

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*

\_\_\_\_\_  
*Подпись аспиранта*

Таранец Константин Борисович

\_\_\_\_\_  
*ФИО аспиранта*

ТЕРАГЕРЦЕВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР

\_\_\_\_\_  
*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

Физико-математические науки,

1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

\_\_\_\_\_  
*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*

Физика атомного ядра и элементарных частиц, 03.06.01 Физика и астрономия

\_\_\_\_\_  
*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный  
руководитель:

д.ф.-м.н., профессор кафедры физики  
Баграев Николай Таймуразович

\_\_\_\_\_  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО  
полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в высшей школе «Фундаментальных физических исследований» Физико-Механического Института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Баграев Николай Таймуразович

д.ф.-м.н., профессор кафедры физики

Рецензент:

Вывенко Олег Федорович, д.ф.-м.н.,  
профессор кафедры физики твердого  
тела СПбГУ

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

### **Актуальность темы.**

Терагерцевое (ТГц) излучение охватывает диапазон 0.1 –30 ТГц (длины волны 3 мм–10 мкм), т.е. коротковолновую часть миллиметрового диапазона, весь субмиллиметровый и дальний (длинноволновый) инфракрасный (ИК) диапазоны длин волн. Особенностью ТГц-квантов излучения является их низкая энергия, из-за чего оно является неионизирующим, а также его стимулирующий эффект при протекании важнейших биологических реакций даже несмотря на ослабление его интенсивности в десятки тысяч раз при проникновении на глубину в несколько сотен микрон от поверхности кожи. Важным является факт, что все белки и их соединения излучают и поглощают в ТГц-диапазоне. К сожалению, ТГц-излучение не проникает сквозь атмосферу Земли, из-за чего все существующие его источники являются искусственными. Более того, они представляют собой громоздкую и дорогостоящую аппаратуру, подобную лазерам на свободных электронах, лампам бегущей волны или термическим источникам слабого некогерентного излучения, а для детектирования терагерцевого излучения используются охлаждаемые жидким гелием болометры с низким уровнем шума. Однако в последнее время прогресс в области нанотехнологии полупроводников и высокотемпературных сверхпроводников сделал возможным получение компактных твердотельных приборов, которые способны излучать и детектировать в терагерцевом диапазоне длин волн. Таким образом, прежде недоступная область спектра стала практически экспериментально реализуемой и таит в себе огромный потенциал применений.

ТГц-излучение свободно проходит через бумагу, дерево, некоторые строительные конструкции, пластики, керамику, а также верхние слои кожи и одежду человека. В ряде европейских стран гигагерцовые волны используются для просвечивания пассажиров и груза в аэропортах вместо вредного для здоровья рентгеновского излучения. Еще одним перспективным направлением является использование терагерцевого излучения для идентификации личности, поскольку структура олигонуклеотидов ДНК взаимосвязана с конкретной частотой в терагерцевом диапазоне электромагнитного спектра излучения (поглощения). На данный момент проводятся множество исследований по секвенированию ДНК с

использованием ТГц излучения. Кроме того, основываясь на спектрах поглощения и преломления ДНК, разрабатываются методики по диагностике онкологических заболеваний. Было показано, что спектральные характеристики здоровых и раковых клеток отличны в терагерцевом диапазоне длин волн. Во всех этих исследованиях применялись оптические методы детектирования ТГц излучения, анализ в основном ограничен спектроскопическими исследованиями, основанными на поглощении, отражении и фотолюминесценции ТГц излучения, хотя конкретный интерес представляют приборы, основанные на электролюминесценции и электрическом фото преобразовании ТГц излучения. Поэтому особый интерес представляет собой создание компактного прибора, сочетающего в себе свойства излучателя и приемника ТГц излучения. В данной работе представляется такой прибор на основе кремниевой наносандвич структуры. В этой связи, особую **актуальность** приобретает исследование механизмов генерации и приема ТГц излучения данной структурой.

**Объектом исследования** является кремниевый наносандвич, который, в условиях пропускания стабилизированного тока исток-сток, является эффективным источником и приемником ТГц излучения.

**Предметом исследования** является создание методики регистрации ТГц излучения с помощью кремниевого наносандвича.

### **Цели и задачи**

Основной **целью** работы является определение механизма приема ТГц излучения кремниевой наносандвич структурой (КНС), получение ТГц спектров излучения био-объектов с целью определения возможности применения КНС в качестве основы для ТГц спектрометра, используемого для экспресс-анализа различных заболеваний.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) КНС в условии приёма ТГц излучения от био-объекта;
- 2) Исследование влияния структуры олигонуклеотидов ДНК на характеристики ТГц спектров от био-объектов;

3) Изучение спектрального ТГц отклика био-ткани подвергнутой внешнему воздействию;

4) Исследование кинетики спектрального ТГц отклика био-ткани

### **Научная новизна**

Научная новизна исследований, проведенных в научно-квалификационной работе, заключается в том, что экспериментально получена методика регистрации спектральных зависимостей ТГц излучения от био-ткани с помощью измерений ВАХ КНС. В основе методики используется квантовый аналог электромагнитной индукции Фарадея. Полученные результаты позволили зарегистрировать ТГц спектры от био-ткани с учетом влияния структуры олигонуклеотидов ДНК. Используемый в качестве основы созданного спектрометра КНС может быть использован как в качестве излучателя многомодового ТГц излучения, так и в качестве его приемника. С помощью варьирования характеристиками напряжения на горизонтальных затворах можно управлять параметрами принимаемого излучения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая и практическая значимость научно-квалификационной работы заключается в том, что был объяснен механизм приема ТГц излучения в КНС на основе квантового аналога эффекта Фарадея.

Полученные результаты могут быть применены для определения характерных размеров био-объектов, что позволит проследить динамические изменения в них и, как следствие, определять последствия различных заболеваний, или иных факторов, влияющих на их работу.

Впервые были получены ТГц спектры био-объектов с использованием компактных источников ТГц излучения на основе КНС. Полученные результаты были применены в практической медицине с целью экспресс диагностики рака молочной железы. Кроме того, была предложена методика оценки последствий, вызываемых COVID-19 на основе динамических изменений в щитовидной железе.

### **Апробация результатов**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Результаты данной работы в виде устных или постерных докладов рассматривались и обсуждались на следующих конференциях:

С.1 Международная конференция Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019, «Terahertz resonance response of biological tissue placed on a silicon nanostructure», Санкт-Петербургский университет Петра Великого, 21.03.2019-23.03.2019

С.2 Международная конференция 6th International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2019", «Terahertz spectrometer for express diagnosis of breast cancer», Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, 22.04.2019-25.04.2019

С.3 Международный форум Rising Himachal Global Investors' Meet 2019, «Practical achievements and prospects of using terahertz radiation in medicine», Dharamshala, India 07.11.19-08.11.19

С.4 Международная конференция Физика – Научкам о Жизни, «Терагерцевый отклик от био-ткани как основа диагностики и лечения в персонифицированной медицине», Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 14.10.2019-18.10.2019

С.5 Международная конференция 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, «Prospects For The Use Of Silicon Terahertz Sources For The Treatment Of Pulmonary Pathologies And Affections Caused By COVID-19», Buffalo, New York, USA (Virtual conference), 8.11.20-13.11.20

С.6 Международная конференция Физика – Научкам о Жизни, «Терагерцевая экспресс-диагностика осложнений, вызванных COVID-19», Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 11.10.2021-14.10.2021

#### **Личный вклад автора**

Все результаты диссертационного исследования получены автором лично.

#### **Публикации**

На основе результатов исследования работы было опубликовано 9 работ. Из них 8 статей в РИНЦ, 7 опубликованы в журналах, индексируемых в базе Scopus и 5 в журналах, индексируемых в базе Web of Science.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность темы Научно-квалификационной работы. Раскрываются важность создания компактных перестраиваемых источников терагерцевого излучения, а также области их возможного применения. Обозначается цель работы, ставятся задачи, формулируется научная новизна и практическая значимость.

**Первая глава** посвящена погружению в проблематику рассматриваемой темы Научно-квалификационной работы. Произведен обзор литературы, где рассматривается развитие систем по детектированию квантовых макроскопических эффектов, которая привела к созданию кремниевого наносандвича (КНС), который, как оказалось, является эффективным источником терагерцевого излучения. Анализируются имеющиеся на данный момент терагерцевые источники, а также преимущества, которыми перед ними обладает КНС.

**Во второй главе** описывается методика создания КНС. Для этого подложки кремния (100) n-типа проводимости толщиной 0.35 мм с удельным сопротивлением 500 Ом·см и 20 Ом·см окислялись в атмосфере сухого кислорода, содержащего пары  $CCl_4$  при температуре 1150°. Формирование слоев окисла на поверхности монокристаллического кремния способствует генерации избыточных потоков собственных междоузельных атомов и вакансий, которые имеют выделенное кристаллографическое направление соответственно вдоль осей  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  (Рисунок 1а). На начальной стадии окисления, образование тонкого слоя окисла сопровождается генерацией избыточных междоузельных атомов кремния, которые способны формировать небольшие микродефекты, тогда как противоположно направленные потоки вакансий приводят к их аннигиляции (Рисунок 1а).

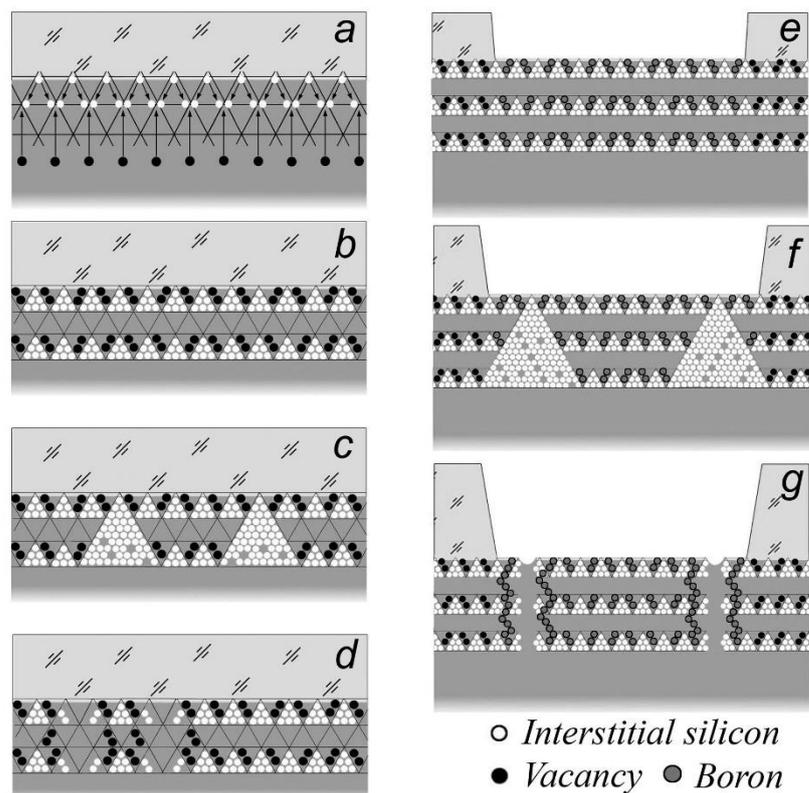


Рисунок 1 - Схема получения самоупорядоченных кремниевых квантовых ям (СККЯ) на поверхности Si (100) в условиях инжекции собственных междоузельных атомов кремния (белые кружки) и вакансий (черные кружки) в процессе предварительного окисления (a, b, c и d) и последующей диффузии бора (e, f и g): a - избыточные потоки собственных междоузельных атомов кремния и вакансий, которые генерируются в процессе предварительного окисления поверхности Si (100) и кристаллографически ориентированы соответственно вдоль осей [111] и [100]. b и d - схема продольных и поперечных СККЯ, которые возникают между слоями микродефектов, формирующихся из собственных междоузельных атомов кремния на стадии получения соответственно тонкого (b) и толстого (c) слоя окисла на поверхности Si (100). Кроме того, в процессе получения средних и толстых слоев окисла на поверхности Si (100) осуществляется фрактальная самоорганизация микродефектов (c). e, f и g - схема последующей пассивации микродефектов в СККЯ в условиях кратковременной диффузии бора по вакансионному механизму (темные области) в рамках планарной кремниевой технологии.

Распределение микродефектов, созданных на начальной стадии окисления представляет собой модификацию фрактала типа салфетки Серпинского со встроенной продольной самоупорядоченной кремниевой квантовой ямой (СККЯ) (Рисунок 1b). Поэтому, для пассивации оборванных связей и других дефектов, созданных в процессе предварительного окисления подложек кремния (100), целесообразно применить последующую кратковременную диффузию бора, которая может привести к трансформации слоев микродефектов в нейтральные  $\delta$ -барьеры, ограничивающие СККЯ (Рисунок 1e, f, g). Для этого с помощью фотолитографии вскрывались окна в холловской геометрии, а сама диффузия проходила из газовой фазы при  $T_{дифф}=900^{\circ}\text{C}$ . Предварительно проведенные исследования показали, что при данной температуре устанавливается паритет между различными диффузионными механизмами, приводящий к резкому замедлению диффузии бора в кремнии, что способствует оптимальной пассивации слоев микродефектов, ограничивающих СККЯ (Рисунок 1e, f, g).

Реконструкция мелких акцепторов бора, приводящая к образованию нейтральных дипольных центров:  $2B^0 \rightarrow B^+ + B^-$ , должна сопровождаться формированием корреляционной энергетической щели в плотности состояний вырожденного двумерного дырочного газа. Следует отметить, что подрешетка биполяронов (Рисунок 2) ответственна не только за возникновение корреляционной энергетической щели, но и определяет строение одноэлектронной зонной схемы сильнолегированных бором  $\delta$ -барьеров, ограничивающих СККЯ. Получившаяся в итоге структура и её характерные размеры представлены на рисунке 3.

**В третьей главе** исследуются электрические характеристики КНС. Показывается, что в условиях пропускания стабилизированного тока исток-сток, краевые каналы в КНС являются эффективными источниками ТГц излучения. В данном случае, ввиду обменного взаимодействия одиночных дырок с дипольными центрами бора с отрицательной корреляционной энергией, происходит подавление электрон-электронного взаимодействия. Кроме того, это приводит к упорядочению

в канале – появляется структура последовательных пиксел с характерными размерами 16.6 мкм x 2 нм, содержащих одиночные обменно-связанные дырки,

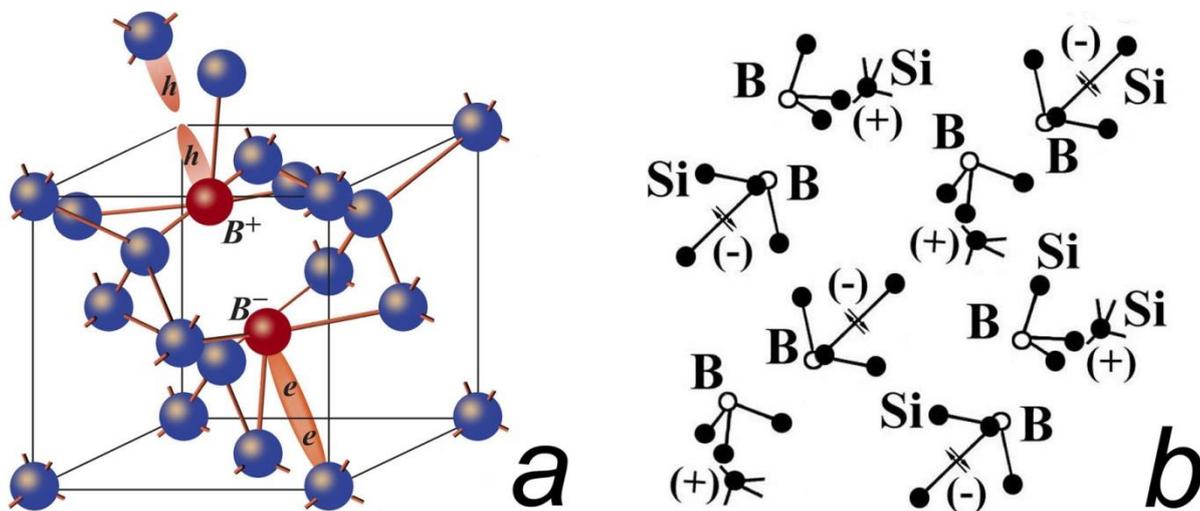


Рисунок 2 - а - Модель реконструкции мелких акцепторов бора, которая сопровождается формированием тригональных дипольных центров бора,  $B^+-B^-$ , с отрицательной корреляционной энергией. б – двумерная подрешетка дипольных центров бора, чередующихся с нелегированными микродефектами, которая является основой формирования наноструктурированных  $\delta$  - барьеров, ограничивающих СККЯ в сэндвич-наноструктуре на поверхности Si (100).

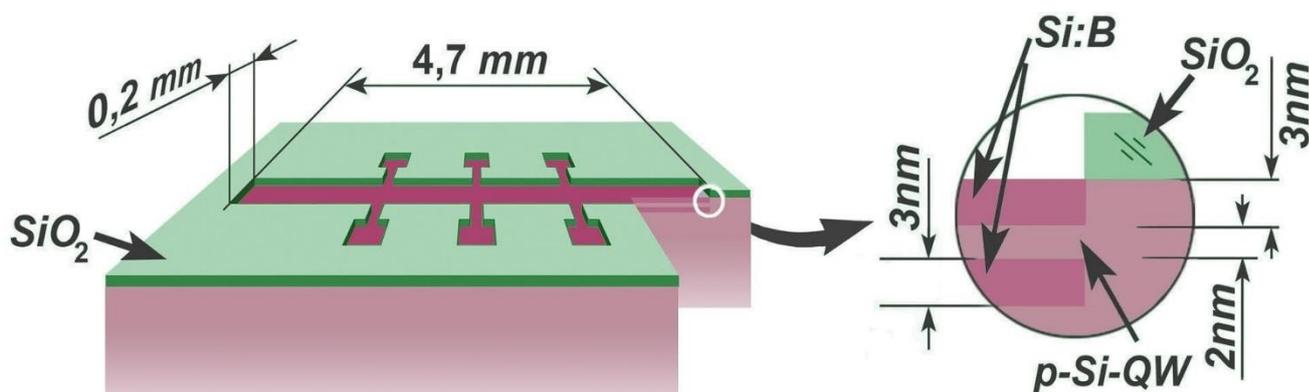


Рисунок 3 – Схема кремниевого наносэндвича, выполненного в холловской геометрии, с характерными размерами.

которые, по своей сути, являются квантовыми гармоническими осцилляторами. Именно они в краевых каналах и являются источниками ГГц и ТГц излучения.

Формируя на поверхности структуру фрактальных микрорезонаторов, настроенных на характерные длины волн, можно многократно усилить их интенсивность. Таким образом, варьируя величиной тока исток-сток можно управлять частотой излучения, тогда как интенсивность определяется величиной рассогласования с собственной частотой встроенного микрорезонатора. В процессе протекания тока через каскад СККЯ, возникает интенсивное ИК-излучение, спектральная характеристика которого отражает резонансный характер оптических переходов между уровнями размерного квантования (Рисунок 4).

Таким образом, в отличие от всех других систем, используемых на данный момент, основанных на генерации излучения при переходе носителей с одного энергетического уровня на другой, в КНС используется энергия, получаемая в процессе квантовой интерференции одиночных носителей. При пропускании тока исток-сток происходит генерация квантов магнитного потока, которые захватываются областью квантовой интерференции одиночных носителей, что ведет к возникновению генерационного тока. Частота же испускаемого излучения находится по формуле Фарадея:

$$I_{gen} = \frac{\Delta E}{\Delta \Phi} = \frac{h\nu}{\Delta \Phi}$$

Основным преимуществом КНС перед структурами, использующими межуровневые переходы, такие как ВТСП, является тот факт, что найти такую систему с уровнями практически невозможно, а отсутствие р-п перехода отсекает возможность для их массового производства.

Помимо роли излучателя, КНС может также выступать и в роли приемника ТГц излучения. Если при пропускании стабилизированного тока исток-сток  $I_{ds}$  измерять продольное напряжение  $U_{xx}$ , то можно оценить величину принимаемого излучения. Между измерительными контактами расположено 124 параллельно соединенные пиксели. Если система находится в магнитном поле Земли, то используя формулу Фарадея, становится возможным оценить генерационный ток в

краевом канале, возникающий при внесении дополнительной энергии  $h\nu$  в условиях изменения магнитного потока  $\Delta\Phi$ , которое соответствует захвату одиночных квантов магнитного потока:

$$I_{gen} = \frac{\Delta E}{\Delta\Phi} = \frac{h\nu}{\Phi_0}$$

При захвате одиночных силовых линий на область квантовой интерференции, для пары носителей в соседних пикселах в условиях подавления электрон-электронного взаимодействия справедливо соотношение  $\Delta\Phi = \Phi_0 = h/2e$ . Таким образом, оценить частоту падающего излучения можно в рамках квантового

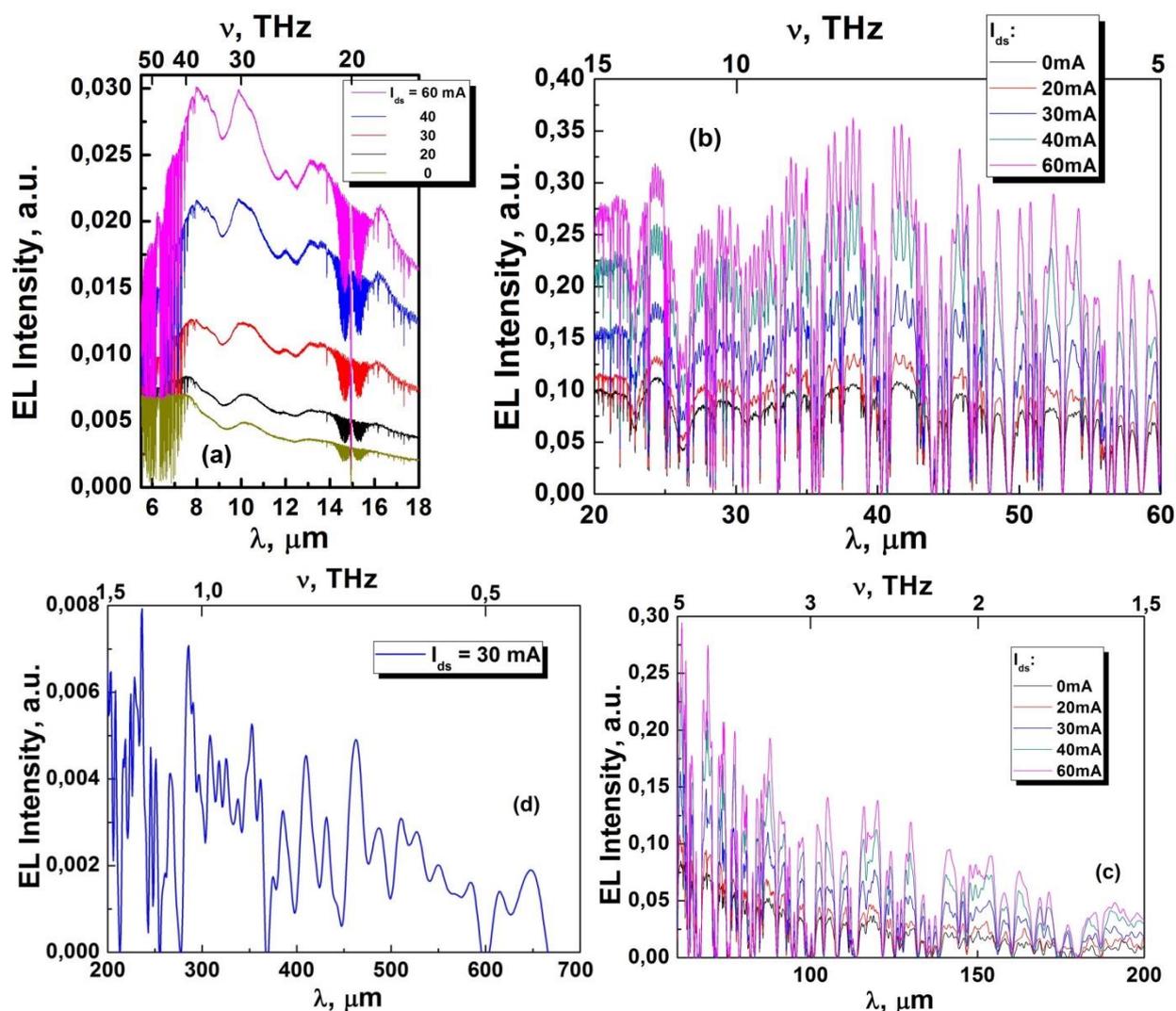


Рисунок 4 - Спектральные характеристики кремниевого наносандвича. Генерация происходит в непрерывном спектре от 1 до 700 мкм. Излучение модулировано в частотном диапазоне 40 ГГц ÷ 1200 ГГц.

аналога эффекта Фарадея по величине генерационного тока:

$$v = \frac{I_{\text{ген}}\Phi_0}{h}$$

**В четвертой главе** приводятся результаты исследований различных биологических объектов, а также делаются выводы о возможности применения КНС для целей персонафицированной медицины: секвенирования ДНК, экспресс анализа различных патологий.

Для демонстрации возможностей КНС по генерации и приему ТГц излучения было проведено три исследования. В их основе лежали результаты, полученные Фишером с соавторами по регистрации спектров поглощения и преломления олигонуклеотидов ДНК, представленных на рисунке 5. Зная последовательность олигонуклеотидов ДНК, становится возможным идентифицировать множество заболеваний, а также их последствий с помощью, что позволит выполнить переход к персонафицированной медицине. Все результаты были получены в клинической больнице РАН и центре им. В.А. Алмазова.

Во всех экспериментах использовалась установка, состоящая из источника ТГц излучения на основе КНС, источника стабилизированного тока (Keithley 6221) и нановольтметра (Agilent 34420A). Стоит отметить, что в КНС были встроены микрорезонаторы направленные на усиление частоты 2.8 ТГц, что соответствует отклику цитозина. Во время эксперимента излучатель, направлялся на исследуемую область био-объекта и находился на расстоянии около 1см от её поверхности. Таким образом, прибор работал в режиме балансного фотоприемника. Как было сказано ранее, пропускание продольного тока через КНС вызывает появление магнитного потока  $\Phi = BS$ . На площадь одной пиксели приходится изменение потока  $\Delta\Phi$ , что приводит к появлению генерационного тока, который, зная сопротивление одной пиксели  $R = h/e^2$ , можно экспериментально зафиксировать как:

$$I_{\text{ген}} = \frac{U_{xy}}{R}$$

где  $U_{xy}$  это напряжение, измеренное на ху-контактах. В данной работе

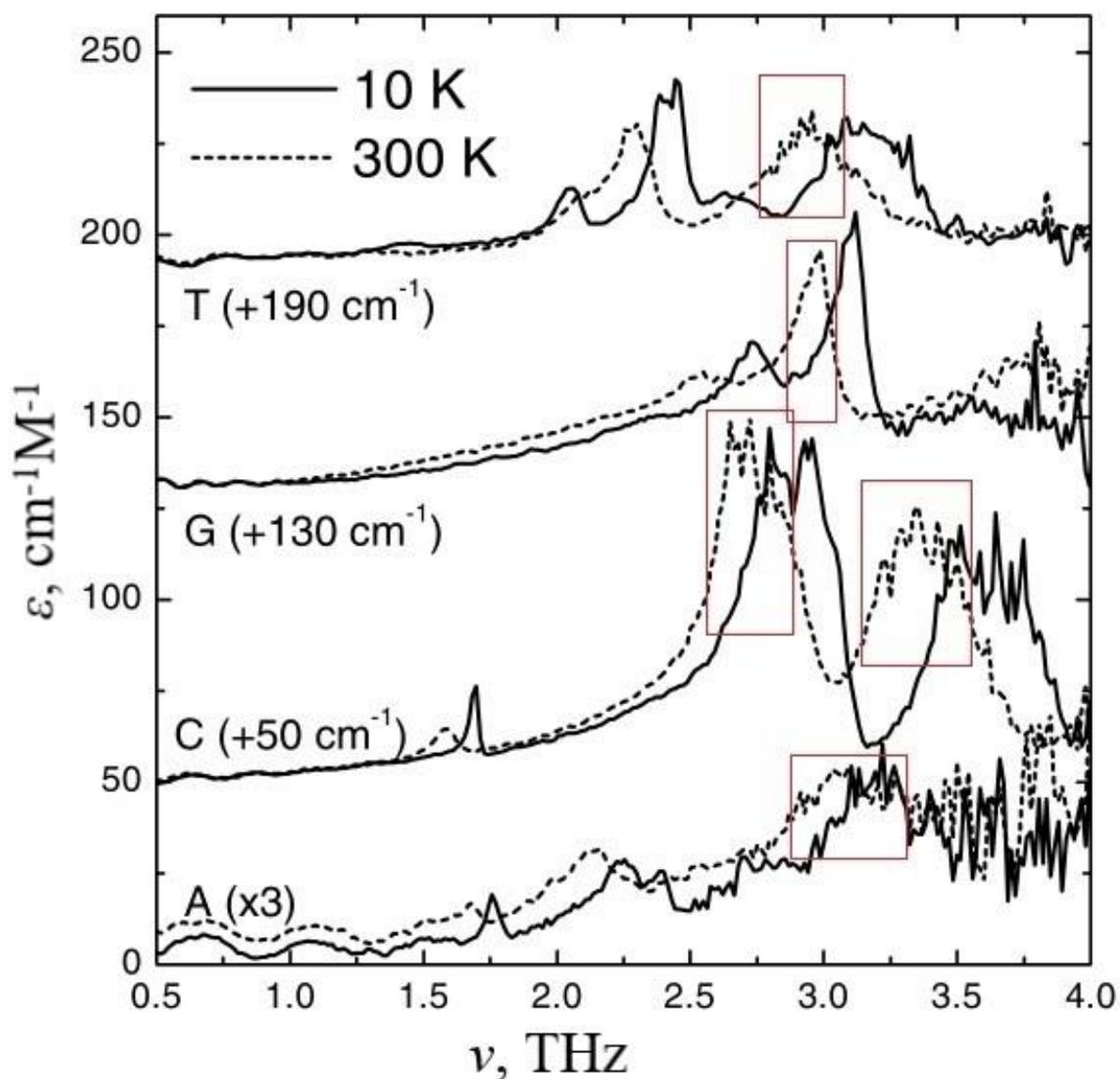


Рисунок 5 - Спектральная зависимость коэффициента поглощения белков: аденина (A), цитозина (C), гуанина (G) и (T), полученный при 10 К (жирная линия) и 300 К (штриховая линия)

использовалась аналогичная методика, но с использованием хх-контактов. В данном случае рассматривается система из 124 параллельно включенных пиксел.

1. Первой целью было определения возможности использования КНС для персональной идентификации. Исследовались различные части тел у группы испытуемых на предмет воспроизведения базовых частот у каждого из

испытуемых, а также определения различных корреляций между спектрами от одних и тех же частей тела среди всех испытуемых. Существенный интерес представляет собой область 2.5 ТГц - 3.5 ТГц, в которой находятся резонансные частоты поглощения и преломления олигонуклеотидов ДНК. На рисунке 6 представлено сравнение результатов, полученные от большого пальца для пяти человек. Хорошо просматривается, что у каждого человека присутствуют свои особенности в спектре, характеризующиеся доминированием в различном количестве пар гуанин-цитозин и аденин-тимин. На рисунке 7 представлены спектры

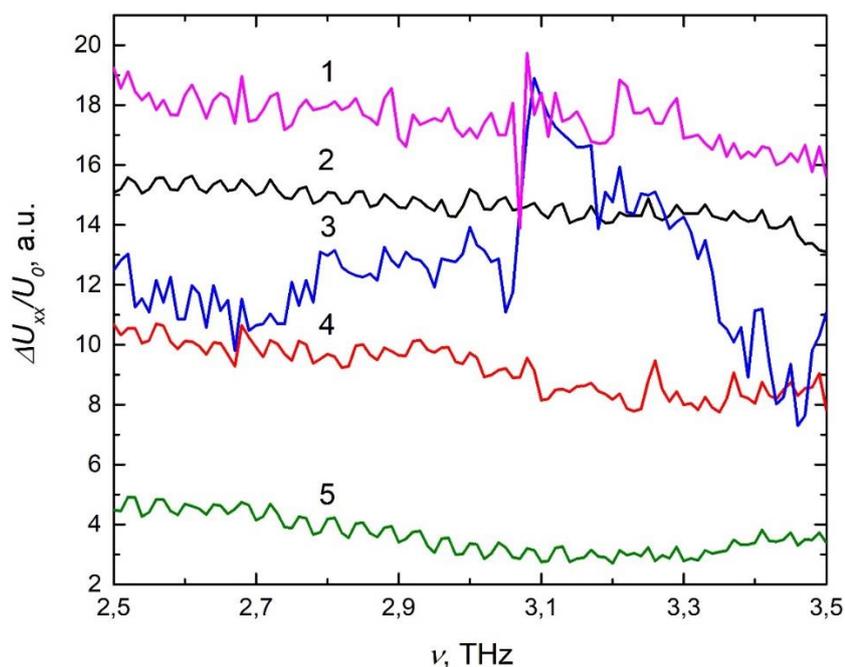


Рисунок 6 - Терагерцевый отклик большого пальца левой руки (1) (+15 rel. units), (2) (+10 rel. units), (3),(4) (+5 rel. units) и (5) у разных испытуемых.

различных частей тела для одного из испытуемых на которых видны особенности, связанные со структурой ДНК. Кроме того, наблюдается ярко выраженная является разница по амплитуде сигнала между большими пальцами и щитовидной железой и грудью. Существенные различия между большими пальцами может быть обусловлено различиями в структуре кровеносных сосудов для различных половин человеческого тела.

2. Во время второго типа исследований были получены ТГц спектры женщин, имеющих различные новообразования в области молочной железы. На основе данных спектров и имея верифицированные диагнозы, а также результаты ультразвуковых исследований и маммограмм, которые позволяют определить местоположение и размер новообразований, проверялась возможность определения наличия патологий и их тяжесть с помощью спектрометра на основе КНС. На рисунке 7 представлено сравнение результатов, полученных для четырех

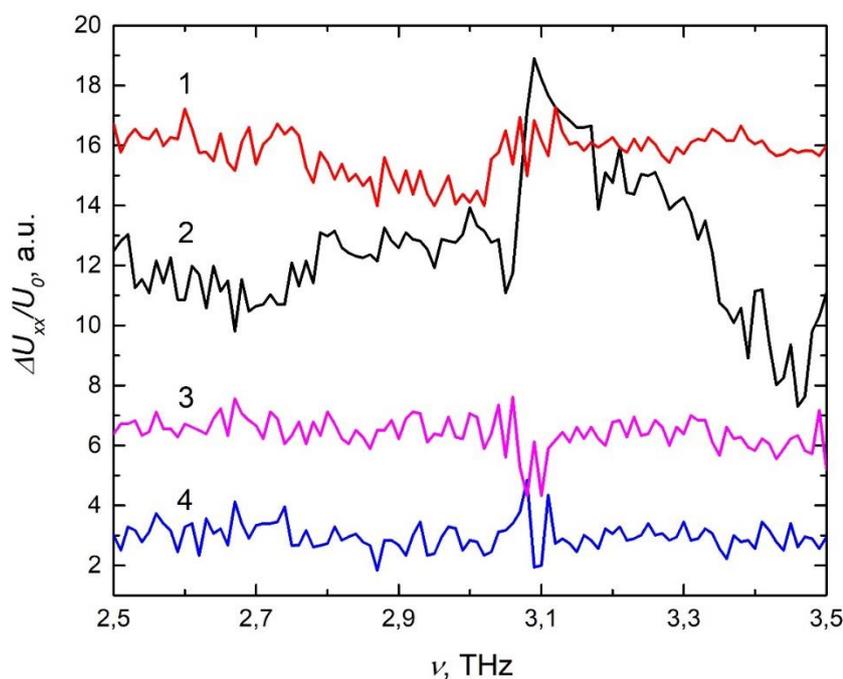


Рисунок 7 - Терагерцевый отклик большого пальца правой руки (1), большого пальца левой руки (2), Груды (3) (+5 rel. units) и щитовидной железы (4) одного из испытуемых.

типичных случаев: фиброаденоматоза диффузного типа, фиброаденоматоза узлового типа, начальной формы рака молочной железы и рак молочной железы опухолью размером от 2 см до 5 см и метастазами в подмышечных лимфатических узлах. Из рисунка 8 видно, что с развитием онкологии происходит увеличения сигнала излучения, кроме того, происходит смещение сигнала, соответствующего резонансному отклику олигонуклеотидов ДНК, из частот 2.8-3 ТГц в более низкие

частоты 2.5-2.6 ТГц. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев рака, с самой ранней стадии присутствует метилирование ДНК. Метилирование это процесс присоединение метильной группы к Молекуле ДНК, которая меняет активность сегмента, к которому она присоединяется без изменения последовательности. Из четырех олигонуклеотидов метилированию могут быть подвержены только два – цитозин и аденин. Существенный интерес представляет собой 5-метилцитозин, а также области, содержащие участки CpG. Запись CpG

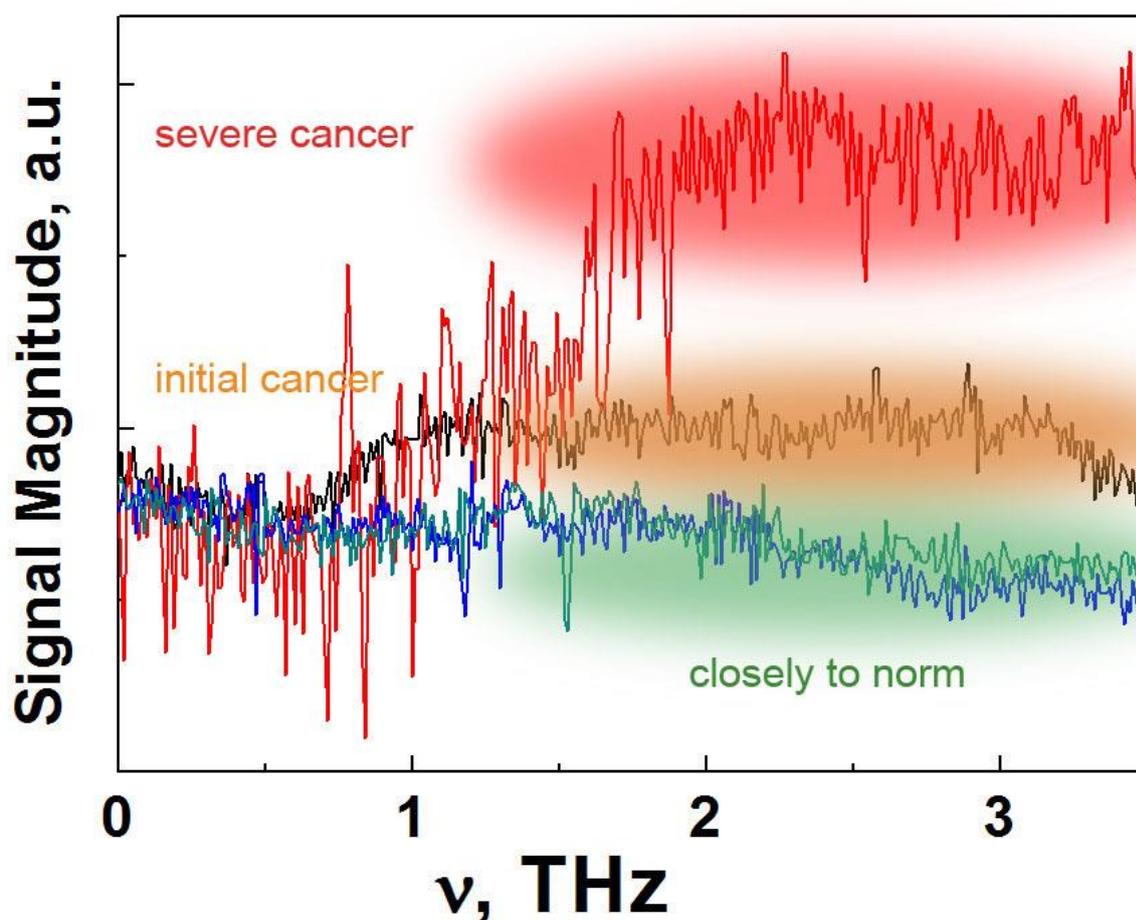


Рисунок 8 – Спектральный отклик ТГц излучения, отраженного от био-ткани для различных типов патологий. Зеленым и синим выделен отклик нормальной ткани, желтым – начальная стадия рака, красный – рак 4 стадии.

означает, что цитозин и гуанин разделены фосфатной группой, что отличается от обычной пары цитозин-гуанин, что проиллюстрировано на рисунке 9. Помимо участков CpG, в молекуле ДНК имеются так называемые CpG-острова – участки с

большим содержанием участков CpG. В здоровой молекуле ДНК 5-метилцитозин в основном встречается в каких-то отдельных участках CpG, тогда как в раковых – в CpG-островах. Именно большая концентрация 5-метилцитозина в CpG-островах ведет к появлению резонансного пика на частотах порядка 1.6 ТГц -1.7 ТГц, частота которого варьируется в данном диапазоне в зависимости от типа рака, что было продемонстрировано в работе Х. Чеона с соавторами. На рисунке 10 представлено сравнение здоровой и раковой био-ткани.

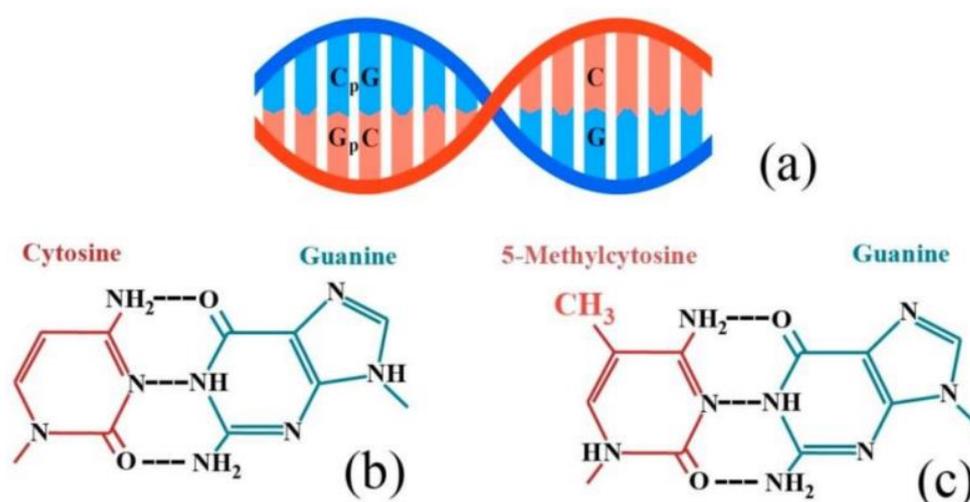


Рисунок 9 – а) Участок CpG и обычная пара гуанин-цитозин. Переход от цитозина (b) к 5-метилцитозину (c) в молекуле ДНК.

3. Во время третьего исследования рассматривались относительные изменения в щитовидной железе после перенесенного заболевания COVID-19. Предварительно были получены результаты в области лечения пациентов, имеющих заболевание COVID-19. По их результатам стало ясно, что ТГц излучение, совместно со стандартной терапией, проводимой в таких случаях, позволяет существенно ускорить процесс выздоровление, а также увеличить шансы на благоприятный исход у пациентов, осложненных факторами риска. В качестве исследуемого объекта была выбрана щитовидная железа, поскольку она довольно сильно подвержена изменениям. На рисунке 11 представлены результаты

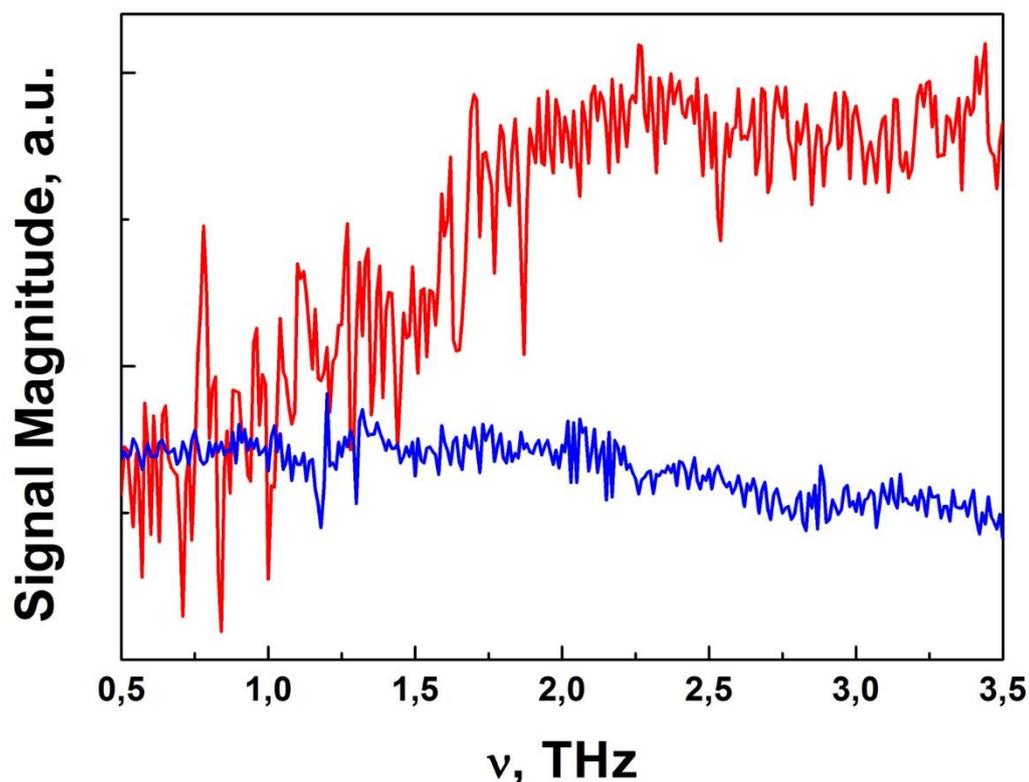


Рисунок 10 – Проявление онкологического метилирования ДНК в области 1.6 – 1.7 ТГц в спектре излучения, отраженного от био-ткани при наличии (красный спектр) и в отсутствии (синий спектр) онкологического заболевания.

измерений испытуемого, переболевшего COVID-19, на временном интервале от месяца до полугода после полного выздоровления. Если посмотреть на область 2.5 ТГц – 3.5 ТГц, то можно заметить преобладание в пары гуанин-цитозин в спектре (2 ТГц и 2.8 ТГц). Об изменениях, вызванных заболеванием COVID-19 можно судить по сохраняющейся амплитуде этих пиков. После повторного облучения испытуемого в течение 15 минут (Рисунок 11с), данные пики сглаживаются. Данный терапевтический эффект отдельно изучается в центре им. В.А. Алмазова. Кроме того, изучались ГГц частоты с целью определить характерные размеры щитовидной железы и её составляющих, а также их изменения. В данном случае, для оценки размеров резонаторов (щитовидная железа и др.) применялась формула Вульфа-Брега. Полученные результаты трактовались как изменения, вызванные

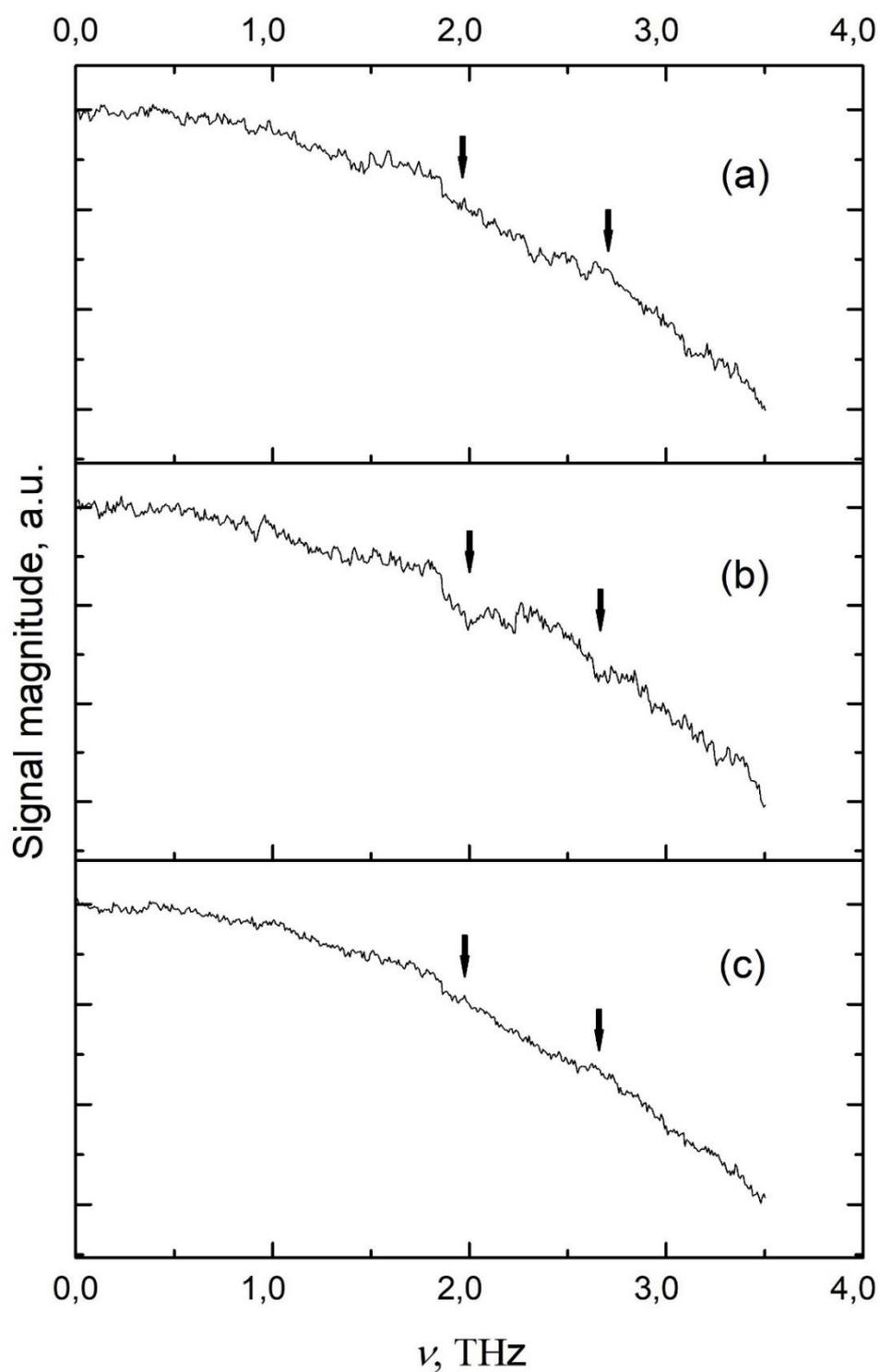


Рисунок 11 - Терагерцевый отклик от щитовидной железы испытуемого (а) через месяц, (b) через полгода после перенесенного COVID-19, (c) через полгода после перенесенного COVID-19 с предварительным 15-минутным облучением ТГц излучением.

COVID-19, несмотря на тот факт, что щитовидная железа, по своей природе, сильно подвержена изменениям.

Анализируя данные, представленные на рисунке 10 мы видим, что в области 2.8 ТГц существует впадина, полуширина которой соответствует величине  $\Delta I_{\text{ген}}=10$  нА. В ходе эксперимента измерялось продольное напряжение, а величину генерационного тока можно получить, если посчитать сопротивление краевого канала, состоящего из 62 пар параллельно включенных пиксел. На основе этого было оценено относительное изменение объема щитовидной железы. На основании соотношения Фарадея, было получено изменение продольных размеров щитовидной железы на 1.6 мм. Данное значение соответствует изменению объема на величину порядка трех процентов. В течение полугода объем щитовидной железы практически полностью восстанавливается. Если проанализировать модуляцию полученных ВАХ, аналогичным образом можно определить характерные размеры «микрорезонаторов», образующихся в объеме щитовидной железы в процессе постковидных осложнений: пятен и узлов. Используя вышеприведенные соотношения, были определены характерные размеры сформированных двух типов узлов в щитовидной железе, соответственно 0.8 – 1.0 мм и 200- 400 мкм.

### **Заключение**

В настоящей работе были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) КНС в условии приёма ТГц излучения от био-объекта. На основе этих данных исследовалось влияние структуры олигонуклеотидов ДНК: Выявлены индивидуальные особенности в спектре на частотах, соответствующих частотам поглощения олигонуклеотидов ДНК; Наблюдалась ярко выраженная разница по амплитуде сигнала между различными частями тела. Таким образом, экспериментально была получена методика регистрации спектральных зависимостей ТГц излучения от био-ткани с помощью измерений ВАХ КНС. В основе методики используется квантовый аналог электромагнитной индукции Фарадея. Исследовались изменения, вызываемые в био-ткани внешними

воздействиями. Используя соотношение Фарадея удалось проследить влияние заболевания COVID-19 на щитовидную железу: Исследовались последствия, вызываемые заболеванием COVID-19. На основании соотношения Фарадея, было получено изменение продольных размеров щитовидной железы на 1.6 мм, а также были определены характерные размеры сформированных двух типов узлов в щитовидной железе, соответственно 0.8 – 1.0 мм и 200- 400 мкм.

## Публикации по теме научно-квалификационной работы

1. **Taranets K. B.**, Fomin M. A., Klyachkin L. E., Malyarenko A. M., Bagraev N. T. and Chernev, A. L., Terahertz resonance response of biological tissue placed on a silicon nanostructure //Journal of Applied Physics. – 2019. – Т. 125. – №. 22. – С. 225702.
2. **Taranets K. B.**, Bagraev N. T., Klyachkin L. E., and Malyarenko A. M., Terahertz spectrometer for express diagnosis of breast cancer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1236. – №. 1. – С. 012035.
3. Fomin M. A., **Taranets K. B.**, Bagraev N. T., Klyachkin L. E., Odintsov V. A. and Bazarbaev V. A., Technique for Recording THz Response from Bio-Tissue //2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2019. – С. 1-2.
4. **Taranets, K. B.**, Fomin, M. A., Klyachkin, L. E., Molyarenko, A. M., & Bagraev, N. T., Terahertz response from bio-tissue to silicon nanostructures //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1410. – №. 1. – С. 012234.
5. Bagraev N.T., Golovin P.A., Khromov V.S., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Mashkov V.A., Novikov B.A., Presnukhina A.P., Reukov A.S., **Taranets K.B.**, Terahertz emitters based on negative-U materials for medical applications //Materials Physics & Mechanics. – 2020. – Т. 44. – №. 2.
6. Bagraev N. T., Klyachkin L. E., Malyarenko A. M. and **Taranets K. B.**, Terahertz Response of Biological Tissue for Diagnostic and Treatment in Personalized Medicine //Technical Physics. – 2020. – Т. 65. – №. 9. – С. 1442-1445.
7. Bagraev N.T., Golovin P.A., Khromov V.S., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Mashkov V.A., Novikov B.A., Presnukhina A.P., Reukov A.S., **Taranets K.B.**, Prospects For THz Therapy: Effective Treatment Of Affections Caused By COVID-19 // Journal of Alternative Complementary & Integrative Medicine. – 2020. - Т. 6. – С. 112.
8. Bagraev, N. T., Klyachkin, L. E., Malyarenko, A. M., Novikov, B. A., Presnukhina, A. P., Reukov, A. S., **Taranets K.B.**, Khromov, V. S., Prospects for the use of silicon terahertz sources for the treatment of pulmonary pathologies and affections

caused by COVID-19 //2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2020. – С. 1-2.

9. Баграев Н. Т., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., **Таранец К.Б.** Терагерцевая экспресс-диагностика осложнений, вызванных COVID-19 // журнал технической физики – 2022. – Т. 92. – №. 7. – С. 939-942.