

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Вергулес Александра Игоревна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Влияние паразитных электромагнитных полей на траекторию
движения электронного пучка в колонне СВВ ОЭМ.**

Практикум электричества и магнетизма, 2 курс, группа № 18311

Научный руководитель:

А.С. Петров

Оценка научного руководителя

« » декабря 2019 г.

Преподаватель практикума

Ю.Ю. Чопорова

Оценка преподавателя практикума

« » декабря 2019 г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

« » декабря 2019 г.

Новосибирск, 2019 г.

Аннотация

Целью работы являлось ознакомление с физическими основами движения заряженных частиц в электромагнитных полях на примере действия паразитных полей на электронный пучок в колонне сверхвысоковакуумного отражательного электронного микроскопа. Для достижения этой цели были проведены эксперименты, регистрирующие влияние источников паразитных полей на движение пучка электронов. Предложена теоретическая модель для описания результатов, полученных в ходе экспериментов. Разработан метод компенсации смещения пучка электронов паразитным полем образца при подаче на его контакт положительного потенциала. Произведена оценка величины магнитного поля полюсных наконечников для объективной, промежуточной и проекторной магнитных линз электронного микроскопа. Оценка согласуется с данными, представленными для типовой магнитной линзы, и позволяет определить порядок величины магнитного поля для каждой линзы по значению суммарного угла поворота электронного пучка магнитными линзами и значениям тока на каждой линзе.

Ключевые слова: сверхвысоковакуумная отражательная электронная микроскопия, электронный пучок, электромагнитные линзы, движение заряженных частиц в электромагнитных полях.

Оглавление	
1. Введение	4
2. Теоретические сведения	5
3. Экспериментальная установка.....	9
3.1 Создание вакуумных условий.....	9
3.2 Катод, термоэлектронная эмиссия	10
3.3 Электромагнитные линзы	11
3.4 Образец и испарители.....	11
4. Методика проведения эксперимента.....	12
5. Результаты.....	14
6. Обсуждение результатов	16
6.1. Построение теоретической модели, описывающей смещение электронного пучка от источников паразитных полей	16
6.2. Компенсация смещения электронного пучка.....	19
6.3. Оценка величины магнитного поля, создаваемого полюсными наконечниками электромагнитных линз	20
7. Вывод.....	22
8. Благодарности.....	22
9. Список используемой литературы	23

1. Введение

Одной из важнейших характеристик микроскопа является его разрешающая способность. После открытия в 1873 году Эрнстом Аббе дифракционного предела [1] стало ясно, что разрешение оптического микроскопа ограничено и по оценкам составляет около 0,25 мкм [2]. Для повышения разрешающей способности нужно либо увеличивать максимальный угол, под которым могут попадать в объектив лучи, прошедшие через препарат (апертура объектива), либо уменьшать длину волны света, освещающего образец. Технически сложно создать источник фотонов с длиной волны порядка межатомных расстояний. Поэтому видимый свет не подходит для изучения атомных структур кристаллов, характерные размеры которых составляют порядка нескольких ангстрем. Альтернативой фотонам являются такие частицы как электроны, которые в отличие от фотонов обладают массой. Согласно принципу де-Бройля электрон с импульсом p можно рассмотреть как движущуюся волну:

$$p = \hbar |\mathbf{k}| = \hbar \frac{2\pi}{\lambda},$$

где $|\mathbf{k}|$ – модуль волнового вектора, λ – длина волны электрона, $\hbar$ – постоянная Дирака. Выразив импульс электрона через его кинетическую энергию ε_3 и массу m :

$$p = \sqrt{\varepsilon_3 2m}$$

и подставив в предыдущее выражение, получим зависимость длины волны электрона от его энергии:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2\pi\hbar}}{\sqrt{\varepsilon_3 m}},$$

где энергия уже измеряется в эВ. При энергии в 100 кэВ длина волны электрона будет равна 12,3 пм, что достаточно для исследования кристаллических структур (к примеру параметр решетки кремния 5,4 ангстрем [3]).

Эрнст Руска заложил основы оптической методики, где вместо фотонов используются электроны, и в 1931 году создал первый электронный микроскоп, что положило начало бурному развитию электронной микроскопии [4]. Разрешающая способность такого микроскопа в десятки тысяч раз превосходит эту характеристику для оптического микроскопа, поэтому электронная микроскопия по-прежнему является действенным методом исследования веществ в областях современного материаловедения.

В курсовой работе используется сверхвысоковакуумный отражательный электронный микроскоп (СВВ ОЭМ) с рабочим ускоряющим напряжением 100 кВ. В процессе эксплуатации установки был замечен интересный экспериментальный факт: если отцентровать положение электронного пучка на экране и после этого изменить величину тока, пропускаемого через образец, то произойдет отклонение пучка от начального положения. В курсовой работе предлагается исследовать это явление.

Целью настоящей работы является ознакомление с физическими основами движения заряженных частиц в электромагнитных полях на примере следующих задач:

1. Установить типы паразитных полей, создаваемых их источниками;
2. Исследовать и теоретически описать характер влияния сил, возникающих в следствие прохождения электронным пучком паразитных полей в колонне электронного микроскопа;
3. Предложить способы компенсации паразитных полей;
4. Оценить магнитное поле, создаваемое электромагнитными линзами.

2. Теоретические сведения

2.1 Движение электронов в электрическом поле

Рассмотрим движение электрона в электростатическом поле с целью нахождения уравнений, описывающих его движение. Ясно, что электрическое поле оказывает влияние лишь на ту составляющую скорости электрона, которая

сонаправлена с этим электрическим полем. Пусть в начальный момент времени электрон имеет скорость v_e , заряд электрона $e < 0$, а вектор напряженности электрического поля будет направлен вдоль оси z , то есть $\mathbf{E} = (0, 0, E)$. Запишем уравнение движения для каждой компоненты скорости:

$$\begin{cases} m \frac{dv_{ex}}{dt} = 0, \\ m \frac{dv_{ey}}{dt} = 0, \\ m \frac{dv_{ez}}{dt} = e \cdot E. \end{cases}$$

Проинтегрировав уравнения два раза по времени, получим:

$$\begin{cases} x = v_{ex0}t + x_0, \\ y = v_{ey0}t + y_0, \\ z = \frac{eE}{2m} \cdot t^2 + v_{ez0} \cdot t + z_0. \end{cases}$$

Из уравнений видно, что, в любом сечении вдоль оси z траекторией электронного пучка является парабола, а само движение будет равноускоренным против направления вектора напряженности электрического поля.

2.2 Фокусировка электронного пучка магнитными линзами

Для фокусировки электронного пучка можно использовать как магнитные, так и электростатические линзы. Преимущество магнитных линз по сравнению с электростатическими состоит в возможности регулирования степени фокусировки электронного пучка, потому как магнитная составляющая силы Лоренца изменяет траекторию электронного пучка, не меняя при этом абсолютного значения его скорости, а, следовательно, энергии и его длины волны де-Бройля. Главным элементом линзы является магнитный полюсный наконечник, изготовленный из мягкого железа, обеспечивающий поле, имеющее аксиальную симметрию. От его конструкции зависят электронно-оптические свойства микроскопа [5]. Рассмотрим движение электронного пучка в аксиально-симметричном магнитном поле, создаваемого полюсными наконечниками [6]. Такую задачу удобно решать в цилиндрической системе координат. Пусть

магнитное поле $\mathbf{B}$, скорость электрона $\mathbf{v}_e$. На движущуюся заряженную частицу в магнитном поле будет действовать сила Лоренца.

Сначала на электрон подействует компонента магнитного поля B_r , которая вызовет появление силы Лоренца $\mathbf{F}_л$, направленной к наблюдателю (см. Рис.1а), и, соответственно приведет к возникновению у электрона дополнительной компоненты скорости $v_{e\alpha}$. На новую компоненту скорости начнет действовать магнитное поле B_z – возникнет компонента силы Лоренца $\mathbf{F}'_л$ (см. Рис.1б), направляющая электрон к оптической оси электронного микроскопа. Иными словами, аксиально-симметричное магнитное поле линзы фокусирует электронный пучок на оптической оси электронного микроскопа. Объясним это явление, расписав систему уравнений движения электрона в магнитном поле, принимающей в данных условиях следующий вид:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{e}{mc} \cdot r \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot B_r, \quad (1)$$

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \cdot \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2 = -\frac{e}{mc} \cdot r \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot B_z, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dt} \left(r^2 \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right) = -\frac{e}{cm} \left[\frac{dz}{dt} \cdot B_r - \frac{dr}{dt} B_z \right]. \quad (3)$$

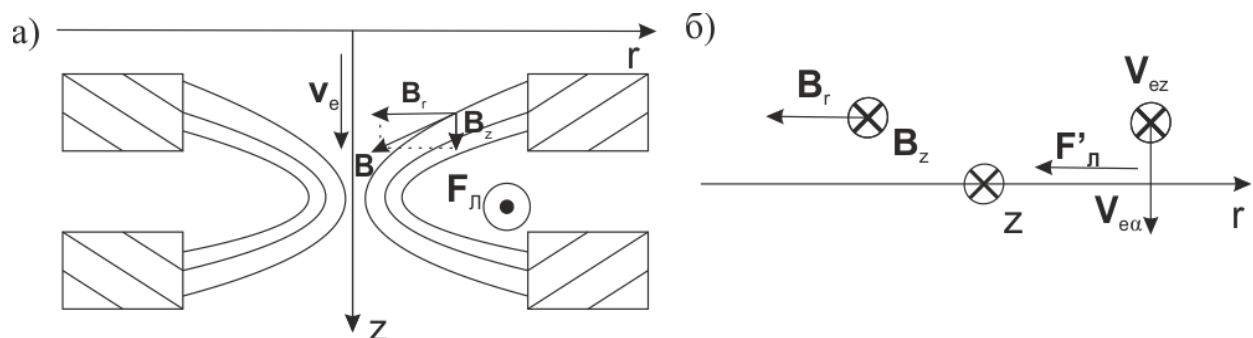


Рис.1. Схематическое описание движения электронного пучка в области действия короткого магнитного поля электромагнитной линзы: (а) появление силы Лоренца $\mathbf{F}_л$, направленной к наблюдателю, от компоненты поля B_r при попадании электрона в область действия электромагнитной линзы; (б) возникновение силы Лоренца $\mathbf{F}'_л$, направленной к оптической оси электромагнитной линзы

Для решения системы воспользуемся теоремой Гаусса для потока индукции магнитного поля. В качестве замкнутой поверхности выберем малый цилиндр радиуса r с высотой dz . Так как высота цилиндра мала, будем считать, что

компонента поля B_r всюду в нем одинакова, а малость радиуса позволяет считать компоненту поля B_z в каждой плоскости цилиндра постоянной. В итоге получим, что:

$$2\pi r \cdot dz \cdot B_r + \pi r^2 \frac{dB_z}{dz} dz = 0. \quad (4)$$

Выразим отсюда B_r :

$$B_r = -\frac{r}{2} \cdot \frac{dB_z}{dz}. \quad (5)$$

Подставим получившееся выражение в уравнение (3):

$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\alpha}{dt} \right) = \frac{e}{m} \cdot \left[\frac{r^2}{2} \cdot \frac{dB_z}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} + r B_z \frac{dr}{dt} \right].$$

В скобках правой части уравнения нетрудно заметить производную произведения. Свернем ее:

$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right) = \frac{e}{mc} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{r^2}{2} \cdot B_z \right).$$

Проинтегрируем последнее выражение по времени с учетом того, что при $\mathbf{B} = 0$ угловая скорость также обращается в нуль, поэтому константа от интегрирования будет равна нулю, и выразим угловую скорость:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{e}{2mc} \cdot B_z. \quad (6)$$

Отсюда можно сделать вывод, что величина угловой скорости будет одинаковой для всех электронов, так как она не зависит от r . Линейная скорость, определяемая уравнением $v = \omega r$, будет зависеть только от расстояния до оптической оси.

При подстановке в уравнение (1) выражений (5) и (6) оно преобразуется следующим образом:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \left(\frac{e}{2m} \right)^2 \cdot r^2 \cdot B_z \cdot \frac{dB_z}{dz}.$$

Ускорением в направлении оси z можно пренебречь и считать скорость в данном направлении постоянной и равной полной скорости, так как рассматриваются электроны, летящие под малыми углами по отношению к главной оптической оси линзы.

Аналогичным образом преобразуем оставшееся уравнение (2):

$$\begin{aligned}\frac{d^2r}{dt^2} - r \cdot \left(\frac{eB_z}{2m}\right)^2 &= -\frac{r}{2} \cdot \left(\frac{eB_z}{m}\right)^2, \\ \frac{d^2r}{dt^2} &= -r \cdot \left(\frac{eB_z}{2m}\right)^2.\end{aligned}\tag{7}$$

Радиальная компонента силы пропорциональна радиальной координате и направлена к оси линзы независимо от вектора индукции магнитного поля и начальной скорости электрона. В результате траектория электрона всегда пересекает ось симметрии. Уравнение (7) отражает влияние электромагнитной линзы на электронный пучок: линза фокусирует пучок и заставляет его двигаться вдоль оптической оси микроскопа.

3. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в колонне сверхвысоковакуумного отражательного электронного микроскопа, переоборудованном из просвечивающего микроскопа JEM-7A [7].

3.1 Создание вакуумных условий

Для того, чтобы исключить рассеяние электронов на молекулах, составляющих атмосферу требуется создать сверхвысоковакуумные условия. Кроме того, при подаче высокого напряжения в условиях остаточной атмосферы нить накала в процессе нагрева может окислиться и сгореть. Сверхвысоковакуумные условия создаются при помощи форвакуумного, диффузионного, ионного насосов и устройства дифференциальной криогенной откачки. Остаточное давление в колонне СВВ ОЭМ при отключенных насосах поддерживается на уровне 10^{-2} – 10^{-1} Па работающим круглосуточно азотным

адсорбционным насосом. Во время экспериментов давление в колонне микроскопа составляло 10^{-5} Па и до 10^{-8} Па в рабочем объеме, вокруг которого прокачивается жидкий азот (криогенная откачка).

3.2 Катод, термоэлектронная эмиссия

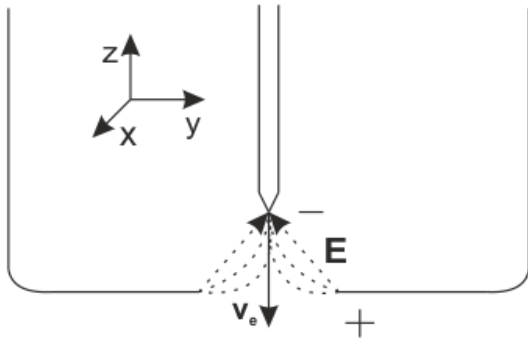


Рис.2. Схематическое изображение электронной пушки

В экспериментальной установке за формирование протяженного узкого электронного пучка отвечает электронная пушка, состоящая из катода и анода (см. Рис.2). Катодом является вольфрамовая нить, которая, нагреваясь электрическим током, испускает электроны за счет процесса термоэлектронной эмиссии. Так как ускоряющее напряжение между катодом и анодом составляет $U=100$ кВ, при покидании области действия этого электрического поля электроны приобретают энергию $\varepsilon_e = eU = 100$ кэВ. Можно вычислить скорость и оценить время t прохождения электронным пучком расстояния от катода до экрана, равного 0,5 м.

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}, \quad t = \frac{0,5 \text{ м}}{v},$$

$$\lambda = \frac{2\pi h}{\sqrt{2eU}}.$$

Расчетные значения λ , v , t для различных величин ускоряющего напряжения E приведены в Таблице 1. Из таблицы видно, что время t электростатического взаимодействия между электронами, мало для того, чтобы исходный электронный пучок перестал быть плотным скоплением одноименно заряженных частиц. Из значений длины волны во втором столбце этой же таблицы следует, что длина волны электрона много меньше длины волны видимого света.

Таблица 1. Значения длины волны, скорости электрона и времени, за которое электрон проходит колонну СВВ ОЭМ

ε_3 , кэВ	λ , пм	v , м/с	t , нс
10	12,3	$59,2 \cdot 10^6$	8,4
50	5,5	$132 \cdot 10^6$	3,8
100	3,88	$187 \cdot 10^6$	2,7

3.3 Электромагнитные линзы

Система электромагнитных линз в СВВ ОЭМ представлена конденсерной, объективной, промежуточной и проекторной линзами. Конденсерная линза фокусирует электронный пучок, созданный катодом, на образце. Через объективную и проекторную линзы всегда протекает один и тот же постоянный ток, в то время как на промежуточной линзе его величину можно изменять. Отраженный образцом пучок электронов проходит через объективную линзу. Формируется первое промежуточное изображение, являющееся объектом для промежуточной линзы, пройдя которую, уже второе промежуточное изображение окончательно увеличивается проекционной линзой и попадает на флуоресцентный экран. Под экраном располагается CCD-камера TVIPS F-114, которую можно использовать для записи экспериментов в формате фото или видео.

3.4 Образец и испарители

Кремниевый образец (размеры: $0,8 \times 0,11 \times 0,05$ см), закрепленный в держатель специальной конструкции, помещается в рабочий объем микроскопа через шлюзовую систему. В держателе образец закреплен при помощи двух танталовых лапок, одна из которых заземлена, на другую может подаваться постоянный или переменный сигнал от источника тока. Нагрев кремниевого образца в рабочей камере СВВ ОЭМ происходит посредством пропускания через него постоянного или переменного электрического тока.

В конструкции микроскопа имеется испарительная ячейка, располагающаяся напротив образца, которая обеспечивает возможность исследования процессов осаждения на поверхность образца различных материалов. В качестве

испарителей выступают пластинка кремния (размеры: $1,0 \times 0,15 \times 0,05$ см) и вольфрамовая спираль, на которую нанесено испаряемое вещество (диаметр 0,2 см, количество витков 5, полная длина 0,7 см). Они также нагреваются пропусканием электрического тока.

Примечательно то, что образец с током и включенные испарители выступают в качестве источников паразитных электрических и магнитных полей, возникающих на пути электронного пучка от образца до экрана. Как следствие, в зависимости от силы тока, подаваемой на образец или испаритель, на экране происходит смещение электронного пучка относительно его положения, когда ток через образец и испарители не течет.

4.Методика проведения эксперимента

Для того, чтобы зафиксировать отклонение пучка было решено провести серию экспериментов. Для краткости введем следующие обозначения: +DC – постоянный ток на образце при положительном потенциале на незаземленной лапке, –DC – постоянный ток на образце при отрицательном потенциале на незаземленной лапке, Испаритель 1 – прямоугольный кремниевый испаритель, Испаритель 2 – катушка, на которую нанесен испаряемый материал.

Меняя направление протекания через образец постоянного тока и его величину, и при этом регистрируя положение электронного пучка, можно пронаблюдать за направлением и величиной смещения пучка. Величина максимального тока, пропускаемого через образец и испаритель 1, ограничивалась значением, при котором их температура была близка к температуре плавления кремния, равной 1414 °C. Поэтому, сила тока изменялась до 3 А на образце, до 3,5 А – на испарителе 1. Для удобства обработки данных и наглядности, все эксперименты снимались на видео. Эксперименты по изучению влияния электрического тока, подающегося на испарители, проводились без смены полярности постоянного тока, так как источники питания испарителей не предусматривают такой возможности.

Изображение электронного пучка на экране представляет собой пятно круглой формы, поэтому его положение при каждом значении силы тока определялось центром этого пятна. Реперной точкой было выбрано положение, которое занимает электронный пучок на экране при выключенных образце и испарителях. В процессе проведения экспериментов было замечено, что положение электронного пучка на экране не зависит от величины переменного тока на образце, в отличие от постоянного тока любой полярности, который при включении сразу отклоняет электронный пучок от нулевого положения. Для того, чтобы точно определить положение электронного пучка, при смене величины тока на образце или испарителе, было необходимо ждать около 5-7 секунд, чтобы положение пучка на экране стало стационарным.

При прохождении через магнитные линзы микроскопа, изображение, формируемое электронным пучком, переворачивается и вращается в плоскости экрана на некоторый угол, что нужно учитывать при нахождении траектории движения пучка в зависимости от силы тока, протекающего через них. Магнитные линзы действуют на электронный пучок подобно собирающей линзе. Изображение образца, формируемое объективной линзой, будет перевернутым, так как он располагается на расстоянии, большем фокусного расстояния этой линзы. То же самое будет верно и для промежуточной, и для проекторной линзы. В итоге имеем то, что на выходе изображение пучка будет перевернутым. Для определения угла поворота электронный пучок наполовину заслонялся образцом, как это показано на Рис.3. Значение смещения пучка определялось разностью между координатами центра пучка при некотором значении силы тока на образце и испарителях, и начальным положением пучка электронов.

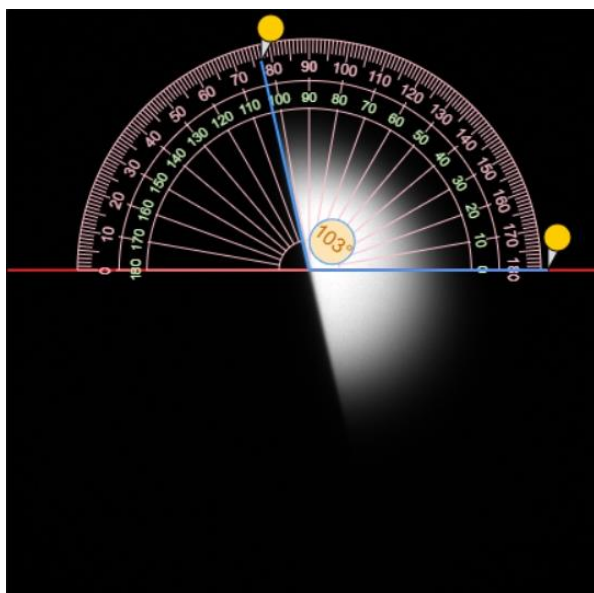


Рис.3. Изображение электронного пучка, наполовину заслоненного образцом

Для того, чтобы не засветить объектив камеры, ток накала, а, соответственно, и эмиссия электронов были уменьшены. Размер электронного пучка был отрегулирован с помощью подбора напряжения на проекторной линзе. Ширина пучка настраивалась изменением тока на конденсерной линзе. Все действия были сделаны для того, чтобы все перемещения могли быть зарегистрированы объективом камеры.

5. Результаты

На Рис.4 (а–г) показаны схематичные изображения смещения электронного пучка, зафиксированные в процессе экспериментов. По полученным результатам были построены графики смещения электронного пучка в зависимости от силы тока на источниках паразитных полей (образца, испарителей), а также траектории электронного пучка.

Во всех четырех случаях величина смещения центра электронного пучка относительно нулевого положения линейно возрастала с увеличением значения силы тока (см. Рис.5а и 6а). Траектории отклонения электронного пучка в плоскости экрана представляют собой прямые, отличающиеся между собой направлениями и углами наклона относительно оси X . При смене полярности на образце, направление смещения электронного пучка менялось на противоположное. Из Рис.6б видно, что больше всего пучок электронов отклоняет испаритель 2.

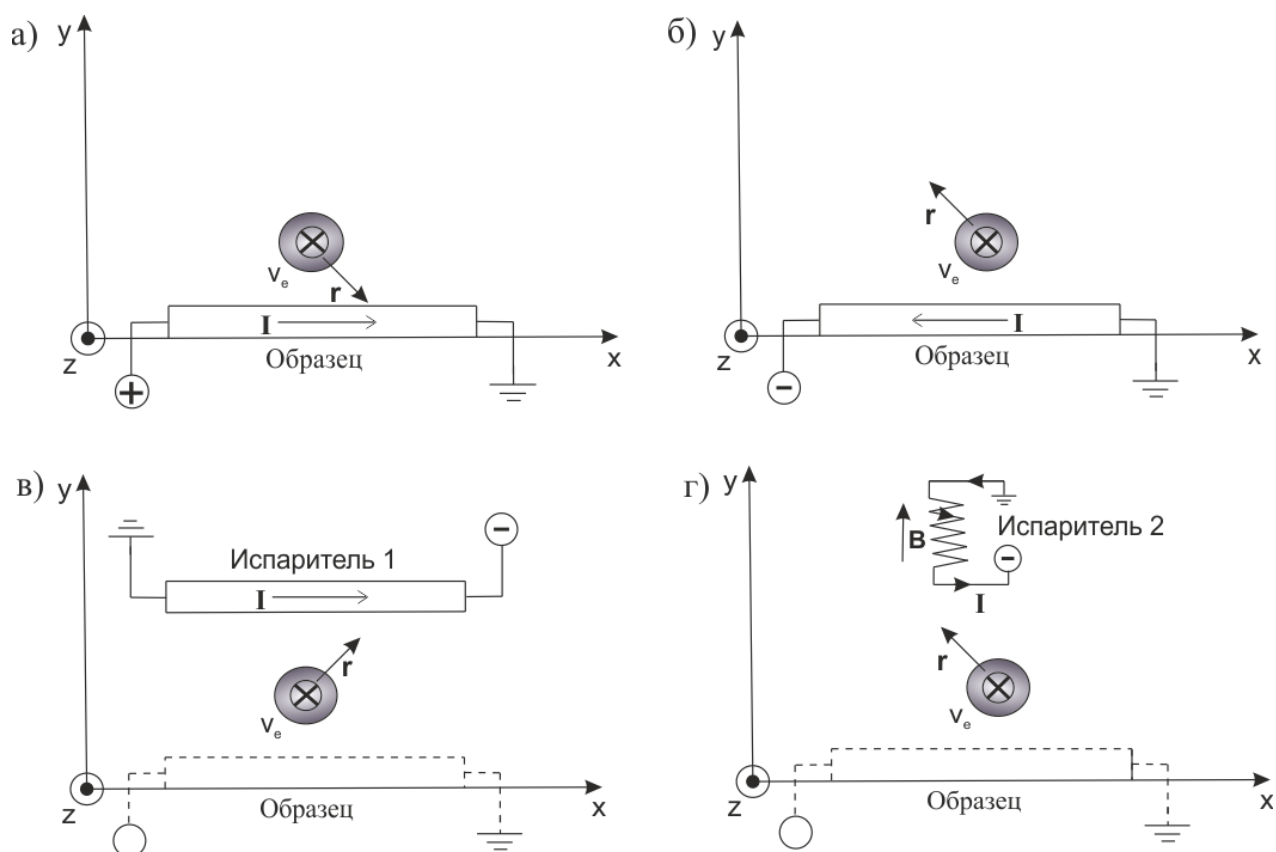


Рис.4. Направление смещения электронного пучка при увеличении значения модуля постоянного тока на: (а) Образец +DC, (б) Образец -DC, (в) Испаритель 1, (г) Испаритель 2

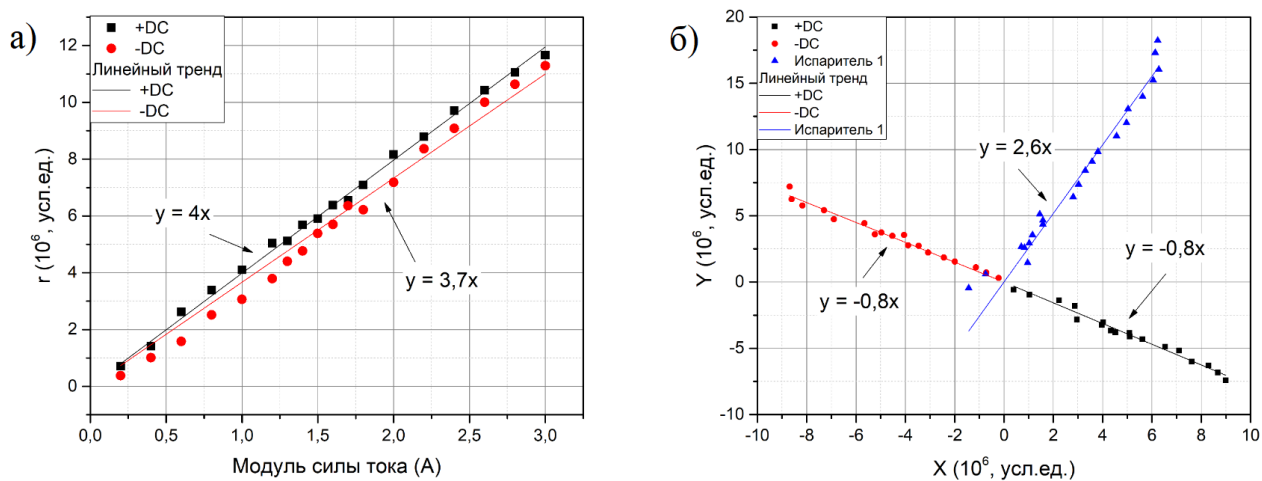


Рис.5. Отклонение электронного пучка: (а) Смещение радиус-вектора электронного пучка в зависимости от модуля силы тока при различных полярностях; б) Траектория электронного пучка, снятая камерой, для образца и испарителя 1

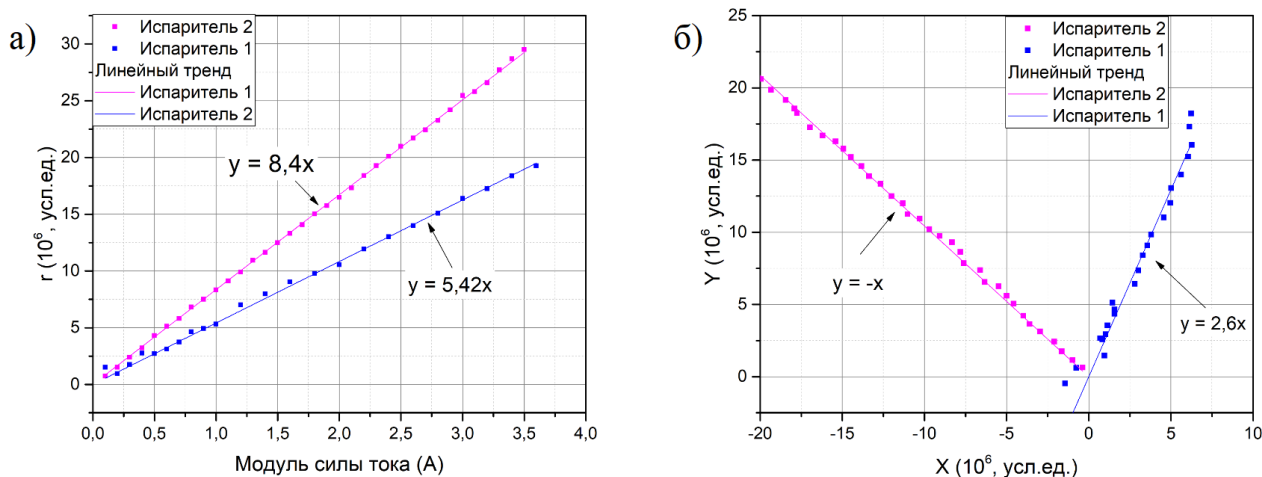


Рис.6. Отклонение электронного пучка: (а) Смещение радиус-вектора электронного пучка в зависимости от величины тока на испарителе 1 и испарителе 2; (б) Траектория электронного пучка, снятая камерой, для испарителя 1 и испарителя 2

6. Обсуждение результатов

6.1. Построение теоретической модели, описывающей смещение электронного пучка от источников паразитных полей

Паразитные электрические поля создаются протекающим по образцу и испарителю 1 током, однако, его влияние нас не интересует, потому как оно лишь увеличивает компоненту скорости электрона, сонаправленную с ним, а не изменяет траекторию движения частицы. Отсюда можно сделать вывод, что отклонение электронного пучка относительно центра, наблюдаемое при пропускании постоянного тока через образец и испарители происходит из-за воздействия на него магнитного поля. Учитывая то, что в эксперименте наблюдается отклонение электронного пучка в плоскости XY , действие z -компоненты силы Лоренца рассматривать не будем.

Как было сказано выше, образец и испаритель 1 являются кремниевыми пластинками. Было сделано предположение, что эти пластинки можно представить совокупностью бесконечных прямолинейных проводников с током. Силовые линии магнитного поля от каждого такого проводника представляют собой концентрические окружности. Отсюда, по принципу суперпозиции, результирующее магнитное поле окажется эллипсом, вытянутым по ширине образца и испарителя 1. В каждом из случаев учитывается смещение, которое

получается в результате пролета электронного пучка в верхней половине эллипса, так как расстояние до источника паразитного поля в этой области меньше, чем при пролете в нижней части эллипса, потому что образец и испаритель 1 расположены не строго вертикально, а под некоторым углом по отношению к оптической оси микроскопа.

Рассмотрим движение электронного пучка в магнитном поле, создаваемом током, протекающим через образец, когда на его контакт подается положительный потенциал (см. Рис.7а). В момент попадания в область действия магнитного поля образца, скорость электрона имеет только z -компоненту. В результате действия компоненты поля B_y на эту скорость появляется сила Лоренца, направленная вдоль оси x , которая вызывает возникновение x -компоненты скорости электрона (Рис.7б). На появившуюся компоненту скорости начинает действовать компонента магнитного поля B_z , которая отклоняет пучок по направлению оси y . Окончательно получаем смещение электронного пучка в плоскости XY , показанное на Рис.7в. Проведя аналогичные рассуждения, можно описать смещение от образца, при подаче на его контакт отрицательного потенциала, и испарителя 1 (см. Рис.7 г–з).

Как видно из сопоставления направлений смещения, полученных в процессе экспериментов (Рис. 4 а–в), и смещений, полученных при помощи теоретической модели, полное соответствие теории и эксперимента наблюдается только на образце при $-DC$. В остальных же случаях теоретическая модель дает верное направление смещения только для компоненты F_{lx} силы Лоренца. Обсудим возможные причины, приводящие к расхождению между теоретической моделью и экспериментом. Во-первых, теоретическое описание явления не учитывает того, что образец и испаритель 1 на самом деле расположены не строго параллельно оси x , а под некоторым углом. Во-вторых, при пропускании постоянного тока через образец в различных направлениях смещение происходило в противоположных направлениях, то есть угол между ними составляет 180° . Теория же указывает на то, что угол между направлениями

смещения электронного пучка в зависимости от направления тока через образец или испаритель 1 равен 90° . Теоретическая модель предполагает, что ток течет строго вдоль образца и испарителя 1, так как лапки, на которые они крепятся располагаются симметрично. Однако в реальности места омических контактов поверхности образца (испарителя 1) с лапками могут располагаться не симметрично относительно центра образца (испарителя 1). Как следствие, магнитное поле, созданное током, протекающим диагонально от одного края образца (испарителя 1) к противоположному, располагается под углом к оптической оси СВВ ОЭМ, что и является возможным объяснением несовпадения второй компоненты силы Лоренца в эксперименте и теории.

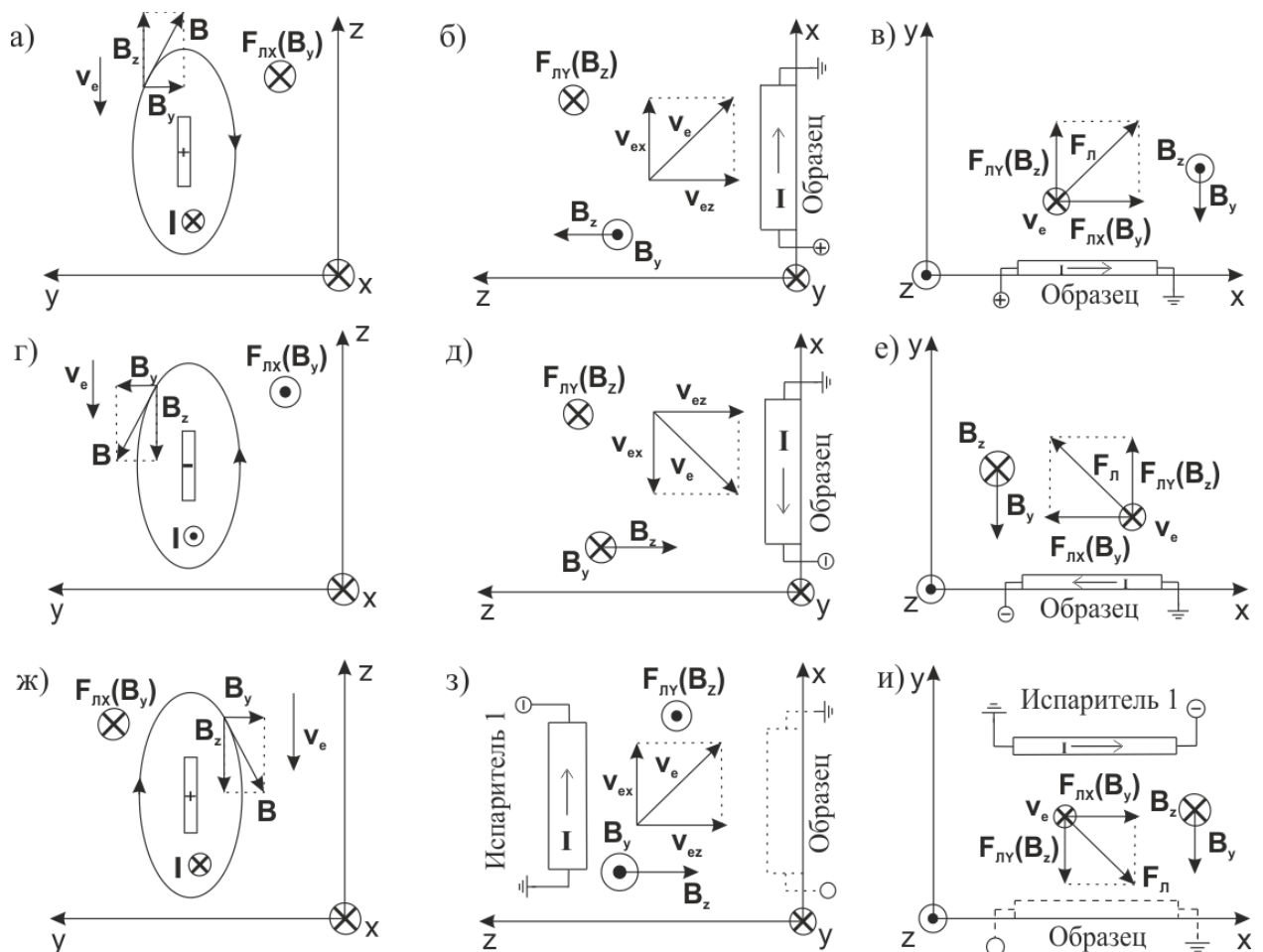


Рис.7. Теоретическая модель, поясняющая отклонение электронного пучка от начального положения: (а), (б), (в) – для образца +DC; (г), (д), (е) – для образца –DC; (ж), (з), (и) – испарителя 1 в колонне СВВ ОЭМ

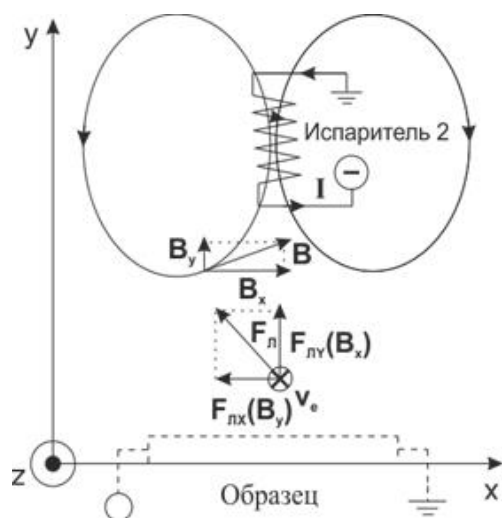


Рис.9. Теоретическая модель, поясняющая отклонение электронного пучка от начального положения для испарителя 2 в колонне СВВ ОЭМ

Конфигурация магнитного поля испарителя 2 рассматривается как распределение силовых линий магнитного поля катушки, состоящей из N витков. Пучок электронов проходит через нижнюю половину поля (см. Рис.9.). Так как изначально электроны имеют только z -компоненту скорости, при попадании пучка в зону влияния паразитного магнитного поля на него начнут действовать одновременно x и y компоненты этого поля.

Сила Лоренца от каждой компоненты будет приводить к смещению электронного пучка в плоскости XY . Направление отклонения электронного пучка магнитным полем испарителя 2 зависит от его положения относительно оси соленоида. Этот факт можно установить из Рис.9: условно силовые линии нижней части магнитного поля испарителя 2 можно разделить на 4 области, в каждой из которых компоненты магнитного поля будут отличаться направлениями. При условии, что данная модель верна, можно сделать заключение, что электронный пучок пролетал в области, изображенной на Рис.9.

6.2. Компенсация смещения электронного пучка

Изменяя геометрию расположения спирали в ее держателе, можно скомпенсировать смещение от любого источника паразитного магнитного поля. По результатам полученным в экспериментах, компенсировать смещение пучка электронов без внесения существенных изменений в конструкцию колонны СВВ ОЭМ возможно при включенном испарителе 2 и образце, когда на его контакт подается положительный потенциал, для значений тока на нем до 3 А. При этом испаритель 2 должен быть закрыт заглушкой, чтобы влияние оказывало только его магнитное поле и испаряемый материал во время эксперимента не осаждался на образце. То, что смещение от испарителя 2 и образца при

положительной полярности происходит в почти противоположных направлениях, можно увидеть из графика на Рис. 10б. По точкам на графике Рис.10б можно рассчитать коэффициент пропорциональности между смещениями, а, соответственно, и между величинами токов на образце и испарителе 2, чтобы подавить смещение от образца. Для компенсации смещения, создаваемого образцом, необходимо подавать на испаритель 2 величину тока, меньшую величины силы тока на образце, опираясь на данные Рис.10а.

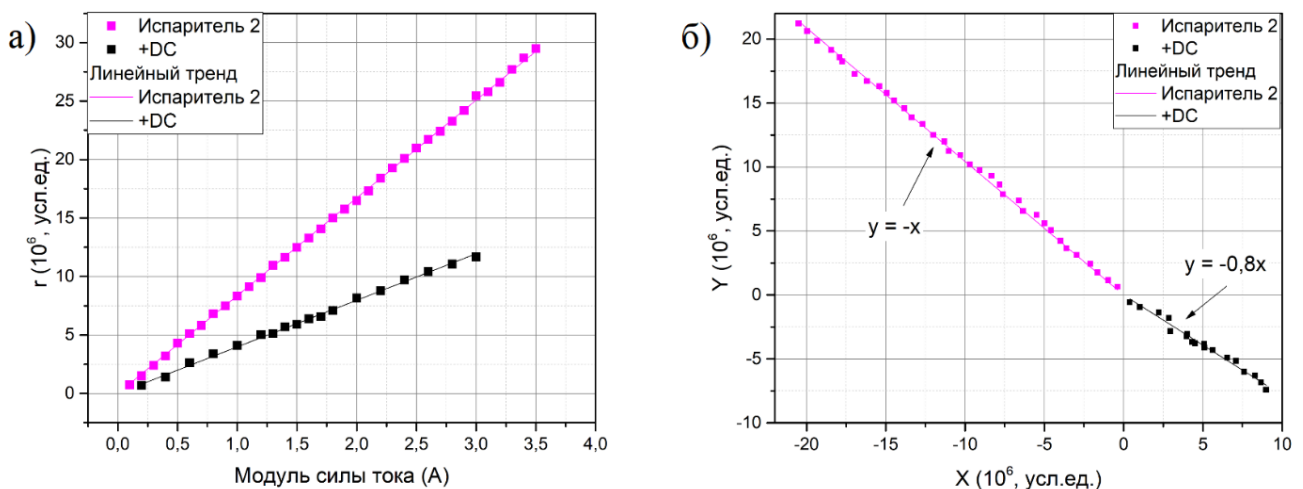


Рис.10. Отклонение электронного пучка: (а) Смещение радиус-вектора электронного пучка в зависимости от величины тока на +DC и испарителе 2; (б) Траектория электронного пучка, снятая камерой, для +DC и испарителя 2

6.3. Оценка величины магнитного поля, создаваемого полюсными наконечниками электромагнитных линз

В Таблице 2 представлены показания величины силы тока, протекающего через каждую магнитную линзу. Используя эти данные, можно оценить максимальную величину магнитного поля магнитных полюсных наконечников. Угол поворота электронного пучка магнитной линзой определяется из соотношения (6), выразив осевую скорость через ускоряющее напряжение:

$$\frac{d\alpha}{dz} = \sqrt{\frac{|e|}{8mU}} \cdot B_z, \quad (8)$$

где U – ускоряющее напряжение, m , e – масса и заряд электрона соответственно, B_z – z- компонента магнитного поля.

Сила тока, мА		
Объективная линза	Промежуточная линза	Проекторная линза
20,5	55	14

Таблица 2. Значения силы тока на магнитных линзах во время проведения экспериментов.

Заметив, что из выражения (8) следует линейная зависимость угла поворота электронного пучка от значения магнитного поля, создаваемого магнитной линзой, а также то, что магнитное поле катушки с током прямо пропорционально зависит от величины тока, придем к системе из трех линейных уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1,83 \\ \frac{\alpha_1}{\alpha_3} = \frac{I_1}{I_3} \\ \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{I_2}{I_1} \end{cases},$$

где $\alpha_1, I_1, \alpha_2, I_2, \alpha_3, I_3$ - значения угла поворота, тока и индукции магнитного поля на объективной, промежуточной и проекторной магнитных линзах соответственно. Решив систему относительно углов поворота по формуле (8), оценим магнитное поле. Длина области действия поля магнитного наконечника составляет 5 мм, в колонне микроскопа поддерживается вакуум, поэтому магнитное поле и индукция магнитного поля тождественно равны.

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0,42 \text{ рад.} \\ \alpha_2 = 1,12 \text{ рад.} \\ \alpha_3 = 0,29 \text{ рад.} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} B_1 = 0,18 \text{ Тл} \\ B_2 = 0,47 \text{ Тл} \\ B_3 = 0,12 \text{ Тл} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} H_1 = 1800 \text{ эрстед} \\ H_2 = 4700 \text{ эрстед} \\ H_3 = 1200 \text{ эрстед} \end{cases}$$

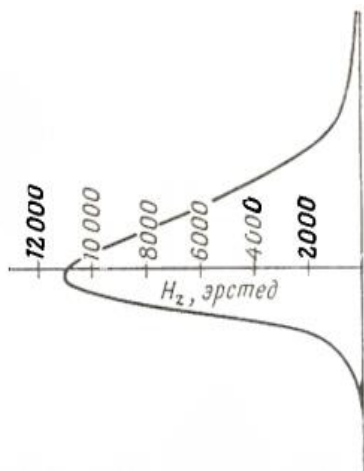


Рис.11. Осевое распределение z-компоненты магнитного поля полюсных наконечников [4]

Для того, чтобы убедиться в достоверности результатов производилось их сравнение с распределением магнитного поля вблизи полюсных наконечников для типовой магнитной линзы микроскопа, представленным на Рис.11 [5]. Из анализа графика на этом рисунке и полученных значений можно сказать, что такой способ справедлив для оценки порядка величины магнитного поля.

7. Вывод

В ходе выполнения курсовой работы были изучены физические основы движения заряженных частиц (электронов) в электромагнитных полях в колонне СВВ ОЭМ. Установлено, что смещение электронного пучка от оптической оси электронного микроскопа происходит под действием магнитного поля, создаваемого токами, протекающими через образец и испарители. Предложена модель, описывающая наблюдаемое смещение электронного пучка для каждого источника паразитного магнитного поля. Теоретическая модель, объясняющая отклонение пучка под действием поля испарителя 2, согласуется со смещением, наблюдаемым в эксперименте. Теоретическое описание смещения электронного пучка для образца и испарителя 1 позволяет верно определить только одну компоненту силы Лоренцы. Возможными причинами расхождения теории и эксперимента являются более сложная геометрия расположения образца и испарителя 1 относительно оптической оси микроскопа. Во-вторых, магнитное поле, создаваемое токами, протекающими через них, может обладать более сложной формой и быть ориентированным несимметрично относительно самого образца и оптической оси. Таким образом, теоретическая модель, требует дальнейшей доработки с учетом реальных геометрии расположения образца и конфигурации магнитного поля. Разработан метод компенсации смещения электронного пучка, возникающего при подаче положительного потенциала на контакт образца. Проведены оценки величин магнитного поля объективной, промежуточной и проекторной магнитной линз СВВ ОЭМ, которые составляют 1800 Гс, 4700 Гс и 1200 Гс, соответственно. Расчетные значения соответствуют по порядку величины значениям, характерным для типовой магнитной линзы.

8. Благодарности

Автор курсовой работы выражает искреннюю благодарность научному руководителю Петрову Алексею Сергеевичу за чуткое руководство, советы и помощь при выполнении работы, Пономареву Сергею за отзывчивость и

подбадривания, Перепелову Александру и Новикову Аркадию за то, что были рядом и сохраняли мой позитивный настрой.

Также хочется поблагодарить Содномая Амгалана за постоянную поддержку и веру в меня.

9. Список используемой литературы

1. <http://www.astronet.ru/db/msg/1176362>
2. http://aco.ifmo.ru/el_books/introduction_into_specialization/glava-6/glava-6-2.html
3. Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой: Краткий справочник физико-химических величин. Издание десятое, испр. и дополн. // СПб.: «Иван Федоров», 2003 г. С. 201.
4. Успехи физических наук. Том 154. Выпуск 2. // М.: «Наука», 1988 г. С.247
5. Хирш П., Николсон Н., Хови А.: Электронная микроскопия тонких кристаллов. // М.: Мир, 1968 г. С.11, 16.
6. Щербаков А.В., Родякина Р.В., Новокрещенов В.В., Ластовирия В.Н.: Технология обработки материалов. Оборудование электронно-лучевых комплексов: учеб. пособие для академического бакалавриата. Издание второе, испр. и дополн. // М.: Издательство Юрайт, 2019 г. С. 55-62.
7. Латышев А.В.: Атомные ступени на поверхности кремния в процессах сублимации, эпитаксии и фазовых переходов. // Н.: 1996г., С.24-38.