

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
( **Н И У « Б е л Г У »** )

**ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

**Экспериментальное исследование рассеяния  
пучков ускоренных электронов на массиве ориентированных  
нанотрубок**

Выпускная квалификационная работа  
обучающегося по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
очной формы обучения, группы 12001515  
Мышеловка Ларисы Викторовны

Научный руководитель  
д. ф.-м. н. Малай Н.В.

БЕЛГОРОД 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1. Обзор литературы.....	5
§1.1 Излучение Смита-Парселла .....	5
§1.2. Получение углеродных нанотрубок .....	12
Глава 2. Основная часть .....	15
§2.1 Постановка задачи.....	15
§2.2 Проведение эксперимента.....	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	29
Список литературы .....	32

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка малогабаритных установок для генерации электромагнитного излучения с заданными характеристиками, подходящих для ведения исследований в небольших лабораториях, на сегодняшний день остается актуальной задачей. Одним из успешных и отработанных подходов к решению данной задачи является использование различных методов генерации излучения, которые осуществляются при взаимодействии пучков ускоренных электронов с веществом. Сегодня на основе данного подхода разработаны и введены в производство множество источников излучения в диапазоне от радиоволн (магнетроны, клистроны) до рентгеновского излучения (рентгеновские трубки). Но в настоящее время продолжается поиск новых путей для разработки источников электромагнитного излучения, имеющих преимущества над уже существующими. В данный момент проводятся экспериментальные исследования новых эффектов в физике излучения заряженных частиц, возникающих при взаимодействии пучков ускоренных электронов с упорядоченными в пространстве структурами, определенные области которых обладают высокой электронной плотностью (ОВЭП). Под ОВЭП понимается область пространства с размерами порядка 0.05-1 мкм, в которой сосредоточены свободные электроны. Например, такую область можно создать с помощью нанотрубок или металлических игл, вблизи острия которых сосредотачиваются свободные электроны.

При движении ускоренной частицы вблизи ОВЭП, кулоновское поле частицы вносит возбуждение в распределение зарядов в области, тем самым заставляя электроны области излучать. Если заряженная частица движется над средой с периодически изменяющейся диэлектрической восприимчивостью, например, над дифракционной решёткой, то в результирующем излучении появляется когерентная составляющая, обусловленная наличием периодичности диэлектрической восприимчивости. Данный эффект впервые

был обнаружен С.Дж. Смитом и Е.М. Парселлом [1] и впоследствии был назван «Излучение Смита-Парселла» (ИСП).

Цель работы: проведение экспериментального исследования рассеяния пучков ускоренных электронов на периодически расположенных массивах ориентированных нанотрубок и генерирующегося в таком процессе излучения.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательского проекта «Исследование когерентных механизмов генерации электромагнитного излучения при взаимодействии ускоренных электронов с периодическими структурами высокой электронной плотности» (грант № МД-5748.2018.2)

## Глава 1. Обзор литературы

### §1.1 Излучение Смита-Парселла

Если заряженная частица пролетает вблизи металлической поверхности, на ней образуется наведенный электрический заряд, который движется вместе с частицей. Если на металлической поверхности существуют неровности, то наведенный заряд вынужден преодолевать каждую неровность с ускорением, при этом излучается некоторое количество фотонов. Следовательно, наличие любых неровностей обеспечивает возникновение электромагнитного излучения. Важными условиями для возникновения излучения являются движущийся заряд и неоднородность. При движении заряда вблизи дифракционной решетки, интенсивность и когерентность возникающего излучения значительно возрастают. Механизм этого излучения для быстрых электронов был предсказан Франком [2] и впервые экспериментально наблюдался Смитом и Парселлом [1] в оптическом диапазоне.

Оценка интенсивности дифракционного излучения была дана в работе Смита и Парселла [1] для идеально отражающей волнистой поверхности (рис.1). Если поверхность почти плоская, период волнистости большой и глубина амплитуды мала, то летящий около поверхности заряд формирует на поверхности его изображение. Причем расстояние между зарядом и его изображением периодически меняется: уменьшается при движении заряда над максимумом структуры и увеличивается, когда заряд находится над минимумом.

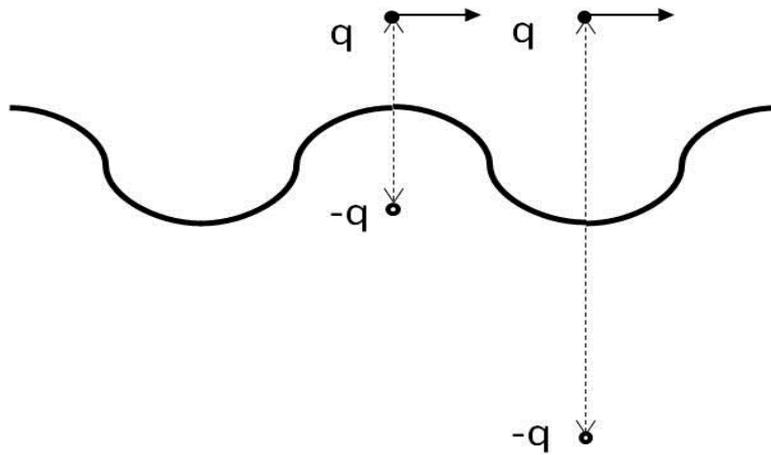


Рисунок 1. Взаиморасположение заряда и его изображения относительно проводящей волнистой поверхности

Таким образом, процесс можно представить в виде одномерного процесса излучения диполя переменной длины, который движется над поверхностью. Интенсивность излучения можно оценить с помощью выражения (1) для мощности излучения осциллятора с амплитудой изменения дипольного момента  $p$  на определенной длине волны:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{16\pi^4 c}{3\lambda^4} p^2 \quad (1)$$

Если, согласно оценкам в работе [1], электроны движутся вдоль решетки с периодом  $d$  на расстоянии  $d/10$ , тогда  $p=ed/10$ . Для эксперимента Смита и Парселла оценка потока излучения дает величину порядка нескольких сотен фотонов на 1 см длины.

Спектр дифракционного излучения не зависит от профиля дифракционной решетки и от того, прозрачная ли она или отражающая. Качественные оценки, проведенные в работе [1], дают следующее выражение (2) для частоты испускаемой волны, наблюдаемой под углом  $\theta$ :

(2)

$$w_n = \frac{2\pi n \frac{v}{d}}{1 - \beta \cos \theta},$$

где  $w_n$  – частота испускаемого излучения,  $n$  – гармоника,  $v$  – скорость пролетающего заряда,  $d$  – период решетки,  $\beta = v/c$ . Данную формулу можно получить из закона сохранения энергии и импульса. Из представленной формулы видно, что частота излучения зависит от угла наблюдения и увеличивается с уменьшением периода решетки.

Представленная формула может быть выведена для случая простой плоской дифракционной решетки, изображенной на рисунке 2.

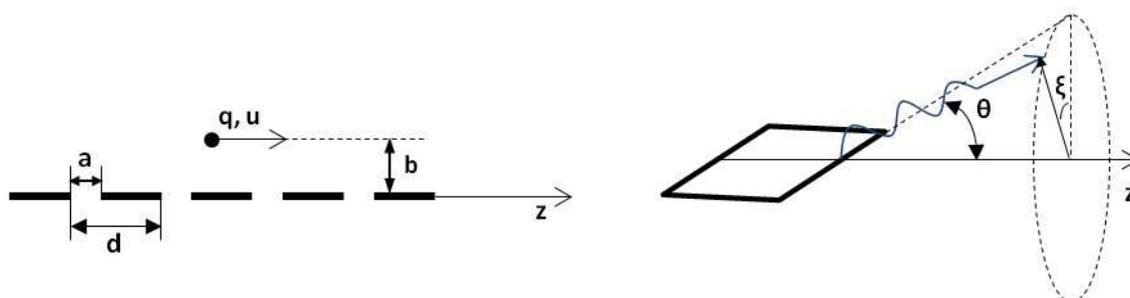


Рисунок 2. Движение частицы вдоль плоской прозрачной дифракционной решетки, с нанесенными на нее бесконечно тонкими проводящими штрихами

Данное выражение верно, когда частица движется параллельно оси периодичности решетки, и подтверждается экспериментом Смита и Парселла, параметры которого следующие:  $d = 1.67 \cdot 10^{-4}$  см,  $\theta = 20^\circ$ ,  $\beta = 0.8$  (использовались электроны с энергией 300 кэВ). Для приведенных параметров для  $n=1$  (основная мода) получена длина волны  $\lambda \approx 5000 \text{ \AA}$ .

Последнее выражение (2) можно свести к соотношению (3):

$$\lambda_n = \frac{d}{n} \left( \frac{1}{\beta} - \cos \theta \right) \quad (3)$$

где  $n$  – порядок дифракции.

На рисунке 3 представлены спектры излучения Смита-Парселла, генерируемые пучком электронов с энергией 20 кэВ и 22.5 кэВ [3]. Приведены данные для оптической решетки с треугольным профилем и периодом решетки  $d = 0.556$  мкм. Наблюдения проводились под углом  $\theta = 80^\circ$ .

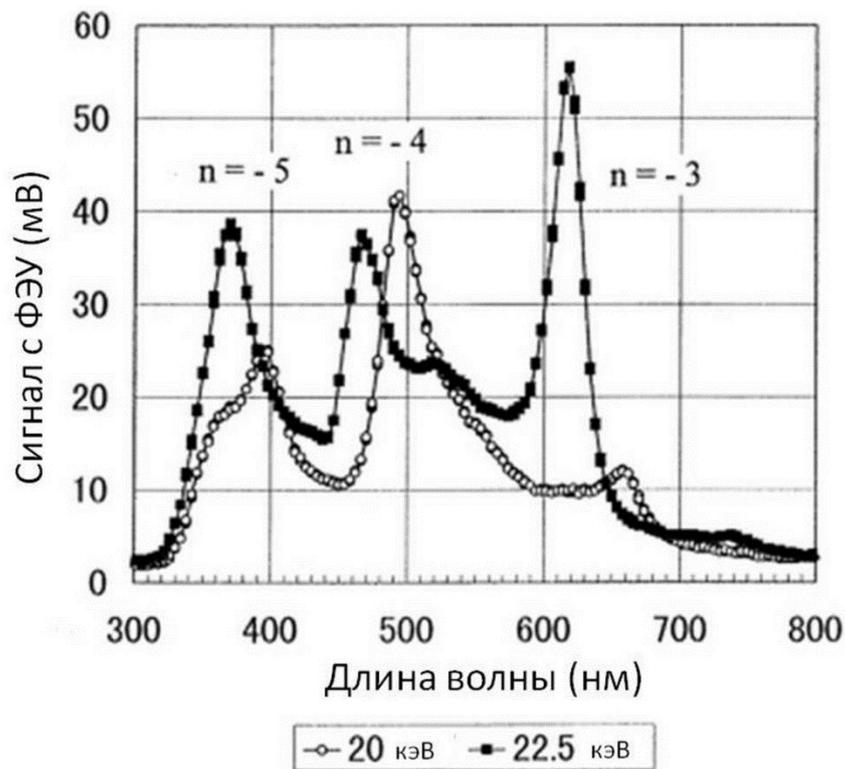


Рисунок 3. Спектры излучения Смита-Парселла для быстрых электронов [3]

На сегодняшний день проводится достаточно большое количество исследований излучения Смита-Парсела при различных условиях (энергия падающего пучка, материал подложки, тип решетки и т.д.) [3-6]. Например, авторы работы [3] для получения и исследования ИСП в оптическом диапазоне

длин волн создали на основе электронного микроскопа ЭММА-2 с ускоряющим напряжением до 100 кВ и током  $I_{\max} = 95$  мкА, экспериментальную установку (рисунок 4)

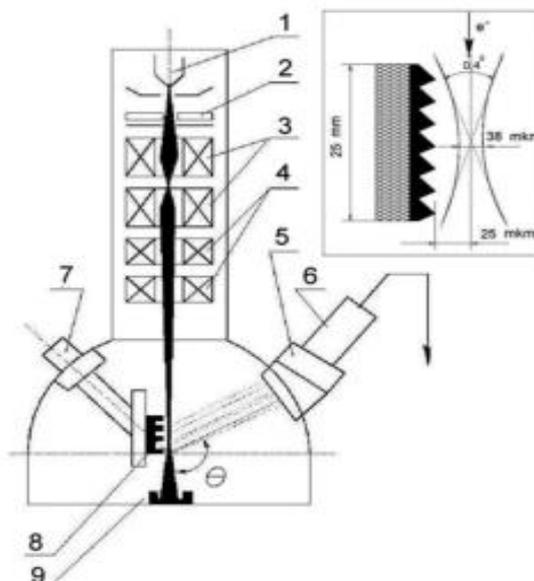


Рисунок 4. Экспериментальная установка: 1) катод; 2) анод; 3) конденсоры; 4) система перемещения; 5) монохроматор; 6) ФЭУ; 7) микровинт; 8) решетка; 9) цилиндр Фарадея [3]

Электронная пушка создает пучок электронов, который с помощью конденсорных линз формируется и направляется на исследуемый объект. В качестве источника электронов в микроскопе используется V-образный вольфрамовый термокатод. Рабочее ускоряющее напряжение варьируется от 50 до 100 кВ. Для каждого значения напряжения ток достигает фиксированного значения 50 кВ соответствует 62,5 мкА, а 75 кВ – 93,7 мкА.

Данная экспериментальная установка позволяла проводить исследования характеристик излучения СП при отсутствии взаимодействия электронного пучка с материалом мишени. В установке при  $d < 25$  мкм ( $d$ -период решётки) пучок касался решетки в верхних и нижних точках, что приводило к интенсивному свечению решетки, обусловленному переходным излучением,

видимым невооруженным глазом. Поэтому, для чистоты эксперимента выдерживается расстояние не менее 25 мкм.

Существуют теоретические исследования для ИСП в рентгеновской области [4]. Также теоретически и экспериментально изучается терагерцовое ИСП [5], в работе были выявлены механизмы многоцветной когерентности ИСП для объемных Дираковских полуметаллических (bulk Dirac semimetals) решеток. В [5] описывается физика процесса – полихромного излучения за счёт изменения параметров решетки (полуметалла Дирака). На рисунке 5 представлены зависимости частот ИСП от высоты решетки ( $h$ ) и расстояния между штрихами решетки ( $w$ ).

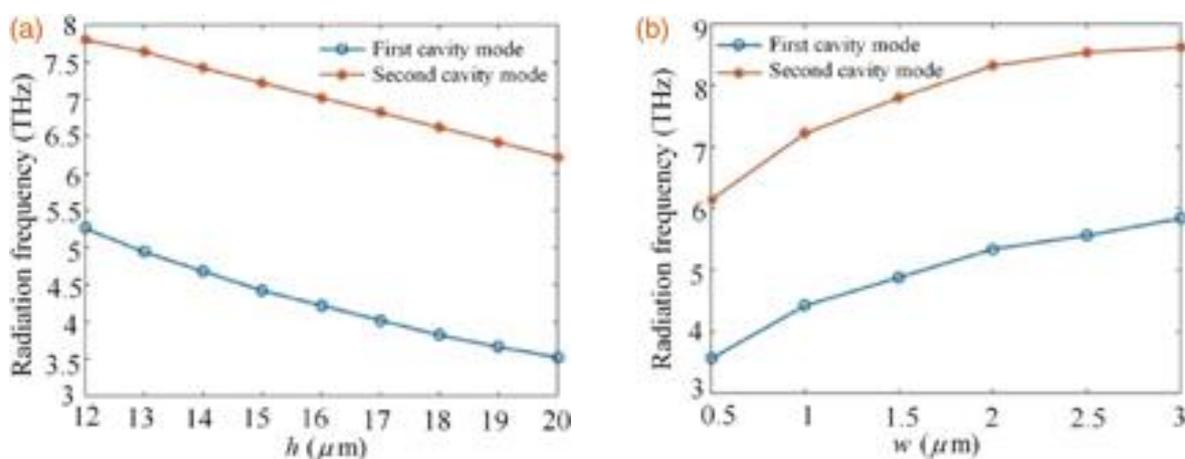


Рисунок 5. Частоты излучения первой и второй гармоник излучения в зависимости от высоты решетки (a) и ширины щели (b) [5]

Помимо этих исследований, следует выделить достаточно интересную экспериментальную работу по изучению ИСП при взаимодействии электронов с низкой энергией 1.5-6 кэВ [6] с металлическими решетками, обладающими наноразмерными характеристиками (рисунок 6).

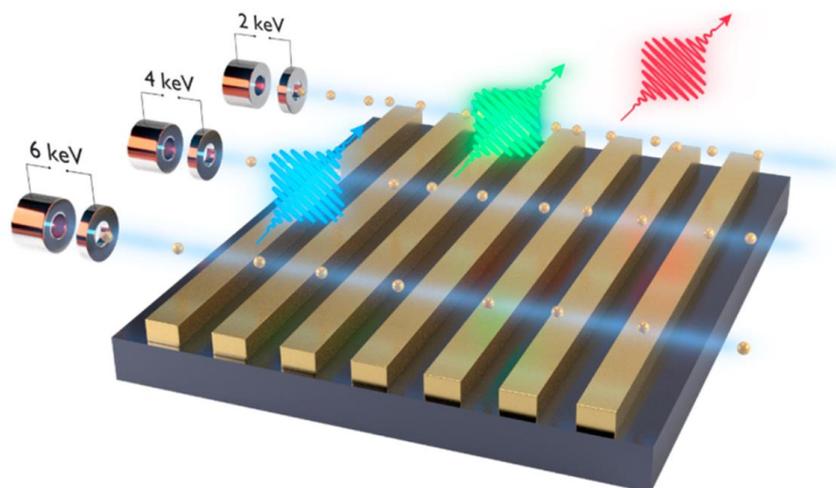


Рисунок 6. Наблюдение видимого ИСП при прохождении вдоль решетки электронов с различной энергией. Изменение энергии электронов позволяет перестраивать длину волны излучения [6]

На рисунке 7 показаны характеристики полученного ИСП.

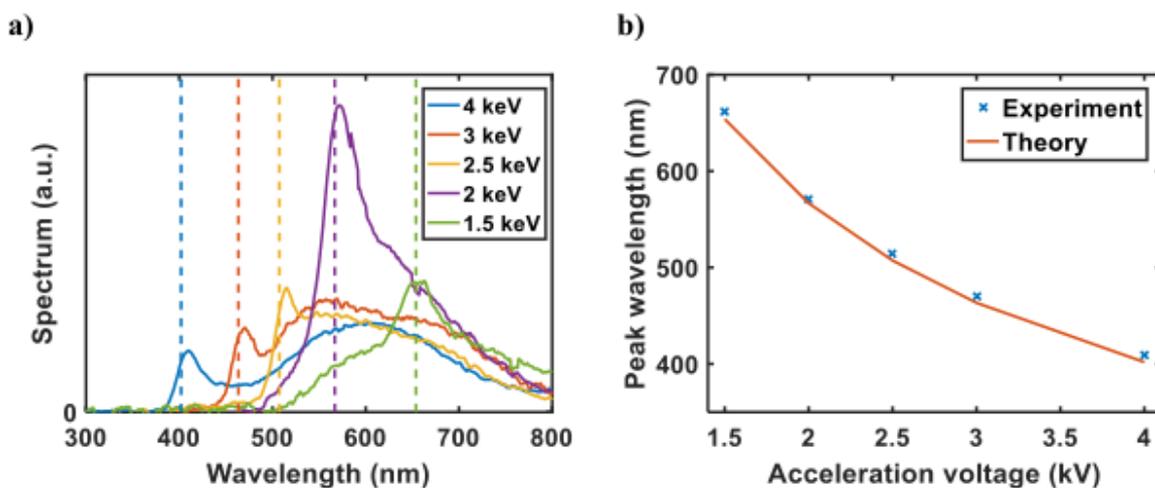


Рисунок 7. ИСП для электронов низких энергий и решетки наноразмерного периода. (а) Измерены спектры для разных кинетических энергий и решетки с шагом 50 нм. Пунктирные вертикальные линии рассчитываются в соответствии с обычной теорией СП при нормальном излучении, с цветами, соответствующим различным кинетическим энергиям. (б) Сравнение пиковых длин волн, полученных экспериментально и теоретически [6].

Авторы работы [6] предполагают, что перспектива создания низкоэнергетического источника света в наномасштабе проложит путь для новых режимов взаимодействия света с веществом.

Можно заключить, что в настоящее время исследования ИСП, генерирующегося при различных параметрах пучков электронов и упорядоченных структур поверхностей, проводятся достаточно активно. Таким образом, возможность генерации излучения Смита-Парселла на упорядоченных массивах углеродных нанотрубок является актуальной задачей и представляет интерес как с научной, так и с прикладной точек зрения.

## §1.2. Получение углеродных нанотрубок

Для выполнения поставленной задачи необходим образец дифракционной решетки, штрихи которой представляют из себя массивы углеродных нанотрубок.

Существует несколько основных методов синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) (дуговой разряд, лазерная абляция, плазмохимическое газофазное осаждение). Современный и наиболее используемый способ получения массивов нанотрубок – метод химического парофазного осаждения (ХПО или CVD). Метод ХПО УНТ заключается в разложении углеводородов до углерода и дальнейшего синтеза углеродных наноструктур на различных подложках. Установки ХПО-синтеза в большинстве своем обладают похожей конструкцией. Схема и фотография установки УНТ-2 для исследования процесса синтеза УНТ приведены на рисунке 8.

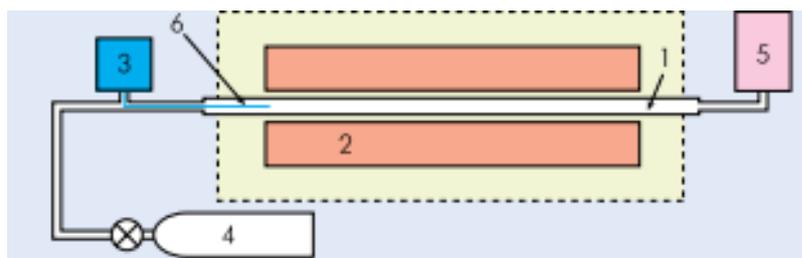


Рисунок 8. Схема (сверху) и фотография (снизу) установки каталитического пиролиза жидких и газообразных углеводородов: 1 – трубчатый кварцевый реактор; 2 – основной термоблок; 3 – инжектор; 4 – баллон с аргоном; 5 – вытяжка для удаления продуктов пиролиза; 6 – игла инжектора

Процесс синтеза УНТ делится на несколько этапов. Сначала, в первой зоне реактора при 100–200°C газ-носитель насыщается реагентами из раствора катализатора (металлорганика) и углеводорода, который, разложившись, будет источником углерода для синтеза. Насыщенный реагентами газ поступает во вторую зону (при 600–1050°C), где углеводороды разлагаются до углерода, а катализатор – до металла. В этой зоне протекает сам синтез УНТ. Схема технологического процесса производства упорядоченного массива углеродных нанотрубок показана на рисунке 9. Принцип показанного технологического процесса основан на термическом разложении метана и осаждении атомов углерода на более холодной подложке, покрытой частицами катализатора. Под воздействием катализатора на подложке

происходит рост нанотрубок. Подложка помещена в объем, разогреваемый до рабочей температуры процесса 1100°C. При добавлении водяного пара аморфный углерод, который также осаждается на подложке, эффективно связывается, оставляя частицы катализатора в активном состоянии. Добавление водяного пара также позволяет улучшить характеристики получаемых массивов нанотрубок (например, сделать массивы более упорядоченными).

Одно из главных преимуществ ХПО-процессов – синтез ориентированных массивов УНТ на носителе. При этом можно создать условия синтеза, при которых обеспечивается высокоселективный рост УНТ на одном материале подложки относительно другого (например, SiO<sub>2</sub>/Si и др.)

ХПО -технология позволяет получать избирательное осаждение не только с использованием "локализованных", но и "летучих" катализаторов. На рисунке 10 приведены примеры массивов, синтезированных с использованием как "летучего" (а), так и "локализованного" (б) катализаторов

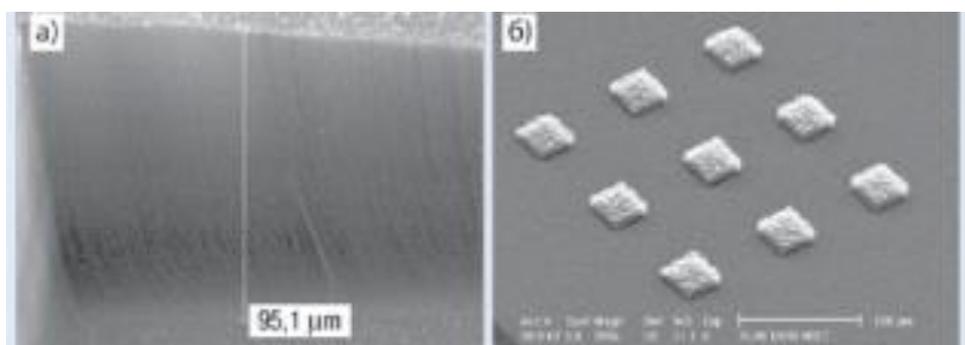


Рисунок 10. Пример селективного роста массивов УНТ при использовании разного типа катализаторов: а) "летучий"; б) "локализованный"

§2.1 Постановка задачи

Основная задача состоит в выполнении исследования возможности генерации излучения Смита-Парселла при прохождении пучка ускоренных электронов вблизи структур, которые представляют собой упорядоченные в пространстве области с высокой электронной плотностью (ОВЭП), в нашем случае это массив нанотрубок. Данная задача была поставлена в рамках выполнения научно-исследовательского проекта № МД-5748.2018.2.

Для выполнения поставленной задачи необходимо выполнить эксперимент, схема которого изображена на рисунке 11.

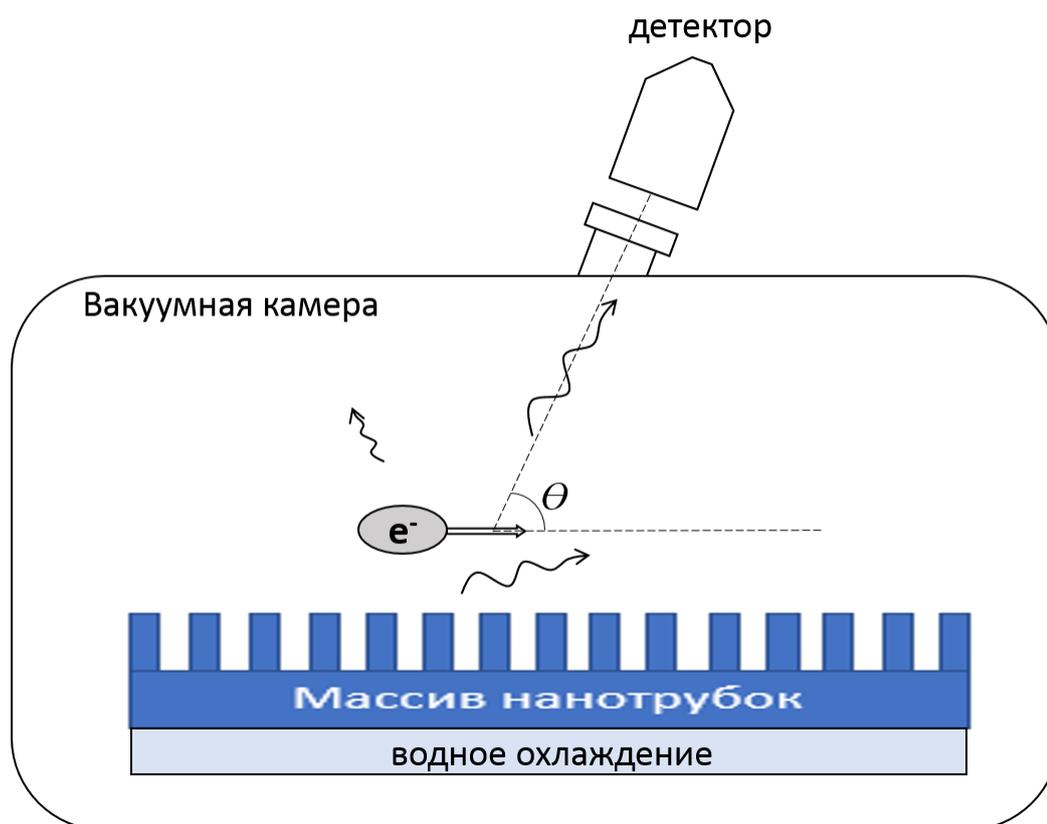


Рисунок 11. Общая схема эксперимента по измерению излучения, генерирующегося при прохождении пучка электронов вдоль упорядоченного массива углеродных нанотрубок

В работе в качестве мишени использовался образец, представляющий собой упорядоченные массивы ориентированных нанотрубок, которые были нанесены в виде периодических штрихов на слабо проводящую подложку (кремний). Изображение фрагмента массива нанотрубок, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, показано на рисунке 12. На рисунке 13 приведена фотография образца – кремниевая пластина с нанесенными на нее массивами углеродных нанотрубок.

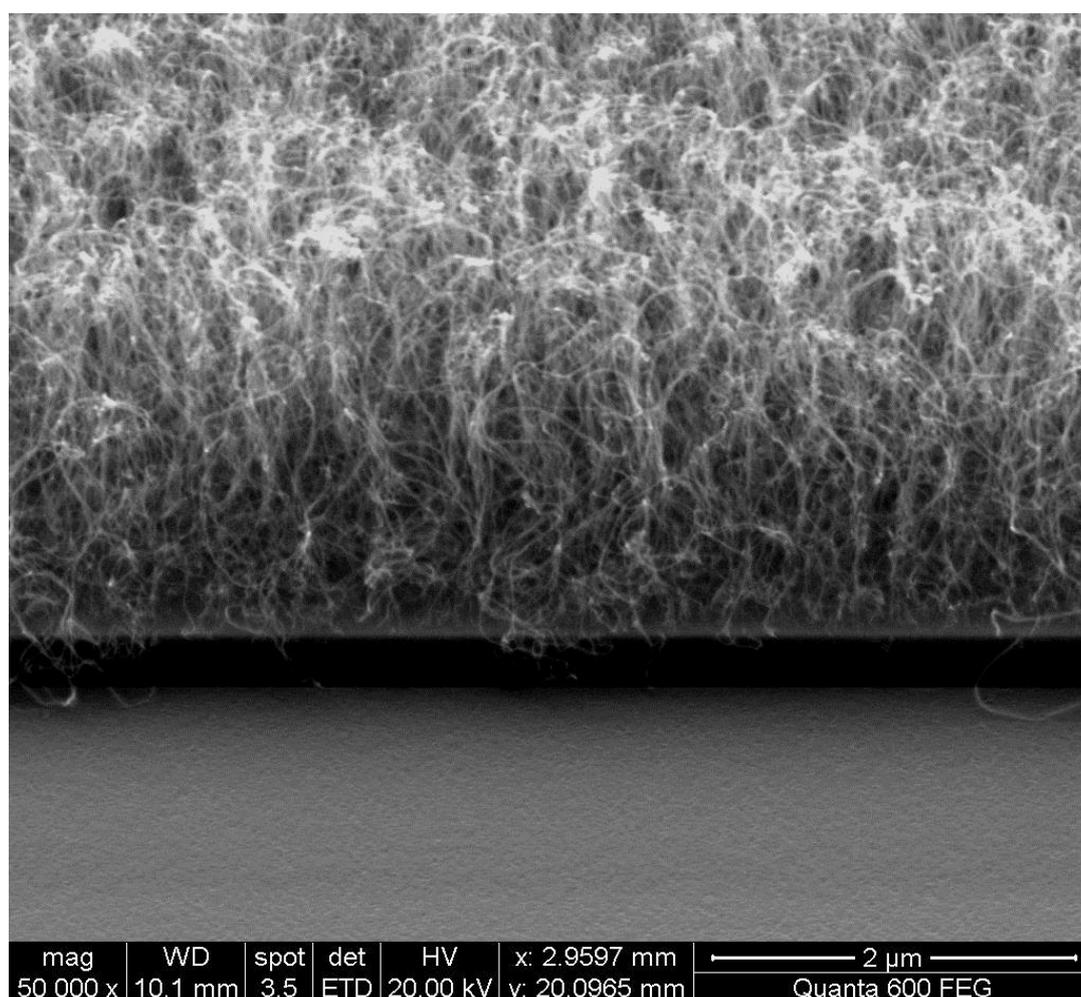


Рисунок 12 – Изображение массива нанотрубок под углом  $60^\circ$  (увеличение 50 000)

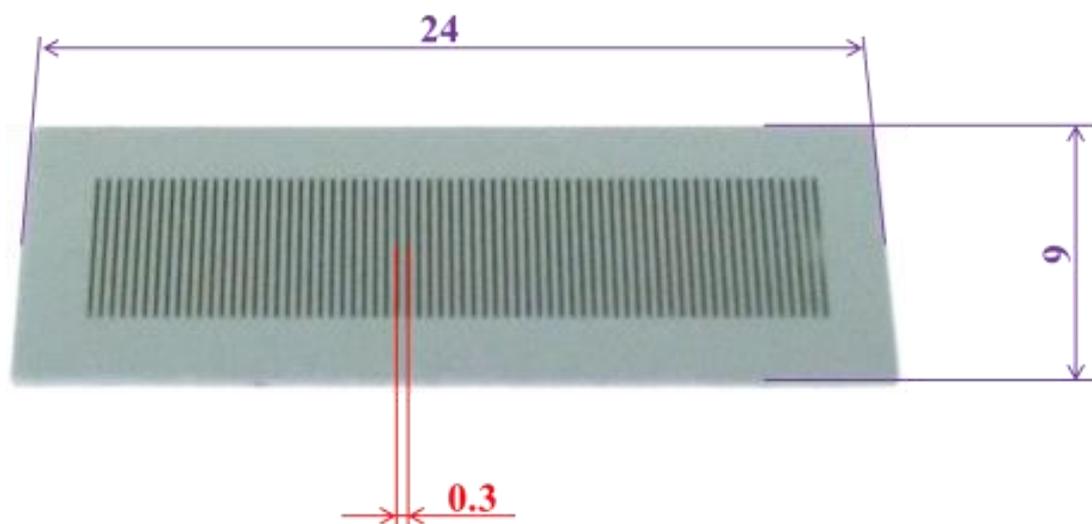


Рисунок 13 – Образец мишени с периодически расположенными ОВЭП

Мишень (пластину с нанотрубками) размещалась в вакуумной камере на специальном держателе (рисунок 14), который, в свою очередь, устанавливался в гониометре с двумя степенями свободы. Фотография гониометра с держателем образца в камере приведена на рисунке 15.

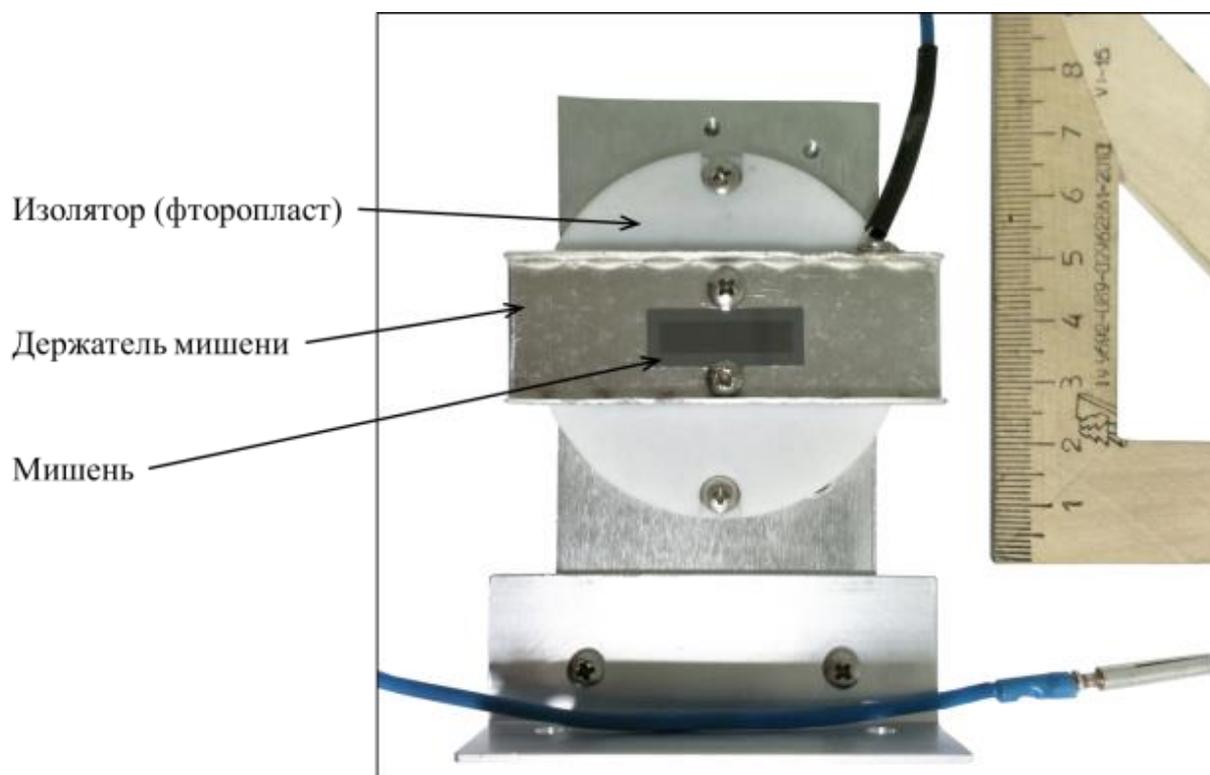


Рисунок 14. Держатель мишени с образцом

Для проведения экспериментов по исследованию излучения, в вакуумную камеру устанавливается двухосевой гониометр, который обеспечивает вращение и линейное перемещение облучаемой мишени относительно оси пучка, что позволяет контролировать угол между скоростью электронов и поверхностью мишени (угол скольжения), а также прицельный параметр взаимодействия.



Рисунок 15. Внешний вид гониометра, установленного в вакуумную камеру размещения мишеней

Помимо закрепленной в держателе мишени на гониометр может устанавливаться люминесцентный экран, предназначенный для визуального контроля положения пучка в вакуумной камере.

Эксперимент проводился на установке, разработанной и созданной на базе международной научно-образовательной лаборатории радиационной физики. Схема установки приведена на рисунке 16.

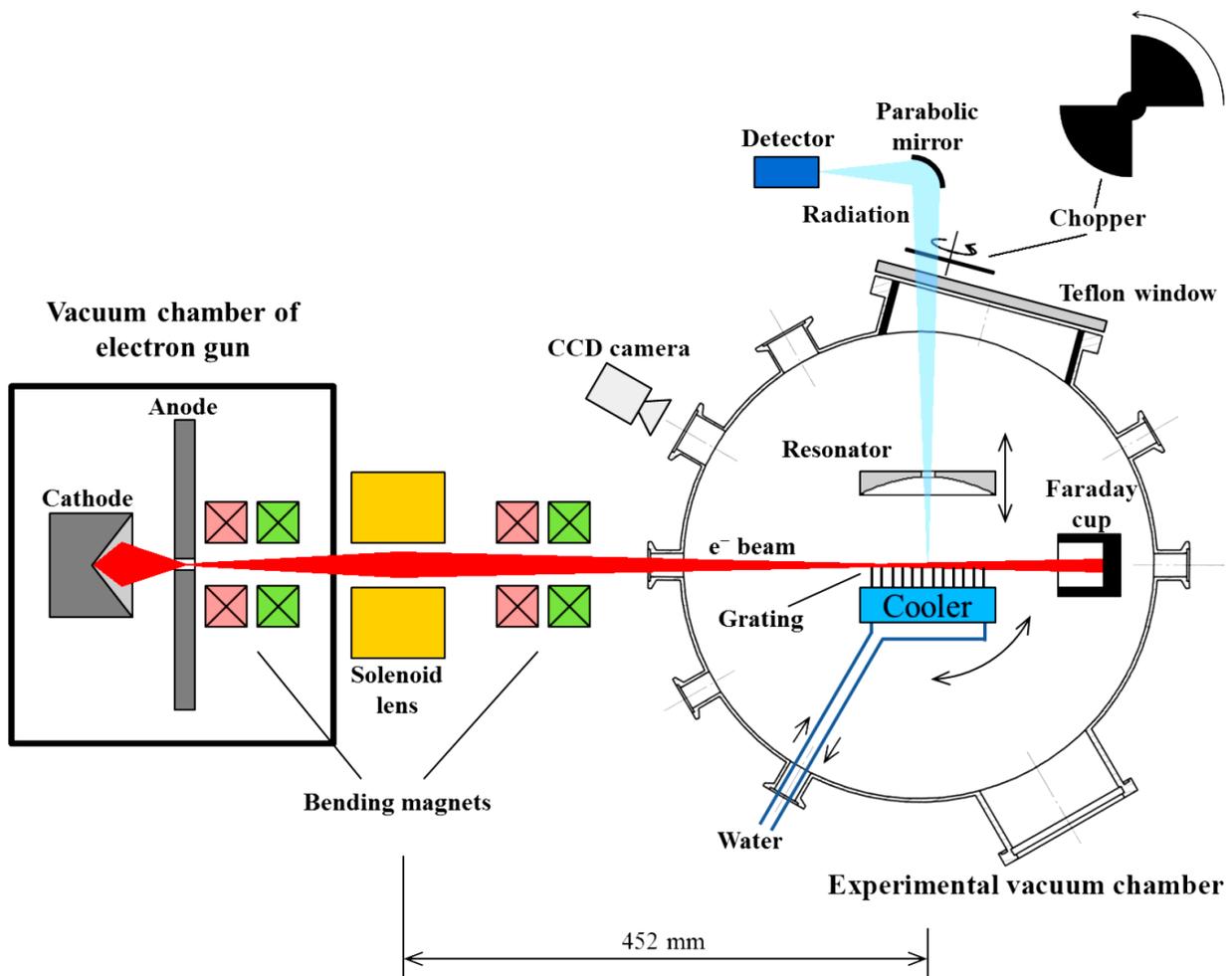


Рисунок 16 – Схема экспериментальной установки с установленной системой диагностики [14]

Установка состоит из электронной пушки постоянного тока, системы транспортировки пучка, экспериментальной вакуумной камеры и комплекта диагностического оборудования.

В качестве источника электронов использовалась электронная пушка, спроектированная и изготовленная в МНОЛ радиационной физики НИУ «БелГУ». Данный источник представляет собой электронную пушку с термокатодом (рисунок 17), заземленным анодом и электростатической фокусировкой. В качестве эмиттера электронов использовались V-образные катоды Kimball Physics Inc. E-020, выполненные из вольфрамовой проволоки диаметром 0.13 мм, подогреваемые электрическим током.

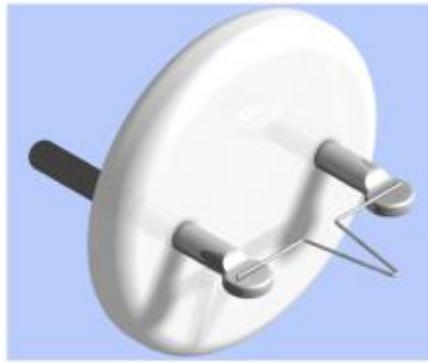


Рисунок 17. Термокатод КРІ Е-020.

Для ускорения электронов на катод подается высокое отрицательное напряжение. Первичная фокусировка пучка осуществляется при помощи электростатического поля, образующегося между плоским анодом и управляющим электродом специальной формы. Анод представляет собой диафрагму с апертурой 0.7 мм, предназначенной для вывода ускоренных электронов. Схематично электронная пушка представлена на рисунке 18. Экспериментальным путём было выявлено, что пушка способна обеспечить пучок электронов с энергией 10–100 кэВ, током от 0.1 нА до десятков мкА.

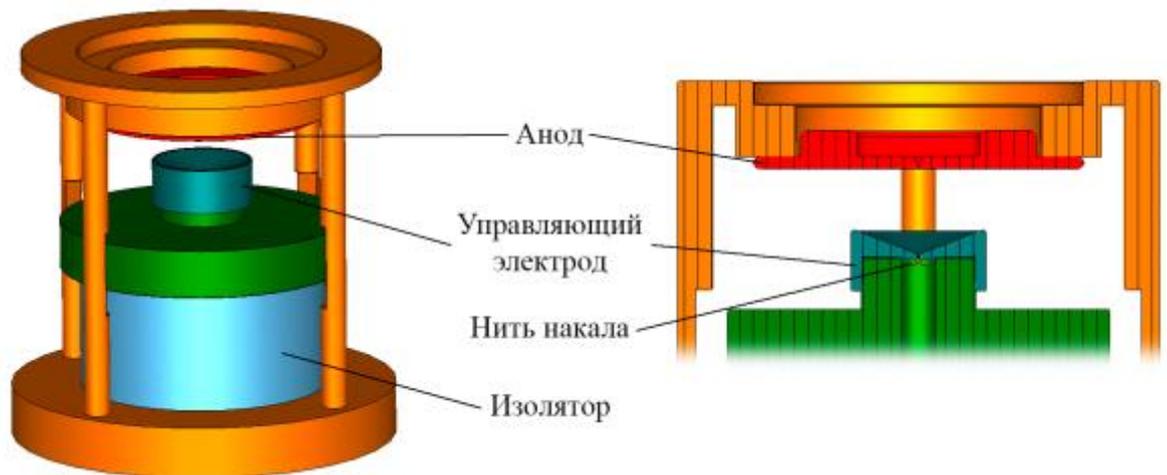


Рисунок 18 Устройство электронной пушки

Для обеспечения работы электронной пушки используется источник питания рентгеновских трубок и электронных пушек Spellman XRV. Питание подается на пушку через высоковольтный вакуумный ввод с масляной

изоляции. Электронная пушка размещается в вакуумной камере, в которой поддерживается давление не более  $1 \times 10^{-6}$  торр.

Основные характеристики электронной пушки:

• ускоряющее напряжение	10–100	кВ;
• ток пучка	1–500	мкА;
• ток эмиссии	до 0.8	мА;
• ток накала	до 2.5–2.8	А;
• напряжение накала	до 2	В;
• диаметр выходной диафрагмы	0.7	мм;
• расходимость пучка	около 3°.	

Измерение тока пучка электронов производилось при помощи цилиндра Фарадея, вход которого для исключения влияния вторичной электронной эмиссии на процесс измерения, закрывался металлической сеткой, находящейся под отрицательным потенциалом порядка 100 В. Сигнал, поступающий с цилиндра Фарадея, измерялся при помощи пикоамперметра Keithley 6485.

Выбор детектора излучения, возникающего при движении пучка электронов вблизи образца, определяется длиной волны ИСП, которую можно оценить из параметров решетки и энергии падающего пучка электронов, используя формулу (3). Оценки длины излучения, которое может генерироваться для заданного образца при энергии электронов порядка нескольких десятков кэВ дает величину субмиллиметрового диапазона, что соответствует терагерцовому излучению.

Для регистрации излучения в терагерцовом и суб-терагерцовом диапазонах используется оптоакустический детектор TYDEX GC-1P (оптимальный рабочий диапазон: 0.15–20 ТГц, полный рабочий диапазон: 0.04–300 ТГц). Для вывода излучения из вакуумной камеры размещения мишеней используется фторопластовое окно толщиной 7 мм, форма которого

позволяет устанавливать детектор под углами наблюдения от  $60^\circ$  до  $90^\circ$  относительно оси пучка. Детектор Голея – это дифференциальный детектор, измеряющий изменение мощности излучения. Выходной прерыватель модулирует выходное излучение, чтобы его можно было обнаружить. Сам он представляет собой металлический диск с четырьмя квадрантами, который может вращаться с фиксированной частотой в диапазоне от 5 до 20 Гц (на рисунке 19 слева).



Рисунок 19. Выходной прерыватель и оптоакустический детектор  
TYDEX GC-1P

Параболическое зеркало с эффективной площадью  $19.6 \text{ см}^2$  используется для концентрации мощности излучения на поверхности детектора. Система сбора данных показана на рисунке 20.

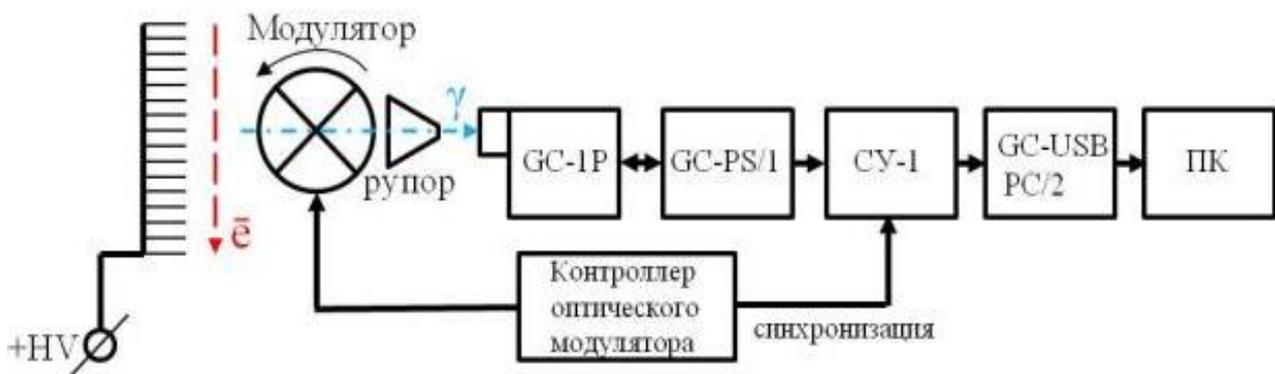


Рисунок 20. Схема подключения спектрометрической системы

Опто-акустический приемник включает в себя приемную камеру, оптический микрофон и плату предусилителя.

Поток излучения формируется с помощью модулятора, который был синхронизирован с синхронным усилителем СУ-1. Далее сформированный сигнал через рупор, который служит для собирания входного сигнала, поступает в оптоакустический приемник GC-1P, затем сигнал усиливается с помощью СУ-1 и с помощью АЦП GC-USB PC/2 преобразовывается, и через USB выводится на компьютер, дальнейшая обработка производилась в программе «Golay Sensor Frontend».

Перед началом работы систему необходимо отъюстировать. Излучение, возникающее при взаимодействии пучка электронов с образцом, должно проходить через модулятор и рупор и попадать в окно детектора. Для юстировки был установлен лазер, луч которого проходил без помех через центр мишени, лопасти модулятора, рупор и попадал в центр окна датчика.

На рисунке 21 приведена оптическая схема приемника GC-1P.

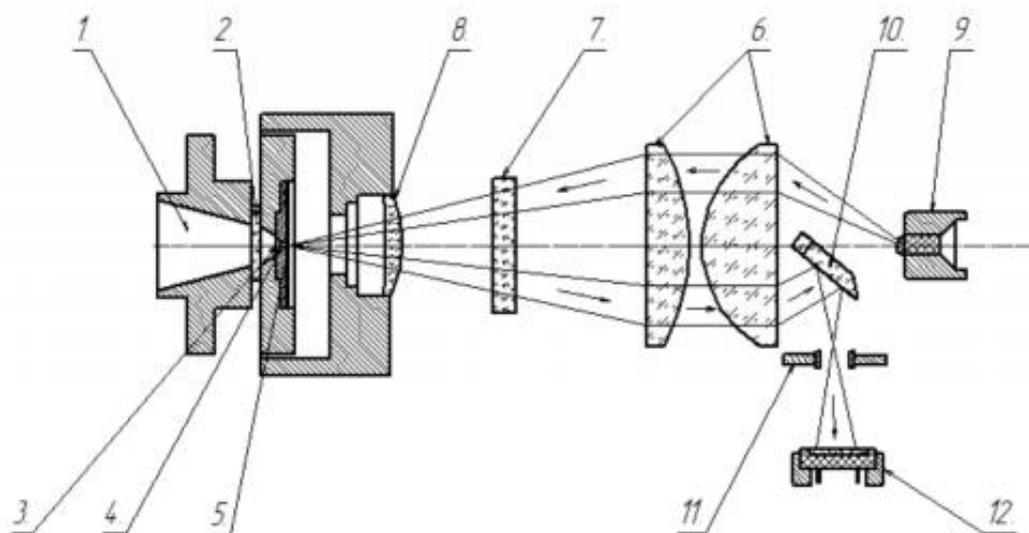


Рисунок 21. Оптическая схема приемника GC-1P

Модулированный поток излучения, пройдя через входной конус 1 и входное окно 2, попадает на полупрозрачную пленку 3, помещенную в центральной части приемной камеры. Поглощенная пленкой энергия передается газу, наполняющему камеру, в результате чего в камере возникают пульсации давления газа с частотой, равной частоте прерывания потока. Эти пульсации передаются через канал 4 на зеркальную мембрану 5, которая одновременно является стенкой приемной камеры и зеркалом оптического микрофона. Конденсором 6 через растр 7, расположенный в фокальной плоскости объектива 8, на зеркальную мембрану проецируется изображение источника излучения оптического микрофона, в качестве которого использован излучающий диод 9. Далее излучение источника отражается от мембраны, проходит через нижнюю половину растра и с помощью зеркала 10 и диафрагмы 11 направляется на фотодиод 12. Под действием пульсации давления газа мембрана колеблется, изображение прозрачных штрихов верхней половины растра периодически смещается относительно непрозрачных штрихов нижней половины растра, направляемого на фотодиод. Предварительный усилитель на операционном усилителе и сдвоенном полевом транзисторе преобразует колебания фототока в переменный

электрический сигнал. Напряжение сигнала по соединительному кабелю подается на вход внешнего «устройства регистратора». [8]

Чтобы оценить характерное время релаксации ТГц детектора, была измерена зависимость мощности детектируемого сигнала от блокировки (выключения) света от источника излучения (нити накала). Зависимость показана на рисунке 22.

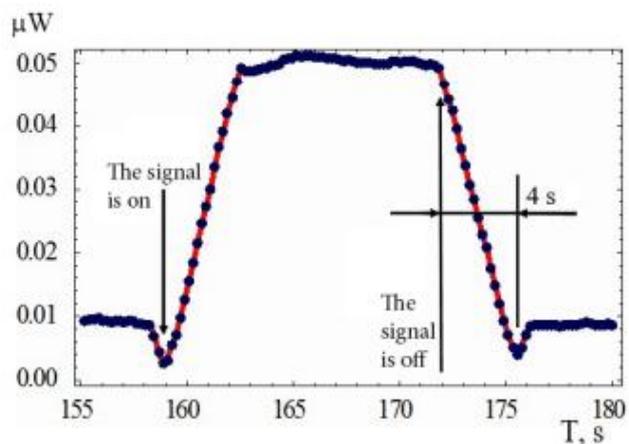


Рисунок 22. Время релаксации детектирующей системы

## §2.2 Проведение эксперимента

На рисунке 23 представлена фотография экспериментальной установке, на которой проводился эксперимент.

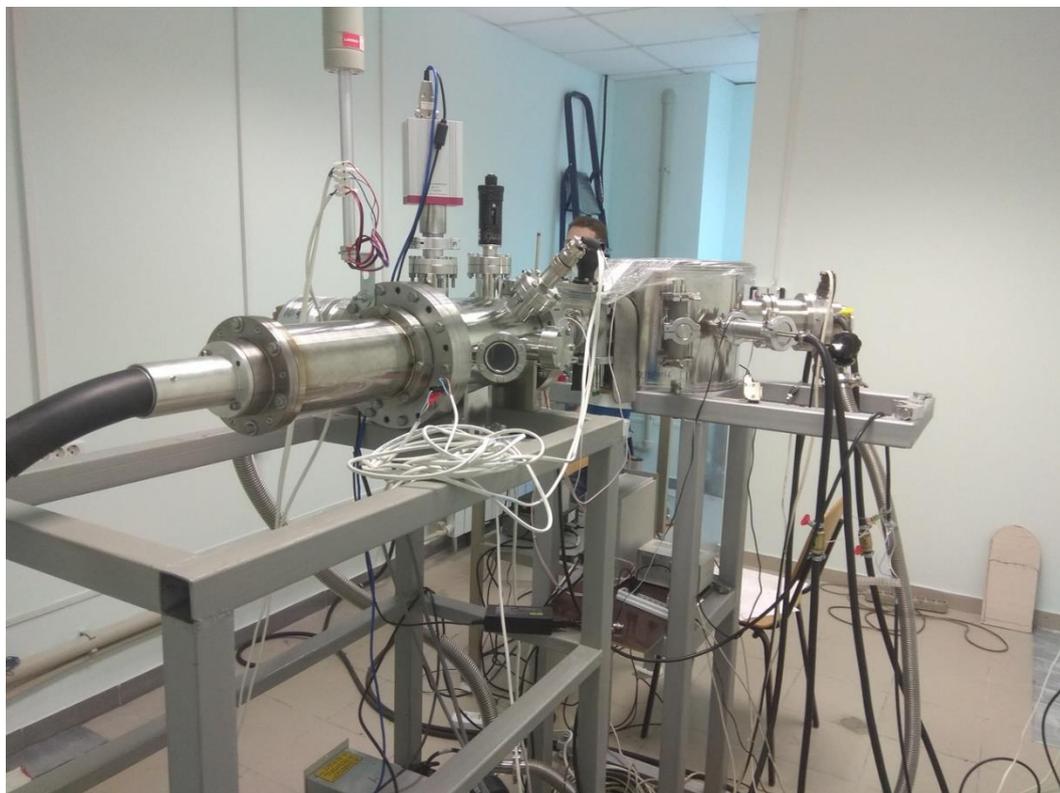


Рисунок 23. Фотография установки

На первом этапе экспериментов проводились измерения характеристик излучения, образующегося при взаимодействии пучка электронов с энергией 40 кэВ и током 3.3 мкА с дифракционной решеткой, представленной на рисунке 14. Детектор устанавливался под углом наблюдения  $80^\circ$ . Ожидаемая длина волны излучения Смита-Парселла первого порядка для таких условий составляет около 0.7 мм (частота излучения 0.4 ТГц). При подстановке в формулу (3) были использованы следующие величины:  $n = 1$ ,  $v \approx 8 \cdot 10^7$  м/с,  $d = 0.3$  мм.

Измерения мощности излучения проводились при электрическом потенциале, подаваемом на решетку, разброс прицельных параметров электронов определялся размером пучка. Результат реакции мощности детектируемого сигнала, регистрируемого оптоакустическим детектором, на наличие пучка электронов представлен на рисунке 24.

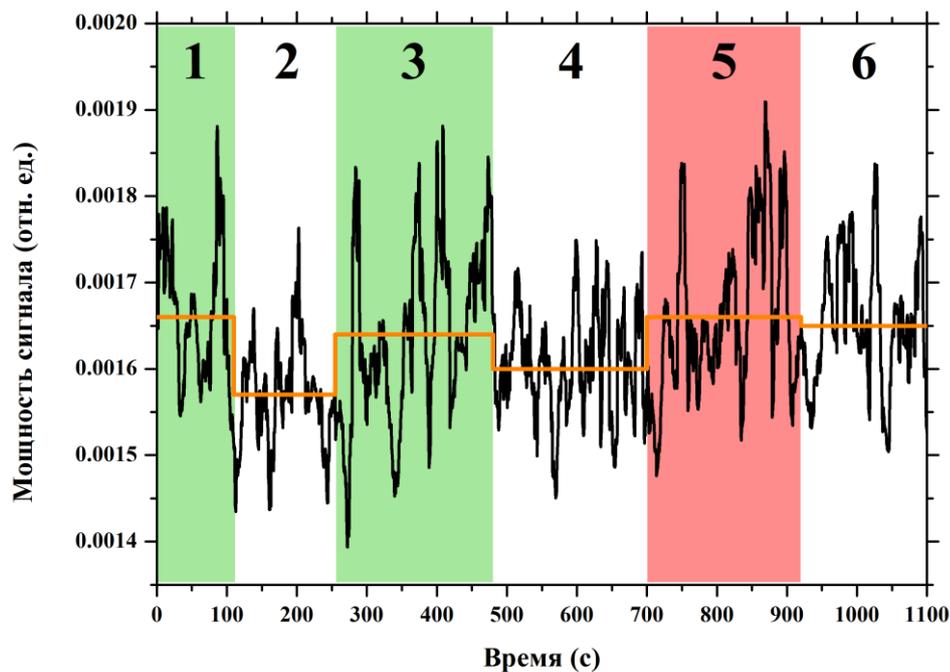


Рисунок 24. Зависимость мощности излучения, генерируемого дифракционной решеткой с периодом 0.3 мм под действием пучка электронов с энергией 40 кэВ и полным током 3.3 мкА: областям 1, 3 соответствует ток пучка над поверхностью решетки 1.5–1.7 мкА; 5 — пучок попадает в торец решетки; 2, 4, 6 — решетка отодвинута от пучка.

Цветом на графике выделены области времени, в которых пучок электронов взаимодействовал с мишенью, находящейся под потенциалом +400 В. Области 1 и 2 соответствуют случаю, когда над поверхностью дифракционной решетки (угол скольжения  $< 0.2^\circ$ ) проходил пучок с током 1.5–1.7 мкА, остальная часть пучка попадала на торец решетки и в процессе

генерации излучения Смита-Парселла не участвовала. На областях 2, 4 и 6 отображен уровень сигнала, когда пучок электронов не взаимодействовал с мишенью. Видно, что мощность регистрируемого излучения скачкообразно возрастает при облучении дифракционной решетки пучком. Область 5 соответствует случаю, когда основная часть пучка попадает на торец решетки (ток пучка над решеткой составляет 7–45 нА). Увеличение мощности сигнала в этой области можно объяснить вкладом инфракрасного (ИК) излучения, образующегося при нагреве решетки под действием пучка. Таким образом, сигнал, измеряемый оптоакустическим детектором, содержит вклады как излучения Смита-Парселла, так и паразитного ИК-излучения. Для исключения влияния теплового фона на результаты измерений можно использовать фильтры, установленные в оптическом тракте и не пропускающие ИК-излучение, и (или) обеспечить охлаждение мишени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью дипломной работы было исследование излучения, возникающего при прохождении пучка ускоренных электронов вблизи структурированной поверхности. Задача состояла в том, чтобы экспериментально измерить параметры излучения, генерирующегося в процессе бесконтактного взаимодействия электронов с энергиями порядка 10 кэВ с дифракционной решеткой, сформированной из упорядоченных массивов углеродных нанотрубок. В ходе работы над дипломом было определено, что излучение, возникающее в данном процессе, определяется механизмом Смита-Парселла.

Анализ современных литературных источников показал, что в настоящее время ведутся активные исследования в области создания источников излучения, основанных на механизме Смита-Парселла. Спектр излучения при этом зависит от различных параметров системы: энергия падающего пучка, материал подложки, тип решетки и т.д. В настоящем исследовании использовалась дифракционная решетка – упорядоченные массивы углеродных нанотрубок, сформированные на кремниевой подложке с периодом 300 мкм. В данной работе также был рассмотрен основной метод выращивания углеродных нанотрубок, который был использован для создания исследуемого образца.

Экспериментальное исследование было выполнено на базе экспериментальной установки, разработанной в МНОЛ радиационной физики НИУ «БелГУ». Предварительно были произведены измерения характеристик излучения, которое может образоваться при взаимодействии пучка электронов с энергией 40 кэВ и током 3.3 мкА с дифракционной решеткой, период которой 0.3 мм. Выбор детектора излучения TУDEX GC-1P (детектор терагерцового и суб-терагерцового излучения), таким образом, определился механизмом излучения и расчетными характеристиками.

Результаты выполненных измерений позволяют предположить, что проявление излучения Смита-Парселла было зафиксировано, так как мощность регистрируемого излучения скачкообразно возрастала при облучении дифракционной решетки пучком, что можно заметить на рисунке 24 (Зависимость мощности излучения, генерируемого дифракционной решеткой). Однако в данных измерениях, без сомнения, также должен присутствовать вклад ИК излучения, возникающего, если пучок касался пластины и нагревал ее (данный процесс достаточно трудно контролировать). Таким образом, данный эффект требует дальнейших более детальных исследований.

Следует отметить, что в случае, если терагерцовое излучение будет однозначно зарегистрировано, это даст отправную точку для создания компактных источников указанного излучения, что является актуальной задачей для современной физики. Терагерцовое излучение имеет достаточно широкие области применения и может использоваться в повседневной жизни человека. Например, в системах безопасности оно используется для сканирования багажа и людей. В отличие от рентгена, ТГц-излучение не вредит организму. С его помощью можно «разглядеть» спрятанные под одеждой человека керамические, металлические, пластиковые и другие предметы на расстояниях до десятков метров. Длина волны сканирующего излучения — 3 мм.

Также существует метод получения изображения микроскопических объектов с использованием ТГц-излучения, с его помощью были получены рекордные значения чувствительности и качественная разрешающая способность.

В медицине начинают внедрять ТГц-томографы, с помощью которых можно исследовать верхние слои тела — кожу, сосуды, мышцы — до глубины в несколько сантиметров. Это нужно, например, для получения изображения опухолей.

Если усовершенствовать ТГц приёмные камеры, то это позволит получать снимки поверхностей, скрытых под слоями штукатурки или краски, что, в свою очередь, сделает возможным восстановление первоначального облика произведений искусства, не трогая при этом его физически.

В производстве ТГц излучение может помогать контролировать качество выпускаемой продукции и мониторинга оборудования. Например, можно проводить осмотр продукции в пластиковой, бумажной таре, прозрачной в ТГц спектре, но непрозрачной в видимом.

Также рассматривается возможность разработки высокоскоростных ТГц систем связи и ТГц локации для больших высот и космоса.

## Список литературы

1. Smith S.J., Purcell E.M. Visible light from localized surface charges moving across a grating // *Phys. Rev.* – 1953. – V. 92. – № 4. – P. 1069
2. Франк М. Оптическое излучение // *Известия АН СССР*, 1942, № 3, С. 6-9
3. Экспериментальная установка для наблюдения эффекта Смита-Парселла на базе электронного микроскопа ЭММА-2и Ю.Н. Адищев, А.В. Вуколов, А.П. Потылицын, Г. Кубе // *Известия Томского политехнического университета*. 2004. Т. 307. № 6
4. В. В. Сыщенко, Н. Ф. Шульга, Излучение на полубесконечной пластинке и эффект Смита–Парселла в рентгеновской области // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* № 4, 94-97, 2011
5. Coherent terahertz Smith–Purcell radiation from Dirac semimetals grating with very deep and narrow slits Tao Zhao 1 \*, Min Hu 1 , Zhen Lian 1 , Renbin Zhong 1 , Sen Gong 1 , Chao Zhang 1,2 , and Shenggang Liu // *Appl. Phys. Express* 11, 082801 (2018)
6. Smith-Purcell Radiation from Low-Energy Electrons Aviram Massuda, Charles Roques-Carmes, Yujia Yang , Steven E. Kooi, Yi Yang, Chitraang Murdia, Karl K. Berggren, Ido Kaminer, Marin Soljačić // *ACS Photonics* 2018593513-3518
7. , А.Басаев, В.Галперин, А.Павлов, Ю.Шаман, С.Шаманаев, Особенности синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) и их массивов на установке УНТ-2а. // *НАНОИНДУСТРИЯ* 4/2009
8. Паспорт опто-акустический приёмник Тидекс GC-1P
9. García de Abajo FJ. Optical excitations in electron microscopy. *Reviews of Modern Physics* 2010, 82(1): 209-275.
10. Shaffer TM, Pratt EC, Grimm J. Utilizing the power of Cerenkov light with nanotechnology. *Nat Nano* 2017, 12(2): 106-117.

11. Schmitz C, Wilson D, Rudolf D, Wiemann C, Plucinski L, Riess S, et al. Compact extreme ultraviolet source for laboratory-based photoemission spectromicroscopy. *Applied Physics Letters* 2016, 108(23): 234101.
12. Kauffman RL, Phillion DW, Spitzer RC. X-ray production ~13 nm from laser-produced plasmas for projection x-ray lithography applications. *Appl Opt* 1993, 32(34): 6897-6900
13. Goldstein M, Walsh JE, Kimmitt MF, Urata J, Platt CL. Demonstration of a micro farinfrared Smith–Purcell emitter. *Applied Physics Letters* 1997, 71(4): 452-454.
14. R.M. Nazhmudinov, P. Karataev, A. Kubankin, K. Lekomtsev, A. Potylitsynd and A. Vukolov. Experimental station with continuous electron beam for investigation of various mechanisms of EM radiation generation // 2018 JINST 13 C06007