

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ”

УДК 621.315.5/6; 621.318.1; 666.65

ФАН НЬЯТ ЗАНГ

**ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ СИЛИКАГЕЛЕВЫХ И  
БЕНТОНИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ  
ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – “Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники”

Минск, 2007

Работа выполнена в учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Научный руководитель: Лыньков Леонид Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой защиты информации, учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Официальные оппоненты: Боднарь Иван Васильевич, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой химии, учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Мельников Виктор Павлович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией электромагнитных измерений государственного научного учреждения “Институт электроники НАН Беларуси”

Оппонирующая организация: учреждение образования “Военная академия Республики Беларусь”

Защита состоится “7” июня 2007 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д02.15.03 при Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по адресу: 220013 Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovvet@bsuir.unibel.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”.

# **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Диссертация выполнена в рамках Государственной комплексной программы научных исследований “Наноматериалы и нанотехнологии” (2006-наст. вр., № г.р.20063326).

## **Цель и задачи исследования**

Целью работы является исследование новых экранирующих материалов на основе водосодержащих силикагеля и бентонита, условий их формирования, герметизации, эксплуатации и разработка на их основе экранов электромагнитного излучения для различных применений. Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

1. Провести обоснование выбора водосодержащих силикагеля и бентонита в качестве материалов для создания экранов ЭМИ и исследовать условия их герметизации.

2. Исследовать влияние состава водного раствора в силикагеле и бентоните на характеристики подавления и отражения электромагнитных волн.

3. Установить закономерности процесса химического осаждения кобальта на поверхность силикагеля и исследовать экранирующие ЭМИ характеристики синтезируемых материалов.

4. Разработать технологии изготовления многослойных влагосодержащих экранов ЭМИ на основе гранулированных и порошковых силикагелевых и бентонитовых материалов.

5. Разработать конструктивно-технологические методы формирования многослойных экранов ЭМИ на основе силикагеля и бентонита, исследовать их термоустойчивость и провести эксплуатационные испытания.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Впервые предложены и разработаны композиционные водосодержащие силикагелевые и бентонитовые порошкообразные и гранулированные материалы для создания электромагнитных экранов многослойной конструкции, что позволило управляемо изменять их характеристики ослабления (от 0 до 40 дБ) и отражения (до -23 дБ) электромагнитной волны в диапазоне сверхвысоких частот 1...40 ГГц.

2. Установленные закономерности формирования рентгеноаморфных кобальтсодержащих покрытий на поверхности силикагеля и диффузии ионов кобальта в наноразмерные поры, что позволило повысить эффективность подавления ЭМИ силикагелевыми материалами от 2 до 9...12 дБ при

одновременном повышении коэффициента отражения на 3 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц.

3. Предложенные принципы построения многослойных поглотителей ЭМИ, основанные на методах герметизации силиконом, латексом, полиэтиленом, что позволило создать гибкие облегченные конструкции селективных малоотражающих укрывных материалов со сниженной до 5 раз дальностью обнаружения радиолокационного объекта.

### **Личный вклад соискателя**

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании возможности использования силикагеля и бентонита в качестве экранов ЭМИ, подготовке и проведении всех экспериментов по исследованию их структуры и свойств.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводилось с научным руководителем доктором технических наук Л.М. Лыньковым, кандидатами технических наук Н.В. Колбун, В.А. Богушем, Т.В. Борботько.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертации обсуждались на III и V Белорусско-Российской научно-технической конференции (Нарочь, Беларусь, 2005, 2006 гг.), IV Международной научно-технической конференции (Новополоцк, Беларусь, 2006 г.), V Международном аэрокосмическом конгрессе (Москва, Россия, 2006 г.), XI Международной научно-технической конференции "Современные средства связи" (Нарочь, Беларусь, 2006 г.), II Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения «МИЛЕКС-2005» (Минск, 2005 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликованы 17 работ, в том числе 7 статей в научных журналах, 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 тезиса докладов. Получен 1 патент Республики Беларусь на полезную модель. Общее количество опубликованных работ по теме диссертации материалов составляет 55 страниц (3,1 авторского листа).

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списков использованных источников и двух приложений. В первой главе проведен анализ процесса взаимодействия электромагнитных волн с различными средами, рассмотрены основные виды радиопоглощающих материалов и конструкции экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) на их основе, во второй главе приводятся обоснование выбора водосодержащих материалов и описание методик для исследования электромагнитных характеристик экранов ЭМИ, третья глава содержит результаты исследований влияния влагосодержания силикагелевых и бентонитовых материалов на их электромагнитные характеристики и на их экранирующие характеристики при взаимодействии с импульсными помехами, а также процесса химического осаждения кобальта и никеля из водных растворов на поверхность силикагеля и влияния сформированного покрытия на электромагнитные характеристики. Полученные результаты использованы в четвертой главе для разработки конструкций экранов электромагнитного излучения и способов их изготовления и приведены рекомендации по практическому их использованию. Общий объем диссертационной работы составляет 147 страниц. Она включает 87 страниц машинописного текста, 76 иллюстраций на 38 страницах, 14 таблиц на 6 страницах, список использованных источников из 118 наименований на 11 страницах, 17 собственных публикаций автора на 3 страницах и 2 приложения на 2 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения исследований и синтез композиционных материалов на основе силикагеля и бентонита для создания экранов электромагнитного излучения.

**В первой главе** приведены современные методы и средства экранирования электромагнитного излучения и описаны принципы взаимодействия электромагнитных волн с различными средами. Анализом литературных источников и патентной информации показано, что электромагнитные волны при взаимодействии с материалами частично отражаются от поверхности материалов, частично затухают в материале. Степень ослабления и отражения волн зависит от проводящих, магнитных и диэлектрических свойств материалов. На этом основан принцип действия большинства радиопоглощающих материалов и покрытий, ослабление ЭМИ которыми обеспечивается за счет магнитных, диэлектрических и резистивных

потерь в материале. Формированием геометрически неоднородной поверхности, градиентным изменением свойств по глубине поглотителя, созданием условий для суперпозиции и взаимного подавления падающей и отраженной в противофазе волн достигают снижения степени отражения электромагнитных волн от поверхности экранов ЭМИ. В СВЧ диапазоне вода в жидкой фазе обладает высокими диэлектрическими потерями за счет механизма дипольной релаксации под воздействием внешнего электромагнитного поля, что обуславливает ее применимость для создания эффективных конструкций экранов ЭМИ.

Во второй главе проводится обоснование выбора влагосодержащих наполнителей, как основы для создания эффективных экранов ЭМИ.

Анализом структуры, физико-химических характеристик, состава силикагеля и бентонита показано, что эти материалы обладают капиллярно-пористым строением и развитой поверхностью, с высокой степенью гидрофильности. Физические связи адсорбированных молекул воды легко разрушаются при повышении температуры окружающей среды. Молекулы воды, которые входят в состав силикагеля в виде ОН-групп, могут отрываться от связей со скелетом силикагеля при передаче им большой энергии, т.е. при более высокой температуре (пропитанные силикагелевые материалы при нагреве до +180 °С еще содержат 2...3 % воды).

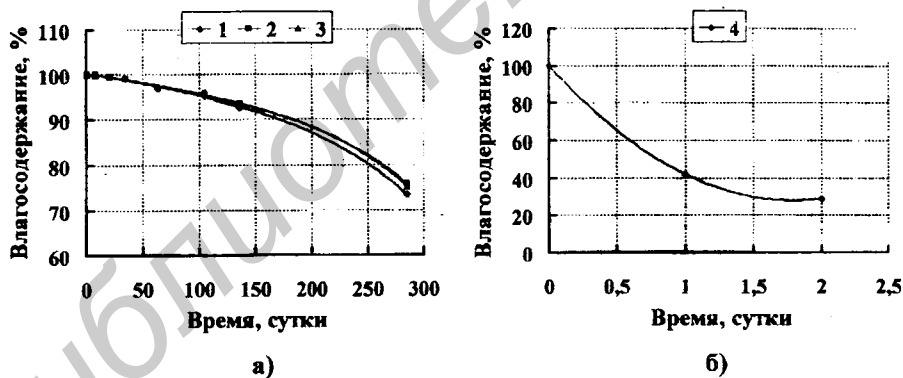
По результатам анализа свойств силикагелевых, бентонитовых материалов и водных наполнителей предложено использовать капиллярно-пористые матрицы на основе силикагелевых и бентонитовых материалов в качестве основы экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) для закрепления водосодержащих наполнителей.

Количество растворосодержащего наполнителя, закрепляемого методом пропитки в капиллярно-пористой матрице силикагелевых и бентонитовых материалов, оценивалось гравиметрически. Электромагнитные характеристики синтезируемых композиционных материалов в диапазонах частот 8...12 ГГц, 27...36 ГГц и 80...115 ГГц исследовались с использованием скалярных анализаторов цепей и волноводных трактов. Исследование синтезируемых материалов в различных температурных условиях проводилось под контролем температуры испытательных образцов, одновременно с измерением их коэффициента отражения и ослабления электромагнитных волн. Приведена методика исследования импульсных характеристик экранов ЭМИ. Для исследования импульсных характеристик образцов использовался импульсный генератор, измерительный аттенуатор, детекторный блок, осциллограф и блок питания. Формировались электромагнитные импульсы с длительностью импульсов 400 нс, периодом повторения импульсов 50 Гц. Частота заполнения импульса была равна 37 ГГц. Мощность в импульсе составляла 20 кВт.

Радиолокационные характеристики экранов ЭМИ оценивались величиной эквивалентной площади рассеяния (ЭПР). Для измерений использовалась схема автоматического измерительно-вычислительного комплекса в режиме измерения ЭПР.

В третьей главе представлены результаты исследований временной стабильности влагосодержания силикагеля и бентонита; влияния влагосодержания экранирующих материалов на основе силикагеля и бентонита на их электромагнитные свойства в том числе и импульсные экранирующие характеристики, процесса осаждения кобальта на силикагель методом химического восстановления.

Для создания экранов ЭМИ на основе раствородержащих материалов одним из важных параметров является временная стабильность влагосодержания материалов. Эта величина непосредственно оказывает влияние на электромагнитные свойства создаваемых материалов. Исследование временной стабильности влагосодержания материалов проводилось с образцами на основе силикагеля и бентонита, пропитанных различными раствородержащими наполнителями. В результате герметизации материалов полиэтиленовой пленкой толщиной 0,2 мм процесс испарения жидкости происходит медленно (потеря жидкости 0,08 % по массе в день) (рисунок 1).



Силикагель, пропитанный: 1 – водой; 2 – водным раствором ПАВ; 3 – водным раствором NaCl, 4 – водой (не герметизированный)

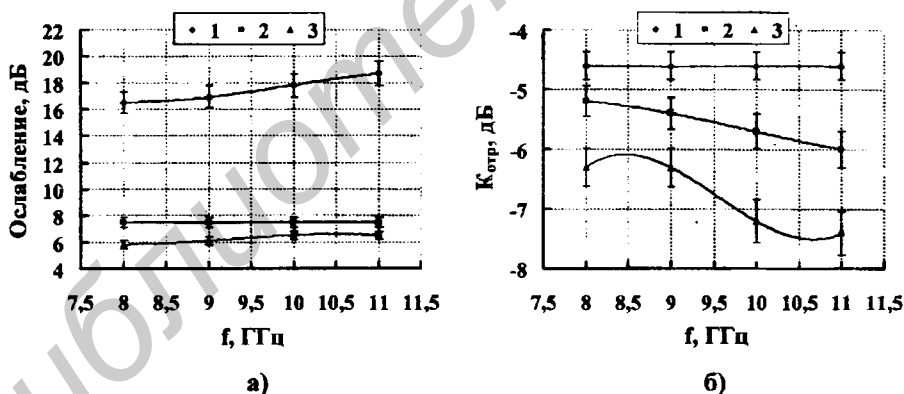
Рисунок 1 – Динамика изменения влагосодержания силикагеля, герметизированного полиэтиленовой пленкой толщиной 200 мкм (а), и без герметизации (б)

Введением водных растворов в пористые материалы изменяются

экранирующие характеристики пропитанных материалов благодаря свойствам самого водного раствора и связей между молекулами растворов и молекулами пористых материалов. Проводились исследования зависимости коэффициента отражения и ослабления электромагнитных волн данных материалов в зависимости от их влагосодержания с использованием образцов на базе силикагеля и бентонита, пропитанных различными растворами. Результаты исследований показывают, что эффективность экранирования ЭМИ обеспечивается в основном за счет поглощения энергии электромагнитных волн водными растворами. Непропитанные силикагелевые и бентонитовые материалы обладают низкими коэффициентом отражения и ослаблением электромагнитных волн.

При введении водных растворов (вода, ПАВ, NaCl) в капиллярно-пористые силикагелевые и бентонитовые материалы повышаются ослабление и коэффициент отражения электромагнитных волн материалов.

Изменением влагосодержания пропитанных силикагелевых и бентонитовых материалов можно регулировать ослабление и коэффициент отражения электромагнитных волн (рисунок 2), для силикагеля, пропитанного водой, регулированием влагосодержания в пределах 30...55 % можно изменить ослабление в пределах 4...19 дБ и коэффициент отражения в пределах -4,5...-7,5 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц.



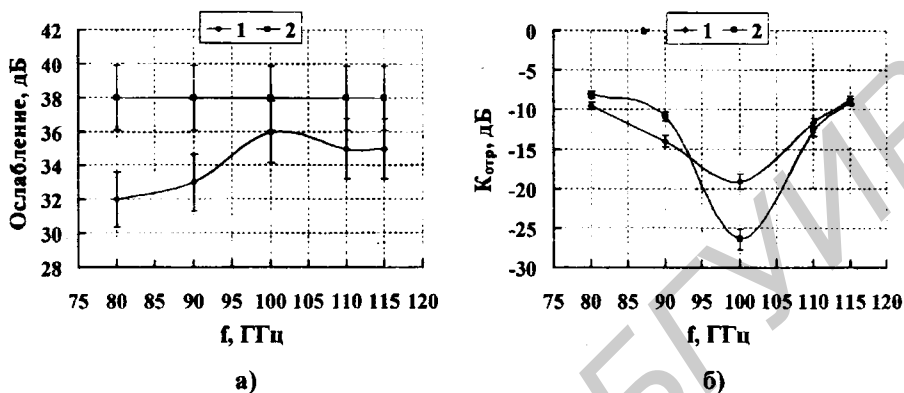
Влагосодержание: 1 – 55 %; 2 – 40 %; 3 – 30 %

Рисунок 2 – Частотная зависимость ослабления (а) и коэффициента отражения (б) пористого силикагеля, пропитанного водой, с различным влагосодержанием

В диапазонах частот 27...36 ГГц и 80...115 ГГц силикагелевые и



бентонитовые материалы, пропитанные водным раствором NaCl (20 мас.%), обладают большей эффективностью экранирования, чем в диапазоне частот 8...12 ГГц (рисунок 3).



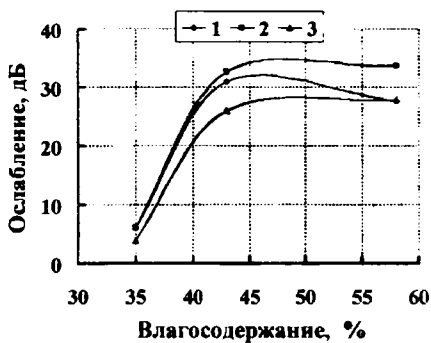
1 – силикагелевый материал, пропитанный водным раствором NaCl; 2 – бентонитовый материал, пропитанный водным раствором NaCl

**Рисунок 3 – Частотная зависимость ослабления (а) и коэффициента отражения (б) порошкообразного силикагелевого и бентонитового материалов, пропитанных водным раствором NaCl (20 мас.%), в диапазоне 80...115 ГГц**

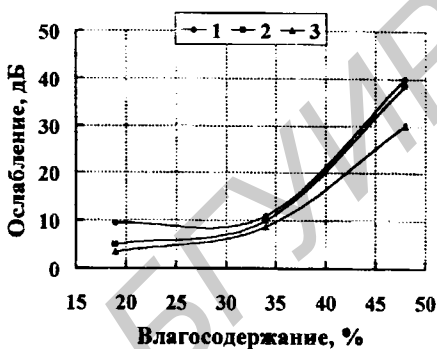
При воздействии сильных полей в результате электромагнитной индукции образуются большие токи во всех проводящих материалах, что может повлечь за собой нарушения и сбои в нормальной работе электронных комплексов, а в ряде случаев перевести в неремонтопригодное состояние. Являясь чрезвычайно опасными для электроники, электромагнитное оружие может также причинять вред живым организмам. Импульсы микроволнового оружия в ряде случаев могут вызывать у человека эпилептические удары, рвоту, приступы лихорадки, потерю сознания.

Ослабление мощности электромагнитного импульса слоем воды толщиной 3 мм, герметизированным полиэтиленом, составляет 58 дБ. Проводилось исследование ослабления электромагнитных импульсов образцами из силикагелевых и бентонитовых материалов, пропитанных различными водными растворами (водой, водным раствором ПАВ и водным раствором NaCl). Результаты исследования показаны на рисунке 4. Величина ослабления ЭМИ образцами силикагеля изменяется в пределах от 5 до 38 дБ. Аналогичная зависимость образцов на основе бентонита лежит в пределах от 5 до 43 дБ. Во

всех образцах с увеличением влагосодержания величина ослабления электромагнитного излучения увеличивается, приближаясь к значению ослабления ЭМИ герметизированного полиэтиленом водного образца с аналогичной толщиной. Наличие различных растворов в образцах существенно не влияет на величину ослабления ЭМИ.



а)



б)

1 – вода; 2 – водный раствор ПАВ; 3 – водный раствор NaCl

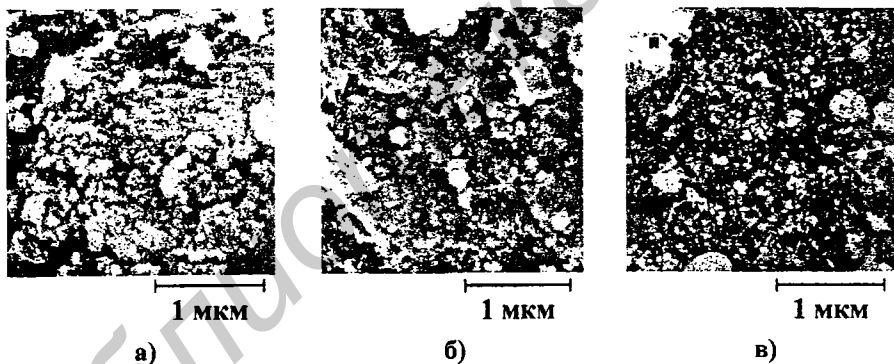
**Рисунок 4 – Зависимость ослабления электромагнитного излучения материалов на основе силикагеля (а) и бентонита (б), пропитанных различными растворами, от величины влагосодержания**

Установлено, что изменением влагосодержания силикагелевых и бентонитовых материалов в пределах 35...50 % можно регулировать ослабление импульсов в пределе 10...40 дБ, соответствующем влагосодержащим материалам. Увеличение влагосодержания свыше 50% не позволяло повысить ослабление электромагнитных импульсов.

Проводилось формирование проводящих и магнитных металлических кластерных структур на поверхность силикагеля методом химического осаждения никеля и кобальта из водных растворов.

Базовым методом, разработанным для формирования кластерных металлоорганических структур на пористых подложках, является метод, основанный на химическом осаждении металла в присутствии предварительно сформированных путем химической сорбции металлических кластеров в пористой матрице. В этом случае сначала производится синтез металлоорганических кластерных структур в полимерной матрице силикагеля восстановлением адсорбированных ионов металлов, а затем — химическое осаждение металла из водных растворов.

Развитая поверхность силикагеля и наличие наноразмерных пор позволяет достичь высокой сорбционной емкости по отношению к ионам кобальта. Синтез включал обработку силикагеля в растворе сернокислого кобальта в течение одних суток для сорбции ионов металла. При этом окраска гранул изменялась на зеленовато-белую соответственно цвету раствора. Процесс восстановления ионов металлов тиосульфатом натрия, используемым в качестве восстановителя, протекал при температуре не ниже 50°C в течение 3...5 мин, что связано с повышенной длиной диффузии восстановителя в зону реакции из-за развитой удельной поверхности подложки. После формирования кластеров последующее осаждение металла происходит в основном на поверхности частиц, формируя обогащенный металлом приповерхностный слой. Процесс осаждения покрытий сопровождался изменением цвета образцов до матово-черного, характерного для ультрадисперсного металла (рисунок 5). Установлена высокая химическая активность синтезированных кластеров, приводящая к быстрому окислению металлических частиц на воздухе в течение 20...30 мин. Для предотвращения быстрого окисления металлосодержащих кластеров предложено использовать формирование защитных мономолекулярных слоев из поверхностно-активных веществ.



**Рисунок 5 – Электронные микрофотографии поверхности силикагеля в исходном состоянии (а) и после химического осаждения кобальта (б) и никеля (в)**

На Оже-спектрах синтезированных материалов кроме пиков, соответствующих кислороду и кремнию, обнаружены рефлексы углерода и кальция, создаваемые сорбированными на поверхности примесями из водопроводной воды, а также рефлексы кобальта и серы, которая осаждается из раствора восстановителя и формирует соединения с металлом. Показано, что концентрация примесей значительно снижается при удалении

приповерхностного слоя, в то время как интенсивность пиков кобальта практически не изменяется, что свидетельствует о диффузии кобальта в наноразмерные поры подложки на этапе сорбции ионов.

Анализ кристаллической структуры композиционных материалов, полученных на основе силикагеля, показал преимущественно рентgenoаморфное строение кобальтсодержащих покрытий. Пики в области малых углов дифракции, соответствующие межплоскостным расстояниям 3,89 и 6,52 Å, могут быть отнесены к соединениям, характерным для силикагелей. Наличие кристаллической фазы металлического никеля и кобальта в покрытиях не установлено (рисунок 6).

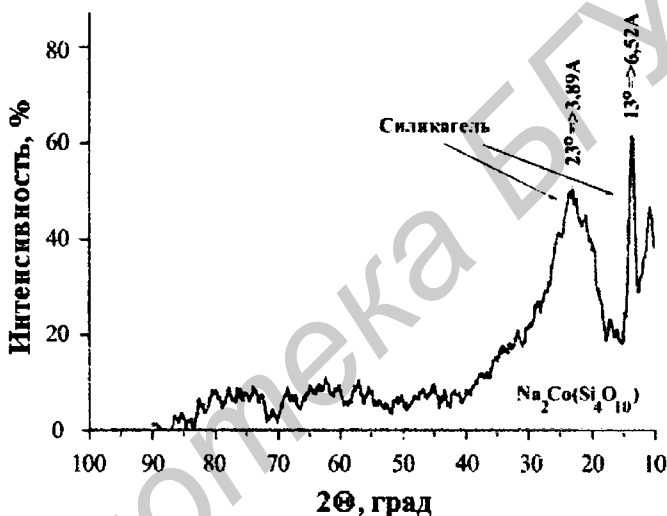
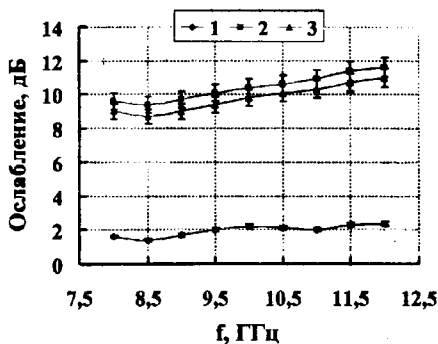


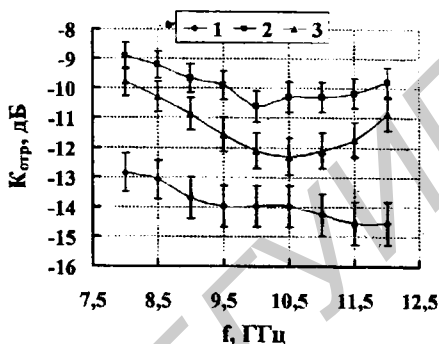
Рисунок 6 – Дифрактограмма силикагеля после химического осаждения кобальта

Установлено, что в результате формирования на поверхности силикагеля кобальтсодержащих покрытий эффективность ослабления ЭМИ этими материалами увеличивается с 2 до 8...10 дБ, при этом происходит увеличение коэффициента отражения до значений -9 ... -12 дБ по сравнению с -12...-14 дБ для исходного силикагеля (рисунок 7), что связано с увеличением уровня отраженного сигнала. Изменение свойств происходит из-за введения в материал матрицы проводящих кластеров и увеличения подавления ЭМИ одновременно за счет поглощения и отражения электромагнитной энергии, как следует из анализа изменения коэффициента отражения и ослабления. Поглощение электромагнитной энергии увеличивается в основном за счет потерь на

создание вихревых токов в проводящей и диэлектрических средах. Увеличение коэффициента отражения происходит за счет повышения электропроводности материала и снижения его волнового сопротивления.



а)



б)

1 – силикагель в исходном состоянии; 2 – силикагель с покрытием из кобальта;  
3 – силикагель с покрытием из никеля

**Рисунок 7 – Частотная зависимость ослабления (а) и коэффициента отражения (б) электромагнитного излучения**

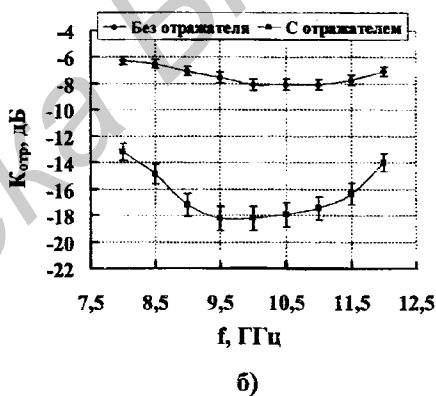
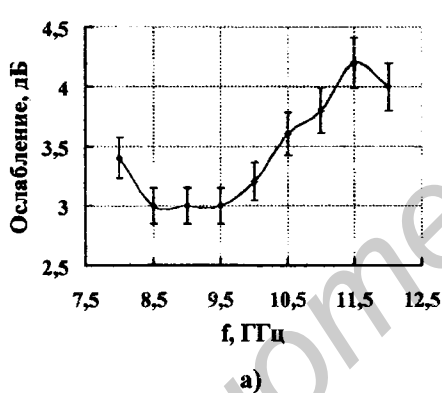
В четвертой главе разработан технологический маршрут осаждения никеля и кобальта на поверхность силикагеля методом сорбции ионов и химического восстановления их из водных растворов сернокислого никеля или кобальта (концентрация 45 г/л) с последующим химическим восстановлением с помощью  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (тиосульфата натрия) и формированием защитных мономолекулярных слоев из ПАВ (бутанола, силикона) на поверхности синтезированных материалов.

Разработана технология изготовления многослойных конструкций влагосодержащих экранов ЭМИ на основе порошковых силикагелевых и бентонитовых материалов, в том числе с различными технологическими наполнителями (силикон, полиэтилен) площадью до  $1 \text{ м}^2$ , что позволило снизить утечку влагосодержащего наполнителя из капиллярно-пористых матриц.

Проведены исследования электромагнитных характеристик одно-, двух- и трехслойных конструкций с использованием металлического отражателя и без него в диапазоне частот 8...12 ГГц. Установлено, что образцы на основе гранулированного силикагеля обладают меньшим коэффициентом отражения электромагнитных волн, чем образцы из порошкообразных материалов. Это

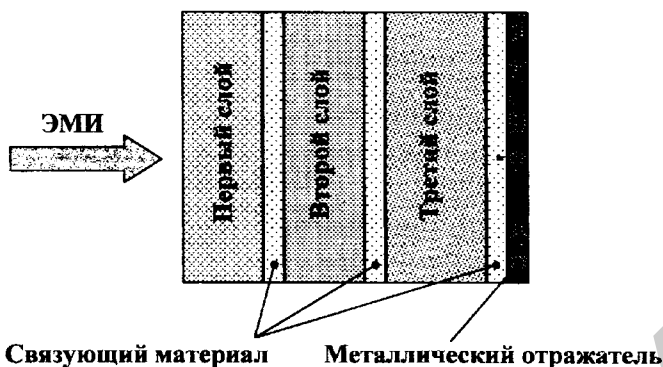
обусловливается выпуклой поверхностью гранул, образующей геометрическую неравномерность поверхности экрана, вследствие чего увеличивается рассеивание электромагнитного излучения. Образцы на основе силикагеля и бентонита, пропитанных водными растворами этиленгликоля и глицерина (50 мас.%) обладают ослаблением в пределах 10...20 дБ и коэффициентом отражения электромагнитных волн в пределах -6...-12 дБ в частотном диапазоне 8...12 ГГц.

Однослойная конструкция экрана из порошкообразного силикагеля в связующем силиконовом материале с использованием алюминиевого отражателя обладает ослаблением более 30 дБ при значении коэффициента отражения электромагнитных волн в пределах -13...-18 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц (рисунок 8). Экран из композиционного материала на основе порошкообразного силикагеля в силиконовом связующем обладает гибкостью и водостойкостью, что стабилизирует влагосодержание пропитанного материала.



**Рисунок 8 – Частотная зависимость ослабления (без металлического отражателя) (а) и коэффициента отражения (б) электромагнитных волн образцов из порошкообразного силикагеля в силиконовом связующем**

У многослойных конструкций (рисунок 9) больше границ между различными слоями материалов, поэтому при прохождении через экран ЭМИ электромагнитные волны переотражаются и затухают в экране, что повышает эффективность экранирования ЭМИ.

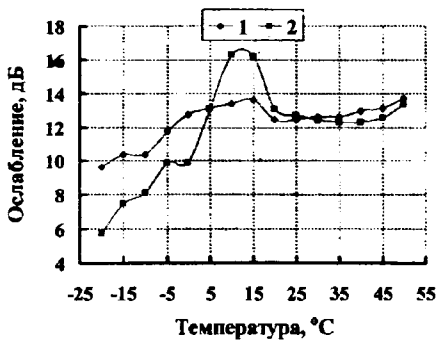


**Рисунок 9 – Схематическое изображение экрана трехслойной конструкции**

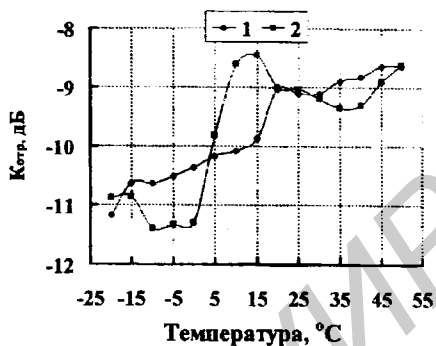
Установка металлического отражателя за двух- и трехслойной конструкцией повышает ослабление конструкции больше 35 дБ при значении коэффициента отражения электромагнитных волн от -15 до -24 дБ.

Исследована температурная зависимость экранирующих характеристик влагосодержащих капиллярно-пористых силикагелевых и бентонитовых материалов. Показано что при понижении температуры основная эффективность экранирования обеспечивается за счет наличия незамерзающих прослоек воды вблизи поверхности твердотельной матрицы при кристаллизации воды в объемной фазе. Введение органических добавок в состав влагосодержащего наполнителя позволяет понизить температуру перехода наполнителя из жидкого агрегатного состояния в твердое. Установлено, что наилучшей стабильностью экранирующих характеристик в различных климатических условиях обладает конструкция, содержащая в качестве наполнителя водный раствор глицерина (50 об.%) с коэффициентом отражения -8,5...-11,0 дБ и ослаблением 10,0...14,0 дБ в диапазоне температуры -20...+50 °С (рисунок 10).

Проведены исследования радиолокационных характеристик порошкообразных силикагелевых экранов ЭМИ в диапазоне 1...40 ГГц методом замещения и сравнения с эталоном и определением уровня отдельных гармоник отраженного сигнала преобразованием Фурье отраженных сигналов. Установлена возможность избирательного использования двухслойных конструкций ЭМИ в качестве малоотражающих объектов в диапазонах частот 1,4...2,4 ГГц, 3,6...4,5 ГГц, 7,1...8,5 ГГц, 10,6...12,4 ГГц, 18,8...20,2 ГГц, 21,2...22,7 ГГц, 24,2...25,4 ГГц, 27,0...40,0 ГГц для порошкообразного силикагеля в силиконе и 1,1...1,6 ГГц, 1,7...2,0 ГГц, 2,3...2,5 ГГц, 8,8...9,1 ГГц, 9,5...12 ГГц, 26,7...27,5 ГГц, 29...34 ГГц для порошкообразного силикагеля в латексе.



а)



б)

1 – силикагель пропитанный водным раствором глицерина; 2 – силикагель пропитанный водным раствором этиленгликоля

**Рисунок 10 – Температурная зависимость ослабления (а) и коэффициента отражения (б) электромагнитных волн образцов**

По результатам исследования радиолокационных характеристик порошкообразных силикагелевых экранов ЭМИ в диапазоне 1...40 ГГц разработана и испытана гибкая конструкция экрана ЭМИ размером более 1,2 м<sup>2</sup> на основе порошкообразного силикагеля в силиконе с использованием металлического отражателя. Измерением уровня отраженного сигнала доплеровской РЛС показано, что снижение уровня отраженного сигнала от 62 до 33 дБ при закрытии разработанным материалом уголкового отражателя с ЭПР 50 м<sup>2</sup> соответствует снижению дальности обнаружения перемещающегося объекта до 5 раз.

В приложениях представлены акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы в производство новых экранирующих электромагнитное излучение материалов и в учебный процесс.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Впервые разработана методика пропитки силикагелевых и бентонитовых материалов в водных растворах с последующей их герметизацией для создания экранов электромагнитных волн. Установлено, что в диапазоне частот 8...12 ГГц в порошковых силикагелевых материалах при изменении влагосодержания от 20 до 55 мас. % величина ослабления увеличивается от 5 до 20 дБ, а коэффициент отражения от -12 до -5 дБ. В порошковых бентонитовых материалах повышение влагосодержания от 20 до 45 мас. % приводит к увеличению ослабления от 4 до 16 дБ, а коэффициента отражения от -8 до -4,5 дБ [7, 8, 10, 13].

2. Установлены особенности ослабления импульсных электромагнитных излучений водосодержащими герметизированными порошковыми силикагелевыми и бентонитовыми материалами толщиной 3 мм. Показано, что с изменением водосодержания от 20 до 50 % ослабление энергии электромагнитного импульса (мощность 20 кВт, частота 37 ГГц) повышается от 5 до 40 дБ и не зависит от состава водного раствора (NaCl, ПАВ) [2, 3].

3. С использованием метода химической сорбции впервые предложено модифицирование поверхности гранулированного силикагеля ионами кобальта. Установлена диффузия кобальта в наноразмерные поры силикагелевой подложки на этапе сорбции ионов, рентгеноаморфное строение кобальтсодержащих покрытий и высокая химическая активность синтезируемых кобальтсодержащих кластеров по отношению к кислороду воздуха. Предложена обработка поверхностно-активными веществами для создания на поверхности кобальтсодержащих материалов защитных мономолекулярных слоев и показано, что подавление порошкообразными кобальтсодержащими материалами электромагнитного излучения возрастает от 2 дБ до 9...12 дБ при одновременном повышении коэффициента отражения на 3 дБ в диапазоне частот 8...12 ГГц при одинаковых массогабаритах исследуемых образцов [5, 16].

4. Впервые предложен принцип построения многослойных поглотителей ЭМИ состоящих из последовательно расположенных слоев гранулированного силикагеля, водосодержащего порошкообразного силикагеля и металлического отражателя, что позволило снизить характеристики отражения до -15...-23 дБ при ослаблении до 30 дБ и выше в диапазоне частот 8...12 ГГц [1, 11].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Установлены параметры формирования никельсодержащих и кобальтсодержащих осадков на поверхности гранулированного силикагеля из водных растворов сернокислого кобальта и никеля и предложен метод их защиты поверхностно-активными веществами от окисления на воздухе [14].

2. Разработана методика герметизации порошковых силикагелевых и бентонитовых материалов связующими из силикона и латекса, что позволяет снизить утечку влаги из материалов при термообработке до  $150^{\circ}\text{C}$  в течение 6 ч, и изготовлены экраны электромагнитного излучения площадью более  $1\text{ м}^2$  [15].

3. Предложено применение конструкций экранов электромагнитного излучения на основе порошкового силикагеля в латексном и силиконовом связующем в качестве малоотражающих радиолокационных объектов с эффективной поверхностью рассеяния  $0,1\text{ м}^2$  и менее на различных фиксированных частотах в диапазоне  $1...40\text{ ГГц}$  [6].

4. Установлено, что наилучшей стабильностью экранирующих характеристик в различных эксплуатационных условиях обладает конструкция экрана, содержащая в качестве наполнителя водный раствор глицерина (50 об.%), с коэффициентом отражения  $-8,5...-11,0\text{ дБ}$  и ослаблением  $10,0...14,0\text{ дБ}$  в диапазоне температуры  $-20...+50^{\circ}\text{C}$  [4].

5. Разработана технология изготовления многослойных конструкций влагосодержащих экранов электромагнитного излучения и проведены испытания разработанной гибкой конструкции площадью более  $1,2\text{ м}^2$  на основе 2-слойной конструкции из порошкообразного силикагеля в силиконе на алюминиевой фольге путем измерения уровня отраженного сигнала доплеровской РЛС. Установлено снижение уровня отраженного сигнала от 62 до 33 дБ при закрытии разработанным материалом отражателя с эффективной поверхностью рассеяния  $50\text{ м}^2$ , что соответствует снижению дальности обнаружения перемещающегося объекта в 5 раз [9, 12, 17].

# СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Статьи

1. Колбун, Н.В. Методы герметизации экранов ЭМИ на основе жидкостносодержащих волокнистых материалов / Н.В. Колбун, Фан Н. Занг // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №2 (18)/2. – С. 158-159.

2. Свойства раствородержащих широкодиапазонных поглотителей электромагнитного излучения для технических средств защиты информации / Н.В. Колбун, Т.В. Борботько, И.С. Терех, Фан Н. Занг, Л.М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2004. – № 6. – С. 78-84.

3. Влияние импульсного электромагнитного излучения на влагосодержащие материалы / Н.В. Колбун, Л.М. Лыньков, А.В. Рубаник, И.С. Терех, Фан Н. Занг // Доклады БГУИР. – 2005. – №6. – С. 101-105.

4. Колбун, Н.В. Исследование состояния влаги в пористых средах на основе силикагеля при их низкотемпературной обработке / Н.В. Колбун, Фан Н. Занг, Л.М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2006. – №1. – С. 74-77.

5. Синтез и свойства кобальтсодержащего модифицированного силикагеля / В.А. Богуш, Фан Н. Занг, Т.В. Борботько, Л.М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2006. – №5. – С. 45-50.

6. Оптические свойства силикагеля с наноструктурированными металлическими покрытиями / Н.В. Колбун, Фан Н. Занг, Хай Н. Ван, В.А. Богуш, Т.В. Борботько, Л.М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2006. – №6. – С. 74-80.

7. Использование порошкообразных почвосодержащих материалов для комбинированных экранов ЭМИ / Н.В. Колбун, Хай Н. Ван, Фан Н. Занг, Т.В. Борботько, В.Б. Соколов // Доклады БГУИР. – 2007. – Т.5, №1. – С.88-93.

## Материалы научных конференций

8. Колбун, Н.В. Экранирующие свойства порошкообразного влагосодержащего материала на основе бентонита / Н.В. Колбун, Фан Н. Занг, Л.М. Лыньков // Материалы докладов и краткие сообщения III Белорусско-Российской науч.-техн. конф. “Технические средства защиты информации”, Минск-Нарочь, Республика Беларусь, 23-27 мая, 2005 г. – Минск, 2005. – С. 51.

9. Имитационное экранирование электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков, Н.В. Колбун, Н.В. Богуш, Фан Н. Занг, И.С. Терех, Т.В. Борботько // Итоговые материалы выполнения Государственной программы ориентированных исследований: сб. научных работ. – Гомель: УО “Гомельский государственный медицинский университет”, 2005. – С. 74-77.

10. Занг, Ф.Н. Поглотитель ЭМИ на основе бентонита / Ф.Н. Занг // Материалы докладов и краткие сообщения

науч.-техн. конф. “Технические средства защиты информации”, Минск – Нарочь, Республика Беларусь, 29 мая-2 июня 2006 г. – Минск, 2006. – С. 76.

11. Занг, Ф.Н. Электромагнитные свойства водосодержащего силикагеля / Ф.Н. Занг, Н.В. Колбун // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств, Т. II.: сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25-26 мая 2006 г. – Новополоцк, 2006. – С.130-134.

12. Поглотители электромагнитного излучения сантиметрового диапазона / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Фан Н. Занг, А.В. Хижняк // Современные средства связи: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Нарочь, Республика Беларусь, 25-29 сентября 2006 г. – Минск, 2006. – С. 34.

13. Занг, Ф.Н. Исследования герметизации порошков силикагеля для создания поглотителей ЭМИ / Ф.Н. Занг // Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Нарочь, Республика Беларусь, 25-29 сентября 2006 г. – Минск, 2006. – С. 61.

### Тезисы докладов

14. Исследование свойств гетерогенных радиопоглощающих материалов / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Н.В. Колбун, Ф.Н. Занг, И.С. Терех // Тезисы докладов МПК по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. - Минск: ГУ “Бел ИСА”, 2005. – С. 42-43.

15. Лыньков, Л.М. Радиопоглощающие материалы сантиметрового и миллиметрового диапазонов широкого применения / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Ф.Н. Занг // Тезисы докладов МПК по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. - Минск: ГУ “Бел ИСА”, 2005. – С. 43-44.

16. Формирование наноструктурированных гетерогенных материалов для электромагнитных экранов методом химического осаждения металлов / В.А. Богущ, Ф.Н. Занг, Т.В. Борботько, В.И. Захаров, Л.М. Лыньков // Сб. тезисов – V Международный аэрокосмический конгресс, Москва, 27-31 августа 2006 г. - М.: СИП РИА, 2006. – С. 140.

### Патенты

17. Поглотитель электромагнитной энергии: пат. 3321 Респ. Беларусь, МПК 7 Н 01Q 17/00 / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Ф.Н. Занг; заявитель учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”. – № u 20060284; заявл. 04.05.06; опубл. 01.11.06 // официальный бюл. / Национальный центр интеллектуальной собственности. – 2007. – №1.

Фан Ньян Занг

## РЭЗЮМЭ

Фан Ньят Занг

### ФАРМІРАВАННЕ ВОДАЗМЯШЧАЛЬНЫХ СІЛКАГЕЛЕВЫХ І БЕНТАНІТАВЫХ МАТЭРЫЯЛАЎ ДЛЯ ВЫСОКАСТАБІЛЬНЫХ ЭКРАНАЎ ЭЛЕКТРАМАГНІТНАГА ВЫПРАМЕНЬВАННЯ

**Ключавыя словы:** электрамагнітнае экраніраванне, капілярна-порыстыя матэрыялы, тэхналогія, экраніруючыя характарыстыкі.

**Аб'ект і прадмет даследавання.** Аб'ектам даследавання з'яўляюцца водазмяшчальныя сілікагелевыя і бентанітавыя матэрыялы. Прадметам даследавання з'яўляюцца асаблівасці саставу, структуры, электрамагнітных уласцівасцей водазмяшчальных бентанітавых і сілікагелевых матэрыялаў, у тым ліку мадыфікаваных кобальтам.

**Мэтай работы** з'яўляецца распрацоўка новых экраніруючых матэрыялаў на аснове водазмяшчальных сілікагелю і бентаніту, даследаванне залежнасці іх электрамагнітных уласцівасцей ад умоў фарміравання, герметызацыі, эксплуатацыі і распрацоўка на іх аснове экранаў электрамагнітнага выпраменьвання для розных прымяненняў.

Распрацаваны тэхналагічны працэс фарміравання нікелевых і кобальтавых уключэнняў на паверхні капілярна-порыстых сілікагелевых матэрыялаў хімічным асаджэннем і прапанавана тэхналогія вырабу гібкіх высокастабільных водазмяшчальных экранаў ЭМВ на аснове сілікагелевых і бентанітавых матэрыялаў.

Паказана частотная залежнасць каэфіцыентаў аслаблення і адлюстравання электрамагнітных хваляў (у дыяпазонах частот 8...12 ГГц, 27...36 ГГц і 80...115 ГГц) капілярна-порыстых сілікагелевых і бентанітавых матэрыялаў ад іх вільгацеўтрымання і саставу растворага напайняльніка. Даследавана тэмпературная залежнасць экраніруючых характарыстык насычаных сілікагелю і бентаніту рознымі воднымі растворамі ў дыяпазоне -20...+50°C.

Прапанаваны метады і прынцыпы фарміравання мнагаслойных наборных канструкцый экранаў электрамагнітнага выпраменьвання з павышаным каэфіцыентам аслаблення і нізкім каэфіцыентам адлюстравання. Даследаваны экраніруючыя характарыстыкі адна- і мнагаслойных канструкцый у дыяпазоне частот 8...12 ГГц і радыёлакацыйныя характарыстыкі эквівалентнай плошчы рассеявання ў дыяпазоне частот 1...40 ГГц. Прапанавана выкарыстанне распрацаваных канструкцый для стварэння гібкіх радыёлакацыйных экранаў у мэтах зніжэння радыёлакацыйнай прыметнасці наземных аб'ектаў.

## РЕЗЮМЕ

Фан Ньят Занг

### ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ СИЛИКАГЕЛЕВЫХ И БЕНТОНИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Ключевые слова:** электромагнитное экранирование, капиллярно-пористые материалы, технология, экранирующие характеристики.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются водосодержащие силикагелевые и бентонитовые материалы. Предметом исследования являются особенности состава, структуры, электромагнитных свойств водосодержащих бентонитовых и силикагелевых материалов, в том числе модифицированных кобальтом.

**Целью работы** является разработка новых экранирующих материалов на основе водосодержащих силикагеля и бентонита, исследование зависимости их электромагнитных свойств от условий формирования, герметизации, эксплуатации и разработка на их основе экранов электромагнитного излучения для различных применений.

Разработан технический процесс формирования никелевых и кобальтовых включений на поверхности капиллярно-пористых силикагелевых материалов химическим осаждением и предложена технология изготовления гибких, высокостабильных влагосодержащих экранов ЭМИ на основе силикагелевых и бентонитовых материалов.

Показана частотная зависимость ослабления и коэффициента отражения электромагнитных волн (в диапазонах частот 8...12 ГГц, 27...36 ГГц и 80...115 ГГц) капиллярно-пористых силикагелевых и бентонитовых материалов от их влагосодержания и состава растворного наполнителя. Исследована температурная зависимость экранирующих характеристик пропитанных силикагеля и бентонита разными водными растворами в диапазоне  $-20...+50^{\circ}\text{C}$ . Предложены методы и принципы формирования многослойных наборных конструкций экранов электромагнитного излучения с повышенным ослаблением и низким коэффициентом отражения. Исследованы экранирующие характеристики одно- и многослойных конструкций в диапазоне частот 8...12 ГГц и радиолокационные характеристики эквивалентной площади рассеивания в диапазоне частот 1...40 ГГц. Предложено применение разработанных конструкций для создания гибких радиолокационных экранов в целях снижения радиолокационной заметности наземных объектов.

## SUMMARY

Phan Nhat Giang

### FORMATION OF WATER-CONTAINING SILICAGEL AND BENTONITE MATERIALS FOR HIGH-STABLE ELECTROMAGNETIC SHIELDS

**Key Words:** electromagnetic shielding, capillary-porous materials, technology, shielding characteristics.

**Object and subject of the study.** The object of the study is water-containing silicagel and bentonite materials. The subjects of the study are features of composition, structure and electromagnetic properties of water-containing bentonite and silicagel materials, including those modified by cobalt.

**The purpose of the present work** is development of new shielding materials based on water-containing silicagel and bentonite, exploration of their electromagnetic properties depending on the conditions of forming, sealing, operation, and development on their basis of electromagnetic shields for diverse uses. The technological process of forming nickel and cobalt inclusions on the surface of capillary-porous silicagel materials by means of chemical deposition has been elaborated and the technology of manufacturing of flexible high-stable water-containing electromagnetic shields based on silicagel and bentonite materials were offered.

The frequency dependence of attenuation and reflection coefficients of electromagnetic waves (frequency bands from 8 to 12 GHz, from 27 to 36 GHz and from 80 to 115 GHz) of capillary-porous silicagel and bentonite materials on their moisture content and composition of the solution filling agent is shown. The temperature dependence of shielding characteristics of silicagel and bentonite impregnated with various water solutions in the range of  $-20$  to  $+50^{\circ}\text{C}$  has been studied.

Methods and principles of forming multilayer electromagnetic shield assemblies with increased attenuation coefficient and lowered reflection coefficient are offered. Shielding characteristics of single-layer and multilayer assemblies in the frequency band from 8 to 12 GHz and radar characteristics of equivalent scattering square in the frequency band from 1 to 40 GHz have also been studied. Application of the developed assemblies for manufacturing flexible radar shields to reduce radar visibility of land-based objects has been recommended.

ФАН НЬЯТ ЗАНГ

**ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ СИЛИКАГЕЛЕВЫХ И  
БЕНТОНИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ  
ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – “Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники”

---

|                    |                         |   |                    |
|--------------------|-------------------------|---|--------------------|
| Подписано в печать | 02.05.2007.             | Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> . | Бумага офсетная.   |
| Гарнитура «Таймс». | Печать ризографическая. |   | Усл. печ. л. 1,63. |
| Уч.-изд. л. 1,3.   | Тираж 60 экз.           |   | Заказ 299.         |

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.