

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Физико-механический институт**

На правах рукописи

Фомин Максим Андреевич

**ТЕРАГЕРЦЕВАЯ ДИАГНОСТИКА ОЛИГОНУКЛЕОТИДОВ ДНК НА
ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР**

Направление подготовки: 03.06.01 «Физика и астрономия»

Код и наименование

Направленность: 03.06.01 05 «Физика конденсированного состояния»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Фомин М. А.

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
Баграев Николай Таймуразович

Санкт-Петербург – 2022

Научно-квалификационная работа выполнена на Кафедре физики Физико-механического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Зав. кафедрой:	Апушкинский Евгений Геннадьевич, д.ф.-м.н., профессор
Научный руководитель:	Баграев Николай Таймуразович, д.ф.-м.н., профессор
Рецензент:	Соломонов Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор

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.

Данная работа посвящена исследованию свойств олигонуклеотидов ДНК в условиях осаждения на поверхность кремниевой наносандвич структуры. Идея изучения биосистем на поверхности квантово-размерных структур не нова – подобными исследованиями занимались многие ученые, в том числе Корнелиус Деккер ведет работы в этом направлении с начала 21 века. Считается, что подобные системы могут позволить эффективно управлять квантовыми макроскопическими эффектами. В качестве биологической части предлагается использовать олигонуклеотид ДНК, но все еще остается неразрешенной задача определения их роли в квантовом транспорте.

В то же время существует необходимость создать метод экспресс-анализа олигонуклеотидов ДНК. Последние 20 лет молекулярная диагностика и науки о жизни быстро развивались во многом благодаря созданию новых методов обнаружения нуклеиновых кислот. В первую очередь главным итогом технологического прогресса стали создание и развитие методов секвенирования нового поколения, которые необходимы для расшифровки первичной структуры ДНК. Следует отметить, что большая их часть чрезвычайно дорогие ввиду использования комплексных оптических схем, а использование маркеров для идентификации конкретных нуклеотидов вносит погрешности в результаты исследований. При этом огромное число повторяющихся элементов (нуклеотидов) представляет большую сложность технического характера при применении подобного рода косвенного детектирования в рамках секвенирования олигонуклеотида.

Существует несколько подходов решения этой проблемы, один из которых подразумевает регистрацию изменения рН раствора при внедрении одиночного нуклеотида в цепочку олигонуклеотида. Для этого используется секвенатор на основе полупроводника, выполненного на базе ион-чувствительных полевых транзисторов.

Иной метод решения вышеописанной проблемы предполагает использование мембран, так называемых нанопор, по поверхности которых пропускается ионный

ток, а затем через отверстия протягивается цепочка нуклеотидов. Регистрируя величину изменения ионного тока, можно получить достаточно точные данные по структуре олигонуклеотида, однако при этом возникают проблемы с частыми разрывами цепочек нуклеотидов при их протягивании, а также существуют ограничения времени прохождения через нанопору.

При этом, не всегда есть смысл раскрывать всю последовательность олигонуклеотида вплоть до каждого нуклеотида. Иногда достаточно оценить характеристики олигонуклеотида как целого, чтобы решить определенный спектр задач, в который также входит, например, фиксация сигналов о возможном наличии онкологии, что есть, по сути, ранняя диагностика. Такой подход подразумевает исследование свойств олигонуклеотидных молекул, в частности электрических свойств ДНК, которые можно изучить при помощи квантово-размерных структур.

Таким образом, исследование электрических свойств олигонуклеотидов ДНК в условиях осаждения на поверхность квантово-размерных структур приобретает большой интерес и **актуальность** как с точки зрения выявления способов управления макроскопическими квантовыми эффектами, так и с точки зрения определения специфических зависимостей олигонуклеотидов для дальнейшей разработки нового метода экспресс-анализа ДНК.

Объектом исследования является кремниевая наносандвич структура (КНС), выступающая в качестве эффективного источника излучения в терагерцевом (ТГц) диапазоне, необходимого для изучения свойств олигонуклеотидов ДНК.

Предметом исследования являются электрические свойства КНС в случае с осаждением олигонуклеотида ДНК на поверхность краевых каналов проводимости.

Целью работы является исследование электрических свойств КНС в случае с осаждением олигонуклеотида ДНК на поверхность краевых каналов проводимости, а также регистрация и оценка влияния олигонуклеотида на эти свойства.

Вышесказанное определяет следующие **задачи**:

- 1) Определение технических условий, которым должна соответствовать КНС для регистрации отклика олигонуклеотидов ДНК в рамках исследования их электрических свойств;
- 2) Исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) продольной и поперечной составляющей КНС после осаждения в краевые каналы наноструктуры олигонуклеотидов ДНК при пропускании тока исток-сток через КНС;
- 3) Регистрация и оценка влияния присутствия олигонуклеотида на поверхности ДНК на характеристики КНС.

Научная новизна

- 1) Получение данных, дающих возможность зарегистрировать и впервые исследовать электрический аналог квантового эффекта Холла;
- 2) Создание методики прецизионной спектроскопии олигонуклеотидов ДНК;
- 3) Проведение оценки влияния олигонуклеотида ДНК на квантовые макроскопические явления КНС.

Практическая значимость. Полученные в процессе настоящей НКР данные по электрическому аналогу квантового эффекта Холла позволят управлять квантовыми свойствами КНС при помощи олигонуклеотидов ДНК, а разработанная методика спектроскопии олигонуклеотидов открывает возможности в рамках разработки прибора для экспресс-анализа ДНК.

Методологическая основа. В рамках решения поставленных задач использовались теоретические аспекты электромагнетизма, электродинамики, биологии и макроскопических квантовых явлений. Рассматриваемые явления базируются на эффекте квантовом аналоге электромагнитной индукции Фарадея, а качественное объяснение изменения величины проводимости КНС проводился исходя из интерпретации квантового эффекта Холла с точки зрения разворачивания вместо магнитного поля электрического тока, которое в свою очередь индуцирует магнитное.

Достоверность научных результатов. В данной работе определяется строгим соответствием теоретических выкладкам, на основе которых строится исследование, а также применением для вычитания линейной аппроксимации программного обеспечения Origin и Matlab, а также сравнительным анализом полученных расчетных данных с экспериментальными.

Апробация работы

Настоящее исследование было поддержано Фондом Содействия Инновациям в рамках конкурса «УМНИК» в 2021 году.

Публикации

Основные результаты исследований в рамках написания НКР обнародованы в 7 публикациях, 5 из которых входят в базу данных Scopus.

Список конференций

Результаты исследования докладывались на множестве международных конференций, среди которых:

«Физика – наукам о жизни» (2018,2019,2021);

XX Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупровод-никовой опто- и наноэлектронике, (2018);

International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, (2019).

Личный вклад автора

Все результаты исследования электрических свойств КНС с олигонуклеотидами в рамках диссертационного исследования получены лично автором.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обосновывается актуальность выбранной тематики диссертационной работы. Рассматриваются существующие на сегодняшний день работы по теме. Объясняются существующие ограничения и необходимость использования КНС в качестве квантово-размерной структуры. Ставятся цель и задачи, необходимые для ее достижения. Формулируются научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В данной работе общий принцип исследования базируется на квантовом эффекте электромагнитной индукции Фарадея. Он подразумевает возникновение за счет протягивания стабилизированного тока исток-сток через КНС магнитного поля, что вследствие появления квантов магнитного потока индуцирует ток, приводящий к излучению КНС в ГГц-ТГц диапазоне. Это очень удобно в рамках изучения свойств олигонуклеотидов ДНК, поскольку их собственные моды лежат в ТГц диапазоне. В то же время КНС представляет собой топологическую структуру, с высокой степенью поляризации спина носителей заряда краевого канала по периметру квантовой ямы, что приводит к спин-поляризации тока. Поэтому в рамках цели работы представляется целесообразным использовать КНС.

Первая глава. Посвящена подробному описанию КНС.

В качестве квантово-размерной структуры используется КНС – это сверхузкая кремниевая квантовая яма p-типа (p-Si-QW), ограниченная δ -барьерами, сильно легированными бором ($5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) на поверхности n-Si (100), в которой достигается высокая подвижность носителей (рисунок 1, a-d). Данные сверхузкие квантовые ямы формируются на кремниевых подложках n-типа (100) в процессе предварительного окисления и последующей кратковременной диффузии бора из газовой фазы. КНС выполнен в рамках холловской геометрии. Также ввиду наличия p-n перехода, было показано, что ток в краевых каналах сильно поляризован по периметру p-Si-QW, поэтому КНС является топологической структурой (можно наблюдать эффект спинового транзистора). Было показано, что атомы бора в δ -барьерах образуют тригональные дипольные центры ($B^+ - B^-$) вследствие negative-U реакции: $2B^0 \rightarrow B^+ + B^-$, кристаллографически

ориентированные последовательности которых формируют краевые каналы, ответственные за проводимость в p-Si-QW. В свою очередь тригональный дипольный центр представляет собой виртуальный джозефсоновский переход со сверхпроводящей корреляционной щелью величиной 44 мэВ. При пропускании тока исток-сток носители заряда перемещаются по краям КНС, и в случае, если идет разрыв приведенной выше negative-U реакции, то КНС охлаждается, и наоборот.

Было показано, что краевые каналы КНС, которые являются последовательностями квантовых гармонических осцилляторов, в условиях протягивания продольного тока исток-сток представляют собой эффективные источники ТГц- и ГГц-излучения, обусловленного наличием дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией (рисунок 1, b-d). При этом в сантиметровом диапазоне наиболее ярко проявляется частота $f_0 = 9.3$ ГГц, вследствие того, что сверхузкая квантовая яма, ограниченная сильно легированными бором δ -барьерами, выполнена в форме микрорезонатора с характерной длиной, соответствующей ее величине d , где $d = \lambda/2n = 4.72$ мм, n — коэффициент преломления (для кремния $n = 3.4$), $f_0 = c/\lambda = 9.3$ ГГц.

Также подтверждено, что в следствие negative-U реакции в краевых каналах КНС подавлено электрон-электронное взаимодействие, а температура внутри образца остается порядка гелиевой: в процессе реакции $2V^0 \rightarrow V^+ + V^-$ происходит забор тепла со стенок краевого канала в условиях протягивания тока исток-сток, поэтому он охлажден. Когда система релаксирует происходит обратный процесс. Поэтому возможна квантованная проводимость КНС даже при высоких (вплоть до комнатных) температурах, поэтому каждый носитель заряда (роль которого выполняет дырка) локализован в отдельной области пространства. Подобные пространства называются пикселями, также они являются квантовыми гармоническими осцилляторами. При этом пиксела с дыркой обладает квантовым сопротивлением.

Подавление электрон-электронного взаимодействия таким образом приводит к тому, что краевые каналы КНС состоят из последовательности смежно

расположенных пиксел. Они же представляют собой источники излучения в ГГц-ТГц диапазонах в рамках квантового эффекта электромагнитной индукции Фарадея: протаскивание тока исток-сток индуцирует появление магнитного поля, из-за чего появляются кванты магнитного потока $\frac{h}{e}$ для одиночных дырок в нормальных цепочках дипольных центров и $\frac{h}{2e}$ для сверхпроводящих цепочек, когда пикселы объединяются, формируя пары дырок. При этом квантовые гармонические осцилляторы «захватывают» возникающие кванты, – силовая линия магнитного поля начинает проходить через пиксел – создавая в результате квантового аналога эффекта электромагнитной индукции Фарадея индуцированный ток, приводящий к генерации излучения в ГГц и ТГц диапазонах:

$$I_{ind} = \frac{E(h\nu)}{\Delta\Phi},$$

где $\Delta\Phi = \Phi_0 = \frac{h}{2e}$.

Для величин токов, используемых в данной работе, по аналогу с двумя встречными джозефсоновскими переходами происходит генерация ТГц излучения. Поэтому частота генерации определяется следующим образом:

$$h\nu = neI_{ind}R_0,$$

где R_0 – квант сопротивления для дырки.

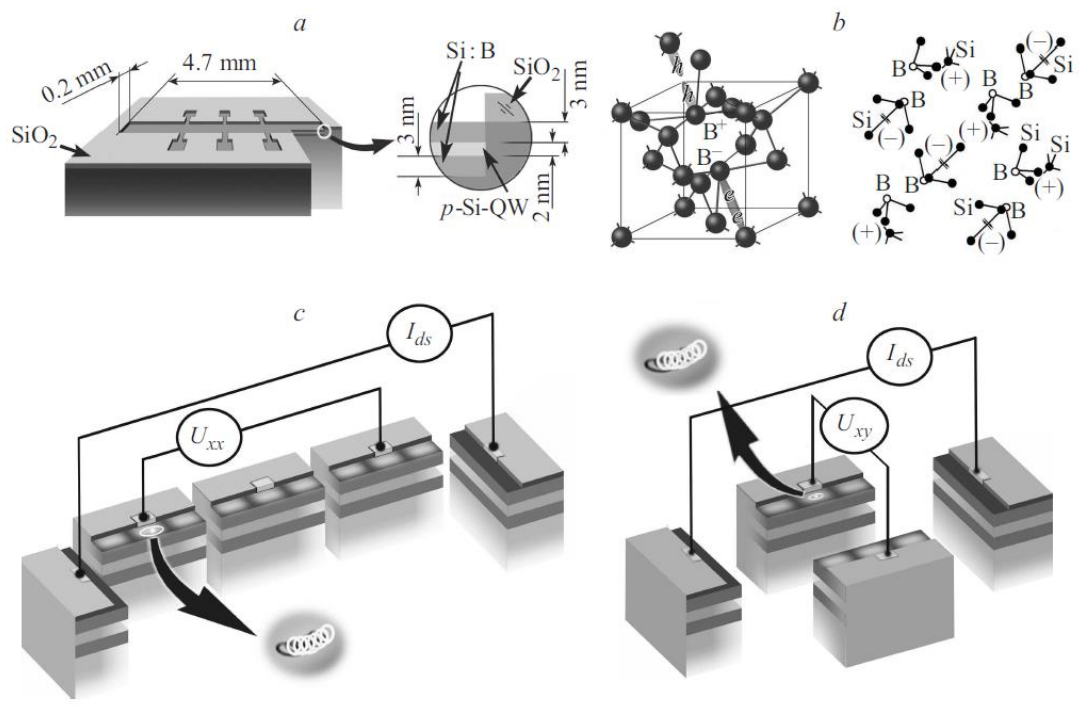


Рисунок 1. Графическое описание структуры КНС: а – размерная схема КНС со всей геометрией; б - дипольный тригональный центр бора и его кристаллографически ориентированные последовательности; с – схема КНС, демонстрирующая контакты для измерения продольной ВАХ КНС; d – схема КНС, демонстрирующая контакты для измерения поперечной ВАХ КНС. В обоих случаях (с, d) указано место осаждения олигонуклеотида ДНК.

Вторая глава. Посвящена определению технических условий, которым должна соответствовать КНС для регистрации отклика олигонуклеотидов ДНК в рамках исследования их электрических свойств.

Как отмечено выше, пиксели проявляют себя эффективными источниками излучения в ТГц диапазоне в условиях протягивания тянущего тока исток-сток I_{ds} через краевые каналы КНС. При этом усиление происходит за счет микрорезонаторов, являющихся неотъемлемой структурой краевых каналов КНС. Таким образом, изменяя размеры микрорезонаторов можно управлять величиной спектра излучения в ТГц диапазоне КНС, в том числе сдвигать его в меньшую или большую сторону. Это излучение также можно настроить на соответствие диапазону частот собственных мод олигонуклеотидов, которые осажжены на краевой канал КНС. Таким образом формируется эффект резонансного отклика, который можно увидеть в пиках на ВАХ КНС. При этом если в микрорезонаторе помимо биомолекулы находится еще и дырка, то эффект будет усилен. В рамках анализа выбранной структуры и подбора оптимальных параметров для проведения эксперимента с исследованием ВАХ КНС в случае осаждения олигонуклеотидов ДНК следует учесть тот факт, что величина частоты собственной моды олигонуклеотида, которая была исследована при непосредственном осаждении на поверхность КНС, составила порядка 2,8 ТГц. Это соответствует размеру резонатора 16.6 мкм. Поэтому, в рамках усиления эффекта резонансного отклика необходимо обеспечить расстояние между дырками в КНС примерно равному данному значению. Чтобы этого добиться следует поддерживать величину плотности носителей в КНС порядка $3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ вдоль направления «xx» в рамках холловской геометрии КНС.

Таким образом, рассчитанная величина плотности дырок в КНС позволила синтезировать образец, краевые каналы проводимости которого являются эффективными источниками в ТГц диапазоне излучения.

Третья глава. Посвящена исследованию полученных данных ВАХ КНС в условиях осаждения одно- и двуцепочечных олигонуклеотидов ДНК на поверхность.

Согласно полученным данным в предыдущей главе был синтезирован КНС с плотностью двумерных дырок в структуре вблизи величины $3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$, необходимой для усиления терагерцевого отклика олигонуклеотида в ВАХ. Таким образом, была собрана рабочая установка, состоящая из следующих элементов: нановольтметр Agilent, источник тока Keithley, металлический контейнер, внутри которого находится держатель образца КНС, компьютер. Была разработана программа в LabView, что позволила автоматизировать проведение эксперимента.

Олигонуклеотиды ДНК были осаждены на краевые каналы КНС с помощью инсулинового шприца. Калибровка точки, в которую должен был попасть олигонуклеотид, осуществлялась с использованием насадки из полидиметилсилоксана, что выполняла функцию трафарета. Длина рабочих олигонуклеотидов составила 100 пар оснований, использовались как одноцепочечные, так и двуцепочечные олигонуклеотиды.

В рамках задачи по регистрации ВАХ КНС была изучена зависимость продольной проводимости в величинах $G_0 = 2e^2/h$ от величины тока I_{ds} , что позволило продемонстрировать периодические биения (рисунок 2, а-с). Анализируя результаты, показанные на рисунке 2, определяется величина частоты резонансного отклика олигонуклеотида на ТГц излучение микрорезонатора краевого канала КНС, в котором находится один носитель – для этого достаточно определить значения периода биений. Таким образом, величина частоты резонансного отклика олигонуклеотида составила 2.8 ТГц при величине тока I_{ds} 48.1 мкА (рисунок 2, б-с), что подтверждает теоретические расчеты. Также стоит отметить, что наблюдаемые биения можно отнести к аналогу осцилляций Шубникова де Гааза. Они возникают, поскольку продольная проводимость $G_{xx} = \frac{I_{ind}}{U_{xx}}$, при этом, как было показано выше, $I_{ind} = \frac{E(h\nu)}{\Delta\Phi}$, так что при изменении тока исток-сток также меняется магнитное поле, что приводит к изменению величины

магнитного потока, и, соответственно, продольного сопротивления, при чем, как было показано выше, меняется оно на величину, кратной $\frac{2e^2}{h}$.

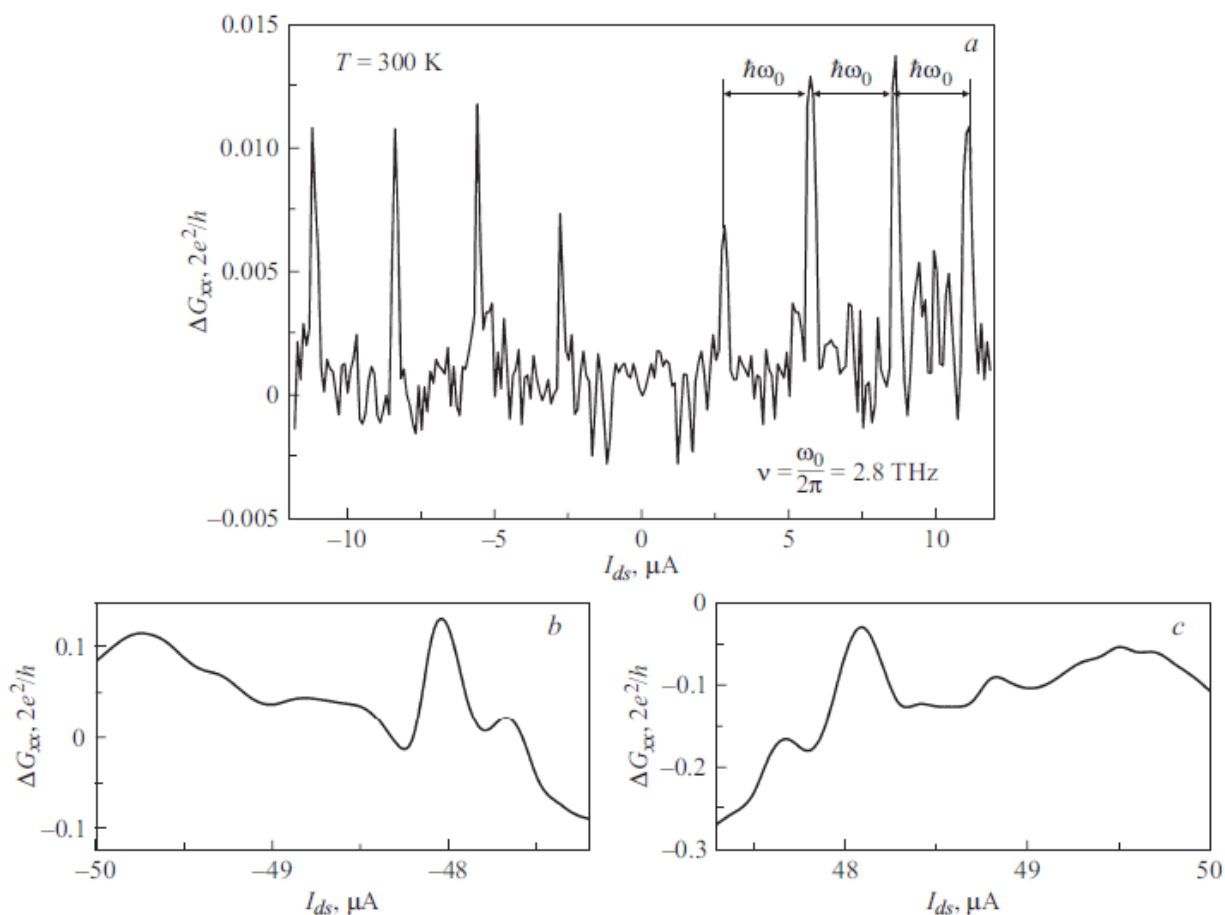


Рисунок 2. Зависимость продольной проводимости от величины тока I_{ds} . Пики соответствуют резонансному отклику одноцепочечных олигонуклеотидов.

Биомолекулы ложились в краевом канале КНС и имеют длину 100 пар оснований.

При этом есть иной способ получить данные о величине частоты резонансного отклика олигонуклеотида – это регистрация зависимости поперечного напряжения U_{xy} в условиях протягивания стабилизированного тока исток-сток (рисунок 3, a,b,c,d). На этой зависимости также наблюдаются пики, период между которыми совпадает в свою очередь с периодом между пиками в зависимости проводимости от тока исток-сток (рисунок 2, а). При этом отмеченные биения соответствуют величине частоты 2.8 ТГц, на которой происходит резонансный отклик олигонуклеотида.

При этом, на рисунке 3, е также изображена зависимость поперечной проводимости в условиях протягивания стабилизированного тока исток-сток, которая может быть интерпретирована как холловская лестница проводимости, которая свидетельствует о наличии квантового эффекта Холла, но в условиях отсутствия приложенного внешнего магнитного поля. В настоящей работе магнитное поле индуцируется протянутым током исток-сток I_{ds} , вследствие квантового аналога эффекта электромагнитной индукции Фарадея. В этом случае наблюдаемый аналог квантового эффекта Холла следует считать электрическим.

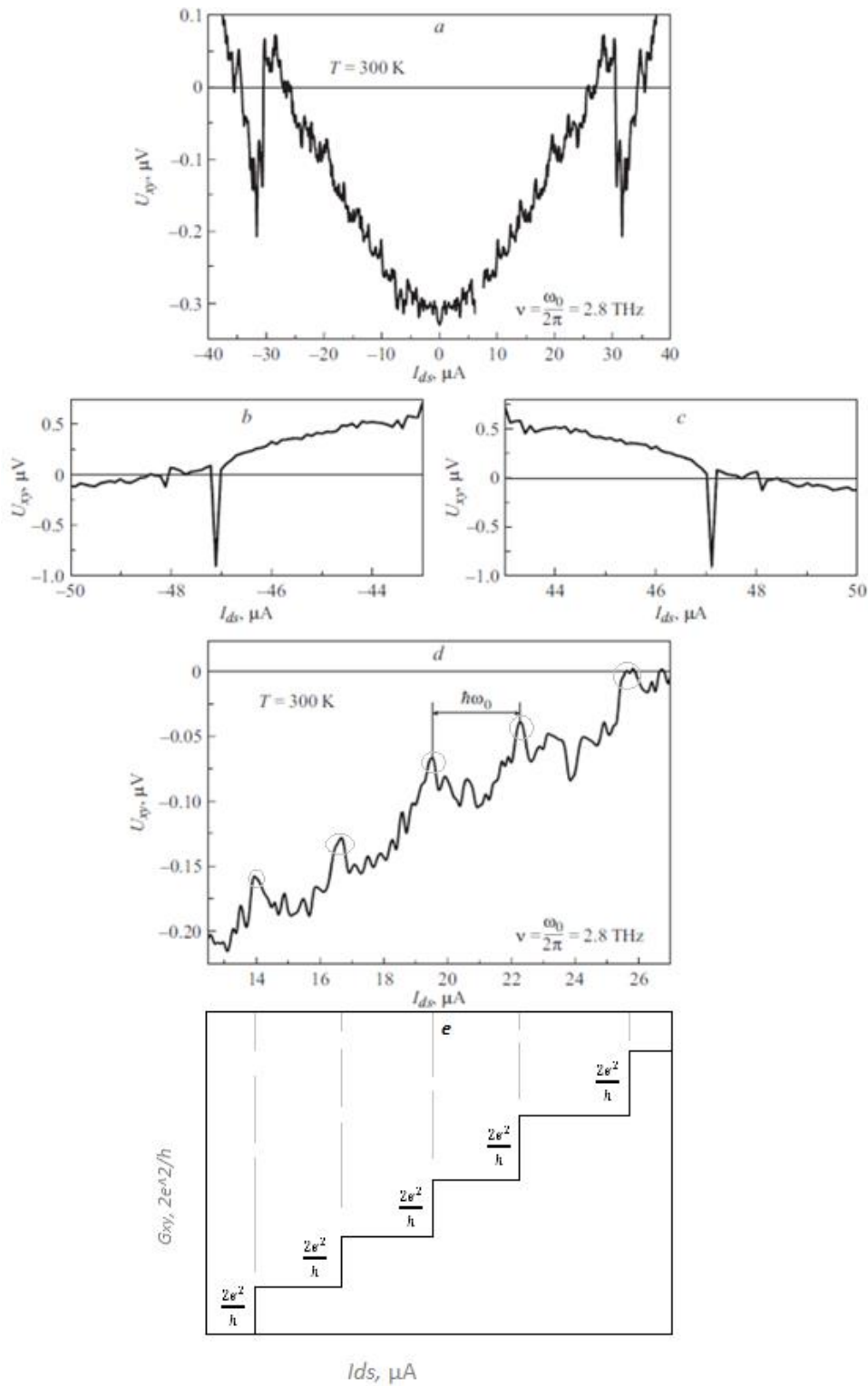


Рисунок 3. Зависимости поперечных напряжения и проводимости в условиях протягивания тока исток-сток. Пики соответствуют резонансному отклику олигонуклеотида на поверхности КНС: а,б,с,д- разные масштабы по току, е – схематичный вид холловской лестницы проводимости, соответствующий по току картине d, а ступеньки соответствуют пикам напряжения.

Более того, данные зависимости могут быть рассмотрены в рамках электромагнитной индукции Фарадея в условиях формирования одиночного кванта магнитного потока, поскольку пропуская стабилизированный ток исток-сток через краевой канал КНС, в канале возникает индуцированное этим током магнитное поле (как и в классической рамке с током), что позволяет наблюдать аналог эффекта Шубникова – де Гааза, но уже в иных условиях, без присутствия внешнего магнитного поля – на зависимости продольного напряжения от величины пропускаемого тока.

Проведенные исследования поперечного напряжения U_{xy} в зависимости от подаваемого стабилизированного тока исток-сток на краевые каналы КНС с осажденными на ее поверхность двуцепочечными олигонуклеотидами ДНК также аналог ступенек квантового эффекта Холла (рисунок 4).

Таким образом, квантовую лестницу Холла можно наблюдать в свойствах КНС в условиях возбуждения собственных мод как одноцепочечных олигонуклеотидов, так и двуцепочечных.

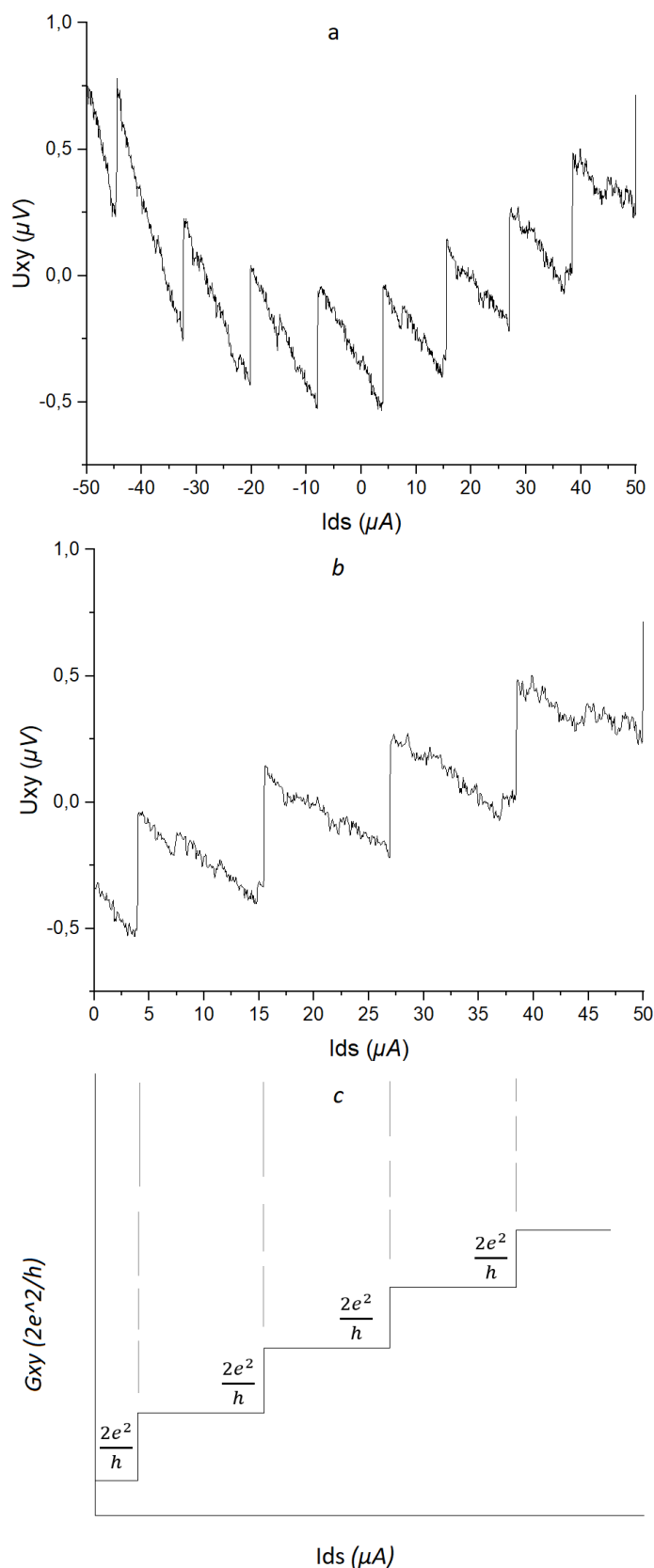


Рисунок 4. Зависимость поперечной разности потенциалов (a,b) и поперечной проводимости (c) в условиях протягивания тока исток-сток и осаждения на поверхность КНС двуцепочечного олигонуклеотида ДНК: а) ток -50:50 мкА; б) ток 0:50 мкА. с) ток соответствует пункту б, т.е. 0:50 мкА.

Стоит также рассмотреть каким образом олигонуклеотид может влиять на величину наблюдаемых квантовых макроскопических эффектов. Подавая напряжение на поперечные контакты индуцируется генерационный ток, который можно представить как $I_{ind} = \frac{eU}{\Delta B * S}$, при этом проводимость $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{e}{\Delta B * S}$, а магнитный поток $\Delta\Phi = \Delta B * S$. Таким образом, имея зависимость проводимости в условиях пропускания тока исток-сток, ее изменение можно интерпретировать как изменение магнитного потока, проходящего через краевой канал КНС, а именно увеличение/уменьшение количества захватываемых одиночных квантов магнитного потока. Это может объясняться изменением эффективной площади краевого канала, на который идет захват квантов магнитного потока. Меняя ток, можно варьировать величину индуцируемого магнитного поля. Оказывается, скачки в проводимости могут быть также объяснены тем, как «ложится» олигонуклеотид на поверхность цепочки пиксел (краевой канал) при осаждении. Дело в том, что олигонуклеотид может занять как 1 пикселу, так и больше: если он ложится «поперечно», то он перекрывает собой больше 1 пикселы ввиду своих размеров (14 нм) по сравнению с шириной пикселы (2 нм). А если он «лег» продольно, то он помещается в пределах периметра 1 пикселы. Вследствие чего, осажденный на поверхность олигонуклеотид меняет собой эффективную площадь краевого канала проводимости, что влияет на изменение магнитного потока, поэтому мы можем наблюдать разрывы в проводимости, поскольку эта величина меняется на единицы порядка $2e^2/h$, в зависимости от того, как ложится олигонуклеотид и какую площадь он собой занимает. Аналогичное объяснение находит и изменение периода аналога осцилляций Шубникова. Таким образом, возможно управление положением квантовой лестницы сопротивления

Заключение.

1) Была получена квантовая лестница проводимости КНС в условиях осаждения на поверхность краевого канала проводимости олигонуклеотида, как для одноцепочечного, так и для двуцепочечного;

2) Было показано, что зависимость поперечного напряжения U_{xy} в условиях протягивания тока исток-сток может интерпретироваться как электрический аналог квантового эффекта Холла (квантование холловского сопротивления), а зависимость проводимости G_{xx} в тех же условиях как аналог осцилляций Шубникова. При этом холловскую лестницу проводимости можно наблюдать и как в случае одноцепочечных олигонуклеотидов, так и в случае двуцепочечных. Таким образом, использованный подход можно использовать в качестве прецизионной спектроскопии олигонуклеотидов ДНК;

3) Было объяснено влияние олигонуклеотида на проводимость G краевых каналов КНС: при осаждении на поверхность КНС олигонуклеотид изменяет собой эффективную площадь краевого канала проводимости, на который происходит захват квантов магнитного потока, что в рамках квантового аналога эффекта электромагнитной индукции Фарадея изменяет величину ступеньки холловской лестницы, либо меняет период аналога осцилляций Шубникова де Гааза.

4) Таким образом, олигонуклеотиды ДНК можно использовать как инструмент в управлении параметрами макроскопических квантовых явлений КНС.

Публикации по теме научно-квалификационной работы

1. Фомин М.А., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Романов В.В., Баграев Н.Т., магнитные свойства краевых каналов кремниевых наносандвич-структур с осажденными олигонуклеотидами ДНК, Журнал технической физики, 2022, 92, 7, 963-967
2. Fomin M.A., Chernev A.L., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Bagraev N.T., Terahertz response from oligonucleotides deposited on silicon nanostructures, International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2019, 2019-September, 8874337
3. Fomin M.A., Taranets K.B., Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Odintsov V.A., Bazarbaev V.A., Technique for recording thz response from bio-tissue, International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2019, 2019-September, 8874514
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, 2019, 1410(1), 012234
5. Taranets K.B., Fomin M.A., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Bagraev N.T., Chernev A.L., Terahertz resonance response of biological tissue placed on a silicon nanostructure, Journal of Applied Physics, 2019, 125(22), 225702
6. Fomin M.A., Chernev A.L., Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Emelyanov A.K., Dubina M.V., Dielectric properties of oligonucleotides on the surface of Si nanosandwich structures, Semiconductors, 2018, 52(5), стр. 612–614
7. Фомин М.А., Чернев А.Л., Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Емельянов А.К., Дубина М.В., Диэлектрические свойства олигонуклеотидов ДНК на поверхности кремниевых наноструктур, Неделя науки СПбПУ, 2017, 13-19 ноября 2017 года, стр 292-295