

ВЫПИСКА

85.08/16-04-Выписка-3

от 3 ноября 2020 г. из протокола 85.08/16-04-4

заседания

Кафедры моделирования электромеханических и компьютерных систем  
Санкт-Петербургского государственного университета

Подлинник протокола находится в делах Кафедры Моделирования  
электромеханических и компьютерных систем

Председатель: профессор Егоров Н.В.  
Ученый секретарь: доцент Андреева Т.А.

**ПРИСУТСТВОВАЛИ (дистанционно):** зав. кафедрой профессор Егоров Н.В., профессор Виноградова Е.М, профессор Карпов А.Г., профессор Курбатова Г.И., проф. Мальков В.М., доцент Антонов А.Ю., профессор Бедрина М.Е., доцент Вараюнь М.И., доцент Клемешев В.А., доцент Кривовичев Г.В., доцент Никифоров К.А., ст. преп. Трофимов В.В., доц. Андреева Т.А., доц. Куранов Д. Ю.

**СЛУШАЛИ:** Отчет докторанта Федорова Артура Григорьевича о выполнении индивидуального плана за первый год докторантуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», специальность 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ на тему «Математическое моделирование физических процессов в кластерных наноструктурах»

**ВЫСТУПИЛ:** Зав. кафедрой, профессор Егоров Н.В.: «Предлагаю заслушать выступление докторанта Федорова Артура Григорьевича»

**ПОСТАНОВИЛИ:**

1. Утвердить отчет докторанта Федорова Артура Григорьевича о выполнении индивидуального плана за второй год докторантуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», специальность 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.
2. Считать индивидуальный план докторанта Федорова Артура Григорьевича о выполнении индивидуального плана за второй год докторантуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», специальность 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, выполненным полностью.

Заведующий кафедрой, профессор



Егоров Н.В.

Ученый секретарь кафедры, доцент



Андреева Т.А.

## ОТЧЕТ докторанта 2 года обучения

<b>ФИО:</b>	Федоров Артур Григорьевич
Специальность	05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
Форма обучения	очная
Научный консультант	Егоров Николай Васильевич

### Работа над диссертационным исследованием

Тема	Математическое моделирование физических процессов в кластерных наноструктурах
Теоретическая часть	<b>Приложено в отчете по НИР</b>
Экспериментальная часть	<b>Приложено в отчете по НИР</b>

### Публикации

1	Егоров Н. В., Антонова Л. И., Карпов А. Г., Трофимов В. В., Федоров А. Г. Теоретическая и экспериментальная оценки электрических параметров голографического микроскопа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №10, 2020, с. 79–84
2	A. G. Fedorov, V. V. Trofimov, L. K. Fedorova. Three-Dimensional Visualization of Thin Film Structures Obtained by Lensless Low-Energy Electron Microscope – принято к печати.

### Перечень заявок, поданных на конкурсы грантов и программ

№	Наименование проекта	Наименование конкурса	Статус конкурса (межд., всеросс., респ.)	Руководитель проекта

1	Моделирование информационных технологий и вычислительной системы голографического микроскопа для исследования и диагностики твердотельных наносистем. (20-07-00334 А).	РФФИ	всеросс. Не поддержана	Карпов А.Г.
---	--	------	---------------------------	-------------

Научный консультант, д.ф.-м.н., проф.

/Егоров Н.В./

Докторант

/Федоров А.Г./

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский государственный университет

ОТЧЕТ НИР

Федорова Артура Григорьевича

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Научный консультант

д.ф.-м.н., проф. Егоров Николай Васильевич

2020 г.

## Содержание

### I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

#### Введение

- Уравнение Шредингера в квазиклассическом приближении
- Приближение фазового объекта
- Фазовый сдвиг электронной волны в электростатическом потенциале
- Модель локализованных частиц свободно подвешенных на графеновой пленке
- Модель I. Заряженная сфера на углеродной пленке
- Модель II. Метод бипризмы Френеля
- Модель III. Метод постоянного заряда

### II. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

- Исследование углеродных нанотрубок

## Введение

Ключевой проблемой классической визуализации объектов исследования является потеря фазовой информации волны в регистрируемых изображениях. Данная проблема решается с помощью электронной голографии. Основное преимущество электронной голографии – запись полной информации об объекте, как в реальном пространстве, так и в пространстве Фурье; это дает возможность для апостериорного использования информации об объекте, содержащейся в волне. Другими словами электронная голография дает возможность не только визуализировать геометрию, но исследовать и другие важные физико-химические параметры объекта. Так, например, можно выделить наиболее актуальные направления электронной голографии [1]:

- Вычисление среднего внутреннего потенциала;
- Исследование поверхностных состояний, остовные заряды; восстановление поверхности, адсорбция;
- Электрическая поляризация;
- Взаимная дифракция в неоднородных слоях;
- Эффект Шотки;
- Наведенные электронным пучком токи и падение напряжения.

Идея голографического метода исследования структуры объектов была предложена Габором [2]. Наибольший интерес в этом плане представляют исследования объектов в электронно-голографических микроскопах, где можно выделить два основных способа регистрации и исследования объектов:

1. Высокоэнергетическая электронная голография (от  $5\text{ keV}$  до  $600\text{ keV}$ );
2. Низкоэнергетическая электронная голография (до  $1\text{ keV}$ ).

Так, для электронов высокой энергии можно выделить следующие методы регистрации и исследования объектов:

- Голографическая томография [3];
- Внеосевая голография [1];
- Темнопольная голография [4].

Низкоэнергетическая электронная голография основана на классическом методе Габора (осевая голография), где подразумевается отсутствие линз между объектом и экраном (Рис. 1).

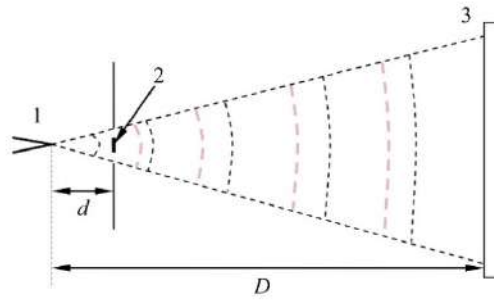


Рис. 1. Осевая голография Габора: 1) источник; 2) объект; 3) экран. Увеличению достигается за геометрии  $M=D/d$ .

Осевая голография за счет отсутствия линз между объектом и экраном не имеет недостатков, связанных с абберацией фокусирующих и преломляющих линз, что в итоге дает наиболее достоверную информацию о структуре исследуемого объекта [1]. Но стоит отметить один из основных недостатков низкоэнергетической электронной голографии: чувствительность электронного пучка к распределению потенциалов, как микроскопа, так и образца. Но с другой стороны чувствительность является и его достоинством при исследовании электрических потенциалов образцов. В работе [5] показано, что чувствительность электронов низкой энергии к электрическим потенциалам больше в сотни раз, чем высокоэнергетические электроны.

Как было отмечено, голографический метод позволяет полную запись об объекте исследования. Другими словами, многочисленные свойства объекта складываются вместе в одну фазу, и выявить, извлечь и оценить каждое из них по отдельности представляет собой огромную проблему, над решением которой занимаются многие исследователи данной области.

В рамках докторской работы, одной из задач является выявление и интерпретация голографических изображений. В связи с этим, второй год докторантуры направлен на разработку и реализацию методов позволяющих интерпретировать голографические изображения, полученные с помощью низкоэнергетической электронной голографии. В частности, в рамках данной работы рассмотрены следующие модельные задачи, позволяющие интерпретировать фазовые сдвиги:

1. Модельная задача с адсорбированными частицами сферической формы на проводящей поверхности. Для данной модели рассматривается классический подход: заряженная сфера вблизи проводящей поверхности. Рассмотрено три модели;
2. Рассмотрена модель трубчатых структур. В данной модели предполагается, что трубчатый объект расположен перпендикулярно к источнику. В этом случае возможно применение модели бипризмы Френеля;
3. Рассмотрены методы восстановления голографических изображений для трубчатых структур, как модель бипризмы Френеля.

Так же в рамках второго года проведены и проводятся натурные исследования в электронно-голографическом микроскопе. В частности, исследуются графеновые нанотрубки подвешенные на медной сетке.

### Уравнение Шредингера в квазиклассическом приближении

Учитывая только упругое рассеяние и пренебрегая поглощением, фазовый сдвиг электронов, проходящий через статистические электрические и магнитные поля, описывается уравнением Шредингера в квазиклассическом приближении (приближение ВКБ) [6]:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{\lambda E} \int V(x,y,z) dz - \frac{2\pi e}{h} \int A_z(x,y,z) dz, \quad (1)$$

где  $V$  – электростатический потенциал,  $A_z$  – z-компонента магнитного векторного потенциала  $\mathbf{A}$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка. Интегрирование берется параллельно оптической оси. Тогда, общий сдвиг фазы электронной волны можно представить следующим образом:

$$\varphi_0 = \varphi_{el} + \varphi_{mag}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{el}$ ,  $\varphi_{mag}$  можно представить следующим образом, соответственно:

$$\begin{aligned} \varphi_{el} &= C_E \int V(x,y,z) dz, \\ \varphi_{mag} &= -\frac{2\pi e}{h} \int A_z(x,y,z) dz, \end{aligned}$$

$C_E$  – зависящая от энергии электронного пучка, параметр взаимодействия. Выражение (2) полностью описывает фазовые сдвиги, возникающие за счет электромагнитного потенциала, соответственно регистрируемая электронная волна несет в себе информацию как об электростатическом потенциале, так и магнитном потенциале объекта исследования.

В рамках данной работы предполагается, что фазовый вклад вносимый за счет магнитного потенциала пренебрежимо малы. Стоит отметить, что в интерпретации реальных голографических изображений нельзя пренебрегать магнитным потенциалом, т.к. электроны с низкой энергией (до 1000 eV) чувствительны к распределению потенциалов в электронном микроскопе, что вызывает артефактное отклонение электронного пучка и затрудняет анализ данных и оценку структуры образца в особенности чувствительны к внешним магнитным полям. Поэтому в будущем планируется учесть вклад от магнитного потенциала.



## Приближение фазового объекта

Следующее приближение, которое применяется в модельных задачах – это фазовое приближение, т.е. учитывается только однократное рассеяние. В данном случае обычно за объект рассматривают или очень тонкие образцы (например, однослойные графеновые пленки) или в случае голографического способа исследований объекты, которые покрывают не более 1% от общей падающей на объект волны [5]. Таким образом, рассматриваются тонкие фазовые объекты с незначительным поглощением, функцию прохождения которую можно представить следующим образом:

$$t(x,y) = \exp(-a(x,y))\exp(i\varphi(x,y))$$

где  $a(x,y)$  - описывает абсорбционные свойства материала;  $\varphi(x,y)$  - описывает фазовый сдвиг возникающий за счет образца. В этом случае регистрируемую (моделируемую), голографическим методом, фазу можно представить в виде модуляции интенсивности:

$$I = |U_{exit}(x,u)|^2 = |U_{ref}(x,u)|^2 + |U_{obj}(x,u)|^2 + 2A_{obj}(x,y)A_{ref}(x,y)\cos(\psi(x,y) - \varphi(x,y))$$

где  $U_{exit}(x,u)$  – волна в области экрана,  $|U_{ref}(x,u)|^2$  – фон,  $|U_{obj}(x,u)|^2$  – вклад даваемый от объект, последний член представляет собой голографический вклад. Распределение волновой функции вблизи экрана решается с помощью Кирхгофа-Гельмгольца, в приближении Зоммерфельда, более подробно можно ознакомиться в работе [7].

## Фазовый сдвиг электронной волны в электростатическом потенциале

Фазовый сдвиг в электростатическом потенциале можно представить в следующем виде:

$$\Delta\varphi = C_E V_0 t \quad (3)$$

где  $C_E$  - постоянная взаимодействия,  $t$  - толщина образца,  $V_0$  - средний внутренний потенциал.

В зависимости от решаемой задачи с помощью выражения (3) можно вычислить разность фаз, оценить толщину образца или вычислить средний внутренний потенциал. Так, например, в работе [8] представлены результаты вычисления среднего внутреннего потенциала. Фазовый сдвиг вычисляется экспериментально, допускается, что толщина объекта известна. В общем, вычисление среднего внутреннего потенциала возможно двумя способами: с применением ab-initio расчетов, таких как метод функции рассеяния точки [9]; по фазовому изображению [10-13]. В работе [13] представлены исследования по вычислению МП как функции энергии в случае высокоэнергетической электронной дифракции (HEED) и низкоэнергетической электронной дифракции (LEED).

Для разработки модели вычисления фазового сдвига электронной волны в электростатическом потенциале, предлагается рассмотреть задачу с точки зрения численного вычисления фазового сдвига как сделано в работах Veleggia [14-18]. В данных работах предлагается теоретическая модель для расчета электромагнитных полей и электронно-оптических фазовых сдвигов в пространстве Фурье для дальнедействующих полей. В данных работах рассмотрены примеры для p-n перехода.

В отличие от работ [14-18] в нашем случае предлагается провести расчет для электростатических полей в случае низких энергий электронного пучка. В работе [18] обсуждаются вопросы, связанные вносимыми вкладами от электростатических и магнитных полей в сдвиг фазы. Т.е. есть возможность оценить вклад от электромагнитных полей, которые предлагают авторы этих работ для учета электростатического вклада в общую фазу.

#### Модель локализованных частиц свободно подвешенных на графеновой пленке

В работе [19] представлены экспериментальные исследования по визуализации отдельных заряженных адсорбатов на графеновой пленке методом осевой голографии Габора на низкоэнергетическом проекционном микроскопе. В работе представлено, что существует экспериментальная возможность регистрации и визуализации отдельных заряженных частиц в виде интерференционных колец. Такая визуализация происходит благодаря адсорбционным свойствам частиц, которые расположены на поверхности графеновой пленки, как искусственно осажденные, так из-за внешних факторов (например, в следствие плохой очистки, во время переноса и т.д.). В зависимости от направления переноса заряда адсорбаты представляют собой сильно локализованные отрицательно или положительно заряженные образования (Рис.1).

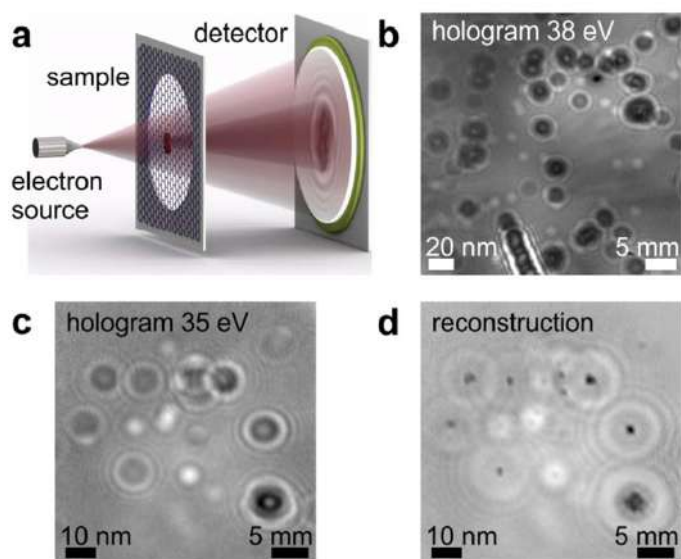


Рис.2. Изображение адсорбатов, зарегистрированные с помощью электронов низкой энергии. (а) Схема регистрации; (б) Голограмма адсорбатов, при расстоянии источник-объект 230 нм; (с). Голограмма адсорбатов, при расстоянии Источник-объект 116 нм; (д) Амплитуда восстановленного изображения (с) [19].

Классический способ интерпретации полученных результатов на Рис.1 возможно в приближении фазовых объектов. Сдвиг фазы можно представить в виде выражения (2). С учетом, допущения о пренебрежении магнитного потенциала, сдвиг фазы зависит только от электростатического потенциала частицы, взаимодействующего с электронным пучком. Для разработки модели локализованных частиц свободно подвешенных на графеновой пленке, предлагаются следующие этапы, в соответствии [14]:

1. Рассмотреть случай локального электрического потенциала, создаваемый отдельными заряженными адсорбатом на графене (экспериментальные расчеты проведены в работе [19]);
2. Задача дискретизации для изображений. Приведение в соответствие пикселей к размерам объекта исследования и размерам детектора [14, 20];
3. Решение задачи для фазового сдвига в пространстве Фурье, и его эквивалентность выражению, в реальном пространстве представленная в работе [19], путем вычисления преобразования Фурье;
4. Моделирование фазовых сдвигов и изображений.

#### Модель I. Заряженная сфера на углеродной пленке

В работе [21] представлены результаты экспериментальных и теоретических расчетов заряженной сферы, подвешенной на углеродной пленке. Эксперименты в работе [21] были

проведены на высокоэнергетическом электронном микроскопе методом внеосевой голографии. Модель, которая была применена в данной работе, можно обобщить для низкоэнергетической электронной голографии.

Основная идея по данной модели следующая. Как уже отмечалось выше, адсорбаты на поверхности графена в голографическом изображении получают сильнолаколизированными точками (Рис. 2). Такие локализованные точки можно представить в виде зараженной сферы, которую можно смоделировать полем точечной сферы с одинаковым зарядом, расположенной перед бесконечной проводящей плоскостью на расстоянии, равном радиусу самой сферы.

Применимость данной модели ограничена следующими допущениями:

1. Заряд равномерно распределен по границе сферы;
2. Расстояние от сферы до границ проводящей плоскости велики по сравнению с размерами частицы;
3. Толщиной проводящей плоскости – пренебрегается.

В этом случае, по методу изображений [22], справедливо следующее выражение [21]:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{Q}{2\varepsilon_0\lambda E} \arcsin\left[\frac{a}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}\right],$$

где  $Q$  – точечный заряд расположенный в центре сферы;  $a$  - радиус сферы,  $\mathbf{r} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ ,  $\mathbf{r}_0 = \sqrt{a^2 + y_0^2}$ ,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная в вакууме,  $\lambda$  – длина волны;  $E$  - ускоряющее напряжение.

В простейшем случае распределение интенсивности можно представить следующим образом:

$$I(\mathbf{r}) = 1 + \cos [\varphi(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r} + D)],$$

где  $D$  - «интерференционное расстояние», которое зависит от условий эксперимента.

На Рис. 3. Представлены результаты моделирования. Моделирование осуществлялось с помощью программного пакета Mathematica. Расчетные параметры представлены в табл. 1.

*Таблица 1. Расчетные параметры.*

№	Параметры	
1	$Q$	400e
2	$a$	0.155 мкм
3	$D$	3 мкм
4	$\varepsilon_0$	$8.854 * 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
5	$\lambda$	0.039 Å
6	$E$	100 кэВ
7	$e$ (заряд электрона)	$1.602 * 10^{-19} \text{ Кл}$

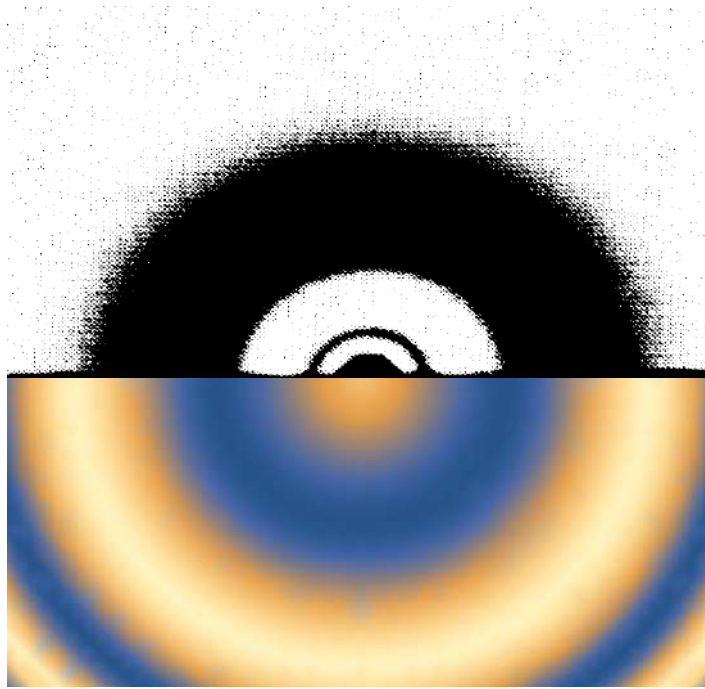


Рис. 3. Сравнение между смоделированными фазовыми распределениями заряженных сфер

### Модель II. Метод бипризмы Френеля

В случае, когда объектом исследования являются трубчатые объекты (например, углеродная нанотрубка), модель сферы более не может применяться. В работе [23] рассмотрено моделирование и восстановление голографических изображений с помощью низкоэнергетической внеосевой голографией. Позднее работа была модернизирована для двумерного случая [24].

Модель применима если трубчатый объект рассматривать, как заряженную проволоку (Рис. 4), тогда в соответствии работам [23,24], распределение волны в области экрана можно представить следующим образом:

$$U(\mathbf{r}, R) = \exp\left(-ir_{z0} \frac{\Delta r^2 K}{2R^2}\right) \left[ F_1(\mathbf{r} - \Delta \mathbf{r}) \exp\left(ir_{z0} \frac{r \Delta r K}{R^2}\right) + F_2(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) \exp\left(-ir_{z0} \frac{r \Delta r K}{R^2}\right) \right],$$

где

$$F_1(\mathbf{r}) = \exp\left(ir_{z0} \frac{r^2 K}{2R^2}\right) FT \left[ f_L(\boldsymbol{\rho}) S(\boldsymbol{\rho}) \exp\left(i \frac{K \rho^2}{2r_{z0}}\right) \right]$$

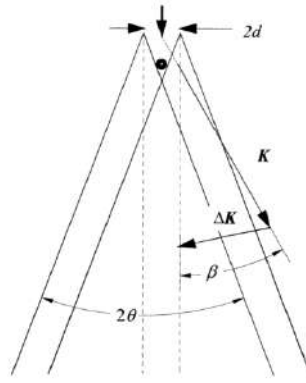


Рис. 4. Распределение волны  $U(\mathbf{r}, R)$ , как сумма двух параллельных волн, от двух мнимых источников.

$$F_2(\mathbf{r}) = \exp\left(ir_{z0} \frac{r^2 K}{2R^2}\right) FT \left[ f_L(\boldsymbol{\rho}) S(\boldsymbol{\rho}) \exp\left(i \frac{K \rho^2}{2r_{z0}}\right) \right]$$

где

$$f_L(\boldsymbol{\rho}) = \begin{cases} 1, & \rho_x \leq -a \\ 0, & \rho_x > -a \end{cases} \quad f_R(\boldsymbol{\rho}) = \begin{cases} 1, & \rho_x \leq -a \\ 0, & \rho_x > -a \end{cases}$$

Остальные параметры представлены на Рис. 5

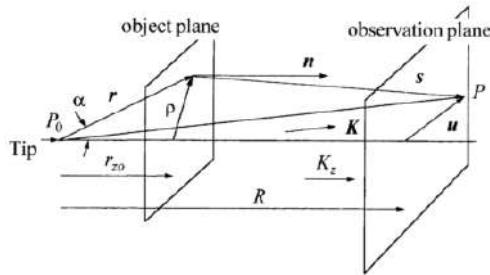


Рис. 5. Схематическое представление хода лучей.

Стоит отметить, что в данной модели заряженная проволока выступает в роли делителя волн, а функция образца представлена выражением  $S(\boldsymbol{\rho})$ , как представлено на Рис.6.

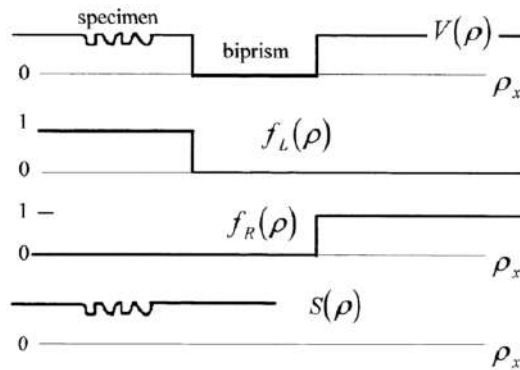


Рис. 6. Передаточная функция образца и заряженной проволоки.

Моделирование распределения интенсивности осуществлялось в пакете Matlab, (Рис. 7).

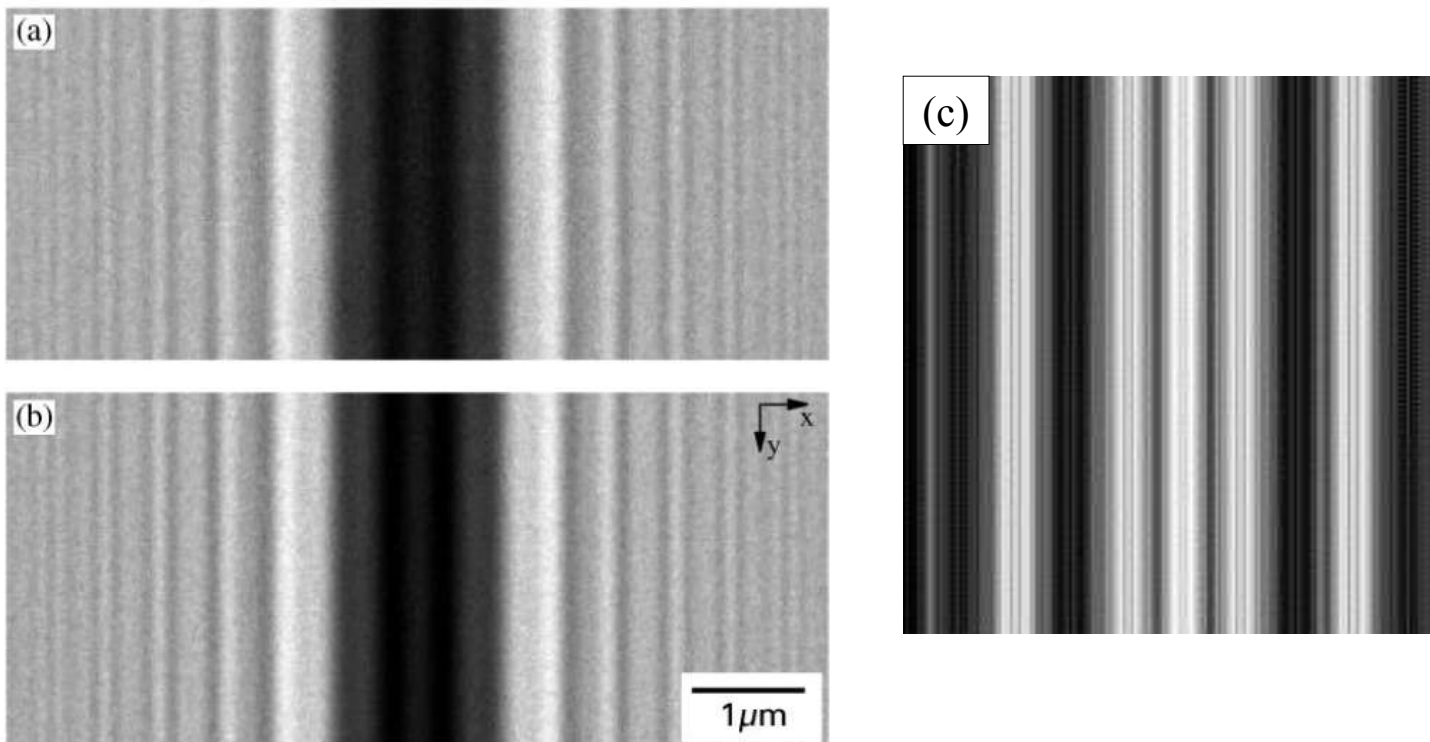


Рис.7. Сравнение экспериментальных и смоделированных изображений при отсутствии образца: (a) эксперимент [24]; (b) модель [24] (c) модель

На данном этапе модель рассматривалась без учета образца. В дальнейшем планируется рассмотреть данную модель для случая трубчатых объектов, без учета  $S(\rho)$ , как представлено на Рис. 7. Стоит отметить, что на (Рис. 7) представлен идеальный случай.

### Модель III. Метод постоянного заряда

В данной модели, представлены аналитические расчеты для определения сдвига фазы [25].

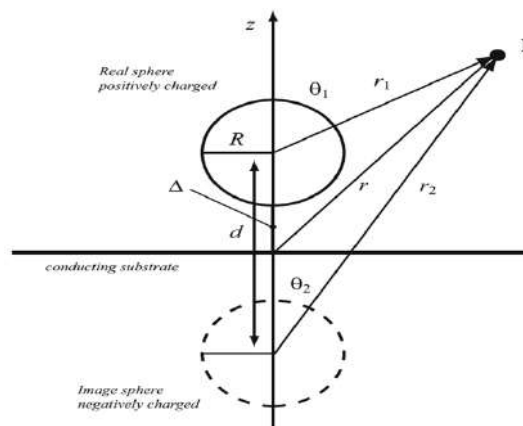


Рис. 8. Схема и расположение мнимой сферы и проводящей поверхности

В работе [25] одной из задач является вычисление потенциала заряженной металлической сфера вблизи проводящей подложки. Отличием данной работы от остальных является то, что они предполагают, что распределение заряда не является пространственно-инвариантным. Для решения задачи авторы работы предлагают два подхода: метод постоянных зарядов и метод постоянных потенциалов. Вид потенциала для первого метода получается с помощью решения уравнения Лапласа с учетом граничных условий:

$$V = V_s C_0 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - V_s C_1 \left( \frac{\cos \theta_1}{r_1^2} + \frac{\cos \theta_2}{r_2^2} \right) + V_s C_2$$

где  $V_s$  – потенциал Кулон для заряженной металлической сфера радиусом  $R$ , в отсутствие подложки.  $C_0, C_1, C_2$  – коэффициенты которые появляются при учете граничных условий:

$$C_0 = 1, C_1 = \frac{d}{d^3 - 2}, C_2 = \frac{1}{d^3}$$

$$C_m = \sum_{n=0}^{M-m-1} \frac{c_n}{d^{n+m+1}}, 1 \leq m \leq M-1$$

Фазу в этом случае, возможно, вычислить по следующему выражению:

$$\varphi(\rho) = C_E V_s R \sum_{n=0}^{\infty} C_n \int_0^{\infty} \left[ (-1)^n \frac{P_n(\cos \theta_1)}{r_1^{n+1}} - \frac{P_n(\cos \theta_2)}{r_2^{n+1}} \right] dz$$

где  $\cos \theta_1 = \frac{z-d/2}{r_1}$ ,  $r_1 = \sqrt{\rho^2 + (z-d/2)^2}$ ,  $\cos \theta_2 = \frac{z+d/2}{r_1}$ ,  $r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z+d/2)^2}$

Второй поход (метод постоянных потенциалов) не рассматривается, т.к. на данный момент не имеет физического смысла.



## Исследование углеродных нанотрубок

Как было отмечено выше, в осевой голографии Габора, основным требованием формирования интерференционных картин на экране, является то что волна провзаимодействовавшая с объектом должна быть менее 1% от общего количества прошедшей волны. В этом плане свободно подвешенные трубчатые структуры является наиболее подходящими объектами. В частности, в рамках второго года докторантуры, рассматривается углеродная нанотрубка (ННТ) Рис. 9.

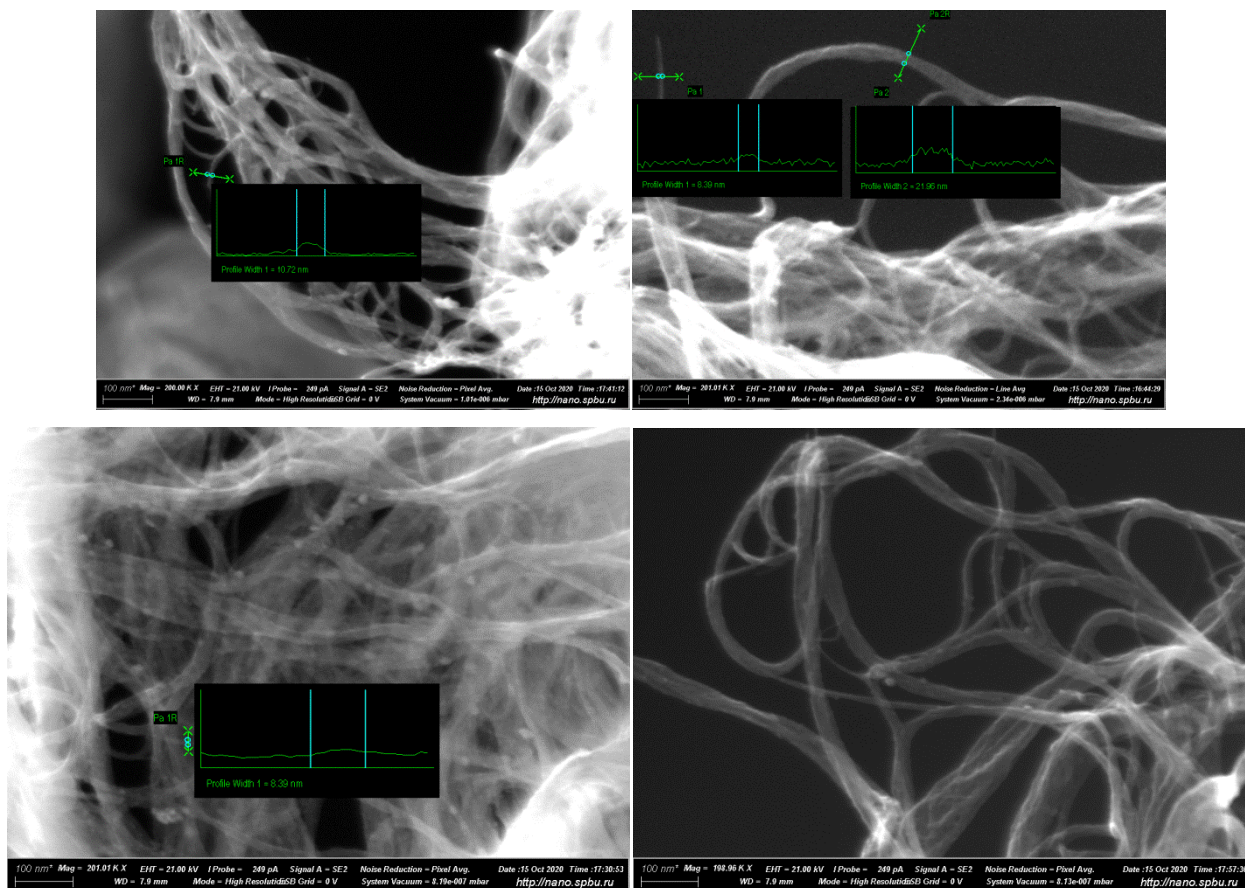


Рис. 9. Снимки углеродной нанотрубки (СЭМ, РЦ «Нанотехнологии», СПбГУ)

Предварительная визуализация была сделана на СЭМ в РЦ «Нанотехнологии» СПбГУ.

Для получения голографических изображений ННТ рассматриваются два способа. В первом случае графеновые пленки перенесены на медную сетку с шагом 9-11 мкм. Во втором случае планируется подвесить ННТ на графеновую пленку (Рис. 10). Графеновая пленка выращена на медной фольге. Однослойный графен является наиболее подходящим материалом для осаждения на него трубчатых объектов для последующего исследования их с помощью электронов низкой энергии.

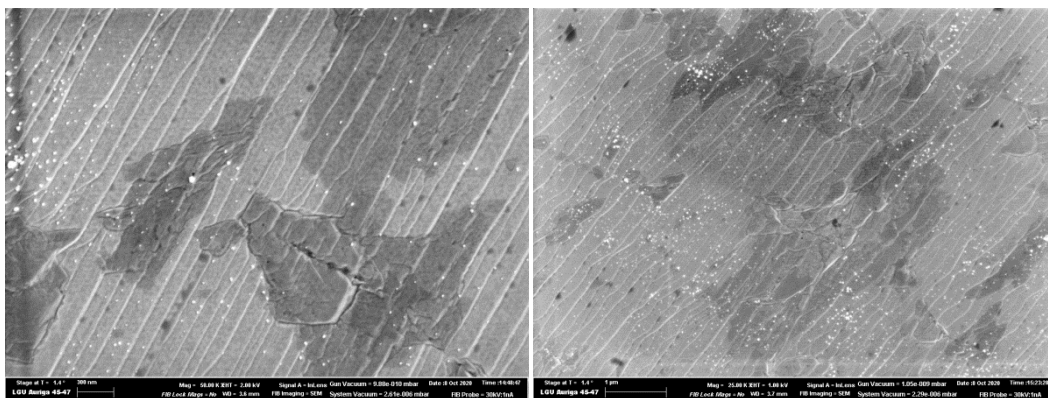


Рис. 10. Графеновая пленка на медной фольге (СЭМ, РЦ «Нанотехнологии», СПбГУ)

## Литература

1. H. Lichte. *Electron Holography* // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012. pp 153-213
2. D. Gabor. A new microscope principle // *Nature* 161. 1948. pp. 777–778.
3. J. Frank. Introduction: Principles of Electron Tomography // *Electron Tomography*. Springer, New York, NY. pp 1-15
4. M.J. Hytch, F. Houdellier, F. Hue, E. Snoeck. Dark - field electron holography for the measurement of geometric phase // *Ultramicroscopy* 111(2011) pp. 1328–1337.
5. Tatiana Latychevskaia, *Materials* 2020, 13, 3089; doi:10.3390/ma13143089
6. R. Wang, et al. Transmission electron holography // *Progress in Nanoscale Characterization and Manipulation*, Springer Tracts in Modern Physics 272. pp 176-187
7. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (The McGraw-Hill Companies, New York, 1988) p. 441.
8. C. Ozsoy-Keskinbora, C. B. Boothroyd, R. E. Dunin-Borkowski etc. Mapping the electrostatic potential of Au nanoparticles using hybrid electron holography // *Ultramicroscopy* 1 65 (2016) 8 – 14
9. Robert S. Pennington etc. Surface effects on mean inner potentials studied using density functional theory // *Ultramicroscopy* 159(2015)34–45
10. Rafal E. Dunin-Borkowski etc. *Electron Holography* // Springer Nature Switzerland AG 2019
11. Hannes Lichte. *Electron Holography* // *Handbook of Nanoscopy*, First Edition. pp. 153–219
12. Rongming Wang, etc. Transmission Electron Microscopy // *Progress in Nanoscale Characterization and Manipulation*, Springer Tracts in Modern Physics. pp 176–177.
13. D.K. Saldin, J.C.H. Spence. On the mean inner potential in high- and low-energy electron diffraction. *Ultramicroscopy* 55 (1994) 397-406
14. M. Beleggia, G. Pozzi. On the calculation of the phase shift of superconducting fluxons: from the isolated to the lattice case // *Ultramicroscopy* 84 (2000) 171-183.
15. M. Beleggia and G. Pozzi. Observation of superconducting fluxons by transmission electron microscopy: A Fourier space approach to calculate the electron optical phase shifts and images. *Physical Review B*, Volume 63, 054507
16. M. Beleggia, P.F. Fazzini, G. Pozzi. A Fourier approach to fields and electron optical phase-shifts calculations // *Ultramicroscopy* 96 (2003) 93–103
17. P.F. Fazzini, G. Pozzi, M. Beleggia. Electron optical phase-shifts by Fourier methods: Analytical versus numerical calculations // *Ultramicroscopy* 104 (2005) 193–205
18. M. Beleggia, G. Pozzi, A. Tomomura. *Electron Holography of Electromagnetic Fields: Recent Theoretical Advances* // Brookhaven National Laboratory. Upton, NY 11973-5000

19. Latychevskaia, T.; Wicki, F.; Longchamp, J.-N.; Escher, C.; Fink, H.-W. Direct observation of individual charges and their dynamics on graphene by low-energy electron holography. *Nano Lett.* 2016, 16, 5469–5474
20. Tatiana Latychevskaia\* and Hans-Werner Fink. Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms // *Applied Optics* / Vol. 54, No. 9 / 20 March 2015
21. J.W. Chen, G. Matteucci, A. Migliori, etc. Mapping of microelectrostatic fields by means of electron holography: Theoretical and experimental results // *Physical review A*. V. 40. N. 6 pp. 3136-3146
22. R.P. Feynman. *The Feynman lectures in Physics* // Addison Wesley, Reading, MA, Vol. 2
23. P. Morin. Computer simulation and object reconstruction in low-energy off-axis electron holography // *Ultramicroscopy* 76 (1999) pp. 1—12.
24. K. Yamamoto, T. Tanji, M. Hibino. Hologram simulation for off-axis electron holography // *Ultramicroscopy*, 85 (2000) pp. 35-49
25. Marco Beleggia. Phase shift of charged metallic nanoparticles // *Ultramicroscopy* 110(2010)418–424