

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи

Гошев Андрей Александрович

**Взаимодействие атомно-молекулярных систем
и наночастиц с ультракороткими
импульсами электромагнитного поля**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Архангельск 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель:	Есеев Марат Каналбекович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой фундаментальной и прикладной физики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
Ведущая организация:	Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Защита состоится «5» Июля 2022 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ЛФИ.01.04.21.003 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», расположенном по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>.

Работа представлена « » 2022 года в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1. ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность работы и степень проработанности темы диссертации

В настоящее время активно проводятся исследования в области наноматериалов, наноструктур и композитов на их основе. Интерес вызывают как фундаментальные, так и прикладные свойства такого рода объектов, что позволяет их использовать в широком классе устройств, материалов и приборов. В процессе уменьшения объекта до наноразмерного уровня начинают коренным образом меняться их электрофизические, механические и другие свойства. Начинают проявляться квантовые эффекты. К примеру, при переходе материала в наноразмерный диапазон масштаба доля поверхностных атомов будет увеличиваться, а свободная поверхность становится стоком различного рода дефектов (вакансий, дислокаций). Таким образом, происходит изменение зонной структуры, что приводит к формированию новых физических свойств объекта.

Так, например, углеродные нанотрубки (УНТ), графен, графеновые квантовые точки – graphene quantum dots (GQD), carbon nanodots (CNDs) являются перспективными кандидатами на роль функциональной добавки в различного рода устройствах. Добавка УНТ и GQD в электродные материалы для литий/натрий-ионных батарей улучшает их ёмкостные характеристики [1]. GQDs являются основными претендентами на замену квантовых точек Cd^{2+} и Pb^{2+} в технологии органических светодиодов – organic light-emitting diode [2, 3]. Углеродные наноматериалы находят своё применение в трибоэлектрических наногенераторах [4], квантовых компьютерах в качестве спиновых кубитов [5], медицине, как возможное средство против рака [6].

Приведённые в работах выше примеры демонстрируют большой функционал углеродных наноматериалов при условии чёткого контроля геометрии и дефектов их поверхности. Это способствует созданию структур с заданными свойствами.

В качестве основных инструментов исследования используют атомно–силовую микроскопию (АСМ), сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), лазерные и рентгеновские методы. Спектроскопия поглощения рентгеновских лучей (СПРЛ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) на сегодняшний день – это один из лучших инструментов для изучения химической модификации поверхностей [7-9]. Данные методы позволили открыть большинство структур кристаллов и многих молекул. Они лежат в основе современных открытий в области физики, химии, биологии, медицины [10-11]. Обычно, теория дифракции рентгеновских лучей [12] на периодических и сложных структурах описывается классически, как рассеяние плоских волн бесконечной длительности во времени. Проводя анализ дифракционной картины, можно судить о структуре вещества. К лазерным методам исследования наноструктур относятся: инфракрасное (ИК) поглощение и комбинационное рассеяние (КР) света, фотолюминесценция (ФЛ). Некоторые из этих методов чувствительны к дефектам структуры, другие к элементному составу.

В последнее время развитие получили методы, совмещающие в себе лазерные и рентгеновские наработки – ультракороткие импульсы (УКИ). Уникальность этих методов заключается в возможности генерировать колоссальную энергию в малом временном и пространственном масштабе. Такого рода лазерные импульсы уже сегодня применяются для исследования биомолекул, локальных дефектов, отслеживания динамики электронных процессов. Установки, позволяющие генерировать такого рода импульсы, вводятся в эксплуатацию и успешно функционируют в настоящее время. Например, Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (XFEL), линейный ускоритель когерентного источника света (LCLS), Free Electron laser Radiation for Multidisciplinary Investigations (FERMI). На сегодняшний день длительность генерируемых импульсов достигла 43 аттосекунд по данным [13]. Именно поэтому в настоящее время актуальным является разработка теоретической базы взаимодействия УКИ с веществом [14-15] и специфики рассеяния УКИ на различных многоатомных системах.

Цель работы

Целью данной работы является разработка нового метода исследования вещества посредством анализа спектров рассеяния ультракоротких лазерных импульсов электромагнитного поля на атомно-молекулярных системах и нанобъектах.

Задачи

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Развитие физико-математической модели расчёта спектральной плотности излучения УКИ атомарными, молекулярными анионами и углеродными наноматериалами.
- Определение ориентационных эффектов при рассеянии УКИ на молекулярных комплексах и наносистемах.
- Определение зависимости спектральной плотности излучения от геометрического расположения атомов нанобъектов.
- Сравнение спектроскопических методов анализа структуры УНТ, модифицированных молекулярными комплексами.
- Определение зависимости проводимости углеродных нанотрубок и композитов на их основе в низкочастотных электромагнитных полях.

Научная новизна работы

1. Впервые получено выражение для вероятности рассеяния ультракоротких лазерных импульсов на атомарных и молекулярных анионах с учётом магнитной компоненты падающего импульса.

2. Показано, что в спектре рассеянного лазерного импульса в рамках физико-математической модели возникает вторая гармоника на удвоенной частоте, которая чувствительна как к типу, так и к ориентации оси молекулярных анионов.

3. Получены и проанализированы спектры рассеяния УКИ на следующих нанобъектах: УНТ, группа колец на плоскости (PGR), графен, композиционный материал. Показано, что анализ интерференционной картины вблизи второй гармоники позволяет более эффективно определять структуру вещества.

4. Выявлена чувствительность спектра диаграммы направленности рассеянного ультракороткого импульса к несущей частоте падающего импульса, что позволяет детектировать собственные характеристики таких импульсов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, существенно развивают и дополняют теоретическое описание вопросов физики взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с веществом. Сделанные в работе выводы вносят вклад в понимание процессов взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с веществом.

Предложенный в работе математический аппарат является более общим и может дополнить методы рентгеноструктурного контроля наноматериалов. Особенно в связи с активным развитием и усовершенствованием техники лазеров на свободных электронах.

Анализируя дифракционные максимумы на второй гармонике, можно более детально описать изучаемую систему. Сигнал от второй гармоники позволяет избежать засветки от падающего излучения, совпадающего по частоте с падающим импульсом, тем самым повысить разрешение для исследования наноструктур. Объединяя спектры рассеяния УКИ на первой и второй гармониках, можно получить мощную методику в дифракционном анализе вещества.

Экспериментально проведённые исследования позволили изучить ряд электрофизических свойств композиционных наноматериалов и наноструктур, имеющих широкую область применения в науке и технике.

Полученные результаты могут быть применимы в фотонике, спектроскопии, рентгеноструктурном анализе, оптоэлектронике и других областях.

Методология и методы исследования

В работе применялись методы электродинамики, квантовой механики, включая методы квантово-механической теории внезапных возмущений.

Положения, выносимые на защиту

1. Учёт магнитной составляющей УКИ позволяет теоретически предсказать наличие гармоник следующего порядка в спектре рассеяния на объектах типа: УНТ, графен, композиционный материал и др.
2. Спектр рассеяния на второй гармонике позволяет определить ориентацию и тип молекулярных анионов, наноструктур в многокомпонентных материалах.
3. Молекулярные комплексы, пришитые в процессе функционализации, существенно меняют проводимость УНТ и композитов на их основе в переменном электромагнитном поле.

Личный вклад автора

Результаты диссертации, представленные в работе, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается строгостью используемых математических методов и моделей, непротиворечивостью результатов и выводов, их согласованностью с современными представлениями классической электродинамики, квантовой теории, совпадением результатов, полученных в предельном переходе с работами других авторов.

Основные результаты представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. Международные конференции “Saint-Petersburg OPEN” Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. Saint-Petersburg, **2016, 2017, 2018**.
2. Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации ФТИ», г. Екатеринбург, **2016, 2017, 2018, 2020, 2021**.
3. Международная конференция, приуроченная к 150-летию Бориса Розинга. Инновационные технологии и новые материалы: физика, химия, техника и инженерия», САФУ, Архангельск, **2019**.
4. Международная конференция RACIRI “Structure, Real-time Dynamics and Processes in Complex Systems”, Светлогорск, **2019**.

5. International conference PhysicA.SPb, (ФТИ Иоффе), **2019**.
6. Международная конференция по фотонике и информационной оптике «МИФИ», Москва, **2020, 2021**.
7. Международная конференция «Енисейская фотоника», Красноярск, **2020**.

Выступление на семинарах

- Семинары кафедры фундаментальной и прикладной физики САФУ, Архангельск, **2020 – 2021**.
- Международный форум промышленного развития новых материалов и технологий. Цзинин, China, **2019**.
- The University Centre in Svalbard (UNIS), Norway, **2018**.
- Семинары СПбГУ, Санкт-Петербург, **2021-2022**.
- Семинары МФТИ, Долгопрудный, **2021**.
- Семинары в институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук ИОФ РАН, **2021**.

Публикации

Материалы диссертации представлены в 17 публикациях в рецензируемых журналах, из которых входят в базы данных: Web of Science/ Scopus –**12** статей (из них **Q1-4, Q2-1**), а также в 18 тезисах докладов в сборниках трудов, материалах международных и российских научных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников. Общий объём диссертации составляет 114 страниц, 36 иллюстраций, библиография содержит 100 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, определяется научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация материалов и публикации.

В **первой главе** рассматриваются современные тенденции в области нанотехнологий, актуальные сферы их применения. Проводится обзор научных работ по исследованию углеродных наноматериалов. Автор приводит собственные оригинальные исследования композитов с добавкой УНТ в медленно меняющихся (адиабатических) электромагнитных полях. Приводятся результаты электрофизических свойств композиционных полимерных материалов армированных УНТ, и УНТ, модифицированных молекулярными комплексами (функциональными группами ф-УНТ). Рассматриваются вопросы оптимизации ввода УНТ и уменьшения их склонности к агломерации.



Фото 1. Изображение диэлектрического спектрометра (novocontrol concept 80), измерительной ячейки (конденсатора) и полимерных композиционных образцов с добавкой УНТ различной концентрации

В процессе исследования приготовленные образцы помещались в измерительную ячейку конденсатор спектрометра, где они подвергались воздействию переменных электрических полей с частотой, изменяющейся в диапазоне 0,01 Гц – 10 МГц (фото 1). Измеренные значения представляли собой действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости (ϵ' , ϵ'') и проводимости σ . Для выявления перколяционных процессов были приготовлены и исследованы образцы с массовыми концентрациями УНТ: 0%; 0,025%; 0,05%; 0,1%; 0,2%; 0,4%; 0,8% (Рис. 1). Приведённые зависимости хорошо описываются известной полуэмпирической формулой:

$$\sigma_{ac} = \sigma_{dc} + A\omega^t, \quad (1)$$

где ω – частота электромагнитного поля, σ_{dc} – проводимость на постоянном токе A, t – эмпирические параметры [16]. Полученные результаты показывают резкое изменение параметров σ_{dc} , A , t в интервале концентраций 0,1–0,2%, что свидетельствует об образовании каналов сквозной проводимости из УНТ в диэлектрической матрице. Установлено, что порог перколяции такого нанокompозита составляет 0,13% массовой концентрации УНТ, для угля БАУ-А и графита это значение составляет 15%, 17% соответственно. Отмечено, что одна из основных причин расхождения порога перколяции в композиционном материале, рассчитанного теоретически методом Монте – Карло ($\sim 10^{-3}\%$ [16]), связана с образованием агломератов УНТ.

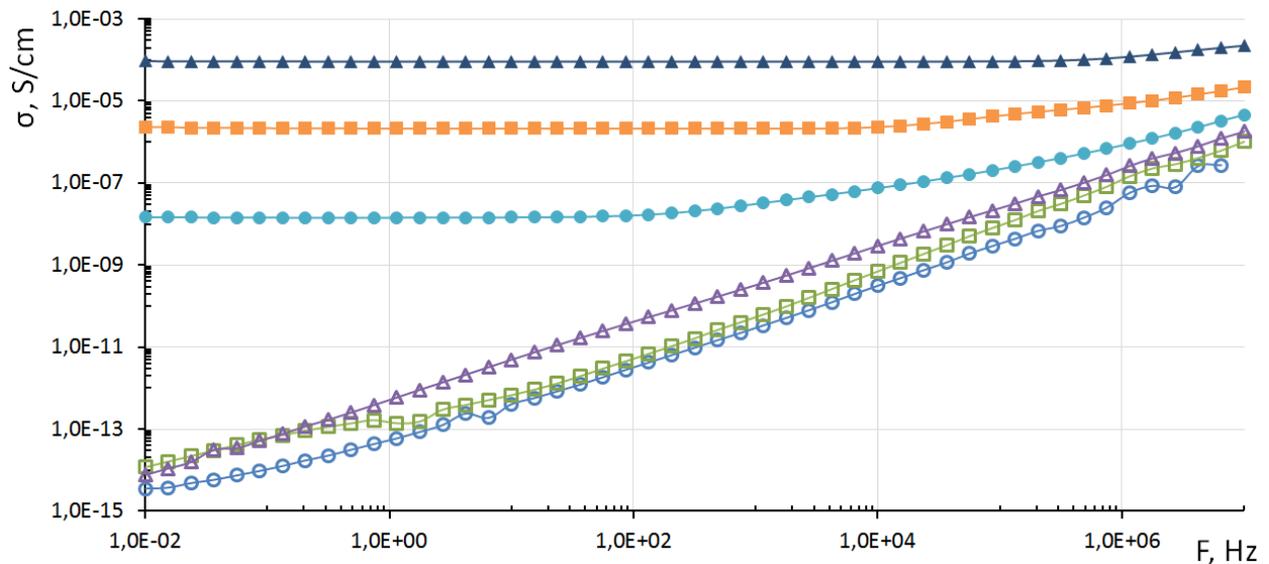


Рисунок 1. Зависимость проводимости от частоты электромагнитного поля для композитов с различной концентрацией УНТ в них ○—0% □—0,05%, △—0,1%, ●—0,2% , ■—0,4%, ▲—0,8%

Далее в работе автор приводит возможные методы решения данной задачи.

- Уменьшить количество агломератов УНТ в композите можно путём увеличения начальной температуры реакции полимеризации, в этом случае проводимость композита может быть улучшена на три порядка при заданной концентрации УНТ.

- Функционализация многослойных углеродных нанотрубок (м-УНТ) так же является эффективным способом снижения их склонности к агломерации, увеличивает сродство к полимерным композитам. Для определения влияния функциональных групп на электрофизические свойства УНТ была проведена функционализация УНТ (ф-УНТ) в парах перекиси водорода в течение четырёх часов. Было показано, что в этом случае порог перколяции в полимерной матрице начинается с концентраций ~6%. Это связано с двумя факторами: уменьшение аспектного отношения УНТ, создание дополнительного сопротивления привитыми группами.

Для выявления процессов, происходящих на ранних этапах функционализации, проведено комплексное исследование различными спектроскопическими методами ф-УНТ при малых временах кислотной обработки [17]. Результаты релаксационной спектроскопии (Рис. 1), а также результаты спектроскопии комбинационного рассеяния позволяют заключить, что в начальные моменты окисления параллельно происходят несколько процессов с разными скоростями: очистка УНТ от аморфной углеродной фазы, обгорание металлического кластера, прививание молекулярных комплексов. Показано, что наличие небольшого количества функциональных групп детектируется методом релаксационной спектроскопии (высоочастотной областью спектра), спектроскопия комбинационного рассеяния не позволяет выявить количество и тип привитых комплексов.

Таким образом, медленно меняющиеся электромагнитные поля позволяют исследовать лишь процессы переноса в углеродных нанотрубках, наносистемах, т.е. процессы без возбуждения электронной подсистемы, тогда как быстро меняющиеся поля или ультракороткие импульсы приводят к разнообразным эффектам, сопровождающим электронные переходы. В том числе к возможностям аттосекундной спектроскопии.

Приведённые методы исследования могут быть дополнены современными активно развивающимися сегодня методами анализа и контроля вещества с помощью лазерной диагностики посредством ультракоротких импульсов (УКИ).

Далее в первой главе автор приводит обзор современных методов рентгеноструктурного анализа, различные виды спектроскопии и микроскопии для исследования структуры нанобъектов и нанокompозитов. Отмечает прогресс в технике

генерации ультракоротких импульсов посредством генерации высоких гармоник, который обеспечил мощный инструмент для исследования многих важных физических процессов в аттосекундном масштабе времени. Приводится обзор актуальных работ. Рассматриваются некоторые технические особенности генерации лазерных импульсов, возможность использовать метод анализа спектров для контроля атомно-молекулярных комплексов на поверхности и геометрии нанообъектов.

Уменьшение длительности импульса до характерного атомного времени делает перспективным возможность использования теории внезапных возмущений для вычисления спектров рассеяния и экспериментальной проверки на различных структурах. Это позволяет рассчитывать в приближении внезапных возмущений процессы взаимодействия отрицательных ионов (ОИ) с УКИ при уже достигнутых продолжительностях импульсов.

Во второй главе рассматриваются вопросы взаимодействия УКИ с отрицательными атомарными и молекулярными ионами (ОИ). При рассмотрении эффектов, связанных с взаимодействием э/м поля с атомами, обычно принято пренебрегать влиянием магнитной компоненты импульса ввиду её малости. Действительно, хорошо известно, что сила, действующая на заряжённую частицу со стороны магнитной составляющей электромагнитного поля, примерно в $c=137$ (а.е.) раз меньше его электрической составляющей. Однако, при рассмотрении некоторых явлений, вклад её весьма существенен и пренебрежение ей может привести к неправильному пониманию тех или иных процессов.

Здесь и ниже используются атомные единицы: $e = m_e = \hbar = 1$, где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, \hbar – постоянная Планка. Заряженность этих систем даёт возможность управления ими, а слабая связь с избыточным электроном позволяет быстро его высвободить (ловушка для электронов). Очевидно, что и характерное время движения электрона в анионах существенно превышает атомное.

Воспользуемся результатами работы [18], где рассматривалось действие пространственно неоднородного поля УКИ на релятивистский электрон. Уравнение Дирака для электрона в поле $U(\mathbf{r})$, в приближении быстрого взаимодействия

$$\hat{H} \Psi = i \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

Оператор Гамильтона такой системы равен:

$$\hat{H} = c\alpha \left(\hat{\mathbf{p}} - \frac{e}{c} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \right) + \beta mc^2 + U(\mathbf{r})$$

Здесь e – заряд частицы, m – её масса, c – скорость света, β и α – матрицы Дирака, а $\hat{\mathbf{p}}$ – оператор импульса электрона. После проведения калибровочных преобразований вида $\varphi' = \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t}$ и $\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla f$ где $f = \mathbf{A} \mathbf{r}$. Векторный потенциал $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}(\eta)$, где η – фаза волны, определяемая $\eta = \omega_0 t - \mathbf{k}_0 \mathbf{r}$. Здесь \mathbf{k}_0 – волновой вектор, ω_0 – круговая частота, \mathbf{A}' – векторный потенциал, ϕ' – скалярный потенциал. Тогда

$$\mathbf{E} = -|\mathbf{k}_0| \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \eta} \quad \text{и} \quad \phi' = -(\mathbf{E} \mathbf{r}), \quad \mathbf{A}' = \mathbf{n}_0 \phi'$$

Таким образом, решая уравнение Дирака получим волновую функцию взаимодействия атомарного электрона с УКИ для релятивистского случая в виде:

$$\psi(t) = \varphi_0 \left(x, y, z + \int_{-\infty}^t \frac{\mathbf{E}\mathbf{r}}{m^*c} \frac{1}{1 + \frac{\mathbf{E}\mathbf{r}}{m^*c^2}} dt \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\mathbf{E}\mathbf{r}}{m^*c^2}}} \cdot \exp \left[-i \int_{-\infty}^t \frac{(m^*-1)c^2 + \mathbf{E}\mathbf{r}}{1 + \frac{\mathbf{E}\mathbf{r}}{m^*c^2}} dt \right], \quad (2)$$

$$m^* = m \sqrt{1 + \left(\frac{E\mathbf{r}}{mc^2} \right)^2}$$

здесь m^* – эффективная электронная масса, \mathbf{E} – напряжённость поля, в котором после калибровки уже учтена магнитная компонента УКИ; φ_0 – волновая функция начального состояния атома смещение по оси z обусловлено влиянием магнитной компоненты поля УКИ подробный вывод см. в [18]. Тогда амплитуда испускания фотона с переходом атома из состояния φ_0 во все конечные состояния φ_n определяется выражением:

$$b_{0n}(\omega) = i \left(\frac{2\pi}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{u}_{\mathbf{k}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} dt e^{i\omega t} \langle \Psi_n(t) | e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} \left(\hat{\mathbf{p}} + \frac{\mathbf{A}}{c} \right) | \Psi_0(t) \rangle$$

Здесь $\Psi_n(t)$, $\Psi_0(t)$ волновая функция (2) разложенная в ряд по малому параметру $\frac{E}{c^2}$.

$$\Psi_n(t) = e^{-i \int_{-\infty}^t \left(\mathbf{E}(t')\mathbf{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\mathbf{E}(t')\mathbf{r}}{c} \right)^2 \right) dt'} \varphi_n(\{x, y, z\}), \quad \Psi_0(t) = e^{-i \int_{-\infty}^t \left(\mathbf{E}(t')\mathbf{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\mathbf{E}(t')\mathbf{r}}{c} \right)^2 \right) dt'} \varphi_0(\{x, y, z\})$$

Проинтегрировав по времени это выражение и просуммировав по поляризациям фотона $\mathbf{u}_{\mathbf{k}\sigma}$, учитывая, что $d^3k = c^{-3} d\Omega_k \omega^2 d\omega$, получим в результате выражение для спектра излучения фотона в единицу телесного угла $d\Omega_k$ в диапазоне частот $d\omega$ в виде:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega_{\mathbf{k}}} = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{c^3 \omega} \left| \left\langle \varphi_0 \left| \mathbf{f}(\mathbf{r}) \mathbf{f}^*(\mathbf{r}) \right| \varphi_0 \right\rangle \right|^2, \quad (3)$$

$\mathbf{f}(\mathbf{r})$ – здесь Фурье образ силы, $\mathbf{f}(\mathbf{r}) = [\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega) \times \mathbf{n}]$, действующий со стороны электромагнитного поля на атомные электроны, \mathbf{r} – радиус-вектор атомного электрона, $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$ – единичный вектор вылета фотона. Фурье образ поля $\mathbf{E}(\omega)$ имеет вид:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{2} \nabla \left(\frac{\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{c} \right)^2 \right) e^{i\omega t} dt.$$

Для определённости будем рассматривать импульс гауссовой формы:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp \left(-\alpha^2 \left(t - \frac{\mathbf{k}_0 \mathbf{r}}{\omega_0} \right)^2 \right) \cos(\omega_0 t - \mathbf{k}_0 \mathbf{r}).$$

Где \mathbf{E}_0 – амплитуда, $\mathbf{k}_0 = \frac{\omega_0}{c} \mathbf{n}_0$, \mathbf{n}_0 – единичный вектор направления вдоль УКИ, длительность импульса, $\tau \sim \frac{1}{\alpha}$ α – параметр затухания в гауссовом импульсе. Тогда Фурье образ поля примет вид

$$\tilde{\mathbf{E}}(\omega) = \tilde{\mathbf{E}}_1(\omega) + \tilde{\mathbf{E}}_2(\omega),$$

где вектор

$$\tilde{\mathbf{E}}_1(\omega) = \frac{\sqrt{\pi}}{2\alpha} \cdot e^{-\left(\frac{\omega-\omega_0}{4\alpha}\right)^2} e^{i\frac{\omega}{\omega_0}\mathbf{k}_0\mathbf{r}} \mathbf{E}_0$$

характеризует вклад электрической составляющей электромагнитного поля, а вектор

$$\tilde{\mathbf{E}}_2(\omega) = \frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{2}\alpha} \left(e^{-\frac{1}{8}\left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2} + \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{8}\left(\frac{\omega-2\omega_0}{\alpha}\right)^2} \right) \nabla \left\{ e^{i\frac{\omega}{\omega_0}\mathbf{k}_0\mathbf{r}} \left(\frac{\mathbf{E}_0\mathbf{r}}{c} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

включает и магнитную компоненту, ω_0 – несущая частота падающего импульса. В результате в спектре рассеяния (3) (вероятности излучения фотона с частотой ω , в единицу телесного угла $\Omega_{\mathbf{k}}$) после проведения необходимых вычислений появляется вторая гармоника, связанная с учётом магнитной составляющей налетающего импульса, что видно из второго слагаемого в (4).

Для расчёта интеграла (3) волновую функцию для атомарного аниона выберем в виде приближении потенциала нулевого радиуса (ПНР)

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{q}{2\pi}} \frac{e^{-q|\mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}|},$$

а для молекулярного иона в форме

$$\Psi(\mathbf{r}) = C \left[\frac{e^{-q\left|\mathbf{r} + \frac{\mathbf{R}}{2}\right|}}{\left|\mathbf{r} + \frac{\mathbf{R}}{2}\right|} + \frac{e^{-q\left|\mathbf{r} - \frac{\mathbf{R}}{2}\right|}}{\left|\mathbf{r} - \frac{\mathbf{R}}{2}\right|} \right]$$

Здесь $q = \sqrt{2I}$, I – энергия электронного средства соответствующего аниона [19, 20], \mathbf{R} – положение одного центра двухатомного аниона относительно другого, \mathbf{r} – здесь радиус-вектор определяет положение слабосвязанного электрона относительно центра масс системы. ОИ простейшая система, которая может моделироваться частицей в поле ямы ПНР. В основе ПНР метода лежит замена истинного атомного потенциала соответствующим граничным условием в точке расположения атома, это даёт возможность получать решения для ряда задач. Одним из условий данного приближения является относительная малость энергий частиц, движущихся в искомом потенциале. Для таких частиц длина волны де Бройля будет велика, что позволяет не учитывать в рассмотрении точную форму и параметры реального потенциала, а заменить его ПНР.

Таким образом, вероятность рассеяния (3) можно считать полностью определённой. На Рис. 2 представлен спектр рассеяния для анионов водорода и щелочных металлов. Зависимость имеет два выраженных пика (гармоники), причём, чувствительность к типу аниона мишени наблюдается в спектре рассеяния лишь на второй гармонике. Присутствие

последней в спектре рассеяния явилось результатом учёта магнитной составляющей падающего импульса.

$$(dW/d\omega) \cdot 10^{-7}, \text{ ат. ед.}$$

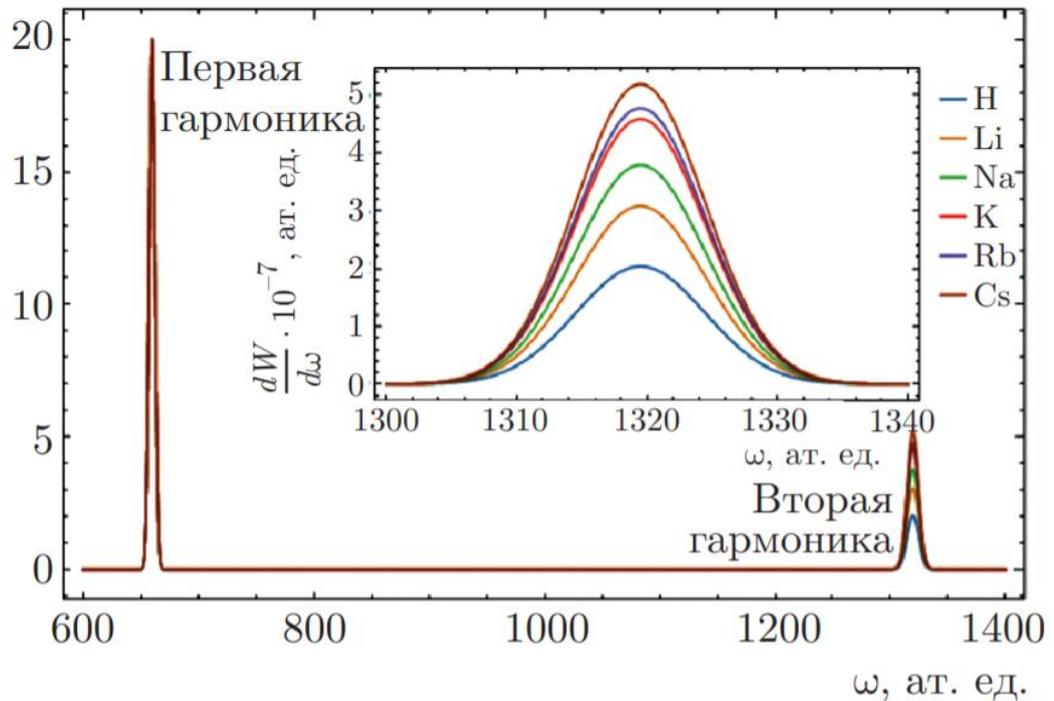


Рисунок 2. Спектральная плотность излучения анионов щелочных металлов и водорода. Вкладка – увеличенная вторая гармоника

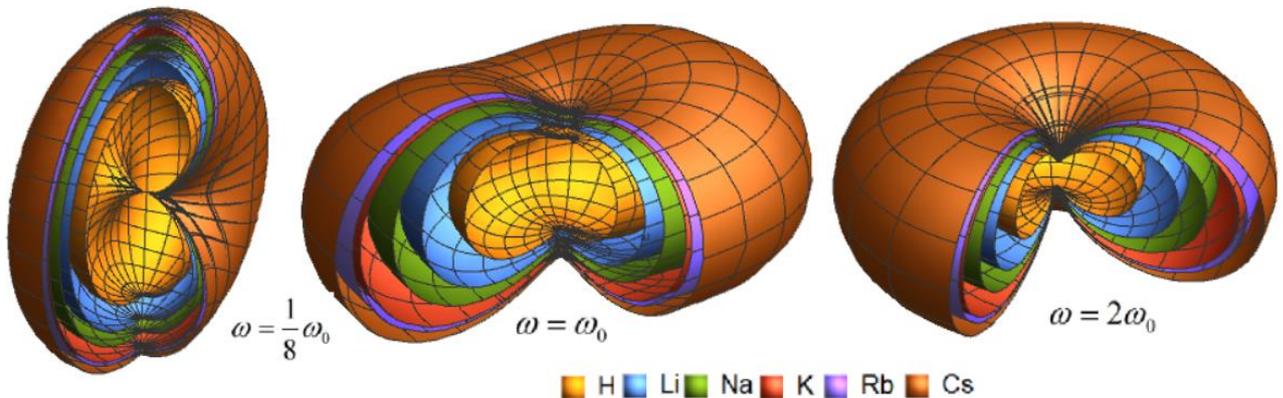


Рисунок 3. 3D – Эволюция диаграммы направленности рассеяния УКИ различными атомарными анионами на второй гармонике в зависимости от несущей частоты. (ось z по –направлению падающего импульса)

Диаграмма направленности, представленная на Рис. 3, показывает вероятность вылета фотона для различных атомарных анионов при несущей частоте УКИ ω_0 а.е. и продолжительности импульса $\tau = 43 \cdot 10^{-18}$ с. Отмечено, что форма диаграммы направленности для атомарного аниона чувствительна к несущей частоте $\omega_0 = 660 \text{ ат.ед}$ и при изменении её в разы качественно изменяется. Это позволяет производить детектирование характеристик, падающих УКИ.

Как и для атомарного аниона, спектр рассеяния молекулярного аниона имеет два выраженных пика на несущей частоте и на удвоенной, которая появляется за счёт учёта магнитной составляющей импульса. Вторая гармоника чувствительна к энергии электронного

средства с молекулярным анионом, что видно из вставки Рис. 4.

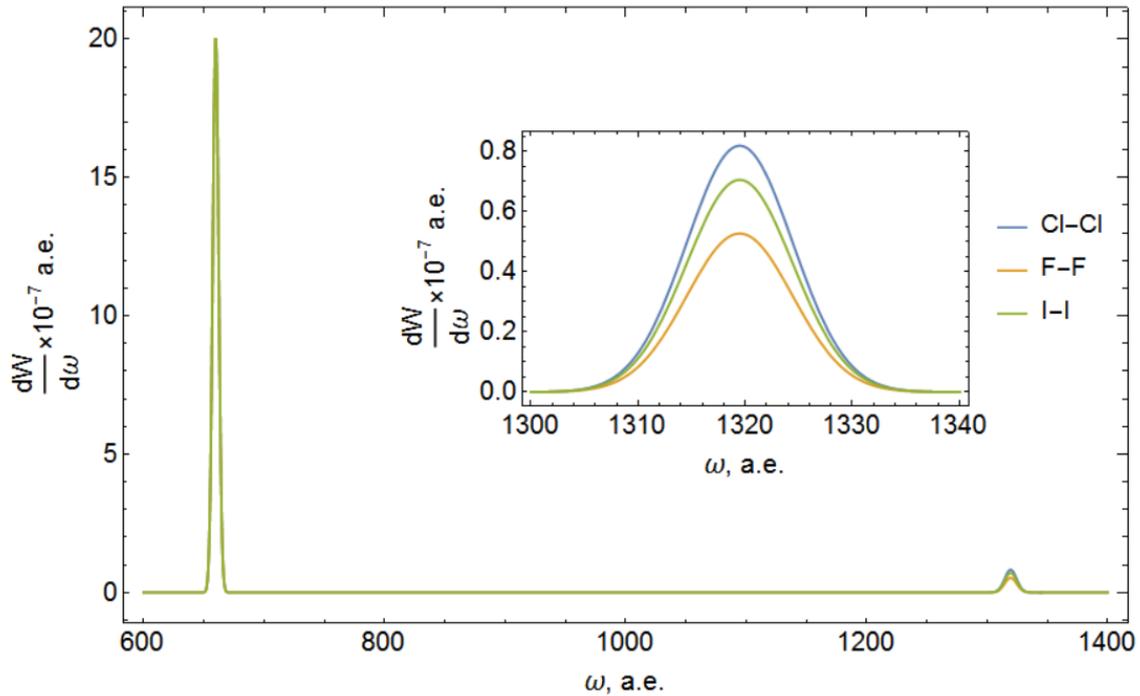


Рисунок 4. Спектральная плотность излучения молекулярных анионов хлора, фтора и йода

На Рис. 5 изображена зависимость спектра рассеяния от угла ϕ . Рассеяние максимально в случае коллинеарности векторов напряженности внешнего электрического поля E_0 падающего импульса и межъядерной оси R . В этом случае слабосвязанный электрон испытывает большие ускорения в поле УКИ.

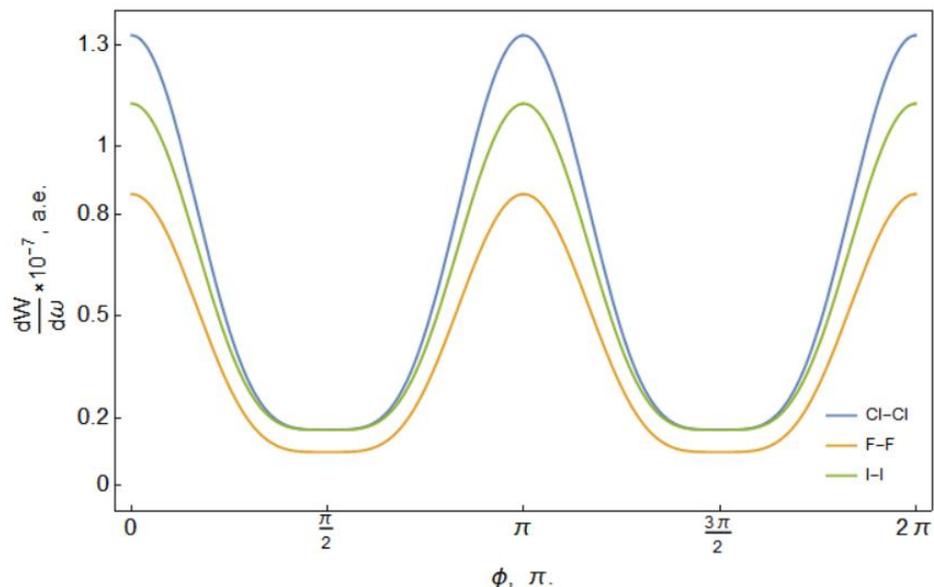


Рисунок 5. Зависимость спектральной плотности излучения молекулярных анионов хлора, фтора и йода от угла падения ϕ (угол между E_0 и R) падающего фотона $E_0=500$ ат.ед., $\tau=43$ ас

Таким образом, во второй части получено выражение для расчёта спектра рассеяния УКИ с учётом магнитной составляющей такого импульса в рамках теории внезапных возмущений для систем молекулярных и атомарных анионов. Показано, что в этом случае спектр рассеяния имеет две гармоники. Наличие второй гармоники связано с учётом магнитной компоненты поля УКИ. Анализ спектра второй гармоники позволяет различать тип

анионов, направление межъядерной оси, что делает метод ориентационно чувствительным. Выявлено, что рассеяние максимально в случае коллинеарности векторов напряженности внешнего электрического поля и направления межъядерной оси молекулярного аниона, а также возрастает с уменьшением энергии электронного сродства. Диаграммы направленности рассеяния на второй гармонике существенно зависят от несущей частоты налетающего импульса. Что позволяет детектировать собственные характеристики таких импульсов. Отметим, что электрон после взаимодействия считается нерелятивистским ввиду того, что не успевает получить достаточное для этого количество энергии по причине внезапности возмущения. Однако, рассматриваемые поля УКИ – релятивистские. Естественным продолжением развития этих подходов является их обобщение и получение конкретных результатов в виде спектров рассеяния на многоатомные системы.

В третьей главе диссертационной работы рассматриваются вопросы рассеяния УКИ гауссовой формы с учётом магнитной составляющей многоатомными системами – нанообъектами. Полученное во второй главе выражение (3) носит общий характер, однако, напрямую вычислить спектры рассеяния многоатомных (многоэлектронных) систем, используя его, проблематично, поскольку для этого требуется знание волновой функции многоэлектронной атомной системы в ее начальном состоянии. Проведение таких численных расчетов в случае многоатомной системы – практически нерешаемая задача даже на современных суперкомпьютерах. Можно избежать больших вычислений, выразив среднее значение в формуле (3) через пространственную плотность атомных электронов в модели Дирака – Хартри – Фока – Слейтера [21].

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{N_e}{4\pi r} \sum_{i=1}^3 A_i \alpha_i^2 e^{-\alpha_i r},$$

где A_i, α_i – табличные коэффициенты, зависящие от вида атомов N_e – число электронов в атоме. После подстановки и упрощения итоговое выражение для спектра рассеяния многоатомной системы представится в виде

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega_{\mathbf{k}}} = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{c^3 \omega} \left(N_a N_e S(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) + N_e^2 \delta_N(\mathbf{p}) F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) \right), \quad (5)$$

где N_a – число атомов в системе, $S(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0), F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ – функции первой и второй части спектра рассеяния, выраженные через электронную плотность:

$$S(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) = G(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) - F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$$

$$G(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) = \frac{1}{N_e} \int \rho_a(\mathbf{r}) |\mathbf{f}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}, \quad F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) = \frac{1}{N_e^2} \left| \int \rho_a(\mathbf{r}) \mathbf{f}(\mathbf{r})^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} ed\mathbf{r} \right|^2$$

Таким образом, спектр рассеяния можно считать вполне определенным. Отметим, что рассеяние с дисперсией α в этом случае локализовано вблизи частот ω_0 и $2\omega_0$, что является следствием разложения волнового уравнения (2) в ряд Маклорена по малому параметру

$\frac{E}{c^2} \ll 1$. Важным параметром в уравнении (5) является фактор $\delta_N(\mathbf{p})$, который ответственен за геометрическое расположение атомов мишени.

$$\delta_N(\mathbf{p}) = \sum_{a,b} e^{i\mathbf{p}(\mathbf{R}_a - \mathbf{R}_b)} = \left| \sum_a e^{i\mathbf{p}\mathbf{R}_a} \right|^2. \quad (6)$$

\mathbf{R}_a – радиус-вектор, задающий положение атома с номером a . Так для кольца, состоящего из одинаковых атомов, расположенных по окружности кольца радиуса R , фактор равен

$$\delta_N(\mathbf{p}) = N_a^2 J_0 \left(\frac{\omega}{c} R |(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0) \times \mathbf{k}| \right)^2 \quad (7)$$

На Рис. 6 графически представлен $\delta_N(\mathbf{p})$ фактор для кольца в зависимости от углов падения УКИ относительно оси симметрии кольца. В этом случае спектр излучения состоит из двух частей отражённой и прошедшей по направлению падения \mathbf{n}_0 . Аналогом может служить классический закон отражения «угол падения равен углу отражения».

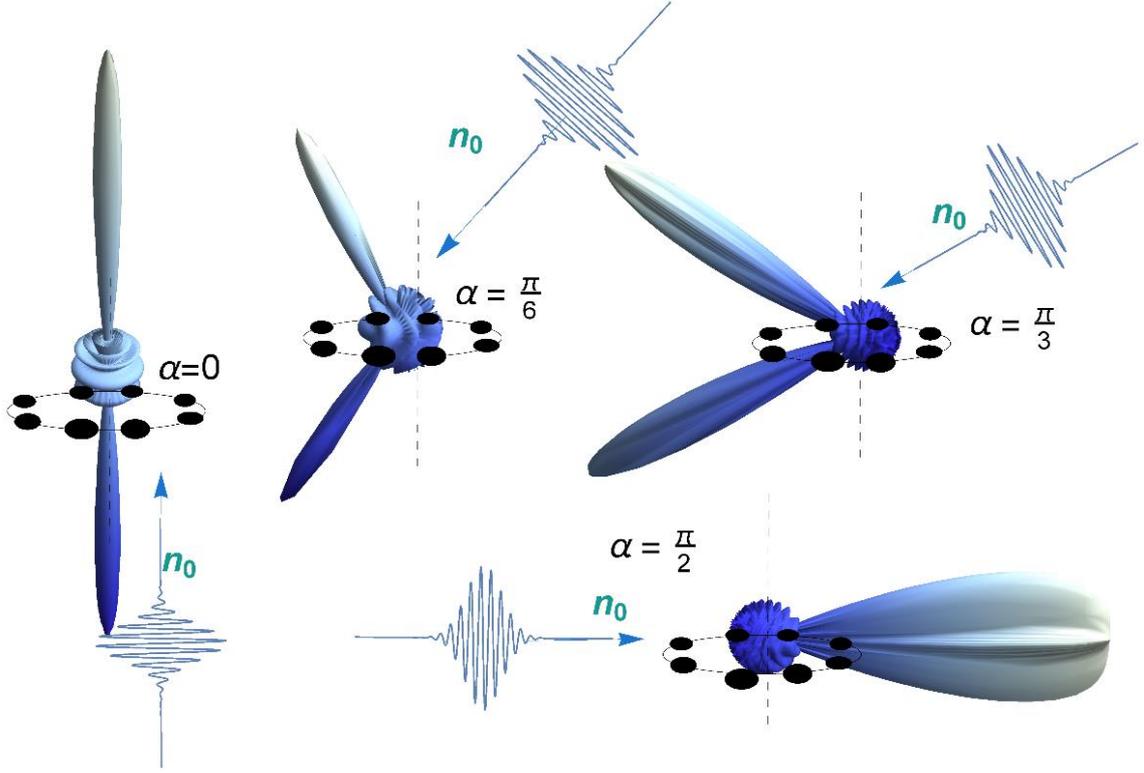


Рис. 6. Ориентационные эффекты фактора δ в зависимости от углов падения импульса \mathbf{n}_0 к нормали кольца. Для длительности импульса $\tau = 43$ ас. Амплитуда поля $\mathbf{E}_0 = 500$ ат.ед., $\frac{\omega_0}{c} = 5$, \mathbf{n}_0 – направление падения УКИ.

Составив δ фактора для кольца (7) не представляет труда на его основе сконструировать и другие системы типа углеродной нанотрубки (8) (однослойной $M=1$ / многослойной $M>1$ УНТ):

$$\delta_N(\mathbf{p}) = \left(\sum_{n=1}^M N_n J_0(R_n |\mathbf{p} \times \mathbf{k}|) \right)^2 \left(\frac{\text{Sin}[L d \mathbf{p} \mathbf{k} / 2]}{\text{Sin}[\mathbf{p} \mathbf{k} d / 2]} \right)^2, \quad (8)$$

где L , d длина УНТ и расстояние между плоскостями кольца.
Для группы колец на плоскости (PGR):

$$\delta_N(\mathbf{p}) = \left(\sum_{n=1}^M N_n J_0(R_n |\mathbf{p} \times \mathbf{k}|) \right)^2 \prod_{i=1}^2 \left(\frac{\text{sin}[L_i \mathbf{p} \mathbf{d}_i / 2]}{\text{sin}[\mathbf{p} \mathbf{d}_i / 2]} \right)^2 \quad (9)$$

По аналогии приводится расчёт других, в том числе и композиционных 3D структур. Анализ фактора для УНТ и леса УНТ показывает, что рассеяние происходит в одном направлении, совпадающим с направлением \mathbf{n}_0 падающего УКИ. Отражение практически отсутствует (Рис. 7). В случае же PGR в спектре наблюдается отражённая часть излучения. Данный эффект хорошо известен для оптического диапазона частот, и уже используется

во многих областях техники (Super-Black Coatings, Blocking Out Light).

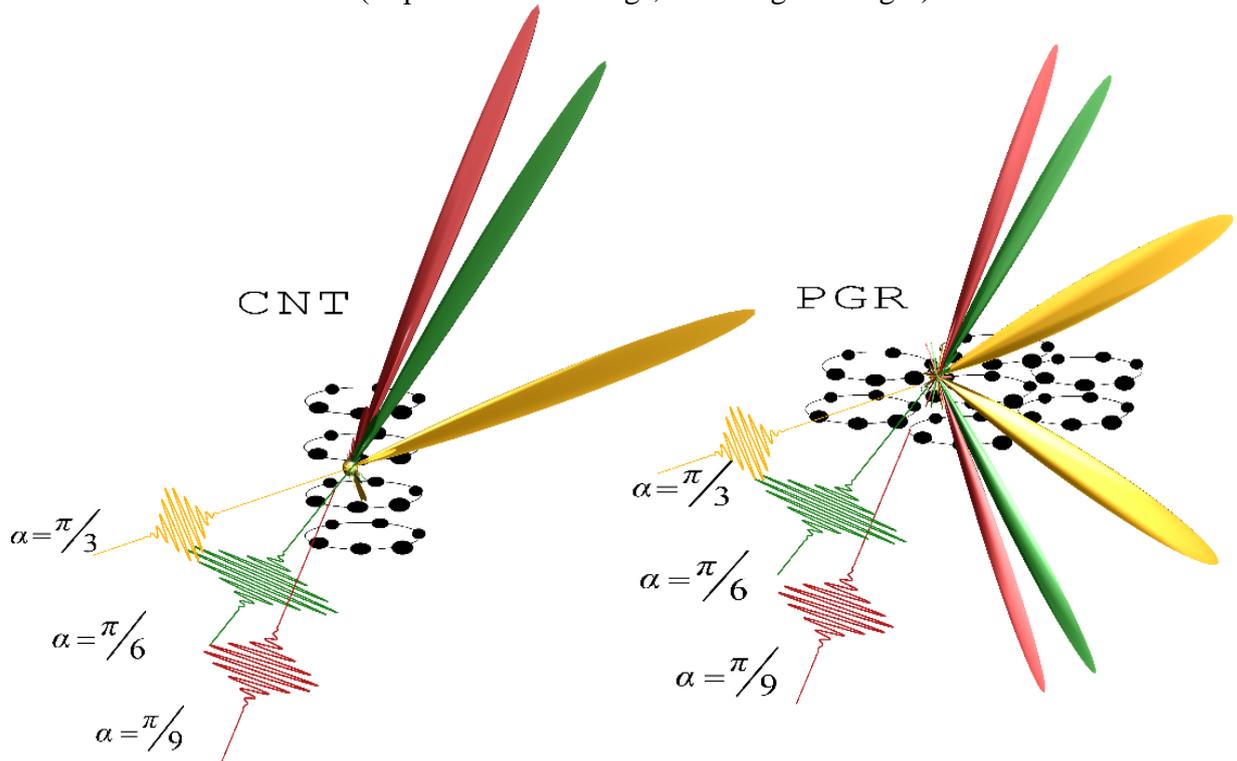


Рисунок 7. Ориентационные эффекты δ фактора в зависимости от углов падения α импульса \mathbf{n}_0 на УНТ и PGR

Анализ спектра (5) позволяет выделить две компоненты когерентную (второе слагаемое $\propto N_e^2 N_a^2$), ответственную за совместное излучение и интерференционную картину. А также не когерентную (первое слагаемое $\propto N_e N_a$) независимое излучение. Так, для большего проявления интерференционных эффектов в спектре (5) требуется существенный вклад второго члена, что возможно при условии $\omega_0 / c \leq 1$ или больших N_a . В противном случае $\omega_0 / c \gg 1$ или $R \rightarrow \infty$ в спектре доминирует некогерентная компонента, излучение в основном направлено по \mathbf{n}_0 . На Рис. 8 представлена 3D диаграмма направленности спектров рассеяния и контурный график рассеяния УКИ на углеродной нанотрубке.

Можно увидеть, что рассеяние на первой гармонике имеет дифракционные максимумы, характерные для данной системы. Из них есть один основной максимум, интенсивность которого существенно больше других. Этот максимум имеет четко выраженное направление по вектору \mathbf{n}_0 . Дифракционная картина на второй гармонике несёт больше информации, чем на первой, максимумов больше и они более чётко выражены. Направление рассеянного УКИ на 2 гармонике заметно отличается от направления \mathbf{n}_0 падения импульса, в отличие от первой гармоники. Обе части спектра чувствительны к числу атомов кольца и несущей частоте УКИ.

Из представленных графиков (Рис 8.) видна характерная дифракционная картина на первой и на второй гармониках. На второй гармонике эта картина имеет более одного чётко выраженного дифракционного максимума, в отличие от первой гармоники. Также следует добавить, что абсолютное значение спектра на второй гармонике может быть существенно больше, чем в данном случае, если выбрать большее значение E_0 и ω_0 .

В работе так же приводятся диаграммы направленности и контурные графики для углеродных наноструктур типа графен, композиционный материал, PGR, и т.д.

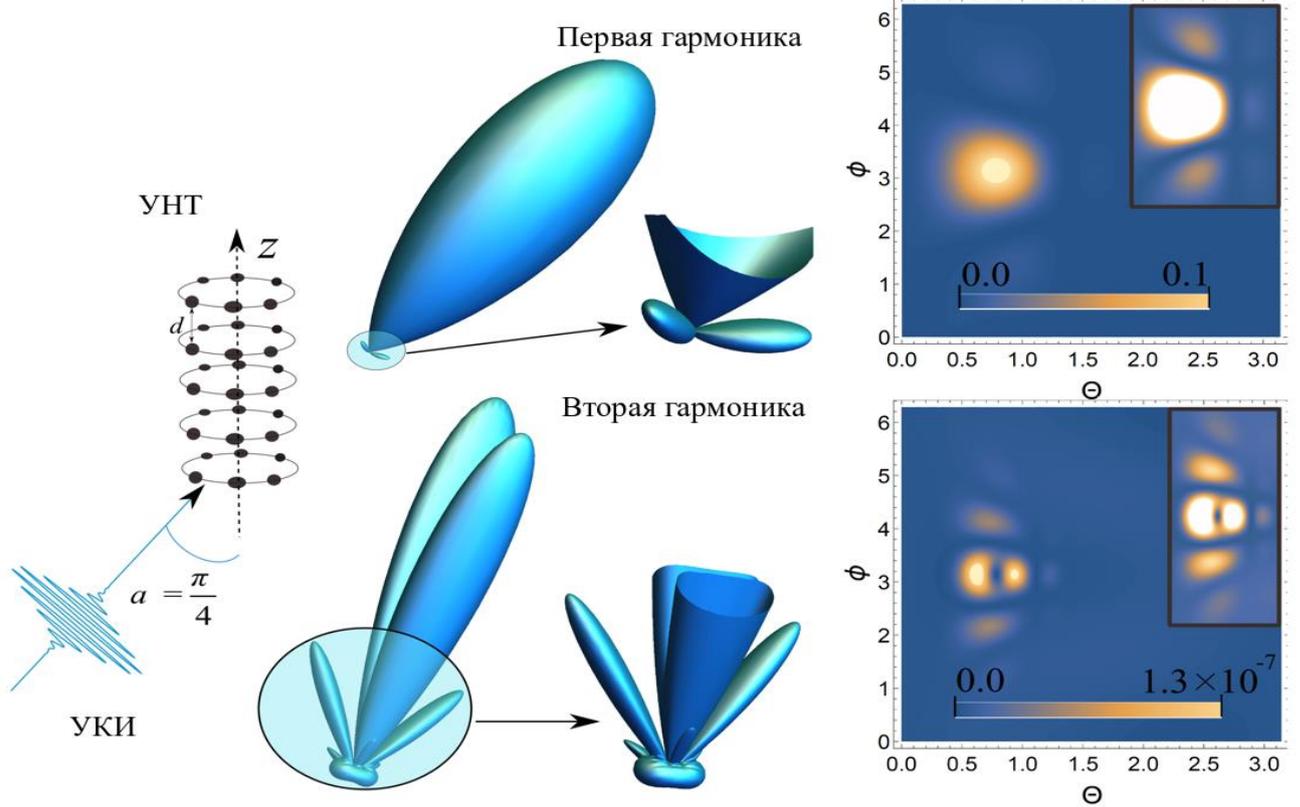


Рисунок 8. 3D диаграмма направленности спектров рассеяния и контурный график для спектров, где θ и ϕ – это углы в сферической системе координат, т.е. полярный и азимутальные углы соответственно. Вставки в контурные графики – это более контрастный контурный график по сравнению с основным вариантом. УКИ был выбран с частотой $\omega_0 = 100$ ат.ед., длительность импульса соответствует 43 ас. и амплитуда $E_0 = 1000$ ат.ед., число плоскостей $L = 8$ ат.ед., расстояние между плоскостями $d = 2$ ат.ед., радиус кольца $R = 4$ ат.ед. На первой и второй гармониках, угол падения α между \mathbf{n}_0 и осью z выбран $\alpha = \pi / 4$

Отметим что выражение (5) является общим. Из него можно получить в частном случае наиболее часто используемое уравнение в рентгеноструктурном анализе [12]. Для этого необходимо учитывать только электрическую составляющую УКИ и предполагать, что все электроны в атомах вещества излучают когерентно. В этом случае из уравнения (5) получаем

$$\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega_k} = \frac{F_1^2(\omega) [\mathbf{E}_0 \times \mathbf{n}]^2}{(2\pi)^2 c^3 \omega} \left| \int n(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}} d\mathbf{r} \right|^2,$$

здесь $n(\mathbf{r})$ – электронная плотность всей атомной системы, используя выражение для интенсивности

$$I = \frac{c}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) dt,$$

и учитывая, что импульс достаточно продолжительный ($\omega_0 / \alpha \gg 1$), можно получить известное выражение из дифракционного анализа

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_k} = \frac{\sin^2 \theta}{c^4} \left| \int n(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r}} d\mathbf{r} \right|^2$$

Таким образом, приведённые результаты могут дополнить имеющиеся сегодня методы диагностики наноматериалов. Так же выражение (5) позволяет исследовать не только стационарные системы, но и динамические. К таким системам можно отнести сложные молекулы, в том числе биомолекулы, где происходит разрыв или образование связей, а также миграции заряда в пептидах и биологических системах. В этом случае необходимо заменить в (5) $\rho(\mathbf{r})$ на $\rho(\mathbf{r}, t)$, где t – это момент времени в который УКИ действует на изучаемую систему.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

Общим результатом диссертационной работы является:

- Впервые получено выражение для вероятности рассеяния ультракоротких лазерных импульсов на атомарных и молекулярных анионах и наноструктурах с учётом магнитной компоненты падающего импульса.
- Показано, что в спектре рассеяния лазерного импульса в рамках физико-математической модели возникает вторая гармоника, спектр рассеяния вблизи которой по интерференционной картине позволяет более эффективно исследовать структуру вещества.
- Проведён расчёт δ - фактора ответственного за дифракционную картину различных многоатомных систем: УНТ, группа колец (PGR), графен, композиционный материал и др. Получены и проанализированы спектры рассеяния УКИ на нанообъектах.
- Получены зависимости проводимости полимерных нанокомпозитов с добавкой УНТ, функционализированных молекулярными комплексами (Ф-УНТ) в низкочастотном электромагнитном поле в широком диапазоне температур.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Eseev, M.K., Goshev, A.A., Makarova, K.A., Makarov D.N. X-ray diffraction analysis of matter taking into account the second harmonic in the scattering of powerful ultrashort pulses of an electromagnetic field // Scientific Reports, –2021.–Vol. 130, №1, –P 3571.
2. Eseev, M.K., Goshev A.A., Makarov D.N. Scattering of Ultrashort X-ray Pulses by Various Nanosystems// Nanomaterials, –2020. –Vol 10. №7, 1355.
3. Гошев А.А., Макаров Д.Н., Есеев М.К., Рассеяние аттосекундных импульсов электромагнитного поля с учетом его магнитной составляющей на атомарных и молекулярных анионах // ЖЭТФ, –2020. Т. 157 №1, –С 36.
4. Eseev, M.K., Goshev A.A. et al., Creation of Superhydrophobic Coatings Based on MWCNTs Xerogel// Nanomaterials, –2019. – Vol 9. № 11, –P 1584.
5. Goshev, A.A.; Eseev, M.K.; Volkov, A.S., Complex Investigation of the CNT's Properties of Small Functionalization Time// AIP Conference Proceedings, –2018– Vol 2015,–P 020027.
6. Goshev, A.A., Eseev, M.K., Investigation of the influence of polymerization temperature on the agglomeration process of the CNT in the composite matrix// Journal of Physics Conference Series, –2017–Vol 917, –P 092013.
7. Goshev, A.A., Eseev, M.K., et al, Diagnostic methods for silica-reinforced carbon nanotube-based nanocomposites//, Nanosys. phys. chem. math. – 2016, –Vol 7 № 1,– P. 180.

8. Goshev, A.A., Eseev, M.K., Kapustin, S.N., Investigation of dielectric properties of polymer composites reinforced with carbon nanotubes in the frequency band of 0.01 Hz-10 MHz// Journal of Physics Conference Series. – 2016,–Vol 741, –P 012191.
9. Osokin C.S., Eseev, M.K., Goshev A.A., Investigation of the dielectric properties and defectoscopy of nanocomposites based on silica and polymers reinforced with carbon nanotubes// Journal of Physics Conference Series. –2016. Vol 769,–P 012033.
10. Eseev, M.K., Vinnik, L.N., Goshev, A.A., Volkov, A.S., Investigation of influence of orientation effects in polymeric composite materials, reinforced with carbon nanotubes, on electrical properties of the sample in frequency band from 0.01 to 10 MHz// AIP Conference Proceedings,– 2016.– Vol 1767,–P 020026.
11. Goshev, A.A., Eseev, M.K., Volkov, A.S., Lyah, N.L., Investigation of electrophysical properties of allotropic modifications of carbon in the range of temperatures 140-400 K// AIP Conference Proceedings, –2017.–Vol 1886, –P 020009.

(РИНЦ)

12. Гошев А.А., Есеев М.К., Макаров Д.Н., «Спектр рассеяния ультракоротких импульсов на углеродной нанотрубке», Физический вестник высшей школы естественных наук и технологий САФУ//–2020. Т. 20, С. 13.
13. Гошев А.А., Винник Л.Н, Волков А.Н., Исследование диэлектрических свойств полимерных композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок. Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2016//– 2016, –Т.5 –С. 331
14. Винник Л.Н, Гошев А.А. Исследование нанокompозитов методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых //.– 2016, – Т.5. –С. 316.
15. Гошев А.А., Есеев М.К. Исследование частотной дисперсии электрофизических свойств углеродных нанотрубок и полимерного композита с добавками УНТ// Физический вестник института естественных наук и технологий САФУ/, – 2016, – Т.15, –С. 54.

Труды конференции

- 1) A.A. Goshev, M.K. Eseev, S.N. Kapustin, C.S. Osokin. Investigation of the dielectric properties of composites based on silicon dioxide with carbon nanotubes // Труды международной конференции «2nd International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2015” on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint–Petersburg, Russia).
- 2) А.А. Гошев, С.Н. Капустин, К.С. Осокин, М.К. Есеев Исследование диэлектрических свойств наносиликатов на основе углеродных нанотрубок //, Сборник тезисов, материалы конференции Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-21. Екатеринбург-Омск: издательство АСФ России.
- 3) М.К. Eseev, A.A. Goshev, P. Horodek, S.N. Kapustin, A.G. Kobets, C.S. Osokin Methods of diagnostics of nanocomposites based on silica-reinforced carbon nanotubes // Book of Abstract «12th International Conference Advanced Carbon NanoStructures ACNS'2015» (Saint-Petersburg, Russia).
- 4) К.С. Осокин; М.К. Есеев; А.А. Гошев; С.Н. Капустин; П. ХорODEK; А.Г. Кобец. Исследование электрических свойств и дефектоскопия нанокompозитов на основе диоксида кремния и полимеров с добавлением углеродных нанотрубок. // Тезисы докладов международной молодёжной конференции Физика. СПб (Санкт-Петербург, 27-29 октября 2015). Издательство ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.
- 5) A.A. Goshev, M.K. Eseev, L.N. Vinnik, A.S. Volkov. Investigation of the dielectric properties of polymer composites reinforced with carbon nanotubes in the frequency band from 0.01 Hz to 10 MHz // Труды международной конференции «3rd International School and Conference

“Saint-Petersburg OPEN 2016” on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint–Petersburg, Russia), 2016.

6) A.A. Goshev, M.K. Eseev, L.N. Vinnik, A.S. Volkov. Research influence of directional effects of polymer composites reinforced with MCNT, on dielectric properties of the sample in the frequency range of 0.01 to 10^6 Hz. Тезисы докладов III Международной молодежной научной конференции: Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2016 (16-20 мая 2016 г.) Екатеринбург: УрФУ, 2016.

7) A.A. Goshev, M.K. Eseev. Investigation of the influence of polymerization temperature on the agglomeration process of the CNT in the composite matrix// Труды международной конференции «4th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures» Saint Petersburg, Russia», «Saint Petersburg OPEN 2017».

8) Goshev A.A., Eseev M.K. «Investigation electrophysical properties of allotropic modifications of carbon in the range of temperatures 140-400 K».Тезисы докладов IV Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2017.

9) Goshev A.A., Eseev M.K., Volkov A.S. «Investigation of activative conductivity in CNT and F-CNT in the range of temperatures 140-470 °K»Тезисы докладов IV Международной молодежной научной конференции, Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2017.

10) Goshev A.A., Eseev M.K. //Тезисы докладов V Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2018.

11) Есеев М.К., Гошев А.А., Капустин С.Н. Investigation of polymer films based on CNT deposited on metal surfaces to protect against electrochemical corrosion and cavitation/// 5th International School and Conference Saint-Petersburg OPEN 2018

12) Есеев М.К., Гошев А.А., Тезисы докладов VI Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2019 influence of surface-bound water on the electrophysical properties of MW– CNT’s.

13) Тезисы докладов международной конференции RACIRI “Structure, Real-time Dynamics and Processes in Complex Systems” тема: Interaction molecular anions with ultrashort electromagnetic field pulse, Svetlogorsk, Russia, 2019.

14) Тезисы докладов International conference PhysicA.SPb. «Взаимодействии аттосекундного импульса электромагнитного поля с атомарными и молекулярными анионами» «ФТИ Иоффе». СПб 2019.

15) Тезисы докладов IX международной конференции по фотонике и информационной оптике «Вклад магнитной составляющей в спектр рассеяния электромагнитного аттосекундного импульса», «МИФИ», Москва 2020 г.

16) Тезисы докладов VII Международная молодежная научная конференция, посвященная 100-летию Уральского федерального университета Физика. Технологии. Инновации, “Взаимодействие аттосекундного импульса электромагнитного поля с атомарными и молекулярными анионами”. Екатеринбург 2020.

17) Тезисы докладов всероссийской научной конференции с международным участием, Енисейская фотоника «рассеяние ультракоротких импульсов электромагнитного поля различными нанообъектами», Красноярск 2020.

18) Тезисы докладов X международная конференция по фотонике и информационной оптике «вторая гармоника в спектре рассеяния ультракоротких импульсов на углеродных наноматериалах», Москва, НИЯУ МИФИ, 2021.

Список литературы

- [1] Chao D., Zhu C. et al. Graphene quantum dots coated VO₂ arrays for highly durable electrodes for Li and Na ion batteries // *Nano Lett.* – 2015. – Vol.15. – P.565.
- [2] Zhao B., Wang Z., et al, Deep-blue carbon dots offer high colour purity // *Nature Photonics.* – 2020. – Vol.14. – P.130.
- [3] Chao Hu, et al. Design and fabrication of carbon dots for energy conversion and storage // *Chem. Soc. Rev.* – 2019. – Vol.48. – P 2315.
- [4] Seongsu K. Manoj K., et al. Transparent Flexible Graphene Triboelectric Nanogenerators // *Adv Matter.* – 2014. – Vol.26.–P.1.
- [5] Maurand R., Jehl X., et al. A CMOS silicon spin qubit // *Nature Communications.* – 2016. – Vol. 7.– P.1
- [6] Lei Q., T. Pan, et al. Biocompatible nucleus-targeted graphene quantum dots for selective killing of cancer cells via DNA damage// *Communications Biology.* – 2021. – Vol.4.b –P. 214.
- [7] Suryanarayana C., Norton M. Grant. X-Ray Diffraction: A Practical Approach // Springer Science & Business Media.– 1998.– P.275.
- [8] Jones . Crystallography. Atomic secrets // *Nature.* – 2014. – Vol.505. – P 602.
- [9] Federico C., Luca P. Optical Technologies for Extreme-Ultraviolet and Soft X-ray Coherent Sources // Springer-Verlag Berlin Heidelberg –2015.
- [10] Usón I, Sheldrick G. Advances in direct methods for protein crystallography// *Curr. Opin. Struct. Biol.* – 1999 – Vol.9– P 643.
- [12] Landau L. D., Lifshitz E. M., Pitaevskii L. P. *Electrodynamics of Continuous Media* // – 1984 – Vol. 8 (2nd ed.).
- [13] Gaumnitz T., Jain A., et al., Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver // *Opt. Express* – 2017 – Vol. 25 –P 27506.
- [14] Astapenko V. A. Attosecond Dynamics of Photoexcitation of the Hydrogen Atom by Ultrashort Laser Pulses// *J. Exp. Theor. Phys.* – 2020 – Vol. 130, – P 56.
- [15] Astapenko V. A., Sakhno E. V., Excitation of a quantum oscillator by short laser pulses // *Applied Physics B* – 2020 – Vol. 126 – P 23.
- [16] Елецкий А.В., Книжник А.А.,и др. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки // *Успехи Физических Наук* –2015 – Т 185 – С. 225.
- [17] Dyachkova T.P., Melezhyk A.V., Gorsky S.Yu., Anosova I.V., Tkachev A.G. Some aspects of functionalization and modification of carbon nanomaterials // *Nanosystems: Physics, Chemistry, mathematics* – 2013– Vol. 4. – P 605.
- [18] Makarov D. N., Eseev M. K. et al. Analytical wave function of an atomic electron under the action of a powerful ultrashort electromagnetic field pulse // *Optics Letters* – 2019 – Vol. 44 – P 3042.
- [19] Месси Г., Отрицательные ионы // М.: Мир - 1979 – 754 с.
- [20] Смирнов Б. М., Отрицательные ионы // М.: Атомиздат – 1978 – С.176.
- [21] Salvat F., Martinez J. D. et al. Analytical Dirac-Hartree-Fock-Slater screening function for atoms (Z=1–92) // *Phys. Rev. A* – 1987 – Vol. 36 – P. 467.