

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ КАФЕДРЫ РАДИОФОТОНИКИ И МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КНИТУ-КАИ В ОБЛАСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ СЕНСОРИКИ

А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

Аннотация. Статья посвящена обзору научных исследований и практических разработок в области микроволновых измерительных устройств и систем, выполненных в КНИТУ-КАИ сотрудниками кафедры радиофотоники и микроволновых технологий (РФМТ), в том числе при участии научных работников НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем. Основное внимание уделяется методам и средствам контроля диэлектрических параметров материалов и сред в СВЧ диапазоне. Выделены основные этапы становления и развития направления, показаны дальнейшие перспективы развития.

Ключевые слова: микроволновые датчики, комплексная диэлектрическая проницаемость, брегговские СВЧ-структуры, измерительные резонансные структуры, диэлектрические материалы, физико-химические параметры.

Введение

Последние десятилетия знаменуются бурным развитием информационных, телекоммуникационных и интеллектуальных систем, что неразрывно связано с расширением областей применения электроники, фотоники и цифровых технологий. Достижения в микротехнологиях, связанные с миниатюризацией и усложнением микроэлектронной аппаратуры, а также возможности современных систем компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования обеспечили нынешних разработчиков мощными инструментами для создания высокотехнологичных устройств нового поколения. Все это способствует тому, что разработки, которые ранее считались дорогостоящими или малоэффективными на современном этапе испытывают свое перерождение. Сказанное во многом справедливо для такой научно-практической области как микроволновые измерения физических величин. Датчики и измерительные системы, использующие в качестве первичного информационного сигнала электромагнитное поле микроволнового диапазона, обладают достаточно долгой историей существования: момент первого появления почти совпадает с началом освоения микроволнового диапазона в радиолокации и связи. На текущий момент микроволновые датчики получили широкое распространение в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, системах безопасности и во многих других сферах. Условно области применения микроволновых измерений можно разделить на измерение физико-химических параметров материалов и веществ, геометрических параметров, механических величин, параметров движения и температуры [1-6]. Особое значение получили методы, основанные на анализе диэлектрических характеристик физических объектов. Несомненный вклад в общее развитие диэлектрических методов микроволнового контроля внесли исследования, проведенные работниками кафедры радиофотоники и микроволновых технологий и НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем КНИТУ-КАИ. Целью статьи представляется проследить этапы становления и развития данного исследовательского направления, показать современное состояние и определить перспективы и пути дальнейшего совершенствования.

1. Этапы развития и современное состояние

У истоков научного направления стояли профессор, д.т.н. Морозов О.Г., профессор, д.т.н. Морозов Г.А., профессор, д.т.н. Седельников Ю.Е., доцент, к.т.н. Насыбуллин А.Р., доцент, к.т.н. Шакиров А.С., доцент, к.т.н. Веденькин Д.А., доцент, к.т.н. Самигуллин Р.Р. Пионерские работы в этом направлении были посвящены методам определения электрофизических параметров водонефтяных сред в СВЧ диапазоне электромагнитных волн. Задача была обусловлена потребностями высокоэффективных микроволновых промышленных технологий в определении диэлектрических параметров объекта обработки как на этапе разработки технологической установки, так и в процессе обработки. В ходе работ были реализованы лабораторные и технологические измерительные установки, осуществляющие измерение и контроль комплексной диэлектрической проницаемости нефтесодержащих продуктов в диапазоне стандартизированных частот для промышленного применения микроволнового излучения. В основе лабораторных измерительных средств лежали классические методы волноводных диэлектрических СВЧ измерений, приспособленные для контроля нефтяных и других жидких продуктов. Для технологических вариантов разработан ряд новых подходов на базе контроля КСВ (коэффициента стоячей волны) рабочей камеры. Совокупность полученных теоретических и практических результатов позволили предложить концепцию адаптивных микроволновых технологических комплексов для нефтеперерабатывающей отрасли, ключевой особенностью которых выступал мониторинг в реальном времени изменяющихся в процессе СВЧ воздействия электрофизических и температурных характеристик объекта обработки, а также параметров электромагнитного поля и внешней среды [7]. На основе данной информации посредством разработанных моделей адаптивного управления производится непрерывная регулировка режимов обработки с целью получения заданных характеристик конечного продукта, уменьшения энергозатрат, повышения надежности технологической установки и сокращения продолжительности процесса обработки.

В дальнейшем концепция адаптивной СВЧ обработки была перенесена на другие типы технологических процессов, среди которых особого внимания заслуживают процессы химической переработки полимеров [8] и отверждения термореактивных композиционных материалов [9-10]. Реализация комплексов предполагала совершенствование микроволновых технологий мониторинга электрофизических параметров материалов и сред. Последующее развитие направления лежало в области резонансных измерений и эффективных методов информационного зондирования сенсорных элементов. СВЧ датчики на резонаторах различного исполнения предлагались для внедрения как в микроволновые технологические установки, так и в установки с другими типами воздействия для контроля физико-химических параметров материалов. Вопрос информационного зондирования играет важную роль в работе измерительной системы, параметры которой напрямую влияют на метрологические характеристики. В научно-исследовательских разработках кафедры радиофотоники и микроволновых технологий широко представлена идеология двухчастотного оптического зондирования резонансных структур для определения центральной частоты контура, родоначальниками которой являются профессора Морозов О.Г. и Ильин Г.И. [11]. Принцип двухчастотного зондирования был с успехом перенесен на резонансные микроволновые структуры, в том числе выступающие в качестве датчиков, и предложен метод девиации промежуточной частоты, позволяющий одновременно получать информацию о резонансной частоте и добротности резонансной характеристики [12-13].

Следующий этап развития направления связан с разработкой нового типа датчиков диэлектрического контроля на основе периодических резонансных СВЧ структур. Проблемы, возникающие при создании СВЧ датчиков, в первую очередь связаны с выбором конфигурации и параметров СВЧ устройства, выступающего в качестве преобразовательного элемента. В этой связи актуальной научно-технической задачей является нахождение

новых путей совершенствования технико-экономических характеристик и расширения функциональных возможностей датчиков, в основе которых лежат разработка особой конфигурации электродинамической структуры, выполняющей роль чувствительного элемента, и оптимизация ее параметров.

Периодические структуры с эффектом возникновения запрещенных частотных областей, обусловленных брэгговским отражением, встречаются во многих областях науки и техники. Наибольшее распространение подобные элементы получили в оптическом диапазоне. Именно в оптике впервые создаются измерительные преобразователи на основе волоконно-оптической решетки Брэгга и одномерных фотонных кристаллов, являющихся реализациями распределенных брэгговских отражателей. Переложение уже нашедших отражение в ряде прикладных задач принципов анализа и синтеза оптических резонансных сенсоров в область радиочастот, позволяет раскрыть новые стороны и области применения известных и хорошо изученных функциональных элементов.

Подобные структуры, реализованные в СВЧ диапазоне электромагнитных волн, в разных источниках именуется по-разному, например, встречаются следующие наименования: СВЧ фотонные кристаллы, электромагнитные кристаллы, микроволновые решетки Брэгга, EBG (Electromagnetic Band Gap) структуры. В КНИТУ-КАИ предложен термин «брэгговская СВЧ структура», как наиболее ёмкое определение, учитывающее глубокую концептуальную связь СВЧ и оптических резонансных периодических структур. Несомненно, СВЧ периодические структуры хорошо изучены и широко используются в различных областях прикладной электродинамики с середины прошлого столетия. В частности, особое значение они получили при создании замедляющих структур, селективных элементов, резонаторов, антенн бегущих и вытекающих волн и др. Предпосылками к возобновлению научного интереса к таким структурам явились публикации американских исследователей Эли Яблоновича и Саджива Джона [14-15], впервые предложившие концепцию фотонных кристаллов. В своих трудах Яблонович предложил исследовать характеристики фотонных кристаллов на их аналогах в СВЧ диапазоне. Предложенный подход в последствии способствовал образованию целой волны публикаций, посвященных взаимному трансферу технологий между оптикой и микроволновой физикой фотонно-кристаллических структур, интерес к которому не утихает и в настоящий момент. Одним из перспективных направлений, образованных в результате трансфера технологий, является применение фотонных кристаллов в задачах сенсорики. СВЧ фотонные кристаллы и особенно их одномерный вариант – брэгговская СВЧ структура обладают свойствами, позволяющими выступать им в качестве сенсоров различных физических величин. Аналогично волоконно-оптическим брэгговским решеткам, применяемым в качестве рефрактометров [16-18], брэгговские СВЧ структуры можно использовать для измерения диэлектрических, магнитных и проводящих свойств веществ. Исследованию измерительных задач, заключающихся в определении электрофизических параметров материальных сред и решаемых с помощью брэгговских СВЧ структур, посвящены работы Усанова Д.А., Скрипаля А.В., Гарсия-Банос Б., Катала-Чивера Х. М., Радоник В. [19-21]. В КНИТУ-КАИ развит обобщенный подход к анализу и синтезу брэгговских СВЧ-структур, рассматриваемых как чувствительные элементы для применения в устройствах диэлектрического контроля. Подход позволяет адаптировать конфигурацию датчика для решения широкого спектра измерительных задач.

Преимуществом использования брэгговских структур перед существующими датчиками для диэлектрических измерений является увеличение чувствительности измерения. Доказательством данного факта может послужить работа [22], посвященная исследованию одномерной периодической структуры в оптическом интегральном исполнении для реализации перестраиваемой линии задержки. В работе показано, что благодаря стремлению к нулю групповой скорости v_g (производная от дисперсионной кривой $\omega-k$) при приближении

к границам запрещенной зоны (полосы заграждения), изменение волнового числа Δk на заданной частоте ω при малом приращении показателя преломления от n до n' (Рис. 1, а) будет больше, чем для случая отсутствия периодической структуры (Рис.1, б).

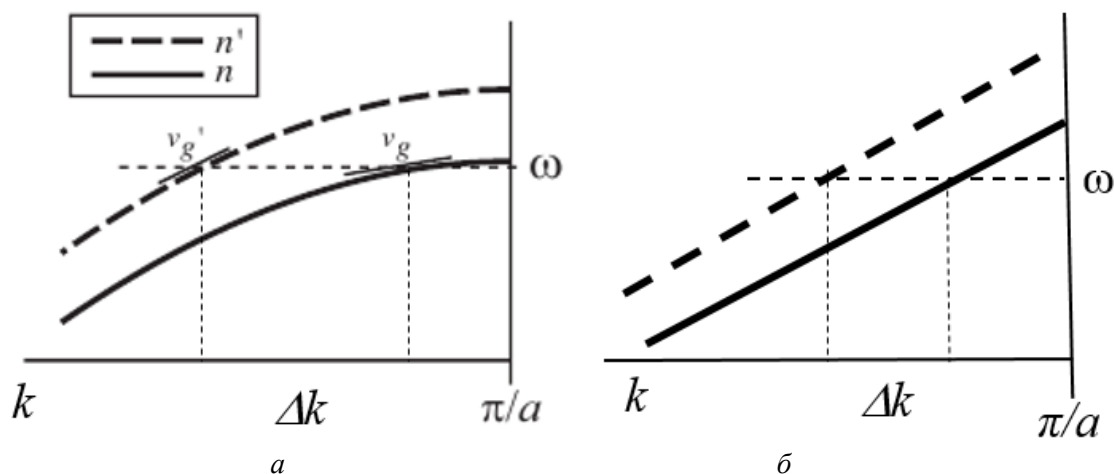


Рис. 1. Дисперсионная кривая периодической структуры при малом приращении показателя преломления: а – при наличии периодической структуры, б – при отсутствии периодической структуры

Изменение показателя преломления оптической интегральной структуры аналогично изменению диэлектрической проницаемости внешней среды для аналогичной периодической структуры в СВЧ диапазоне. Следовательно, фазовый сдвиг ΔkL , где L – длина структуры, примет наибольшее значение на границах полосы заграждения и чувствительность к изменению диэлектрической проницаемости на этих частотах будет максимальна. В общем случае принцип контроля диэлектрических или других физико-химических свойств сред на базе микроволновых периодических структур можно отнести к ближнеполевым или замкнутым типам микроволновых измерений [2].

На кафедре радиофотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ впервые метод контроля диэлектрических параметров среды посредством брэгговской СВЧ структуры описан в кандидатской диссертации Насыбуллина А.Р. «Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата» (научный руководитель Морозов О.Г.). В работе предлагается осуществление мониторинга диэлектрической проницаемости жидкого реагента с помощью коаксиального кабеля с внедренными периодическими измерительными ячейками, формирующими брэгговскую структуру. Результаты исследований заложили основу для решения ряда прикладных задач диэлектрической сенсорики [23-24]. Малость электрических размеров измерительных ячеек позволяет не учитывать паразитное излучение из отверстий и, следовательно, его вклад в погрешность измерения будет мал. С другой стороны, такая конфигурация датчика в силу небольшого возмущения диэлектрического заполнения кабеля исследуемой жидкостью не обеспечивает требуемую чувствительность преобразования в случаях высокоточных измерений.

Коаксиальный кабель с периодическими неоднородностями в виде ячеек послужил прототипом для реализации дискретного уровнемера для жидких продуктов [25-26]. Принцип измерения основан на расщеплении брэгговского резонанса на два резонанса, каждый из которых соответствует одному из двух сред, в которые погружен измеритель. Метод позволяет также анализировать многофазные жидкости, но точность при этом зависит от толщины слоев. Реализация дискретного уровнемера и рекомендации к построению непрерыв-

ного уровнемера представлены в кандидатской диссертации Севастьянова А.А. «Брэгговские СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле для систем контроля уровня жидких сред» (научный руководитель Морозов О.Г.).

Развитие коаксиальных СВЧ датчиков на брэгговских структурах продолжалось в области коаксиальных волноводных систем, обладающих по сравнению с кабелями большими возможностями по увеличению чувствительности, надежностью и воспроизводимостью параметров. Особое внимание уделено кусочно-однородным и кусочно-регулярным коаксиальным линиям с внешним проводником, оснащенным малыми отверстиями для введения исследуемой жидкости в измерительное пространство датчика [27-28]. Результаты исследований нашли отражение в материалах кандидаткой диссертации Фархутдинова Р.В. «Средства контроля диэлектрических параметров жидких сред на основе брэгговских СВЧ структур в коаксиальном волноводе» (научный руководитель Насыбуллин А.Р.). Дальнейшее совершенствование метрологических и технико-экономических характеристик коаксиальных датчиков для диэлектрического контроля жидкостей заключалось в переходе от закрытых коаксиальных линий к полукрытым. Особенностью последних является минимальное паразитное излучение во внешнее пространство при улучшенных показателях воспроизводимости измерений за счет облегченного процесса заполнения и освобождения измерительного объема исследуемой жидкостью.

Комплексный подход к изучению свойств брэгговских структур в СВЧ диапазоне позволил перенести концепцию построения преобразовательных элементов на другие типы направляющих систем, в частности рассмотрены варианты и проведена физическая реализация структур на диэлектрических волноводах [29] и планарных линиях передачи [30]. Последние имеют особое значение при проектировании СВЧ датчиков по причине относительной простоты реализации, компактности и функциональности. Планарные датчики позволяют исследовать жидкие, твердые и сыпучие вещества и материалы.

На рис. 2 представлены варианты брэгговских СВЧ структур, использованных как преобразовательные элементы в задачах диэлектрических измерений.



Рис. 2. Брэгговские СВЧ структуры

Наряду с брэгговскими СВЧ структурами на кафедре радиوفотоники и микроволновых технологий активно ведутся разработки измерительных резонаторов для анализа комплексной диэлектрической проницаемости природных и искусственных сред различного рода. В рамках научного проекта «Методы и алгоритмы анализа сложных сред» под руководством профессора кафедры РИИТ, д.ф.-м.н. Нигматуллина Р.Р. в сотрудничестве с Политехническим институтом Бари (Италия) исследуются высокочувствительные резонансные СВЧ датчики в планарном исполнении для диэлектрической характеристики оливкового масла [31-32]. Целью исследований представляется решение задач выявления фальсификаций оливковых масел и определение степени их деградации. Резонансные СВЧ датчики также были разработаны для процессов контроля полимеризации композитных материалов, влажности органических отходов животноводства, измерения параметров нефтяных сред и автомобильного топлива.

Непрерывное увеличение областей применения микроволнового диапазона и тенденция к совершенствованию систем связи гражданского и специального назначений приводят к необходимости решения задачи определения электрофизических характеристик материалов и веществ в широком диапазоне частот. На кафедре радиوفотоники и микроволновых технологий широко представлены различные подходы, позволяющие находить частотные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей твердых, жидких и сыпучих сред однородной и гетерогенной структуры. Данные подходы основаны как на классических лабораторных и полупромышленных методах измерения электрофизических свойств в СВЧ диапазоне (волноводные, резонансные, открытого пространства), так и на не традиционных методах. Появление последних объясняется существованием характерных ограничений у классических методов, связанных с зависимостью точности измерений от диапазона определяемых величин, типа и структуры объекта измерений, параметров измерительной цепи. Совершенствование классических методов заключается в улучшении алгоритмов вычисления искомых параметров, адаптации измерительных установок к конкретному материалу и повышении качества калибровочных процедур. В числе выполненных работ, касающихся измерения диэлектрических параметров материалов в СВЧ диапазоне, можно отметить определение электрофизических характеристик авиационных композитных материалов [33], параметров затухания в различных строительных материалах [34], диэлектрических параметров поглощающих покрытий [35] и микроволновых метаматериалов [36].

Тесную связь с рассмотренными ранее задачами имеет проблема определения коэффициента отражения отражающих материалов, используемых для производства рефлекторов крупногабаритных антенн. Сотрудниками кафедры РФМТ совместно с сотрудниками кафедры РТС была реализована работа под руководством профессора Седельникова Ю.Е. по реализации метода измерения коэффициента отражения сеточных материалов в дециметровом диапазоне, особенностью которого является установка исследуемого образца в стенке волновода или в качестве земляного проводника полосковой линии передачи [37]. В работе был апробирован способ калибровки измерительной установки по результатам компьютерного численного моделирования установки и аналитических математических моделей сетчатого материала.

2. Перспективы развития

Современное состояние направления микроволновых сенсорных систем характеризуется существованием множества вариантов конструктивной реализации датчиков для широкого спектра приложений. Тем не менее в основе большинства датчиков лежат принципы, физические возможности которых можно считать исчерпанными. Дальнейшее развитие направления возможно в поиске новых принципов или комбинировании существующих с целью усиления их возможностей. К перспективным подходам, позволяющим улучшить

характеристики датчиков, можно отнести использование сенсорных структур в виде электромагнитных кристаллов, поверхностных плазмон-поляритонов, метаматериалов, резонаторов Фано. В контексте увеличения областей применения и расширения функциональных возможностей в последнее время активно обсуждаются микроволновая биосенсорика и квантовая микроволновая сенсорика. В направлении повышения точности измерений в практику разработчиков микроволновых датчиков привлекаются современные методы численного электромагнитного моделирования, позволяющие проводить многокритериальную оптимизацию конструкции датчика, облегчают анализ погрешностей измерений и предоставляют разработчикам новый инструмент – виртуальную калибровку, которая в совокупности с физической калибровкой открывает большие возможности по улучшению метрологических характеристик. С появлением на рынке большой номенклатуры монолитных микроволновых интегральных схем разработка средств мониторинга информационных параметров преобразовательных элементов выходит на новый этап развития, когда можно создать компактный модуль, не уступающий по характеристикам в узкой полосе частот современным векторным анализаторам СВЧ цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kremer, F.* Broadband Dielectric Spectroscopy / F. Kremer, A. Schönhals. – Berlin [and etc.]: Springer-Verlag, 2003. – 729 p.
2. *Nyfors, E.* Industrial Microwave Sensors / E. Nyfors, P. Vainikainen. – Norwood: Artech House, 1989. – 351 p.
3. *Викторов, В.А.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
4. *Бензарь, В.К.* Техника СВЧ-влажнометрии / В.К. Бензарь. – Минск: Изд-во «Вышэйшая школа», 1974. – 352 с.
5. *Kupfer, K. (Ed.)* Electromagnetic Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances / K. Kupfer. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 545 p.
6. *Chen, L.F.* Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 549 p.
7. *Морозов, Г.А.* Современные подходы к построению адаптивных СВЧ технологических комплексов обработки высоковязких водонефтяных смесей / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Я.Н. Шангараева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 59-66.
8. *Морозов, Г.А.* Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин, А.Р. Насыбуллин и др. // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 3 (13). – С. 13-24.
9. *Морозов, Г.А.* Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1-2. – С. 568-572.
10. *Морозов, О.Г.* Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Р.Р. Самигуллин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1 (15). – С. 67-74.
11. *Куприянов, В.Г.* Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / В.Г. Куприянов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, П.Е. Денисенко, Д.А. Веденькин,

А.А.Талипов, А.А.Василец, А.Р. Насыбуллин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 200-204.

12. Морозов, О.Г. Устройство для измерения характеристик резонансных структур / О.Г.Морозов, Г.А. Морозов, Д.И. Касимова, А.А. Севастьянов, А.А. Талипов, О.А. Степущенко, А.Р. Насыбуллин, П.В. Гаврилов, И.А. Макаров // Патент на полезную модель RU 141415 U1, 10.06.2014. Заявка № 2013152608/28 от 26.11.2013.

13. Морозов, О.Г. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г.Морозов, А.Р. Насыбуллин, Д.А.Веденькин и др.// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 76-86.

14. *Yablonovitch, E.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Phys Rev Lett.* – 1987. – 58. – 2059-2062.

15. *John, S.* Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // *Phys Rev Lett.* – 1987. – 58. – 2486.

16. *Patil, J.J.* Comprehensive and Analytical Review on Optical Fiber Refractive Index Sensor / Patil, J.J., Patil Y.H., Ghosh A. // *Proceedings of the Fourth International Conference on Trends in Electronics and Informatics.* – 2020. – PP. 169-175.

17. *Fu, H.* Microchanneled Chirped Fiber Bragg Grating Formed by Femtosecond Laser-Aided Chemical Etching for Refractive Index and Temperature Measurements / Fu H., Zhou K., Saffari P., Mou C., Zhang L., He S., Bennion I.// *IEEE Photonics Technology Letters.* – 2008. – Vol. 20. – No. 19. – Pp. 1609-1611.

18. *Schroeder, K.* A fibre Bragg grating refractometer / Schroeder K., Ecke W., Mueller R., Willsch R., Andreev A. // *Meas. Sci. Technol.* – 2001. – 12 – Pp. 757–764.

19. Усанов, Д.А. Использование сверхвысококачественной коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков / Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В. и др.// Радиотехника и электроника. – 2020. – № 5 (65). – С. 495-503.

20. *Garcia-Banos, B.* Enhancement of Sensitivity of Microwave Planar Sensors With EBG Structures / Garcia-Banos, B., Cuesta-Soto F., Griol, A. et al. // *IEEE Sensors Journal.* – 2006. – 6. – PP. 1518 – 1522.

21. *Radonić, V.* Microfluidic EBG Sensor Based on Phase-Shift Method Realized Using 3D Printing Technology / Radonić V., Birgermajer S, Kitić G. // *Sensors.* – 2017. – 17. – 892.

22. *Povinelli, M.L.* Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays / Povinelli M.L., Johnson S.G., Povinelli M.L., Joannopoulos J.D. // *Optics Express.* – 2005. – Vol. 13, No. 18. – P. 7145-7159.

23. Морозов, Г.А. Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах / Г.А. Морозов, Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р. и др.// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 65-70.

24. Насыбуллин, А.Р. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле / А.Р.Насыбуллин, О.Г.Морозов, А.А.Севастьянов // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 3. – С. 8. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/mac/mar14/8/text.html>.

25. Насыбуллин, А.Р. Преобразовательный элемент измерителя уровня жидких продуктов на основе брэгговской СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле / Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Севастьянов А.А. и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 216. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16390>.

26. Морозов, О.Г. Брэгговские СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле для систем контроля уровня жидких сред / О.Г. Морозов, А.Р.Насыбуллин, А.А. Севастьянов // Казань: ООО «Новое знание», 2016. – 128 с.

27. Фархутдинов, Р.В. Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном волноводе как датчик контроля диэлектрических параметров жидких сред / Фархутдинов Р.В., Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г. и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – №4-2 (22). – С. 114-120.

28. Nasybullin, A.R. Means for monitoring the dielectric parameters of liquid media based on quasiperiodic Bragg microwave structures in a coaxial waveguide / A.R.Nasybullin, O.G. Morozov, G.A.Morozov, R.V.Farkhutdinov et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1499. – 012015.

29. Насыбуллин, А.Р. СВЧ диэлектрический волновод круглого сечения с брэгговскими периодическими неоднородностями / А.Р. Насыбуллин, Т.М. Ишкаев // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2 (45). – 7 с. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4232>.

30. Насыбуллин, А.Р. Преобразовательные элементы на основе полосковых брэгговских структур для СВЧ датчиков параметров технологических процессов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 129-131.

31. Nigmatullin, R.R. Advanced and sensitive method by discrete geometrical invariants for detection of differences between complex fluids / R.R.Nigmatullin, A.Vorobev, A.R. Nasybullin et al. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2019. – №73. – С. 265-274.

32. Ivanov, A. Design and characterization of a microwave planar sensor for dielectric assessment of vegetable oils / Ivanov A., Agliullin T., Vorobev A., Nigmatullin R.R., Nasybullin A., Morozov O., Laneve D., Portosi V., Prudenzeno F., D’Orazio A., Grande M. // Electronics. – 2019. – №9(8). – 1030.

33. Веденькин, Д.А. Оценка характеристик согласования антенн, размещённых на поверхности из композитного материала / Д.А. Веденькин, Ю.Е. Седельников, А.Р. Насыбуллин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2015. – № 1 (25). – С. 6-15.

34. Куприянов, В.Н. К исследованию ослабления электромагнитных волн ограждающими конструкциями зданий/ В.Н. Куприянов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин и др. // Приволжский научный журнал. – 2016. – № 1 (37). – С. 38-45.

35. Насыбуллин, А.Р. Определение радиочастотных характеристик композиций с субмикронными углеродными структурами / А.Р. Насыбуллин, М.П. Данилаев, Е.А. Богослов // Материалы 11-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2015». – 2015. – С. 118.

36. Павлов, В.В. Устройство для измерения параметров микроволновых метаматериалов / В.В. Павлов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «V Научный форум Телекоммуникации: Теория и Технологии «ТТТ-2021». – 2021. – С. 195-196.

37. Данилов И.Ю., Романов А.Г., Насыбуллин А.Р., Седельников Ю.Е. Способ измерения коэффициента отражения материала рефлектора // Патент на изобретение 2757357 С1, 14.10.2021. Заявка № 2020117266 от 12.05.2020.

SCIENTIFIC RESEARCH AND TECHNICAL ENGINEERING OF THE KNRTU-KAI DEPARTMENT OF RADIO PHOTONICS AND MICROWAVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF MICROWAVE SENSORS

A.R. Nasybullin, O.G. Morozov, G.A. Morozov

Kazan National Research Technical University named
after A.N. Tupolev-KAI
10, K.Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the review of scientific research and practical engineering in the field of microwave measuring devices and systems conducted in KNITU-KAI by employees of the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies (RPMT) including the participation of scientists from the Research Institute of Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems. The main attention is paid to methods and means of materials and mediums dielectric parameters monitoring in the microwave range. The basic stages of formation and development of the direction are allocated, further prospects of development are shown.

Keywords: microwave sensors, complex dielectric constant, Bragg microwave structures, measuring resonant structures, dielectric materials, physicochemical parameters.

Дата поступления статьи в редакцию 20.12.2021