

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники,  
доктор технических наук, профессор

А.А. Шедуганов

2014 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу **Бадьина Александра Владимировича** «*Электродинамическая анизотропия свойств многокомпонентных неоднородных диэлектриков*», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Диссертационная работа Бадьина Александра Владимировича «Электродинамическая анизотропия свойств многокомпонентных неоднородных диэлектриков» посвящена исследованию взаимодействия электромагнитного излучения с композитными материалами природного и искусственного происхождения.

**Актуальность диссертационной работы** определяется недостаточностью данных по электрофизическим свойствам неоднородных анизотропных материалов природного и искусственного происхождения в СВЧ и КВЧ областях. Направление работы соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899) – индустрия наносистем, рациональное природопользование.

Таким образом, актуальность темы, выбранной для диссертационных исследований, сомнений не вызывает.

**Диссертационная работа** состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Весь материал изложен на 110 страницах, содержит 88 рисунков, 4 таблицы и библиографический список из 91 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель и задачи исследования, показывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены защищаемые положения и дана общая характеристика диссертационной работы. Отмечен личный вклад автора, приведена информация об апробации результатов работы.

**В первой главе** представлен обзор литературы по современным диэлектрическим анизотропным многокомпонентным композиционным радиоматериалам, а также методам исследования их диэлектрических свойств. Представлены наиболее распространенные современные многокомпонентные диэлектрические композитные материалы, а также модельное описание взаимодействия с электромагнитной волной. Далее в первой главе описываются методы экспериментального исследования анизотропии диэлектрической проницаемости многокомпонентных композитных материалов. На основании проведенного аналитического обзора сформулированы два основных вывода: исследование анизотропии, вызванной в изотропной среде неоднородными несферическими включениями, является актуальной задачей, важной как для более глубокого понимания механизмов формирования такой анизотропии, так и для практических применений методов и приборов радиоволновой диагностики природных сред, создания искусственных композиционных материалов; отсутствует описание электродинамической модели композиционного материала с

несферическими включениями различных видов, позволяющее численно анализировать влияние ориентационных, размерных, диэлектрических параметров включений на анизотропные свойства композита в целом, недостаточно экспериментальных данных в широкой полосе радиочастот, включая диапазон КВЧ.

**Вторая глава** посвящена модельному описанию взаимодействия электромагнитной волны с диэлектрическими включениями эллипсоидальной формы, расположенными случайным образом в диэлектрической матрице, и их влиянию на анизотропию диэлектрической проницаемости композитного материала в целом. Приводятся выражения для угловой зависимости коэффициента прохождения электромагнитной волны для плоскопараллельного слоя композитного материала, используя которые возможно моделировать угловую зависимость коэффициента прохождения электромагнитной волны при различных значениях анизотропии диэлектрической проницаемости композитного материала. Представлены результаты расчета коэффициента прохождения для двух ключевых случаев: матрица с плоскими сплюснутыми эллипсоидальными включениями и матрица с вытянутыми вдоль одной оси стержнеобразными эллипсоидами. На конкретных примерах показана возможность численных оценок анизотропии диэлектрической проницаемости однокомпонентных и многокомпонентных неоднородных объектов с дискообразными и стержнеобразными включениями, позволяющих прогнозировать параметры различных композитных материалов.

**В третьей главе** приводится описание экспериментальных средств, методов исследования и измерений. Представлены результаты исследования поляризационных свойств неоднородных анизотропных материалов в квазиоптических пучках, приводятся результаты экспериментальных исследований поляризационных свойств плоскопараллельного образца керна горной породы. Также в третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований в квазиоптических пучках угловой зависимости коэффициента прохождения многослойных углеродных нанотрубок в полистироле, подверженном растяжению. В главе отмечается, что полистирол, подверженный растяжению, может использоваться как поляризатор в области крайневисоких частот. Экспериментально показана возможность локальной СВЧ диагностики анизотропии многокомпонентного неоднородного материала резонаторным методом. Приводится описание лабораторного макета компактного устройства, позволяющего проводить оперативный радиоволновый контроль анизотропии горной породы.

**В заключении** перечислены основные научные результаты работы.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в:

- полученных новых результатах моделирования поляризационных свойств природной многокомпонентной неоднородной диэлектрической среды, описываемой диэлектрической матрицей, заполненной случайным образом расположенными эллипсоидальными включениями нескольких видов, различающихся значениями диэлектрической проницаемости и соотношений главных осей эллипсоидов;

- экспериментально измеренных величинах анизотропии диэлектрической проницаемости неоднородной горной породы в квазиоптическом пучке в области частот 34-177 ГГц;

- получении в диапазоне 101–177 ГГц экспериментальных данных по частотной зависимости коэффициента прохождения электромагнитной волны для композитного материала на основе полистирола и многослойных углеродных нанотрубок со средней длиной 130 мкм и массовой концентрацией 0,25%, подверженного растяжению в 1,5 раза;

- показанной возможности исследования локальных значений анизотропии композитного материала с помощью открытого резонатора с измерительным отверстием прямоугольного сечения в одном из зеркал.

**Практическая значимость диссертации** заключается в том, что:

- показанная возможность определения направлений анизотропии электрофизических свойств горных пород в радиочастотном диапазоне открывает перспективы создания новых средств оперативной диагностики свойств керна;
- полученные результаты по влиянию водосодержания древесины на её радиоволновую анизотропию могут быть использованы для уточнения характеристик радиоволновых влагомеров;
- полученные результаты измерений коэффициента прохождения композитных материалов на основе углеродных нанотруб указывают на возможность создания на основе композитных материалов, состоящих из углеродных нанотруб и полистирола, поляризаторов СВЧ и КВЧ диапазонов.

**Достоверность результатов** обеспечена корректностью постановки задач и физической обоснованностью, согласованием полученных результатов разными методами для одних и тех же образцов. Достоверность достигается корреляцией результатов, полученных методом открытого резонатора с аналогичными результатами, полученными волноводным СВЧ рефлектометром и волноводно-резонаторным методом для одних и тех же исследуемых образцов. Достоверность экспериментальных результатов обоснована измерением спектров диэлектрической проницаемости образцов, аттестованных в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии, как стандартные образцы предприятия.

**Результаты работы** использовались в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) при выполнении НИР, а также в учебном процессе.

**Апробация работы.** Материал диссертационной работы достаточно полно изложен в 11 публикациях, 4 из которых размещены в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 в изданиях, индексируемых Web of Science. Материалы диссертации широко обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях.

**Автореферат** и имеющиеся публикации достаточно полно отражают основные результаты и выводы диссертации.

#### **Замечания по диссертации:**

1. Недостаточно представлены ограничения применимости математической модели взаимодействия электромагнитного излучения с многокомпонентным диэлектриком без учета рассеяния на включениях.
2. В третьем положении, выносимом на защиту, отсутствует пояснение входящего в него символа  $a$ , что затрудняет понимание положения. Аналогично в формулах (1.8) – (1.10), (1.21), (1.22) диссертации нет пояснения входящих в них символов.
3. В п.3 заключения говорится о созданных квазиоптических измерительных комплексах, включая ГВЧ диапазон, но в диссертации результаты измерений в этом диапазоне не приводятся.
4. В диссертации представлены экспериментальные исследования неоднородных материалов в более узком частотном диапазоне по отношению к численному моделированию.
5. В диссертации встречается термин «направление анизотропии», вызывающий недопонимание. Что именно под «направлением анизотропии» понимается и как это направление выделяется.
6. Коэффициент анизотропии диэлектрической проницаемости вводится на стр. 40 диссертации; на страницах 50 и 82 без пояснения также используются другие формы записи. В автореферате качество рисунков 4-9, 13 низкое, что не позволяет однозначно понять надписи в поле рисунков.

Как видно из замечаний, все они относятся к представлению результатов работы и не снижают значимость результатов проведённых исследований.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.03 – Радиофизика в части следующих пунктов: «Разработка теоретических и технических основ новых методов и систем связи, навигационных, активных и пассивных локационных систем, основанных на использовании излучения и приёма волновых полей различной физической природы и освоении новых частотных диапазонов», «Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах»..

Диссертация А.В. Бадьина «Электродинамическая анизотропия свойств многокомпонентных неоднородных диэлектриков» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в Томском государственном университете под руководством доктора технических наук, заведующего кафедрой радиоэлектроники Г.Е. Дунаевского. В ней решена актуальная задача влияния анизотропии многокомпонентных неоднородных диэлектриков на взаимодействующую с ними электромагнитную волну.

Результаты диссертации А.В. Бадьина могут быть использованы для совершенствования аппаратуры и квазиоптических методов исследования образцов горных пород, в частности для экспресс-диагностики анизотропии свойств кернов в научно-исследовательской лаборатории структурной петрологии и минерагении Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

В целом, диссертация А.В. Бадьина по своему содержанию, объёму выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор, Александр Владимирович Бадьин заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Доклад А.В. Бадьина по диссертационной работе заслушан 27 ноября 2014 года на научном семинаре кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. На семинаре присутствовали 16 человек, в том числе 3 доктора наук, 6 кандидатов наук. Протокол № 7.

Председатель семинара  
заведующий кафедрой СВЧиКР ТУСУРа:  
кандидат ф.-м. наук, с.н.с.



С.Н. Шарангович

Рецензент: доктор ф.-м. наук, профессор кафедры  
СВЧиКР ТУСУРа



Г.Г. Гошин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Ленина пр., 40, Томск, 634050

Шарангович Сергей Николаевич, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, тел. (3822)413643, e-mail: shr@tusur.ru

Гошин Геннадий Георгиевич, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, тел. (3822) 701518, e-mail: GoshinGG@svch.tusur.ru