

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

Кафедра физики твердого тела

ПРИМЕНЕНИЕ БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СВЧ-МИКРОСКОПА,
РАБОТАЮЩЕГО В АВТОДИННОМ РЕЖИМЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
МЕДИЦИНСКИХ ЗАДАЧ

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ
студента 2 курса
по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Шароватова Виталия Олеговича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-.м.н.

А.Э.Постельга

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

Ал.В. Скрипаль

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2020

Введение. Современная медицина требует применения последних технических достижений для совершенствования методов диагностики. Основным требованием к таким методам является бесконтактное неразрушающее воздействие технических средств на органы и ткани пациента. Это требование обосновано этическими нормами медицины, а также заботой о комфорте пациентов.

Среди множества методов диагностики, применяемых в настоящее время можно выделить ближнеполевую СВЧ-микроскопию.

Ближнеполевая СВЧ-микроскопия – это неразрушающий прямой метод исследования, позволяющий с контролируемой степенью локальности и чувствительности получать информацию о поверхностных и подповерхностных свойствах различных сред. Этот метод базируется на регистрации СВЧ-воздействия, локализованного в ближнем поле зонда. Это позволяет резко поднять пространственное разрешение и преодолеть дифракционный предел для данных частот.

Работая в автодинном режиме, ближнеполевой СВЧ-микроскоп способен определять динамические параметры движения объектов, что позволяет использовать его при контроле физиологических параметров живых систем. Также ближнеполевой СВЧ-микроскоп позволяет регистрировать изменения таких параметров, которые зависят от структуры материала, что может позволить оценить качество лечения.

Целью бакалаврской работы являлось: показать возможность применения ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме, для решения медицинских задач.

Магистерская работа содержит 4 главы:

1. БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ-МИКРОСКОПИЯ. ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ

- 1.1. Основные понятия о принципе работы
- 1.2. Виды измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа
 - 1.2.1. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с диэлектриком в качестве зонда
 - 1.2.2. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с диафрагмой в качестве зонда
 - 1.2.3. Применение обрыва коаксиальной линии в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа
 - 1.2.4. Сложные виды зондов ближнеполевого СВЧ-микроскопа
- 1.3. Применение ближнеполевого СВЧ-микроскопа в сканирующем режиме

2. ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ-АВТОДИНОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

- 2.1. СВЧ-автодин и его принцип работы
- 2.2. Применение СВЧ-автодина для контроля дыхания и сердцебиения

3. БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОП, РАБОТАЮЩИЙ В АВТОДИННОМ РЕЖИМЕ КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИВОЙ СИСТЕМЫ

- 3.1. Применение ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме для определения параметров упругих сферических оболочек на примере модели глазного яблока
- 3.2. Применение системы диэлектрик-диафрагма в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме для определения параметров упругих сферических оболочек на примере модели глазного яблока

4. БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОП, РАБОТАЮЩИЙ В АВТОДИННОМ РЕЖИМЕ КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЖИВОЙ СИСТЕМЫ

- 4.1. Строение зуба и реминерализирующая терапия зубной эмали
- 4.2. Основы предлагаемого метода
- 4.3. Регистрация изменения толщины эмали средствами ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме *in vitro*

4.4. Регистрация изменения толщины и структуры эмали средствами ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме в результате воздействия деминерализирующего и реминерализирующего составов *in vitro*

4.5. Особенности проектирования измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа для проведения измерений *in vivo*

4.6. Особенности проведения контроля реминерализирующей терапии *in vivo*

4.7. Анализ результатов контроля реминерализирующей терапии *in vivo*

1. БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ-МИКРОСКОПИЯ. ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ

1.1. Основные понятия о принципе работы

Радиоволновые методы неразрушающего контроля уже многие десятилетия занимают свою нишу среди других методов неразрушающего контроля [1]. Волноводные методы являются одной из разновидностей радиоволновых [2]. Они интересны возможностью сравнительно простого теоретического описания характеристик волны, взаимодействующей с исследуемым объектом. Теоретическое описание такого взаимодействия открывает возможность определения искомых параметров исследуемого объекта в результате решения соответствующей обратной задачи [3]. К известным недостаткам радиоволновых методов измерения, принцип действия которых основан на использовании распространяющихся в волноводе волн (волн основного типа), относится низкая локальность измерений, соизмеримая с длиной распространяющейся волны, относительно невысокая чувствительность к изменению искомых параметров в случаях, когда возможно строгое математическое описание взаимодействия волны с исследуемым объектом. Ситуация кардинально изменяется, если используются системы, в которых с исследуемым объектом взаимодействует

ближнее СВЧ-поле, например сосредоточенное в области измерительного отверстия в короткозамкательном прямоугольном волноводе или в стенке резонатора. Если исследуемый образец расположен в таких системах в непосредственной близости от отверстия, то он взаимодействует с зоной так называемого ближнего поля, в значительной степени образованного нераспространяющимися типами волн. В этом случае локальность измерений по сравнению с традиционно используемыми системами удастся повысить в десятки и сотни раз. Повышение локальности связано с тем, что длины волн высших типов значительно меньше длины волны основного типа колебаний.

1.2. Виды измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа

Главной функцией измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа является преобразование основной волны, проходящей в волноводе в волну высшего типа. Именно эти волны являются основой метода. Преобразователь волны называют зондом.

Однако виды волн высшего типа и их особенности разнообразны и зависит это именно от типа измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа, которую выбирает исследователь под конкретные задачи.

1.2.1. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с диэлектриком в качестве зонда

Принцип работы данного варианта измерительной части основан на свойстве диэлектрика преобразовывать электромагнитную волну. Волна, проходящая «фокусируется» в пространстве диэлектрика и меняет свою форму на выходе волновода, преобразовываясь в волну высшего типа.

Средствами САПР HFSS была создана 3D-модель данного варианта зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа, а также смоделировано ближнее поле, создаваемое им. Частота, используемая при моделировании, составляла

12 ГГц, используемое сечение волновода – 23x10 мм. В качестве диэлектрика выбран поликор толщиной 2мм.

1.2.2. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с диафрагмой в качестве зонда

Принцип работы диафрагмы, выступающей в роли зонда, является преобразование волны за счет своих геометрических параметров, отличных от параметров сечения волновода, в котором проходит волна основного типа. Ближнее поле формируется на выходе подобно капле воды.

В отличие от зонда, представленного выше, в качестве материала для диафрагмы должен быть использован исключительно металл, так как преобразование волны происходит именно в сечении щели диафрагмы, а материал, из которого она сделана должен отражать волну.

1.2.3. Применение обрыва коаксиальной линии в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа

Обрыв коаксиальной линии является одним из наиболее удачных вариантов в случае, когда для измерений параметров материалов необходима крайне высокая локальность. Ближнее поле формируется на кончике центральной жилы, выступающей из обрыва коаксиальной линии на определенное расстояние. Параметры ближнего поля в этом случае определяет как сама коаксиальная линия, так и геометрические параметры в области её обрыва. Такими параметрами является выступ центральной жилы относительно обрыва кабеля, упомянутый выше, а также геометрические параметры кончика выступающей центральной жилы. Также важен диэлектрик коаксиальной линии, используемый в качестве проводника электромагнитной волны, а также длина коаксиального кабеля, если таковой используется.

1.2.4. Сложные виды зондов ближнеполевого СВЧ-микроскопа

Технические параметры СВЧ-линий передачи позволяют объединять виды зондов определенного типа. Это может оказаться необходимым, например, в рамках особенностей исследуемого объекта или для более тонкого управления такими параметрами, как локальность и чувствительность ближнего поля.

В качестве крайне сложного примера для решения конкретной задачи, когда необходимо не только объединить виды зондов, но и изменить их физический принцип работы, можно представить двухзондовый ближнеполевого СВЧ-микроскоп для определения подвижности носителей заряда полупроводниковых структур [4].

1.3. Применение ближнеполевого СВЧ-микроскопа в сканирующем режиме

Сканирующий ближнеполевого СВЧ-микроскопа является основой для методов, предлагаемых в этой работе. Данный режим работы позволяет получить данные как о поверхностном профиле материала, так и о его структуре. Один из вариантов реализации данного режима предложен авторами [5].

Роль резонатора в ближнеполевом СВЧ-микроскопе, предложенном авторами [5], выполняла резонансная диаграмма, устанавливаемая на конце прямоугольного волновода и перекрывающая его поперечное сечение. Отверстие в диафрагме представляло собой узкую щель шириной b' и длиной a' , вырезанную в тонкой проводящей пластине вдоль ее широкой стороны.

2. ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ-АВТОДИНОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

2.1. СВЧ-автодин и его принцип работы

Для реализации методов диагностики, предлагаемых в данной работе необходимо, чтобы ближнеполевой СВЧ-микроскоп выступал в роли измерительной части, функционирующей в единой системе с приёмопередающим СВЧ-прибором под названием СВЧ-автодин.

СВЧ-автодин – сложная многофункциональная СВЧ-система, в которой реализуется, так называемый, эффект автодинного детектирования, при котором активный элемент СВЧ-генератора является одновременно источником и приёмником отражённой электромагнитной волны [7].

Устройства, в основе работы которых лежит эффект автодинного детектирования, отличаются конструктивной простотой, малогабаритностью и высокой чувствительностью к изменению нагрузки. Вследствие этого они находят широкое применение для решения различных задач метрологии, контроля технологических процессов, ближней локации и других целей. Выделенный сигнал регистрируется либо в цепи питания СВЧ-генератора, либо внешним детектором, на который ответвляется часть генерируемой СВЧ-мощности.

Применение эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах для контроля параметров материалов основано на установлении зависимостей величины продетектированного сигнала от параметров контролируемых слоев, например, толщины, диэлектрической проницаемости, электропроводности.

Если поверхность образца обладает рельефом, или образец является неоднородным по своим электрофизическим характеристикам (электропроводность, диэлектрическая проницаемость), то при перемещении

зонда вдоль поверхности образца изменяется амплитуда и фаза отражённой электромагнитной волны и тем самым изменяется величина сигнала, фиксируемого детекторным диодом. При сканировании исследуемого образца сигнал с детекторного диода через АЦП передавался в компьютер, где с помощью специального программного обеспечения с учётом величины сигналов, управляющих линейными трансляторами, формировался трёхмерный массив данных, позволяющий получить графическое представление свойств исследуемого образца.

2.2. Применение СВЧ-автодина для контроля дыхания и сердцебиения

СВЧ-автодин уже применялся авторами [10] для контроля динамических параметров живых систем, таких как дыхание и сердцебиение человека.

Рассчитывались параметры: среднеквадратическое отклонение, дисперсия, наиболее часто встречаемое значение интервалов. Таким образом, была показана возможность определения статистических параметров дыхательных движений по форме движения грудной клетки с помощью СВЧ-интерферометрии, что открывает дополнительные возможности для диагностики таких заболеваний как: ХОБЛ, астма, а также позволяет вести контроль за динамикой лечения.

3. БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОП, РАБОТАЮЩИЙ В АВТОДИННОМ РЕЖИМЕ КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИВОЙ СИСТЕМЫ

3.1. Применение ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме для определения параметров упругих сферических оболочек на примере модели глазного яблока

На основе полученных данных о смещении поверхности упругой сферической оболочки вычисляется такой параметр живых систем как внутриглазное давление. Этот параметр является основой для диагностики такого заболевания как повышенное внутриглазное давление человека.

Авторами работы [20] предлагается использовать ближнеполевым СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме [21], что в силу его конструктивных особенностей позволяет обеспечить возможность перпендикулярности направления воздушной струи к поверхности глаза, а также свести к минимуму дискомфорт пациента во время измерений.

Использование СВЧ диапазона способствовало решению проблемы допустимого уровня мощности излучения, по сравнению с оптическим диапазоном. Вследствие того, что перемещение оболочек значительно меньше длины волны СВЧ-излучения, можно использовать простые алгоритмы определения динамических характеристик. Разработанная авторами [20] методика позволит определять внутриглазное давление предложенным бесконтактным методом.

3.2. Применение системы диэлектрик-диафрагма в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме для определения параметров упругих сферических оболочек на примере модели глазного яблока

Авторы [20] использовали ближнеполевым СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме [21], где в качестве зонда использовался коаксиально-волноводный переходник (КВП).

Согласно расчетам в САПР HFSS, область действия поля составляет примерно 1,2 мм, что не позволяет установить образец на эффективном расстоянии и подвести источник воздушного пневмоимпульса нормально образцу и соосно зонду. К тому же не удалось добиться значения потока мощности, соответствующего норме (СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03). Уровень потока мощности можно понизить, установив перед зондом дополнительную диафрагму, однако данное решение дополнительно уменьшит радиус действия поля и ещё сильнее снизит чувствительность.

Решить вновь проблему можно использовав сложную систему диэлектрик-диафрагма в качестве измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа [22]. Усложнение системы измерительной части зонда позволит более гибко контролировать мощность излучения ближнего поля за счет появления диэлектрика. В качестве диэлектрика был выбран поликор, толщиной 0,43 мм, в качестве диафрагмы использовалась алюминиевая пластинка с щелью 9x4 мм, толщиной 0,2 мм. Волновод выполнен из латуни и имеет сечение 23x10 мм.

Конфигурация, представленная выше, позволяет регистрировать смещения поверхности упругой сферической оболочки порядка 10 мкм на расстоянии 22 мм от измерительной части.

4. БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОП, РАБОТАЮЩИЙ В АВТОДИННОМ РЕЖИМЕ КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЖИВОЙ СИСТЕМЫ

4.1. Строение зуба и реминерализирующая терапия зубной эмали

Реминерализация зубной эмали – это медицинская процедура, направленная на восстановление зубной эмали – внешней оболочки зуба. Эмаль зуба имеет сложную кристаллическую структуру [23], которая на протяжении всей жизни человека подвергается грубым физическим и химическим воздействиям. Это приводит к разрушению структуры эмали и потере защитных свойств [24,25].

Реминерализация зубной эмали применяется как в терапевтических целях, для восстановления структуры поврежденных участков, так и в косметических целях, как один из этапов профессиональной очистки зуба.

Процесс реминерализации зубной эмали состоит из следующих этапов:

1. Предварительная очистка поверхности зубной эмали;
2. Нанесение на зубную эмаль реминерализирующего состава;
3. Удержание реминерализирующего состава на поверхности эмали в течение определенного времени для закрепления лечебного эффекта;
4. Удаление реминерализирующего состава с поверхности эмали без использования воды.

В качестве реминерализирующего состава, используемого стоматологами, применяются фторсодержащие пасты.

Существует множество методов диагностики состояния зубной эмали, однако ни один из этих методов не предназначен для контроля реминерализирующей терапии.

4.2. Основы предлагаемого метода

Эмаль является внешней оболочкой зуба и покрывает всю его поверхность

В результате воздействия реминерализующего состава восстанавливается поверхностный участок эмали, однако не существует методов, позволяющих оценить качество процедуры реминерализации сразу после её проведения.

Предлагаемый метод реминерализующей терапии позволит провести сравнительный анализ состояния до и после проведения процедуры реминерализации и помочь врачу стоматологу принять решение об её эффективности.

4.3. Регистрация изменения толщины эмали средствами ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме *in vitro*

Прежде чем приступить к реализации метода необходимо проверить, как ближнеполевой СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме, реагирует на изменение толщины образца.

Зафиксируем положение образца в пространстве и подведем по очереди к каждой точке чувствительную часть зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Для исключения влияния расстояния между острием зонда и поверхностью эмали, а также диэлектрической части воздушного промежутка все измерения будут проходить в контактном режиме. Из предположения, что зубная эмаль ведёт себя как диэлектрик следует, что контакт зубной эмали с зондом не повлияет на результат эксперимента.

На диаграмме видно, что с увеличением толщины эмали показания на с детектирующего диода СВЧ автодина увеличиваются с увеличением толщины эмали. На основе полученного результата можно сделать вывод,

что ближнеполевой СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме, реагирует на изменение толщины эмали.

4.4. Регистрация изменения толщины и структуры эмали средствами ближнеполевого СВЧ-микроскопа, работающего в автодинном режиме в результате воздействия деминерализирующего и реминерализирующего составов *in vitro*

Для регистрации изменений структуры и толщины эмали экспериментального образца (удаленного зуба) было оказано воздействие деминерализирующего вещества (слабый раствор 10% соляной кислоты) в течении 10 минут и реминерализирующего вещества (фторсодержащая паста) в течении суток.

Из результатов видно, что показания, полученные с детектирующего диода СВЧ-автодина, резко упали после воздействия деминерализирующего вещества, однако после воздействия реминерализирующего вещества приняли значения близкие к изначальным.

Полученные результаты подтверждают, что ближнеполевой СВЧ-микроскоп, работающий в автодинном режиме способен регистрировать изменения толщины и структуры эмали, а предложенный метод пригоден для контроля качества реминерализирующей терапии зубной эмали.

4.5. Особенности проектирования измерительной части ближнеполевого СВЧ-микроскопа для проведения измерений *in vivo*

Часть установки, взаимодействующая с частями тела пациента (измерительная часть) должна быть стерильна и иметь возможность санитарной обработки. Электрические контакты должны быть изолированы от пациента, а источник излучения не должен превышать установленный нормами САНПИН мощности.

Также стоит помнить, полость рта человека и расположение в ней зубов усложняют проведение измерений из-за сложной геометрической формы. Измерительная часть должна обладать должной конфигурацией для достижения труднодоступных участков, при этом быть удобной для использования врачом-стоматологом и желательно не доставлять дискомфорта и болевых ощущений пациенту при измерениях.

Исходя из рассуждений, приведённых выше, в качестве измерительной части будет использоваться конец коаксиального кабеля.

В результате получена измерительная часть ближнеполевого СВЧ-микроскопа со следующими характеристиками: конец коаксиального кабеля, с выступающей на 2 мм центральной жилой, помещенный в пластиковый цилиндр длиной 10 см с утонченным концом. Конец цилиндра с оголенной центральной жилой закрывается тонкой крышкой из фторопласта в форме выпукло-вогнутой линзы внешне повторяющей форму полости цилиндра для полной изоляции центральной жилы коаксиального кабеля.

4.6. Особенности проведения контроля реминерализующей терапии *in vivo*

Запись данных не является мгновенной и должна проходить примерно в течении 5 секунд, чтобы в дальнейшем на результаты измерений не повлияли произвольные движения пациента или врача-стоматолога.

В итоге получаем следующие этапы проведения эксперимента:

1. Врач-стоматолог фиксирует измерительную часть ближнеполевого СВЧ-микроскопа в конкретной точке зуба;
2. Оператор ЭВМ записывает показание с СВЧ-автодина в течении короткого промежутка времени и сохраняет результат;
3. Врач стоматолог меняет положение измерительной части прибора.

Данная процедура проводится несколько раз в зависимости от количества зубов, требующих процедуры реминерализации, а также о количества точек на каждом зубе.

4.7. Анализ результатов контроля реминерализирующей терапии *in vivo*

В ходе контроля реминерализирующей терапии был получен большой объём экспериментальных данных. Большая часть результатов совпала с результатами контроля реминерализирующей терапии *in vitro* и будет представлена ниже.

Однако в дополнении к схожим результатам были получены новые данные, которые отличаются от полученных и представляют интерес для дальнейшего развития и большего понимания работы метода.

Для контроля реминерализирующей терапии были выбраны передние зубы пациентов, чтобы фактор удобства выполнения измерений врачом-стоматологом был снижен до минимума. На каждом зубе было выбрано от 2х до 3х точек, измерения проходили от шейки зуба до режущего края, до и после процедуры реминерализации.

В ходе дальнейшего анализа результатов было выдвинуто предположение о том, что зуб, являясь, предположительно, диэлектрическим материалом может вращать фазу воздействующей на него электромагнитной волны, что влияет на результат измерения. Данное предположение объясняет аномальные результаты и указывает на необходимость доработки метода.

Одним из вариантов исправления обнаруженного недостатка – переход на относительные величины. Помимо исправления недостатка, приводящего к аномальным результатам, данный переход позволит отказаться от использования значений напряжения как величины «качества зубной эмали», что повысит наглядность результатов и удобство их анализа.

Переход от абсолютных показаний к относительным заключается в следующем:

- Значение ДО делится на само себя;
- Значение ПОСЛЕ делится на значение ДО. В зависимости от положительного или отрицательного результата, полученного на детектирующем диоде СВЧ-автодина, частное от деления будет больше или меньше единицы соответственно;
- Значение ДО вычитается из значения ПОСЛЕ. Чтобы исключить влияние вращения фазы на результат используем модуль полученной разности;
- К значению ДО прибавляем модуль полученной разности и получаем относительное значение ПОСЛЕ.

В итоге, после проведения контроля реминерализующей терапии *in vivo* и доработки используемого метода был получен пригодный для применения в медицинских целях способ, показавших свою состоятельность. Несмотря на удачные, по большей части результаты, изначально метод основывается на большом количестве предположений. Пусть и подтвержденные практическими результатами, все сделанные в данной работе предположения требуют однозначного подтверждения путём проведения дальнейших исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. 55 с.
- 2 Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волноводные методы измерения электрических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. 1978. № 11. С. 63–87.

- 3 Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Использование СВЧ-фотонных структур для измерения параметров нанометровых пленок // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 80–88.
- 4 Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с низкоразмерным резонатором типа "индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма" // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2010. №6. С. 66-69
- 5 Golosovsky M., Davidov D. Novel millimeter-wave near-field resistivity microscope // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68, № 11. P. 1579– 1581.
- 6 Д.А. Усанов. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. (Саратов, Изд-во Сарат. ун-та, 2010), с. 100.
- 7 Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. Principles of Near-Field Microwave Microscopy // Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale / S. Kalinin and A. Gruverman. – Springer Science. NewYork, 2007. V.1. Chapter 7. P. 215–253.
- 8 Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с низкоразмерным резонатором типа "индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма" // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2010. №6. С. 66-69
- 9 Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. // Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. 2003. С.312.
- 10 Горлова Е. В., Дорошенко А. А., Постельга А. Э., Усанов Д. А. Дистанционная оценка статистических параметров дыхательных движений // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. 2016. С. 112-115.
- 11 Кузнецов В.И., Тараканов С.А., Рыжаков Н.И., Мешковский И.К., Никитенко А.Н., Рассадина А.А. Диагностика респираторных

- параметров организма в оценке функционального состояния // Вестник новых медицинских технологий. 2013. № 1. Т. XX. С. 79-80.
- 12 Усанов Д.А., Постельга А.Э., Дорошенко А.А. Определение параметров сердечной деятельности по форме колебаний плечевой артерии с помощью радиоволнового автодина // Медицинская физика. 2013. №4(60). С. 72-76.
 - 13 Усанов Д.А., Постельга А.Э., Дорошенко А.А. Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина с использованием вейвлетпреобразований // Журнал Медицинская физика. 2013. № 1 (57). С. 78–84.
 - 14 Усанов Д.А., Постельга А. Э. Восстановление сложного движения участка тела человека по сигналу радиоволнового автодина. // Медицинская техника. 2011. №1. С. 8–10.
 - 15 Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Постельга А.Э. Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. №11–12. С. 44–51.
 - 16 Любимов Г.А. История развития и биомеханическое содержание измерения внутриглазного давления по методу Маклакова // Глаукома. 2006. № 1. С. 43–49.
 - 17 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. Измерение механических деформаций упругой сферической оболочки, заполненной несжимаемой жидкостью, с помощью полупроводникового лазерного автодина. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 4. С. 372-374.
 - 18 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Исследование упругих свойств глаза на модели и *in vivo* с помощью полупроводникового лазерного автодина // Российский журнал биомеханики. 2012. Т. 16, № 4: С. 8–21.

- 19 Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Метод измерения внутриглазного давления с помощью полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ, 2012. № 3. С. 69-74.
- 20 Постельга А.Э., Усанов Д.А., Дорошенко А.А. Определение динамических параметров движения упругих сферических оболочек на примере модели глазного яблока с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2018. Сборник статей Всероссийской школы-семинара. 2018. С.198-203.
- 21 Усанов Д.А., Горбатов С.С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ // Саратов, Издательство: Саратовский государственный университет. 2011, С.392.
- 22 Шароватов В.О., Дорошенко А.А., Добдин С.Ю., Постельга А.Э., Усанов Д.А. Использование ближнеполевого СВЧ-микроскопа с диафрагмой в качестве зонда для определения параметров упругих сферических оболочек // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами. Сборник статей Всероссийской школы-семинара. 2019. С.185-188.
- 23 И.А., Беляев А.Ю., Изюмов Р.И., Ерофеева Е.С., Гилева О.С. Экспериментальное исследование микроструктуры поверхности эмали человеческих зубов // Материаловедение. – 2012. – Вып. 184, № 7. – С. 50–55
- 24 Н.Е. Макарова, Ю.А. Винниченко «Очаговая деминерализация эмали. Методы диагностики и лечения», журнал «Стоматология», 2017 №4.
- 25 Спектроскопическое исследование процессов деминерализации и реминерализации зубной эмали Сурменко Е.Л., Тучин В.В., Соколова Т.Н., Kishen A. Альманах клинической медицины. 2006. № 12. С. 39