекательно для практических приложений, а именно, для создания диапазонных поглощающих покрытий.

При воздействии мощных электромагнитных полей происходит пробой пленок. На рисунке 8 приведены фотографии типичных разрядов в пленках.

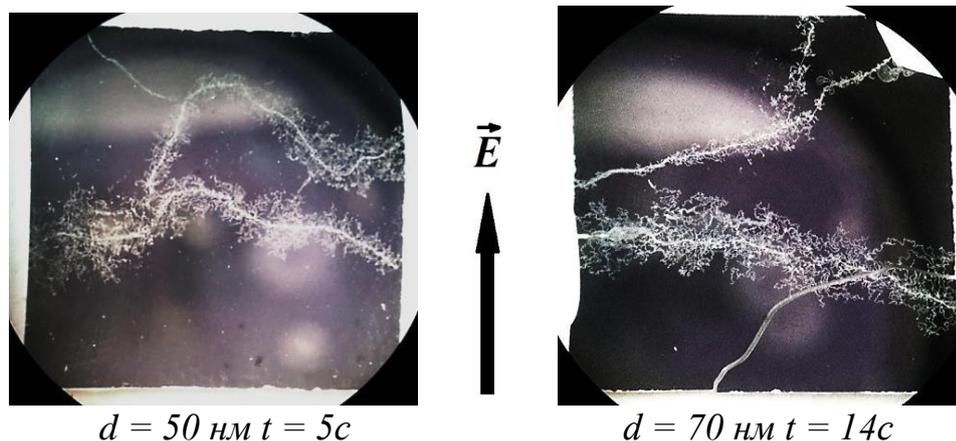


Рисунок 8 – Фотографии пробоев МДС с пленками из алюминия при воздействии мощных ЭМП

Эти процессы имеют место как в СВЧ диапазоне, так и при протекании по пленкам постоянного либо низкочастотного переменного тока.

Пробой в пленках развивается, как правило, по пути наибольшего градиента плотности тока, т.е. посередине МДС перпендикулярно вектору напряженности электрической компоненты поля.

Анализ участков нанометровых пленок показал, что из расплавленной пленки формируются более крупные металлические фрагменты (материал пленки как бы скатывается в капельки) и появляются участки поверхности МДС с диэлектрическими свойствами (рисунок 9).

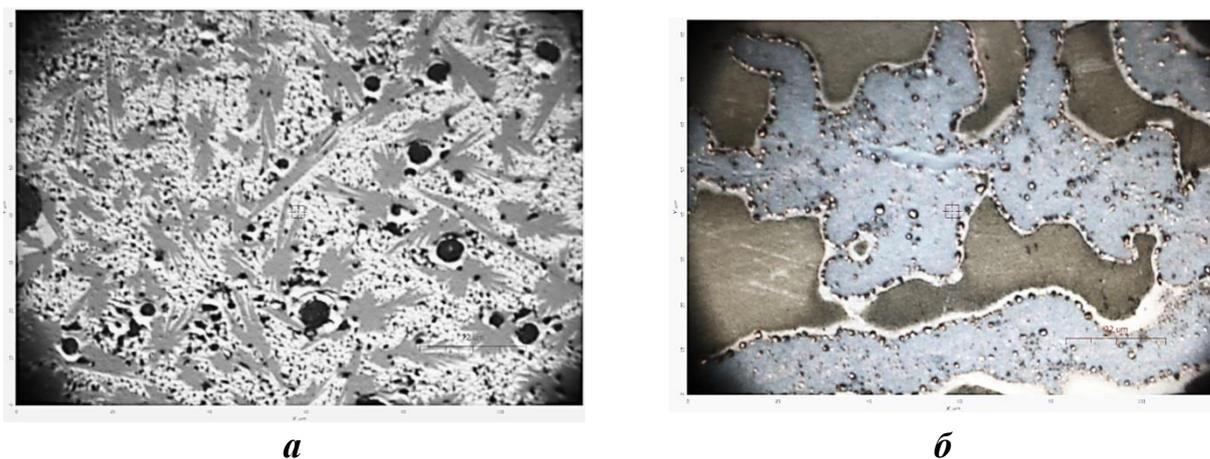


Рисунок 9 – Снимки участков поврежденных пленок:  
а - из алюминия  $d = 50$  нм; б - из меди  $d = 30$  нм

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в процессе работы над диссертацией.

## Основные результаты работы и выводы

Основными результатами диссертационной работы явились экспериментальные и теоретические исследования физических явлений в нанометровых проводящих пленках металлодиэлектрических структур при воздействии ЭМП.

1. Впервые было установлено явление сильного поглощения энергии электромагнитных волн нанометровыми проводящими пленками из алюминия, меди, никрома и титана в диапазоне частот от 3 до 25,5 ГГц.

2. Установлено, что в процессе преобразования энергии ЭМП в акустическую энергию участвует только электрическая компонента воздействующего поля, параллельная поверхности пленки.

3. Определены значения толщин нанометровых проводящих пленок из алюминия, меди, никрома и титана, при которых реализуется пространственный резонанс (сильное поглощения энергии), что представляет интерес, как для разработчиков интегральных микросхем, так и для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры.

4. Установлено, что в проводящих пленках с толщинами от 2 до 15 нм при пространственном резонансе поглощается 20-25% мощности падающей волны при поверхности пленки в 0,1 площади поперечного сечения волновода.

5. Впервые обоснована возможность использования нанометровых проводящих пленок в качестве диапазонных поглощающих покрытий, что является актуальным при практических использованиях экранирования объектов от СВЧ-излучений.

6. На разработанной установке проведены экспериментальные исследования стойкости тонких проводящих пленок к мощным ЭМП и установлен характер их разрушения: пробой в проводящих пленках МДС происходит посередине пленки в направлении, перпендикулярном вектору электрической компоненты поля. Время разрушения пленок определяется, в

первую очередь, толщиной пленок: чем тоньше пленки, тем меньше времени или мощности ЭМП необходимо для пробоя пленки. Проведенные исследования имеют практическую значимость при создании интегральных микросхем, СВЧ приборов и модулей, имеющих в своих конструкциях тонкие проводящие пленки.

7. При воздействии на МДС с тонкими проводящими пленками постоянного и переменного низкочастотного напряжений было установлено, что мощность, выделяемая в этих пленках, растет с увеличением толщины пленки за счет омических потерь, т.е. отсутствует резонансное поглощение мощности.

8. Компьютерным моделированием найдено распределение плотностей токов в проводящих пленках МДС, дано физическое обоснование распределения тока и характера пробоя в пленках по направлению, перпендикулярному вектору электрической компоненты воздействующего ЭМП.

9. Установлено, что при расположении МДС с пленками толщиной более 50 нм вблизи узкой стенки волновода имеют место резонансные явления в системе «МДС – волновод», что можно использовать для создания таких устройств СВЧ-техники, как аттенюаторы, фильтры и т.д.

10. Проведенные экспериментальные исследования являются исходным материалом для создания теории пространственного резонанса в нанометровых проводящих пленках МДС и теории пробоя в тонких проводящих пленках МДС.

**Список опубликованных работ по теме диссертации**

**1.** Слипченко Н.И. Дифракция на металлодиэлектрических структурах в волноводе / Н.И. Слипченко, Е.П. Таран, В.В. Старостенко, Д.А. Полетаев, **С.П. Арсеничев**, М.В. Глумова // Радиотехника. – 2012. – № 168. – С. 113 – 119. (Харьков), ВАК Украины.

**2. Арсеничев С.П.** Резонансные свойства металлодиэлектрической пластины в волноводе / С.П. Арсеничев, Д.А. Полетаев, Н.И. Слипченко, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, А.А. Шадрин // Радиотехника, – 2012. – Вып. 70. – С.149-153. (Харьков), ВАК Украины.

**3. Арсеничев С.П.** Экспериментальное исследование дифракционных свойств тонких проводящих пленок в волноводе / С.П. Арсеничев, Г.Н. Бендеберя, Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, Н.И. Слипченко, В.В. Старостенко, Е.П. Таран // ISSN 0485-8972 Радиотехника. – 2013. – Вып. – С.175. ВАК Украины.

**4. S.P. Arsenichev, G.N. Bendeberya, Ye.V. Grigoryev, S.A. Zuyev, N.I. Slipchenko, V.V. Starostenko, and Ye.P. Taran.** Experimental research of diffraction properties of thin conducting films in a waveguide // Telecommunications and radioengineering. – 2014. – Vol. 73, N 14. – P.1241 – 1250. (База Scopus).

**5. Арсеничев С.П.** Механизмы воздействия электромагнитных полей на проводящие пленочные структуры микросхем [Электронный ресурс] / С.П. Арсеничев, Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 5. – Режим доступа : <http://jre.cplire.ru/jre/may14/4/text.html> – Загл. с экрана. ВАК России.

**6. Арсеничев С.П.** Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлодиэлектрических структур в прямоугольном волноводе // С.П. Арсеничев, Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, И.Ш. Фитаев. - Электромагнитные волны и электронные системы, - 2017 г., - т. 22, № 2. - С.48-53. ВАК России.

### Доклады, труды конференций

**7. Арсеничев С.П.** Электротепловые процессы в проводящих пленках металлодиэлектрических структур при воздействии мощных электромагнитных полей» / С.П. Арсеничев, М.В. Глумова, Е.В. Григорьев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран // 21-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Т.2. – 2011. – С.863-864. (База Scopus).

**8. Арсеничев С.П.** Распределение токов при дифракции на металлодиэлектрических структурах в волноводе / С.П. Арсеничев, Л.Н. Ахрамович, М.В. Глумова, Д.А. Полетаев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран // Материалы 22-й международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2012). – Севастополь, 10 – 14 сентября 2012 г. – С. 518 – 519. (База Scopus).

**9. Арсеничев С.П.** Волноводный фильтр на металлодиэлектрической пластине / С.П. Арсеничев, Л.Н. Ахрамович, М.В. Глумова, Е.В. Григорьев, Д.А. Полетаев, Е.П. Таран // Материалы 22-й международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2012). – Севастополь, 10 – 14 сентября 2012 г. – С. 541 – 542.

**10. Таран Е.П.** Модель тепловых процессов в пространственно-неоднородных пленочных структурах при воздействии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона / Е. П. Таран, Н. И. Слипченко, В. В. Старостенко, **С. П. Арсеничев** // 23-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь. – 2013. - С.920-921. (База Scopus).

**11. Таран Е.П.** Модель дифракции электромагнитных полей на пространственно-неоднородных пленочных структурах при воздействии электромагнитных полей СВЧ-диапазона / Е. П. Таран, Н. И. Слипченко, В. В. Старостенко, **С.П. Арсеничев** // Материалы 23-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. Т.2. - С.916-917. (База Scopus).

**12. Арсеничев С.П.** Особенности деградационных процессов в нанометровых пленочных проводящих структурах при воздействии мощных электромагнитных полей / С.П. Арсеничев, Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, В. В. Старостенко, Е.П. Таран // 24я Международная Крымская конференция. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, сентябрь 2014г. с.1087-1088 . (База Scopus).

**13. Арсеничев С.П.,** Григорьев Е.В., Зуев С.А., Марушак Б.А., Старостенко В.В., Таран Е.П. «Преобразование энергии электрического поля в энергию акустических волн в нанометровых проводящих пленках» 25я Международная Крымская конференция. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, сентябрь 2015г. С.844-845.

**14. Старостенко В.В.** Способ и устройство для визуализации электротепловых процессов в металлодиэлектрической структуре / В.В. Старостенко, Е.П. Таран, Д.А. Полетаев, **С.П. Арсеничев** // Материалы 25 -й международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2015). – Севастополь, 6 – 12 сентября 2015 г. – С.838 – 839. ISBN 978-1-4673-9414-7.

**15. Арсеничев С.П.** Влияние технологических факторов на характеристики нанометровых проводящих пленок / С.П. Арсеничев, М.В. Глумова, Е.В. Григорьев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, И.Ш. Фитаев // Материалы 26-й международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2016). – Севастополь, 2016 г. – С. 1786 – 1791.

### **Патенты**

1. Пат. RU 150124 Российская Федерация, МПК H04N1/00, G03B41/00. Устройство для визуализации электротепловых процессов в пленочных металлодиэлектрических структурах / Полетаев Д.А., Шадрин А.А., Таран Е.П., **Арсеничев С.П.**, патентообладатель Крымский федеральный

университет им. В.И. Вернадского. – № 2014149438/93; заявл. 08.10.2014; публ. 27.01.2015, Бюл. № 3.

2. Пат. RU 150123 Российская Федерация, МПК G01R19/00, G01R33/00. Устройство для измерения токов на поверхности пленочной металлодиэлектрической структуры при воздействии мощных электромагнитных полей / Таран Е.П., Шадрин А.А., **Арсеничев С.П.**, Полетаев Д.А., патентообладатель Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. – № 2014149436/93; заявл. 08.10.2014; публ. 27.01.2015, Бюл. № 3.

3. Пат. RU 150127 Российская Федерация, МПК H01P1/20. СВЧ фильтр / Таран Е.П., Шадрин А.А., **Арсеничев С.П.**, Полетаев Д.А., Григорьев Е.В., Глумова М.В., патентообладатель Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. – № 2014149443/93; заявл. 08.10.2014; публ. 27.01.2015, Бюл. № 3.

4. Пат. RU 150138 Российская Федерация, МПК H01P1/20. Сверхвысокочастотный аттенюатор / Таран Е.П., Шадрин А.А., **Арсеничев С.П.**, Полетаев Д.А., Григорьев Е.В., Глумова М.В., патентообладатель Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. – № 2014150194/93; заявл. 08.10.2014; публ. 27.01.2015, Бюл. № 3.