

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Кафедра Радиотехнической электроники

К защите допустить:
Руководитель образовательной программы

К защите допустить:
Зав. кафедрой

Смирнов В.А.
(ФИО)

Смирнов В.А.
(ФИО)

« ___ » _____ 20__ г.

« ___ » _____ 20__ г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА**
**по направлению 11.03.04 «Электроника и
наноэлектроника»**

*на тему: Разработка конструкции и технологии изготовления элементов вакуумной
наноэлектроники с использованием фокусированных ионных пучков*

**Руководитель
выпускной квалификационной работы:**

Коломийцев Алексей Сергеевич, зав. каф. НТМСТ, к.т.н., доцент кафедры НТМСТ
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень и звание)

(подпись)

«13» июня 2020 г.

Студент:

Шандыба Никита Андреевич
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень и звание)

(подпись)

«11» июня 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения

Направление подготовки 11.03.04 – «Электроника и наноэлектроника»

Кафедра Радиотехнической электроники

Группа ЭПб04-2

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу бакалавра студенту

Шандыба Никите Андреевичу

1. Тема работы:

Разработка конструкции и технологии изготовления элементов вакуумной наноэлектроники с использованием фокусированных ионных пучков

утверждена приказом по вузу № 4125-к от 24 марта 2020 г.

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 11 июня 2020 г.

3. Исходные данные к работе:

- Данные научных работ в исследуемой области;
- Личные результаты и наработки в области теоретических и экспериментальных исследований элементов вакуумной наноэлектроники;
- Результаты формирования экспериментальных образцов элементов вакуумной наноэлектроники методом фокусированных ионных пучков и измерение их ВАХ.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

- Анализ основных методов изготовления элементов и структур наноэлектроники и микросистемной техники;
- Теоретическое исследование элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники;
- Исследование режимов локального профилирования поверхности ФИП Ga⁺;
- Экспериментальное исследование формирования различных конструкций автоэмиссионных ячеек комбинацией методов локального профилирования поверхности ФИП и измерение электрических характеристик полученных структур.

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- Макет автоэмиссионной ячейки с вертикально ориентированным эмиттером.

6. Дата выдачи задания – 10.02.2020 г.

Руководитель ВКР _____ Коломийцев Алексей Сергеевич
(подпись)

Задание принял к исполнению (дата) 10.02.2020 г.

Подпись студента _____ Шандыба Никита Андреевич
(подпись)

УДК 615.471

Шандыба Никита Андреевич

гр. ЭПб04-2

«Разработка конструкции и

технологии изготовления

элементов вакуумной

нанoeлектроники с

использованием

фокусированных ионных

пучков»

Выпускная квалификационная

работа бакалавра

ИНЭП ЮФУ г. Таганрог 2020

АННОТАЦИЯ

В данной выпускной квалификационной работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку конструктивно-технологических решений создания элементов вакуумной автоэмиссионной нанoeлектроники методом фокусированных ионных пучков для создания перспективной элементной базы. Представлены результаты моделирования влияния основных геометрических и электрофизических параметров автоэмиссионной ячейки с вертикально ориентированным эмиттером на напряженность электрического поля на вершине автокатода. Также были проведены экспериментальные исследования режимов локального профилирования поверхности ФИП Ga⁺. Полученные данные позволили сформировать различные конструкции и технологии создания автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером комбинацией методов локального профилирования поверхности ФИП. Также, были представлены результаты измерения электрических характеристик полученных структур и выполнены оценки порогового напряжения начала эмиссии.

УДК 615.471

Shandyba Nikita Andreevich

gr. EPbo4-2

“Development of the design and manufacturing technology of elements of vacuum nanoelectronics using focused ion beams”

Graduation qualification work of the bachelor

INEEE SFEDU Taganrog 2020

ANNOTATION

In this final qualifying work, theoretical and experimental studies were conducted aimed at developing structural and technological solutions for creating vacuum field emission elements of nanoelectronics by the focused ion beam method to create a promising element base. The results of modeling of the influence of the basic geometric and electrophysical parameters of a field emission cell with a vertically oriented emitter on the electric field at the top of the cathode were presented. Experimental studies of the regimes of local profiling of the FIB Ga⁺ surface were also carried out. The data obtained made it possible to form various designs and technologies for creating field emission cells with a vertically oriented emitter using a combination of methods for local profiling of the FIB surface. Also, the results of measuring the electrical characteristics of the resulting structures were presented and estimates of the threshold voltage of the onset of emission were performed.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУР НАНОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ... ..	11
1.1. Направления нанoeлектроники	11
1.1.1. Вакуумная автоэмиссионная нанoeлектроника	12
1.1.2. Одноэлектроника	16
1.1.3. Квантовые точки, нити, нанопровода	21
1.2. Методы изготовления элементов и структур нанoeлектроники	23
1.2.1. Электронно-лучевая литография	23
1.2.2. Зондовая литография.....	24
1.2.3. Фокусированный ионный пучок.....	26
1.3. Применение ФИП при создании элементов нанoeлектроники	30
1.4. Выводы и постановка задач.....	35
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОЙ АВТОЭМИССИОННОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.....	36
2.1. Анализ основных электрофизических параметров, закономерностей и зависимостей элементов вакуумной нанoeлектроники.....	36
2.2. Постановка цели и задач для теоретического исследования автоэмиссионных ячеек	38
2.3. Разработка конструкции вакуумной автоэмиссионной ячейки и задание основных параметров моделирования	40
2.4. Исследование зависимости напряженности электрического поля в диэлектрике SiO ₂ от его толщины	43
2.5. Исследование напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера при различной толщине слоя SiO ₂	46
2.6. Исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от его высоты при различной толщине анодного слоя	47
2.7. Исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от радиуса закругления острия и диаметра ячейки... ..	49
2.8. Исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от угла наклона боковой поверхности автокатода и ..	51

2.9. Основные выводы по главе	53
3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛОКАЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФИП Ga+	53
3.1. Исследование закономерностей процессов локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама и углерода	54
3.1.1. Исследование точности переноса рисунка шаблона на подложку ..	54
3.1.2. Исследование влияния времени воздействия пучка в точке и степени перекрытия на локальное ионно-стимулированное осаждение вольфрама и углерода	61
3.2. Локальное электронно-стимулированное осаждение вольфрама	63
3.2.1. Исследование точности переноса рисунка шаблона на подложку ..	64
3.2.2. Исследование влияния времени воздействия пучка в точке на локальное электронно-стимулированное осаждение вольфрама	67
3.3. Локальное ионно-лучевое травление	70
3.3.1. Разработка методики контроля глубины травления и идентификации границ слоев при травлении ФИП	70
3.3.2. Исследование точности переноса рисунка шаблона на подложку ..	73
3.3.3. Исследование влияния тока ФИП и времени воздействия пучка в точке на отклонение боковой поверхности углублений от нормали при локальном ионно-лучевом травлении поверхности	78
3.4. Основные выводы по главе	81
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФИП И ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУЧЕННЫХ СТРУКТУР	82
4.1. Исследование толщин сформированных слоев и нанесение маркерных знаков	82
4.2. Формирование отдельного, вертикально ориентированного автоэмиссионного катода	84
4.3. Формирование автоэмиссионной ячейки с эмиттером, сформированным методом ионно-стимулированного осаждения	87
4.3.1. Исследование глубины залегания ионов Ga ⁺ при формировании автоэмиссионной ячейки	87
4.3.2. Формирование автокатаода в углублении	89
4.4. Формирование закрытой автоэмиссионной ячейки	92

4.5. Формирование автоэмиссионной ячейки со сложной формой анода .	94
4.6. Формирование автоэмиссионных ячеек на основе тонких пленок металлов.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	102
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	107

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ФИП – фокусированный ионный пучок

АЭМП – автоэлектронные микроприборы

АЭК – автоэмиссионные катоды

ЭЛЛ – электронно-лучевая литография

СЗМ – сканирующая зондовая микроскопия

АСМ – атомно-силовая микроскопия

ЖМИИ – жидкометаллический источник ионов

АЭЭ – автоэлектронная эмиссия

ГИС – газово-инжекционная система

ХАГ – химически-активные газы

РЭМ – растровый электронный микроскоп

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня развитие нанотехнологий является приоритетом научно-технологического развития многих государств, что находит отражение в различных областях техники. При этом одной из наиболее перспективных сфер применения приборов и структур, изготавливаемых методами нанотехнологий, является электроника, что обусловлено общемировой тенденцией к уменьшению размеров и критической необходимостью к увеличению степени интеграции и быстродействия микросхем [1].

Нанoeлектроника - область электроники, в которой ключевую роль играют процессы создания, исследования и применения электронных приборов с нанометровыми размерами элементов, в основе функционирования которых зачастую лежат принципы неклассической физики. Типичные размеры элементов нанoeлектроники — от единиц до сотен нанометров [2-3].

Развитие электроники во многом определяется технологическими процессами формирования элементной базы, которые в настоящее время обеспечивают создание функциональных электронных компонентов с размерами десятки нанометров. Одним из перспективных направлений развития электроники является автоэмиссионная нанoeлектроника, которая позволяет создавать наноразмерные приборы, обладающие высоким быстродействием, помехозащищенностью и низким энергопотреблением. Приборы автоэмиссионной нанoeлектроники могут применяться при создании сенсоров газов, систем высокоскоростной передачи информации, эмиссионных дисплеев и др. Применение традиционных технологических процессов не позволяет добиться максимальной эффективности, высокой точности, воспроизводимости и разрешающей способности при создании элементов вакуумной эмиссионной электроники, тогда как применение методов нанотехнологии дает возможность достичь требуемых размеров

структур и использовать преимущества возникающих в низкоразмерных системах физических эффектов.

В данной работе будет представлено решение вышеперечисленных проблем при формировании автоэмиссионной наноэлектроники с применением комбинации методов локального профилирования поверхности фокусированным ионным пучком. Метод ФИП позволяет в условиях высокого вакуума производить технологические операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы без необходимости применения резистов, масок и химических травителей.

Целью данной работы является проведение прикладной проблемно-ориентированной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, по исследованию и разработке конструктивно-технологических решений создания элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники методом фокусированных ионных пучков для создания перспективной элементной базы.

В работе, на основании полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований режимов формирования элементов автоэмиссионной наноэлектроники методом фокусированных ионных пучков и результатов моделирования подобных структур, будет представлено научное обоснование предположений по применению новых материалов, конструкций и технологий при создании перспективной элементной базы наноэлектроники. Практическая значимость результатов исследованной тематики заключается в разработке конструктивных и технологических решений формирования элементов автоэмиссионной наноэлектроники на основе наноразмерных структур углерода и вольфрама, которые часто используются в данной отрасли, из-за наиболее выгодных электрофизических свойств указанных материалов, для формирования автоэлектронных устройств. Также будут представлены методики исследования электрических параметров сформированных структур.

1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУР НАНОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Направления нанoeлектроники

На сегодняшний день существуют следующие основные направления развития нанoeлектроники:

- SET-электроника, где переключательные элементы (вентили) строятся на основе одноэлектронных транзисторов;
- нанoeлектроника, где вентили реализуются на основе атомарных и молекулярных кластеров;
- квантовые компьютеры, где булевы и/или более сложные операторы реализуются на основе квантовых взаимодействий в твердом теле;
- супрамолекулярная электроника, где булевы и/или более сложные операторы реализуются на основе (био)молекулярных взаимодействий [4];
- вакуумная автоэмиссионная нанoeлектроника;
- устройства наномеханики, в том числе актюаторы и трансдукторы, молекулярные моторы и наномоторы, нанороботы, интегрированные микроэлектромеханические устройства;
- создание низкоразмерных (с толщиной отд. слоёв менее 100 нм) гетероструктур с двумерным (2D) электронным газом, сверхрешёток, одномерных (1D) квантовых проводов, нульмерных (0D) квантовых точек.

Наиболее перспективными из них являются: вакуумная автоэмиссионная нанoeлектроника, одноэлектроника, а также направление по созданию наноприборов на основе квантовых точек, нитей и нанопроводов.

1.1.1. Вакуумная автоэмиссионная наноэлектроника

Несмотря на существенные достижения в полупроводниковой микро- и наноэлектронике, в последние годы интенсивно развивается новое направление электроники, возникшее на стыке микроэлектроники и вакуумной техники — вакуумная микро- и наноэлектроника [5-7]. В недрах полупроводниковой и тонкопленочной микроэлектроники зародились и оформились технологические идеи создания миниатюрных автоэмиссионных устройств с микронными, субмикронными и даже нанометровыми размерами элементов. Появилась реальная возможность создать сверхминиатюрные аналоги электровакуумных приборов, перенести богатый задел плодотворных технологических идей традиционной микроэлектроники на вакуумную микроэлектронику, выделение которой в самостоятельную область науки и техники принято считать с момента проведения в 1988 году в США 1-ой международной конференции по вакуумной микроэлектронике. Одним из главных принципиальных преимуществ автоэлектронных микроприборов (АЭМП) перед полупроводниковыми приборами является их высокая стойкость к воздействию температуры и радиации. Эта устойчивость обусловлена самой природой автоэлектронной эмиссии, лежащей в основе работы данных приборов. Кроме того, вакуумная микро- и наноэлектроника «грозит» стать самой быстродействующей электроникой, поскольку скорость электронов в вакууме в пределе сопоставима со скоростью света $3 \cdot 10^8$ м/с, в то время как предельная скорость носителей заряда в самых быстродействующих полупроводниках типа $A^{III} B^V$ составляет порядка $(2 - 3) \cdot 10^5$ м/с. При этом с физической точки зрения наиболее удобной средой, в которой контролируется поток электронов, все еще остается вакуум [8].

Основой вакуумной микроэлектроники являются, так же, как и в вакуумных электроламповых устройствах, физические процессы движения электронов в вакууме, а технологическое исполнение элементов базируется преимущественно на технологии полупроводниковой и тонкопленочной

микроэлектроники. Развитие этого класса вакуумных микроэлектронных приборов зависит от свойств применяемого миниатюрного холодного источника интенсивных электронов (автоэмиссионного катода) [9-11].

Автоэмиссионные катоды (АЭК) обладают совокупностью свойств, делающих их исключительно перспективными. Это единственный тип катодов, для которого не требуется предварительного возбуждения эмиссии. Автоэлектронная эмиссия из металлических и полупроводниковых веществ обеспечивается сильным $\sim 10^7$ В/см внешним электрическим полем, которое снижает и, что особенно важно, сужает потенциальный барьер вблизи поверхности катода [12-13].

Наиболее характерными достоинствами автоэмиссионных катодов являются [14-17]:

1. Высокая экономичность, обусловленная отсутствием накала.
2. Устойчивость эмиссии к колебаниям температуры в широком ее диапазоне: от гелиевой до температуры красного каления.
3. Высокая плотность тока эмиссии, достигающая 10^9 А/см².
4. Устойчивость эмиссии к радиационному облучению вплоть до уровня, вызывающего разрушение материала автокатаода.
5. Высокая крутизна вольт-амперной характеристики, обусловленная экспоненциальной зависимостью тока от напряжения.
6. Безынерционность отклика тока на изменение внешнего напряжения.

Совокупность этих свойств делает автоэмиссионные катоды чрезвычайно привлекательными источниками свободных электронов и стимулирует разработки приборов и устройств электронной техники на их основе.

Первые работы в этом направлении были выполнены в 1961 — 1968 гг. Кеннетом Шоулдерсом и Чарльзом Спиндтом [18-20], сотрудниками лаборатории прикладной физики Стенфордского исследовательского института США (Менло Парк, Калифорния). Сущность усовершенствованной ими в дальнейшем технологии заключается в следующем (Рисунок. 1.1).

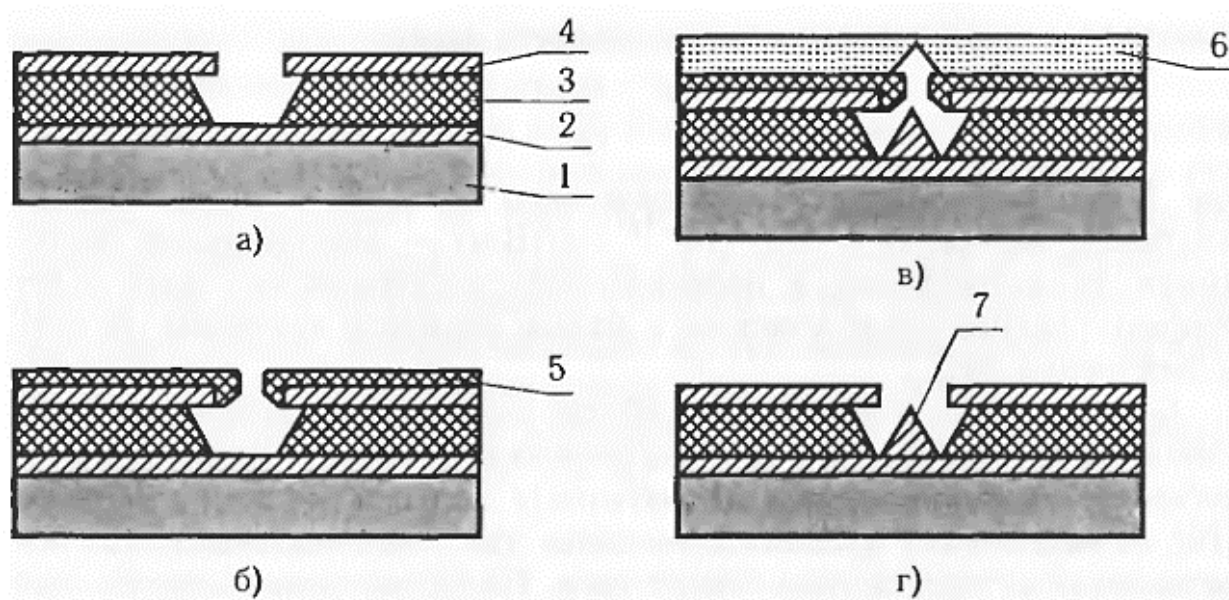


Рисунок 1.1 – Схема технологического процесса изготовления тонкопленочного матричного автоэмиссионного катода на диэлектрической подложке. 1 — подложка; 2 — проводниковый слой молибдена (катодный слой); 3 — диэлектрический слой окиси алюминия, 4 — проводниковый слой молибдена (сетка); 5 — осаждаемый слой окиси алюминия; 6 — герметизирующее покрытие; 7 — молибденовый острый эмиттер [22]

На сапфировую подложку — 1 наносят слой молибдена — 2 толщиной 0,25 мкм. На проводниковый слой молибдена — 2 наносят диэлектрический слой из окиси алюминия — 3 толщиной 1 мкм, и затем проводниковый слой молибдена — 4 толщиной 0,25 мкм. В результате чего на подложке — 1 формируется трехслойная тонкопленочная «сэндвич» структура Mo-Al₂O₃-Mo. После чего методами электроннолучевой литографии и травления в сформированной тонкопленочной «сэндвич» структуре формируют цилиндрические микрополости диаметром порядка 1,5 мкм. Для этого участки верхнего слоя молибдена (4) протравливаются в растворе на основе серной и азотной кислот, а слой оксида алюминия (3) — в ортофосфорной кислоте при температуре 95°С. Далее удаляют фоторезист и подложку со сформированной структурой (Рисунок 1.1, а), последовательно нагревают в вакууме до температуры 1000° С, в результате этого оставшийся слой окиси алюминия (3)

оказывается устойчивым по отношению к последующему травлению в ортофосфорной кислоте при температуре 95°C. Затем по касательной к поверхности вращающейся вокруг своей оси подложки осаждают окись алюминия (5), в результате чего вокруг обода каждой цилиндрической микрополости образуется нависающий выступ (губа) (Рисунок 1.1, б). Когда получают желаемый диаметр затягивающейся микрополости, то начинают осаждение молибдена по нормали относительно вращающейся подложки (Рисунок 1.1, в), при этом одновременно продолжают напыление окиси алюминия по касательной к вращающейся подложке до тех пор, пока отверстия не будут закрыты полностью. В результате вышеописанных процессов молибден, осаждаемый на основание полости, принимает форму конуса — 7. После этого путем химического травления в ортофосфорной кислоте при температуре 95°C удаляют герметизирующее покрытие 6, а оставшуюся структуру (Рисунок 1.1, г) подвергают термообработке в вакууме при температуре около 1000°C с целью ее обезгаживания и очистки.

Электрические испытания изготовленных таким образом тонкопленочных матричных автоэлектронных катодов проводились в традиционной геттерно-ионной вакуумной камере при давлении около $1,33 \cdot 10^{-7}$ Па после мягкого отжига при температуре около 200°C. В большинстве испытаний трехслойная структура возбуждалась переменным током частотой 60 Гц, а положительное смещение прикладывалось к внешнему коллектору, как показано на рисунке 1.2. В этих структурах максимальный ток возбужденного коллектора составлял около 1,5 мкА при максимальном напряжении в трехслойной структуре 60 В и соответственно: 6 мкА при 100 В и 100 мкА при 200 В [21].

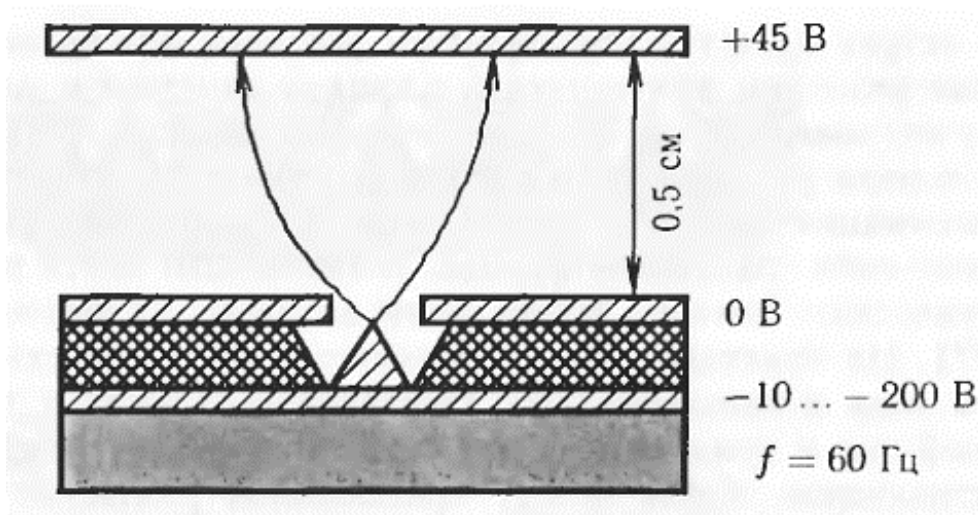


Рисунок 1.2 - Схематическое изображение структуры и схемы электрических испытаний тонкопленочного матричного автоэмиссионного катода [22]

Таким образом, первые испытания матричных автоэмиссионных катодов показали высокую вероятность получения плотностей тока в десятки ампер на см^2 при умеренных значениях приложенного напряжения.

1.1.2. Одноэлектроника

Одно из самых перспективных направлений увеличения степени интеграции микросхем основано на развитии приборов, в которых контролируется перемещение буквально одного электрона. В таких устройствах, называемых одноэлектронными транзисторами, бит информации представлен одним электроном. В подобных транзисторах время перемещения электрона определяется процессом туннелирования и может быть очень малым.

Теория одноэлектронного туннелирования была предложена К. К. Лихаревым в 1986 году [23]. Через несколько лет после первой статьи Лихарева начало появляться множество работ, в которых описывалось экспериментальное наблюдение эффектов, предсказанных Лихаревым; теория блестяще подтвердилась экспериментом [24]. В элементарном виде основные

положения этой теории могут быть представлены следующим образом. Пусть имеется туннельный переход образованный двумя близко расположенными металлическими электродами и изолирующим слоем между ними.

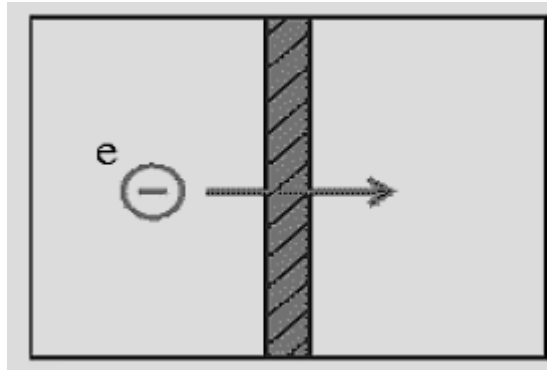


Рисунок 1.3 - Система электродов с разделяющим их тонким изолирующим слоем [25]

Обозначим емкость такой системы через C , тогда выражение для энергии данной системы может быть записано в виде

$$E = Q^2/2C \quad (1.1)$$

где Q – заряд на обкладках конденсатора.

Так как заряд кратен заряду электрона, то минимальная величина изменения энергии составит

$$\Delta E = e^2/2C. \quad (1.2)$$

Для проявления эффектов, связанных с дискретной природой зарядов, необходимо, чтобы минимальное изменение энергии было больше температурных флуктуаций, т. е. $\Delta E \gg kT$, где k – постоянная Больцмана, а T – температура. Необходимо также, чтобы это изменение превышало энергию квантовых флуктуаций, величина которых может быть оценена из соотношения неопределенности Гейзенберга, которое для рассматриваемой системы запишем в виде

$$E\tau \gg h \quad (1.3)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи, $R = \max(R_i; R_s)$ – сопротивление перехода.

Из условия (1.3) следует ограничение $E \gg h/RC$, которое, учитывая (1.2), можно записать в следующем виде

$$R \gg R_Q \quad (1.4)$$

где $R_Q = h/4e^2 = 6,45$ кОм – так называемый квант сопротивления.

Важным предположением теории одноэлектронного туннелирования является заключение, что начальный заряд Q_0 на туннельном переходе может быть отличен от 0, и, более того, может принимать значения не кратные целому числу электронов. Это объясняется тем, что заряд может создаваться поляризацией близлежащих электронов, заряженных примесей и т. д., и таким образом иметь любое значение. Представим выражение для заряда Q системы в виде

$$Q = Q_0 \pm ne. \quad (1.5)$$

Можно показать, что если Q_0 имеет значение в пределах от $-e/2$ до $e/2$, то добавление или вычитание целого числа электронов будет увеличивать общую энергию системы, т.е. является энергетически невыгодным (Рисунок 1.4).

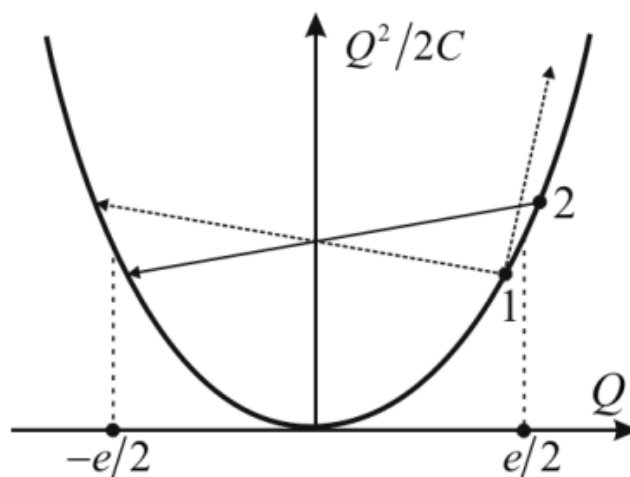


Рисунок 1.4 - Зависимость зарядовой энергии перехода от заряда.

Стрелками показаны добавления или вычитания одного электрона для случаев кулоновской блокады (1) и туннелирования (2) [26]

Кулоновская блокада – блокирование прохождения электронов через квантовую точку, включенную между двумя туннельными контактами, обусловленное отталкиванием электронов в контактах от электрона на точке, а также дополнительным кулоновским потенциальным барьером, который создает электрон, находящийся на точке [27].

Создание так называемых одноэлектронных приборов открывает заманчивые перспективы цифровой одноэлектроники, в которой бит информации будет представлен одним электроном. В таких приборах перемещение электрона происходит посредством туннелирования. Так как времена туннелирования электрона достаточно малы, то теоретический предел быстродействия одноэлектронных приборов очень высок. С другой стороны, работа, необходимая для перемещения одного электрона, также мала, следовательно, энергопотребление одноэлектронных схем должно быть чрезвычайно небольшим. Так, по оценкам К. К. Лихарева теоретический предел быстродействия одноэлектронного прибора составляет сотни ТГц, а энергопотребление одного прибора – 3×10^{-8} Вт.

В силу особенностей одноэлектронных систем и процессов первые эксперименты проводились при очень низких температурах – несколько милликельвинов. В настоящее время одноэлектронные эффекты наблюдаются и при комнатной температуре. Это осуществлено при использовании сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Тем не менее, одноэлектронных приборов, устойчиво работающих при комнатной температуре, до сих пор не создано. Устойчиво функционирующие приборы с воспроизводимыми характеристиками существуют лишь при температуре 4,2 К.

Однако одноэлектронные эффекты при комнатной температуре давно наблюдаются и исследуются. Проблема заключается в создании работоспособных приборов. Идея одноэлектронного транзистора на эффекте кулоновской блокады была предложена в 1986 году К. К. Лихаревым и Д. В. Авериним [28]. Также, как и полевой транзистор, одноэлектронный транзистор имеет три электрода, называемые истоком, стоком и затвором (Рисунок 1.5).

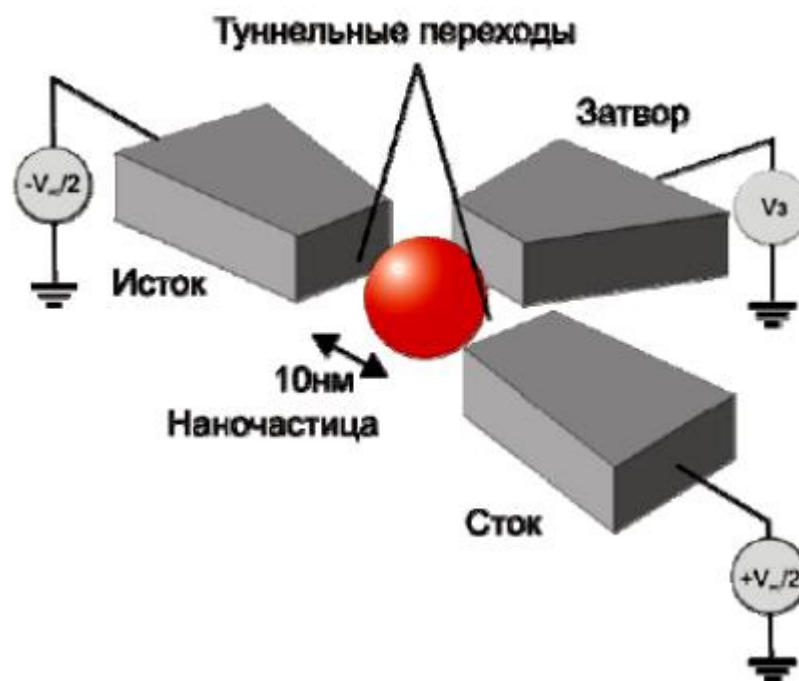


Рисунок 1.5 - Одноэлектронный транзистор (схематично) [25]

Между электродами располагается дополнительный металлический или полупроводниковый «наноостровок» – наночастица или кластер нанометровых размеров, изолированный от электродов диэлектрическими прослойками, через которые и может при определенных условиях происходить движение электрона. Если приложить напряжение между истоком и стоком транзистора, то ток протекать не будет, поскольку электроны в данный момент заблокированы на наночастице. Для появления тока необходимо увеличить потенциал на управляющем электроде – затворе. Только когда потенциал на затворе станет больше некоторого порогового значения, блокада прорывается, электрон получает способность пройти через барьер, и в цепи исток-сток начинает протекать ток. При этом электрический ток в цепи протекает порциями, что соответствует движениям единичных электронов. Таким образом, управляя потенциалом на затворе, можно пропускать через барьеры одиночные электроны. Количество электронов в наночастице должно быть не более 10 (а желательно и меньше). Это может быть достигнуто в квантовых структурах с размером порядка 10 нм.

1.1.3. Квантовые точки, нити, нанопровода

Коллоидные квантовые точки – полупроводниковые нанокристаллы с размером в диапазоне 2-10 нанометров, состоящие из $10^3 - 10^5$ атомов, созданные на основе неорганических полупроводниковых материалов Si, InP, CdSe и т. д. Коллоидные квантовые точки объединяют физические и химические свойства молекул с оптоэлектронными свойствами полупроводников.

Квантово-размерные эффекты играют ключевую роль в оптоэлектронных свойствах квантовых точек [29]. Энергетический спектр квантовой точки принципиально отличается от объемного полупроводника. Электрон в нанокристалле ведет себя как в трехмерной потенциальной “яме”. Имеется несколько стационарных уровней энергии для электрона и дырки с характерным расстоянием между ними $\hbar^2/(2md^2)$, где d – размер нанокристалла (квантовой точки). Таким образом, энергетический спектр квантовой точки зависит от ее размера. Аналогично переходу между уровнями энергии в атоме, при переходе носителей заряда между энергетическими уровнями в квантовой точке может излучаться или поглощаться фотон. Частотами переходов, т. е. длиной волны поглощения или люминесценции, легко управлять, меняя размеры квантовой точки. Поэтому квантовые точки иногда называют «искусственными атомами». В терминах полупроводниковых материалов это можно назвать возможностью контроля эффективной ширины запрещенной зоны [30].

В полупроводниковых структурах, где движение электронов по одной из координат ограничено, начинают проявляться эффекты квантования вдоль этой координаты. В результате свободное движение электронов из трехмерного становится двумерным, что кардинально меняет большинство электронных свойств и является причиной новых интересных эффектов, в том числе квантового эффекта Холла.

Вполне естественно сделать еще один шаг на этом пути и создать (или по крайней мере попытаться это сделать) одномерные электронные системы, часто называемые квантовыми нитями. Для этого необходимо иметь нечто действительно напоминающее тонкую нить, где движение электронов резко ограничено в двух направлениях из трех и лишь вдоль оси нити (будем называть ее осью x) остается свободным. При этом за счет малых поперечных размеров нити движение в плоскости yz квантуется, и его энергия может принимать лишь некоторые дискретные значения E_i , $i = 1, 2, \dots$, так что полный закон дисперсии имеет вид

$$E = E_i + \frac{p_x^2}{2m} \quad (1.6)$$

где m – эффективная масса электронов. Видно, что каждому дискретному уровню E_i соответствует целый набор возможных состояний, отличающихся импульсом p_x . При этом обычно говорят не об уровне, а о подзоне размерного квантования с номером i . Как уже говорилось, переход от трех - к двумерным электронным системам раскрыл перед исследователями целую новую область с большим количеством принципиально новых физических явлений. Можно надеяться, что тоже самое произойдет и при новом шаге в область одномерных систем [31].

Нанопровода представляют собой широкий класс одномерных наноструктур, перспективных для самых разных нанотехнологических применений, главным образом, для будущей наноэлектроники. Их характеристики легко контролируемы уже на этапе создания. Именно управляемость параметров и хорошая временная стабильность являются их главными преимуществами. Указанные преимущества дают возможность рационально осуществлять различные стратегии интеграции элементов. В частности, уже были изготовлены наноразмерные полевые транзисторы, а также реальные приборы на их основе – сверхчувствительные газовые и биологические сенсоры. Их высокая чувствительность обусловлена огромным отношением поверхности нанопровода к объему по сравнению с планарными

структурами. Связывание химической или биологической молекулы на поверхности нанопровода приводит к изменению концентрации носителей во всем сечении нанопровода, тогда как в планарной структуре это изменение происходит только в приповерхностном слое. Одним из перспективных материалов для создания и исследования свойств нанопроводов является висмут. На его основе возможно создание сенсоров и различных термоэлектрических устройств. Висмут отличается от других металлов самой низкой теплопроводностью, малой эффективной массой и большой длиной свободного пробега носителей, что в области наноразмеров предвещает скорое проявление квантовых эффектов. Висмутовые нанопровода изготавливают традиционными методами электроники с использованием электронной литографии. Проблема состоит в том, что из-за низкой точки плавления висмута и его химической нестабильности тонкие висмутовые провода получаются очень хрупкими. К тому же они чрезвычайно чувствительны к статическим электрическим зарядам и окислению, что приводит к очень низкому выходу годных проводов. Разработка эффективного метода создания висмутовых нанопроводов в рамках имеющихся МОП и КМОП технологий позволит практически реализовать все их достоинства [32].

1.2. Методы изготовления элементов и структур наноэлектроники

1.2.1. Электронно-лучевая литография

Одной из разновидностей литографических процессов является электронно-лучевая литография, основанная на экспонировании полимерного слоя резиста остросфокусированным электронным лучом. Таким способом можно создать приборы с очень сложной топологией, включающей элементы субмикронного размера. Столь высокая разрешающая способность обеспечивает явные преимущества электронной литографии по сравнению с обычной фотолитографией. Объясняется это тем, что диаметр электронного

луча можно сделать много меньше дифракционного предела, ограничивающего размеры фотолитографического изображения [33].

Принцип метода заключается в следующем: электронный пучок, остросфокусированный с помощью магнитных линз на поверхность слоя полимера (резиста), чувствительного к электронному облучению, прорисовывает на нем изображение, которое обнаруживается после обработки резиста в проявителе. Обработка электронным пучком резиста меняет степень растворимости полимера в растворителе (проявителе). Участки поверхности, с записанным на них изображением, очищаются от резиста с помощью проявителя. Через полученные окна в плёнке резиста производится вакуумное напыление подходящего материала, например, нитрида титана или металлов, а также может быть выполнено ионное травление. На последнем этапе технологического процесса неэкспонированный излучением резист также смывают другим растворителем. Перемещение электронного пучка по поверхности осуществляется с помощью компьютера изменением токов в отклоняющих магнитных системах. В некоторых установках при этом меняется форма и размеры пятна электронного пучка. На выходе многоступенчатого технологического процесса получается фотошаблон-маска для использования в фотолитографии и других нанотехнологических процессах, например, в технологии реактивного ионного травления.

ЭЛЛ позволяет на нынешнем уровне развития технологии в рекордных экспериментальных установках получать структуры с разрешением менее 1 нм, что недостижимо для жесткого ультрафиолетового излучения. Это возможно благодаря более короткой де-Бройлевской длине волны электронов по сравнению со светом [34].

1.2.2. Зондовая литография

В соответствии с видами локального взаимодействия СЗМ зонда с поверхностью выделяют следующие виды зондовой литографии:

- СТМ литография;
- АСМ анодно-окислительная литография;
- АСМ силовая литография;
- другие специфические виды (электростатическая зарядовая литография, литография с помощью зонда ближнепольного оптического микроскопа и др.).

Существует множество разновидностей СТМ литографии. Наиболее простой способ модификации поверхности с помощью СТМ заключается в непосредственном контактном воздействии СТМ зонда на поверхность. Это приводит к появлению ямки на поверхности образца, но при этом может повреждаться и сам зонд. Более щадящий способ воздействия на поверхность заключается в подаче на образец импульса тока высокой плотности или электрического поля высокой напряженности. Поверхность образца под зондом при этом может расплавляться и даже частично испаряться. СТМ зонд может перемещать частицы материала по поверхности образца, либо удалять их оттуда, манипулировать большими молекулами и даже отдельными атомами.

В анодно-окислительной литографии изменяется не только рельеф образца, но и локальные электрофизические свойства его поверхности. Например, при подаче напряжения на проводящий АСМ зонд, на поверхности образца может начаться электрохимический процесс, и металлический слой под зондом начнет окисляться. Этот метод используется на воздухе, когда зонд и поверхность материала покрыты тонким слоем абсорбированной воды. Когда зонд приближается достаточно близко к поверхности образца, эти абсорбированные слои соприкасаются и, вследствие капиллярного эффекта, между острием и образцом возникает водяная перемычка. Таким образом, при подаче напряжения возникает электрохимическая реакция между зондом и поверхностью образца в водной среде. Если поверхность имеет положительный заряд, а острие – отрицательный, то они будут

электрохимически взаимодействовать, соответственно, как анод и катод, и непосредственно под острием начнет расти оксидный слой.

СЗМ позволяет осуществлять непосредственное силовое воздействие зонда на поверхность образца (АСМ силовая литография). Это может производиться двумя способами – статическим воздействием (наногравировка) и динамическим воздействием (наночеканка).

Процесс гравировки хорошо известен как средство формирования рисунка на поверхности предмета. Реализация такого процесса с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии позволяет осуществлять наногравировку с нанометровым разрешением. При осуществлении наногравировки с использованием методики обычной контактной силовой микроскопии зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (или на расположенном на ней слое резиста) формируется рисунок в виде углублений (царапин). Такая методика использует принцип вспашки: материал извлекается из подложки вполне определенным образом, оставляя канавки с характерным сечением, определяемым формой кончика зонда.

С использованием динамической силовой литографии (наночеканки) модификация поверхности происходит за счет формирования углублений на поверхности образца колеблющимся зондом. Такой метод нанолитографии свободен от торсионных искажений и позволяет производить визуализацию сформированного рисунка без серьезного воздействия на поверхность подложки или резиста. Кратковременное «укалывание» поверхности также защищает зонд от быстрого разрушения.

1.2.3. Фокусированный ионный пучок

Система ФИП — это эффективное сочетание сканирующего ионного микроскопа и инструмента для прецизионной обработки материала. ФИП был разработан в результате исследований Крона в 1961 году, посвященным

жидкометаллическим источникам ионов (ЖМИИ) для использования в космосе. Разрабатывая двигатель, использующий заряженные металлические капли, он впервые опубликовал данные об эмиссии ионов из жидкометаллического источника. ЖМИИ стали применяться для полупроводников и в материаловедении. Промышленное внедрение ФИП произошло в 1980-х годах, преимущественно для растущей полупроводниковой промышленности.

Современные системы ФИП для генерации ионов, обычно Ga^+ , используют ЖМИИ в верхней части колонны. Здесь ионы эмитируются, затем фокусируются в пучок электрическим полем и последовательно проходят через апертуры, затем сканируют поверхность образца (Рисунок 1.6).

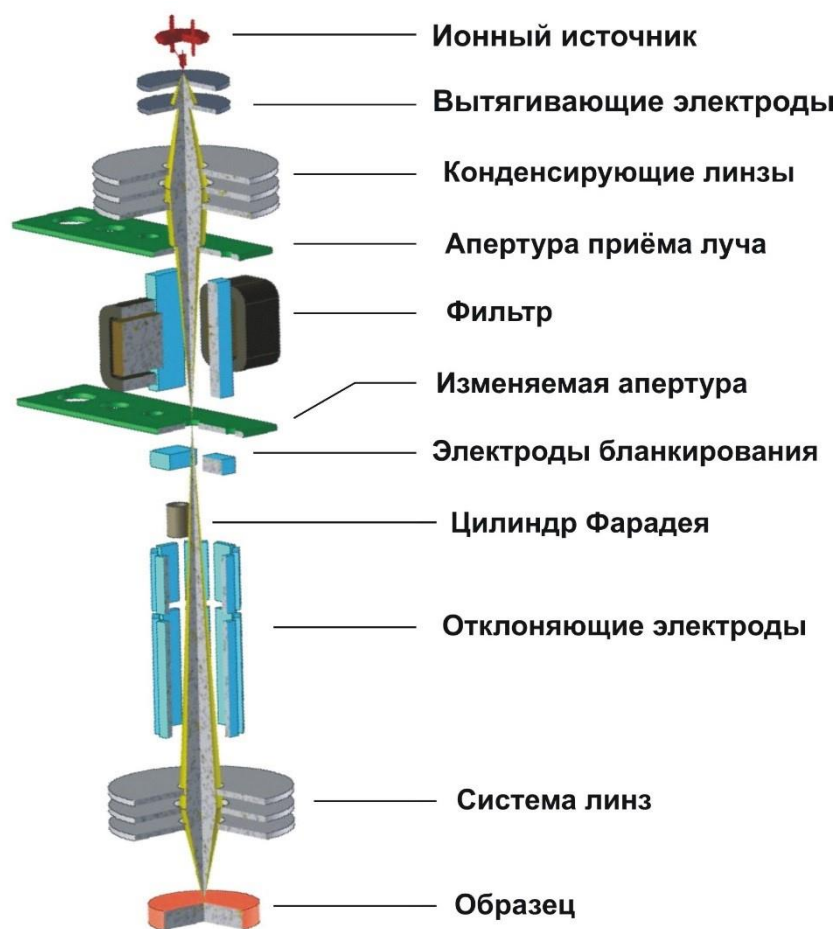


Рисунок 1.6 – Схема установки ФИП

В зависимости от силы столкновения ионов с атомами поверхности разделяют упругий или неупругий характер взаимодействия. Упругие столкновения приводят к отрыву поверхностных атомов - так называемое

«распыление» - и являются основной причиной модификации поверхности материала (Рисунок 1.7).

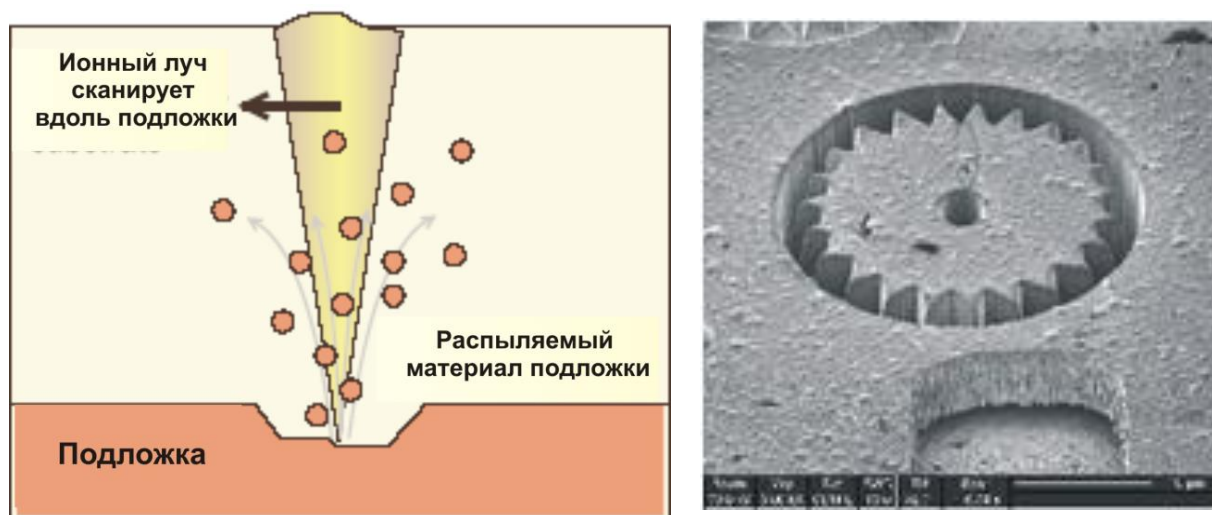


Рисунок 1.7 – Схема процесса распыления при воздействии ФИП

Неупругие столкновения случаются, когда ионы передают часть своей энергии поверхностным атомам или электронам. В результате появляются вторичные электроны (электроны, которые были возбуждены и смогли уйти со своей оболочки) наряду с рентгеновскими лучами (энергия высвобождается, когда электрон возвращается на более низкую орбиту). Вторичные ионы также генерируются в процессе столкновений, по-видимому, после эмиссии вторичных электронов.

Полезная информация может быть получена от всех видов эмиссии, в зависимости от оснащённости установки. Сигналы от испущенных ионов после детектирования могут быть усилены и отображены, и в результате мы получим детальное изображение структуры поверхности образца.

Помимо возможности визуализации, ФИП может быть использован в качестве инструмента по осаждению материалов посредством впрыска металлоорганического газа на пути распространения ионного пучка непосредственно вблизи поверхности образца (Рисунок 1.8). Эта методика применяется для восстановления некоторых материалов и формирования наноразмерных структур.

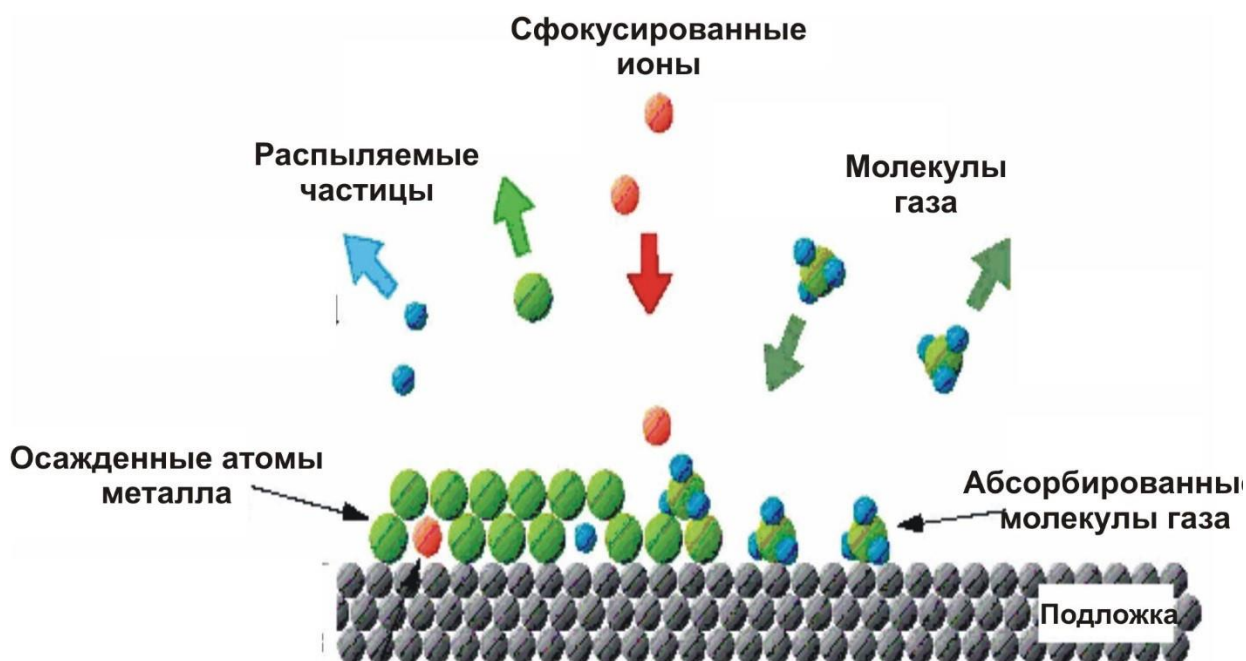


Рисунок 1.8 – Схема процесса локального ионно-стимулированного осаждение ФИП из газовой фазы

Физической основой работы ФИП является то, что ионы значительно тяжелее электронов. Столкновения крупных первичных ионов с атомами поверхности вызывают ее модифицирование, зависящее от дозы, перекрытия, времени воздействия в точке и многих других переменных, которое не может быть достигнуто с помощью электронов.

Установка ФИП предоставляет уникальную возможность выбрать определенный участок образца, так чтобы модифицировать только его, не затрагивая весь остальной образец. Эта особенность имеет широкую область применений, от простых техник (формирование отверстий для анализа) до более сложных (прецизионное вырезание трехмерного поперечного сечения образца и нанолитография) [35].

По сравнению с другими методами наноразмерного профилирования поверхности твердых тел метод ФИП обладает рядом достоинств, среди которых: высокая разрешающая способность, высокая скорость формирования топологического рисунка без необходимости использования резистов и масок, возможность обработки широкой номенклатуры материалов и структур, локальность и избирательность процесса травления. Указанные

достоинства достигаются возможностью изменения технологических параметров процесса в широких пределах [36].

Основными же недостатками ФИП являются низкая производительность процесса (невозможность одновременной обработки больших площадей), накопление электростатического заряда на поверхности высокоомных и диэлектрических образцов, эффекты, связанные с переосаждением профилируемого материала в субмикронных углублениях, а также неравномерное травление или осаждение проводящих материалов, возникающее из-за специфической формы ионного луча, что может быть уменьшено за счет применения дополнительных связующих газов и лучшей юстировки ионного луча.

Таким образом, применяя совместно операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения проводящих материалов фокусированным ионным пучком Ga^+ из газовой фазы, можно создавать различные наноразмерные структуры, что и используется в литографии ФИП.

1.3. Применение ФИП при создании элементов нанoeлектроники

Внедрение в современную технологию гибких селективных методов микро- и наноразмерной обработки материалов и их многослойных топологически упорядоченных композиций открывает новые уникальные возможности. Существенным достоинством современной ионно-лучевой технологии является возможность реализации не только «жестких» операций ионно-лучевого микрофрезерования, но и селективных процессов сверхлокального избирательного травления или осаждения материалов по заданному геометрическому шаблону с возможностью одновременного наблюдения зоны обработки с нанометровым пространственным разрешением. Разрешающая способность технологических операций находится на уровне 100 нм и менее.

Принцип метода ФИП основан на локальной модификации поверхности твердого тела ускоренными до 30 кВ сфокусированными ионами Ga⁺. Минимальный диаметр ионного пучка составляет около 7 нм [37]. Метод позволяет производить локальное ионно-лучевое травление твердых тел или локальное ионно-стимулированное осаждение при подаче в зону воздействия ионного пучка химически активных газов. Несмотря на относительно низкую производительность, метод ФИП имеет широкие перспективы применения благодаря высокой разрешающей способности обработки, возможности управления параметрами пучка в широких пределах, отсутствием необходимости применения масок, резистов и химических реактивов, высокая чистота процесса благодаря реализации обработки в вакууме ($10^{-4} - 10^{-5}$ Па).

Основными направлениями применения ФИП при создании элементов нанoeлектроники являются: вакуумная автоэмиссионная нанoeлектроника как с планарно-ориентированным эмиттером, так и с вертикально ориентированным эмиттером, который может быть выращен с помощью осаждения из газовой фазы ФИП; формирование систем и отдельных элементов одноэлектроники посредством высокоточного профилирования поверхности; формирование наномостиков, перемычек, нанougлублений, нитей, нанопроводов; подготовка поверхности для будущего структурированного роста квантовых точек и нановискеров; литография сложных наноразмерных элементов нанoeлектроники; создание различных микро- и наномеханических устройств, в том числе актюаторов и трансдукторов, наномоторов, определенных элементов для нанороботов, интегрированных микроэлектромеханических устройств, датчиков и сенсоров.

Наиболее перспективным применением метода ФИП для создания устройств нанoeлектроники на сегодняшний день является формирование элементов и структур вакуумной автоэмиссионной микро-и нанoeлектроники [38-47].

Так, например, в работе [38] описана методика формирования массивов острых эмиттеров на основе структуры InGaN/GaN с использованием ФИП. Гетероструктуры на основе нитридов элементов III группы обладают уникальными светоизлучающими характеристиками и имеют перспективы широкого применения при производстве светоизлучающих структур видимого и УФ-диапазона.

В рассматриваемой работе метод ФИП применяется для безмасочного структурирования подложки InGaN/GaN с целью формирования массивов наноразмерных острых эмиттеров. Экспериментальные образцы были сформированы методом MOCVD на подложке сапфира в виде многослойных структур: 30 нм слой GaN, 4 мкм слой GaN легированный кремнием, 14 пар квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN и 560 нм слой GaN легированный магнием. Ионно-лучевое структурирование производилось ионами галлия при ускоряющем напряжении 30 кэВ и токе пучка 300 пА. РЭМ-изображения сформированных эмиттерных структур представлены на Рисунок 1.9. Для удаления разупорядоченного слоя, возникшего в результате ионной бомбардировки, структура подвергалась химическому травлению в КОН.

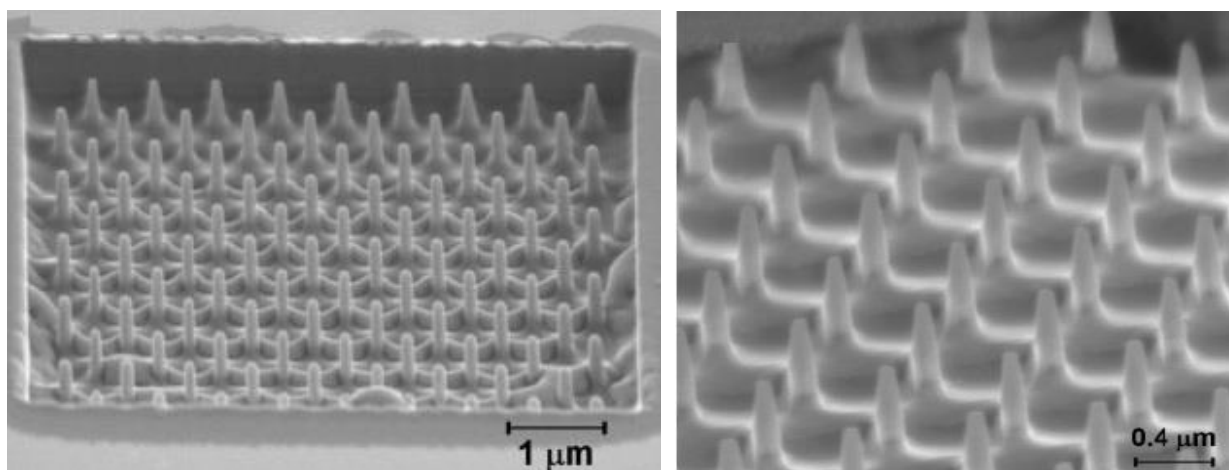


Рисунок 1.9 – РЭМ-изображения массива эмиттерных структур, сформированных фокусированным ионным пучком

В работе [45] метод травления ФИП применялся при формировании планарных автоэмиссионных структур на подложке мультиграфен/SiC. РЭМ

изображение и график измеренной ВАХ структуры представлен на рисунке 1.10.

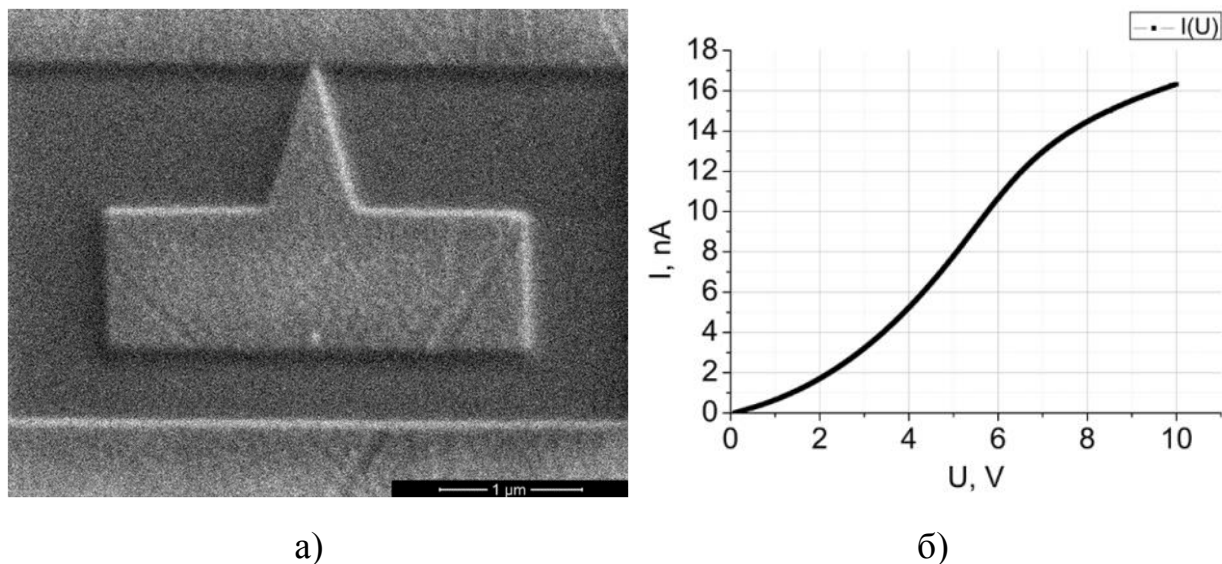


Рисунок 1.10 – РЭМ изображение сформированной планарной автоэмиссионной ячейки методом ФИП (а) и ВАХ структуры (б)

Из анализа графика следует, что пороговое значение напряжения, при котором начинается эмиссия составляет около 0,2 В, а величина тока при разности потенциалов 10 В равна 16,3 нА. Радиус закругления вершины автокатода равен 30 нм.

В статье [46] представлены результаты формирования вертикально ориентированных автоэмиссионных ячеек с применением метода ФИП на основе пленок графена на карбиде кремния.

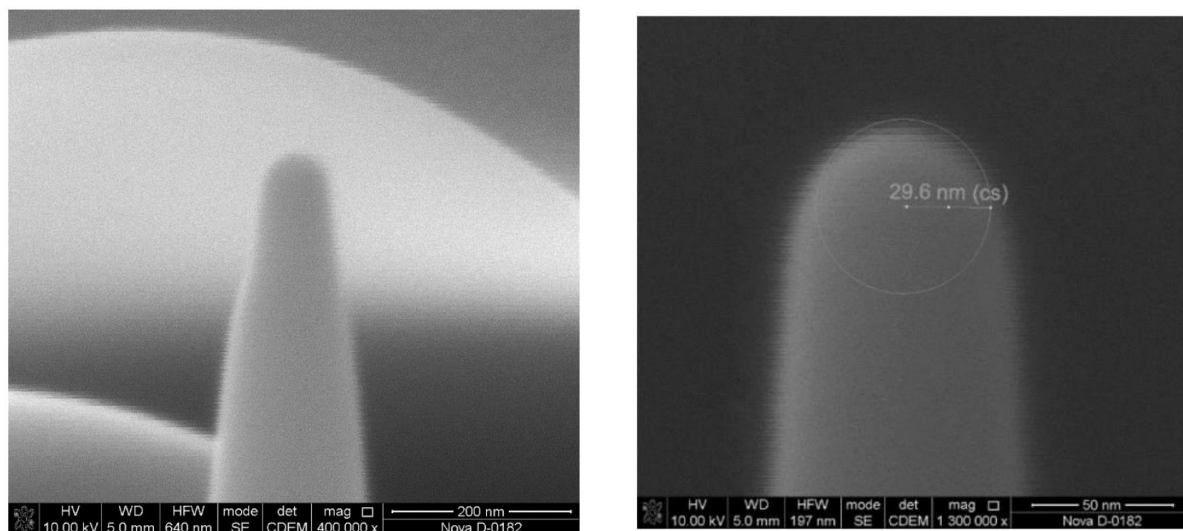


Рисунок 1.11 – РЭМ изображение автоэмиссионного катода в форме острия

РЭМ изображения полученных структур представлены на рисунке 1.11. При травлении были использованы следующие параметры ионного пучка: ток пучка – 30 пА, ускоряющее напряжение 30 кэВ, время воздействия пучка в каждой точке – 1 мкс, перекрытие пучка при пошаговом перемещении – 50 % от диаметра пучка и время травления эмиссионной структуры – 3,5 мин. В итоге радиус полученного острия был равен около 30 нм.

В работе [47] было показано применение локального ионно-стимулированного осаждения платины ФИП при формировании автоэмиссионных структур. РЭМ изображение полученной структуры и ВАХ представлены на рисунке 1.12.

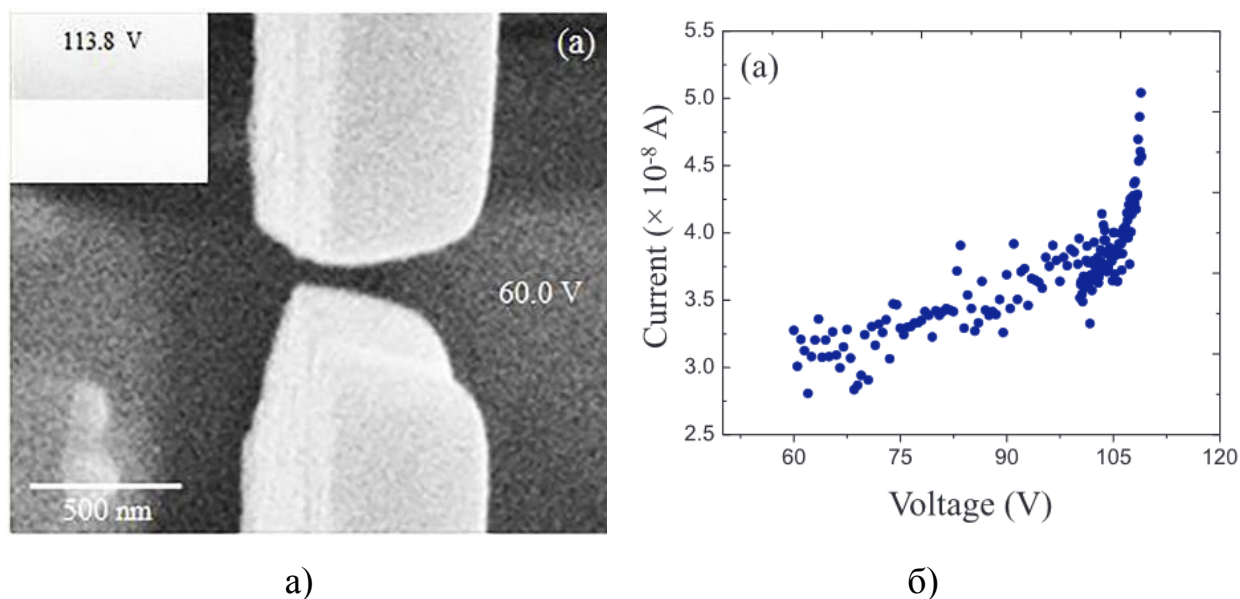


Рисунок 1.12 – РЭМ изображение автоэмиссионной структуры из платины при 70 нм межэлектродном расстоянии (а) и её ВАХ (б)

Измерения производились в вакууме при давлении 10^{-6} мбар. Из анализа кривой видно, что при разнице потенциалов между электродами в 109 В ток достигает значений около 50 нА. Также, в данной работе на основании полученных данных было рассчитано значение работы выхода для платины, которое составило 6,35 эВ.

1.4. Выводы и постановка задач

Проведенный анализ основных современных методов изготовления элементов и структур нанoeлектроники позволил выявить основные проблемы, возникающие при применении описанных методов для субмикронного профилирования поверхности твердых тел. Показано, что применение метода фокусированных ионных пучков является наиболее перспективным для субмикронного профилирования поверхности подложек, формирования различных наноразмерных структур, создания устройств нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

Обзор литературных источников показывает, что одним из перспективных направлений развития нанoeлектроники является вакуумная автоэмиссионная нанoeлектроника, элементы которой могут быть сформированы с применением комбинации методов локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения ФИП, что подтверждается большим количеством научных статей в данной области.

Таким образом, проведенный обзор позволяет сформулировать цель выпускной квалификационной работы: разработка конструкции и технологии изготовления элементов вакуумной нанoeлектроники с использованием фокусированных ионных пучков.

В соответствии с поставленной целью, основные задачи выпускной квалификационной работы формулируются следующим образом:

- теоретический анализ основных электрофизических параметров, закономерностей и зависимостей элементов вакуумной нанoeлектроники;
- разработка конструкции вакуумной автоэмиссионной ячейки;
- моделирование основных геометрических параметров ячейки методом конечных элементов для нахождения их оптимальных значений;

- исследование влияния основных режимов и параметров ФИП на формирование элементов вакуумной наноэлектроники;
- разработка технологии изготовления элементов вакуумной наноэлектроники с использованием фокусированных ионных пучков.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОЙ АВТОЭМИССИОННОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

2.1. Анализ основных электрофизических параметров, закономерностей и зависимостей элементов вакуумной наноэлектроники

Целенаправленные экспериментальные исследования АЭЭ из металлов начались практически сразу же после выдающегося изобретения Э. Мюллера автоэлектронного микроскопа-проектора. Основной задачей этих исследований являлась экспериментальная проверка основных выводов теории Фаулера—Нордгейма. И в первую очередь основной формулы теории — формулы Фаулера—Нордгейма, которая в «упрощенной» записи может быть представлена следующим образом:

$$j = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (2.1)$$

или

$$\lg \frac{j}{E^2} = A - \frac{B}{E}, \quad (2.2)$$

где A и B — известные постоянные.

Из теории Фаулера—Нордгейма следует, что $(\lg j)/E^2$ для автокатода с заданной работой выхода должен линейно зависеть от $1/E$. Получение в эксперименте линейной зависимости для

$$\frac{\lg j}{E^2} = f\left(\frac{1}{E}\right)$$

можно рассматривать как качественную экспериментальную проверку теории автоэлектронной эмиссии Фаулера и Нордгейма, тогда как получение из эксперимента согласующегося с теорией значения величины B — как ее количественную проверку.

Однако экспериментальное изучение зависимости j (E) и определение величины B связано с некоторыми осложняющими обстоятельствами. Они обусловлены тем, что на опыте непосредственно измеряются не плотность автоэмиссионного тока j и напряженность электрического поля E , а полный эмиссионный ток J и приложенная между автокатодом и анодом разность потенциалов U . $j = J/S$, где S — площадь эмитирующей поверхности острейного автокатада, а напряженность поля у вершины острия:

$$E = \beta U, \quad (2.3)$$

где β — (форм – фактор) величина, зависящая от формы вершины острия, при условии, что поле объемных зарядов в вакуумном промежутке автокатод—анод пренебрежимо мало. Поэтому при условии, что S и β постоянны, экспериментально измеряемая зависимость

$$\frac{\lg J}{U^2} = f\left(\frac{1}{U}\right) \quad (2.4)$$

должна быть также линейной. Однако для определения величины B необходимо знать значение коэффициента β . Но этот коэффициент лишь для катода в виде шара имел бы постоянное значение по всей поверхности катода, равное $1/r$. Для катода в виде острия произвольной формы β различно для различных элементов поверхности, т. е. $\beta = \beta(\xi, \eta)$, где ξ и η — координаты поверхности острия, причем функция $\beta(\xi, \eta)$ зависит от формы конкретного острия. Вид функции $\beta(\xi, \eta)$ может быть рассчитан из теории потенциала лишь для некоторых аксиально-симметричных форм острий (гиперболоид вращения, параболоид вращения, шар на конусе с центром в его вершине). Поэтому обычно острие аппроксимируют одной из этих форм (гиперболическая аппроксимация, параболическая аппроксимация и т. д.). Однако реальные острия лишь приближенно соответствуют этим формам.

Поэтому погрешность при определении β (ξ , η), а следовательно, и $E = \beta U$, оказывается существенной (обычно $\Delta E/E = 30\%$) [48].

Из анализа основных теоретических параметров, закономерностей и зависимостей вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники можно сделать вывод о том, что главной формулой АЭЭ из металлов является формула (2.1) Фаулера—Нордгейма, которая в точности описывает все физические процессы, происходящие при приложении напряжения между заостренным автокатодом и анодом. Экспериментальное изучение этой зависимости обладает некоторыми осложняющими обстоятельствами, в частности, перебор всех основных параметров, влияющих на J и U , на практике является довольно ресурсоемким и долгим процессом. Также, теоретическое исследование элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники затруднено из-за нахождения величины форм-фактора β , зависящей от формы вершины автокатада, с помощью которой можно получить значение напряженности электрического поля по формуле (2.3). Таким образом, исследование элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники является сложной задачей, требующей применения комплексных методов моделирования для оценки влияния основных параметров наноразмерных автоэмиссионных структур на эмиссионные характеристики с целью снижения погрешности теоретических результатов.

2.2. Постановка цели и задач для теоретического исследования автоэмиссионных ячеек

Целью данного раздела является теоретическое исследование одного из направлений вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером, формируемых комбинацией методов локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения ФИП Ga^+ из газовой фазы. Данное направление выбрано в связи с перспективностью как самой темы вертикально

ориентированных автокатодов, так и метода формирования таких наноразмерных структур. Основные направления применения автоэмиссионных ячеек с данной ориентацией эмиттера – это создание: сенсоров газов, систем высокоскоростной передачи информации, энергоэффективных эмиссионных дисплеев, помехозащищенных военных устройств и др.

Как известно, в вакуумной автоэмиссионной наноэлектронике, например, для снижения порогового напряжения эмиссии необходимо стремиться к минимизации межэлектродного расстояния и уменьшению радиуса закругления эмиттера до нанометровых значений. Подобная оптимизация структуры ячейки дает возможность повысить напряженность поля на вершине автокатада и увеличить значение его форм фактора, что, в свою очередь, позволяет понизить пороговые напряжения возникновения эмиссии и увеличить плотность тока с одного эмиттера. Так же, стоит учитывать и физические эффекты, происходящие в диэлектрике при сильных электрических полях. Правильный выбор толщины изолятора, позволит избежать негативных эффектов, связанных с электрическим пробоем, а также продлит время бесперебойной работы конечного прибора. В автоэмиссионных структурах с вертикально ориентированным эмиттером, немаловажным оказывается и значение его высоты, которое является одним из определяющих факторов в работе устройства.

Таким образом, в данной главе будут представлены результаты теоретического исследования влияния основных геометрических и электрофизических параметров вакуумных автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером на напряженность электрического поля на вершине автокатада, которые позволят оптимизировать конструкцию ячейки, повысить её энергоэффективность и снизить пороговое напряжение начала эмиссии. Оценка напряженности электрического поля является наиболее предпочтительной и исключает ряд осложняющих факторов, описанных выше для β , при получении результата расчетов. При

необходимости значение форм-фактора может быть получено согласно формуле (2.3).

2.3. Разработка конструкции вакуумной автоэмиссионной ячейки и задание основных параметров моделирования

Простейшей автоэмиссионной ячейкой является вакуумный диод, имеющий заостренный автокатод и анод, который может быть выполнен различной формой. Электроды разделены слоем диэлектрика, который обеспечивает получение автоэлектронного эффекта. Так, структура исследуемой автоэмиссионной ячейки состоит из слоёв Si/Ni/SiO₂/Ni. В качестве подложки используется кремниевая пластина. На Si-подложке сформирован проводящий Ni-слой. Анодный Ni-слой отделен от катодного диэлектриком (SiO₂). Данный диэлектрик выбран для согласования со стандартными технологическими процессами, используемыми при изготовлении наноразмерных устройств. Формирование ячейки выполняется с применением операции травления структуры Si/Ni/SiO₂/Ni методом фокусированных ионных пучков. Травление осуществляется на глубину до поверхности катодного Ni-слоя таким образом, чтобы протравить Ni на некоторую глубину. Это необходимо, чтобы на поверхности Ni не осталось диэлектрического слоя SiO₂.

Традиционно, эмиттеры изготавливаются на основе тугоплавких материалов. В исследовании в качестве материала эмиттера был использован вольфрам. Он является достаточно прочным материалом с высокой температурой плавления, что позволяет использовать его в системах с большой плотностью тока. Эмиттер сформирован на поверхности проводящего Ni-слоя методом локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама из газовой фазы.

Автоэлектронная эмиссия возникает, когда напряженность электрического поля у поверхности автокатаода превышает пороговое

значение. В этом случае электроны приобретают достаточную энергию для преодоления потенциального барьера на границе металл/вакуум. Для W это значение находится в диапазоне $3-4 \cdot 10^7$ В/см [49]. В исследовании для достижения требуемых значений напряженности электрического поля и обеспечения стабильной автоэлектронной эмиссии прикладываемое напряжение составило 200 В.

Моделирование автоэмиссионных ячеек позволяет оптимизировать их конструкцию для снижения порогового напряжения, повышения однородности эмиссии и долговечности автоэмиссионного катода. Теоретическое исследование влияния геометрических параметров вакуумной автоэмиссионной ячейки на распределение напряженности электрического поля проводилось с использованием метода конечных элементов. Выбранные геометрические параметры моделирования основаны на экспериментальных исследованиях режимов формирования автоэмиссионных ячеек комбинацией методов локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения ФИП, а также на анализе литературных источников и теоретических исследований.

Параметры моделирования автоэмиссионной ячейки представлены в Таблице 2.1. Схема исследуемой ячейки с основными геометрическими параметрами показана на Рисунке 2.1.

В данной работе будет исследовано влияние каждого параметра из таблицы 2.1. в диапазонах из столбика 4 на напряженность электрического поля на вершине автокатода с начальными геометрическими условиями автоэмиссионной ячейки в каждом исследовании, указанными в столбике 3.

Таблица 2.1 – Исследуемые параметры

Параметр	Символ	Начальные условия	Диапазон исследования
Толщина анодного слоя	h_1	300 нм	100 нм – 700 нм
Толщина диэлектрического слоя	h_2	1 мкм	50 нм – 1,5 мкм
Толщина катодного слоя	h_3	300 нм	300 нм – 1,75 мкм
Углубление эмиттера в катодный слой	h_4	150 нм	150 нм – 1,6 мкм
Высота автоэмиссионного катода	H	1,15 мкм	500 нм – 2 мкм
Диаметр автоэмиссионной ячейки	d	1,4 мкм	900 нм – 2 мкм
Радиус закругления вершины автоэмиссионного катода	r	50 нм	10 – 100 нм
Угол наклона боковой поверхности эмиттера	α	5°	$0 - 20^\circ$
Угол наклона боковой поверхности эмиссионной ячейки	γ	10°	$0 - 25^\circ$
Разность потенциалов	U	200 В	200 В

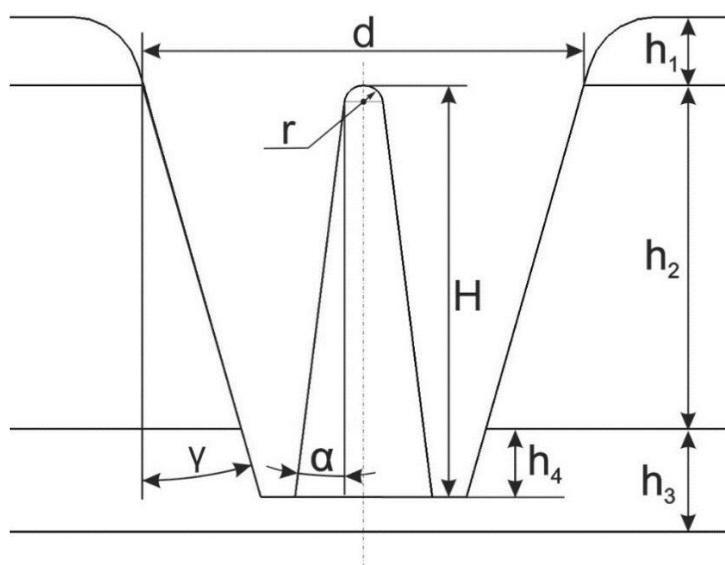


Рисунок 2.1 – Общий вид исследуемой автоэмиссионной ячейки

2.4. Исследование зависимости напряженности электрического поля в диэлектрике SiO₂ от его толщины

Исследование толщины диэлектрика обусловлено физическими ограничениями, вызванными пробоем диэлектрика в сильных электрических полях. Поэтому необходимо знать точное значение толщины диэлектрического слоя, при которой начинается электрический пробой. Электрический пробой - образование под действием высокого напряжения электропроводного плазменного канала в диэлектрике между электродами изоляционного промежутка (Рисунок 2.2). Электрической прочностью материала называется напряженность ($E_{пр}$), при которой происходит пробой материала. Она зависит от материала диэлектрика, конфигурации электродов, внешних факторов, качества диэлектрика, типа воздействующего напряжения. Напряжение $U_{пр}$, при котором происходит электрический пробой называют пробивным напряжением (Формула (2.5)).

$$U_{пр} = E_{пр} * h \quad (2.5)$$

При увеличении разрядного промежутка h пробивное напряжение возрастает, а электрическая прочность снижается. При электрическом пробое твердого диэлектрика под действием приложенного напряжения разрываются химические связи, и вещество перерабатывается в плазму.

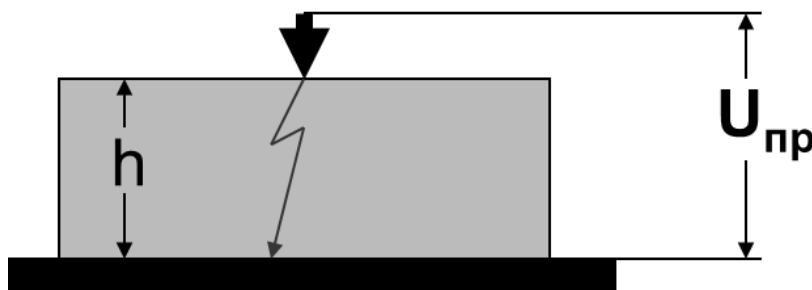


Рисунок 2.2 – Электрический пробой диэлектрика

Для диэлектрика SiO₂ зависимость электрической прочности пленки от её толщины представлена на рисунке 2.3, из которого следует, что прочность пленки увеличивается с уменьшением её толщины.

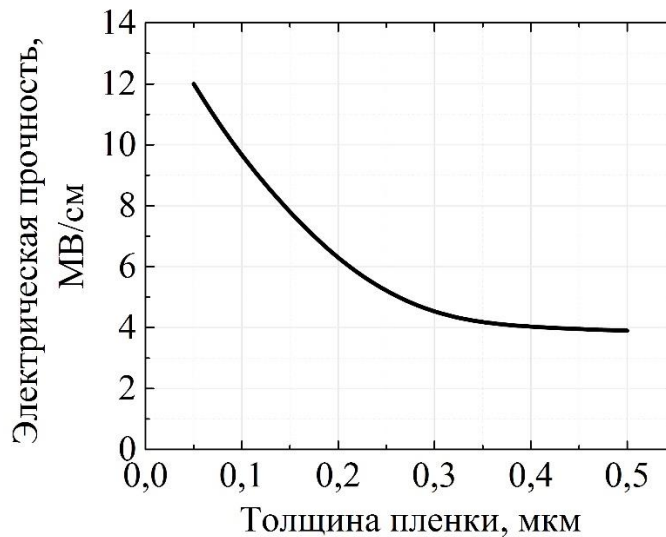
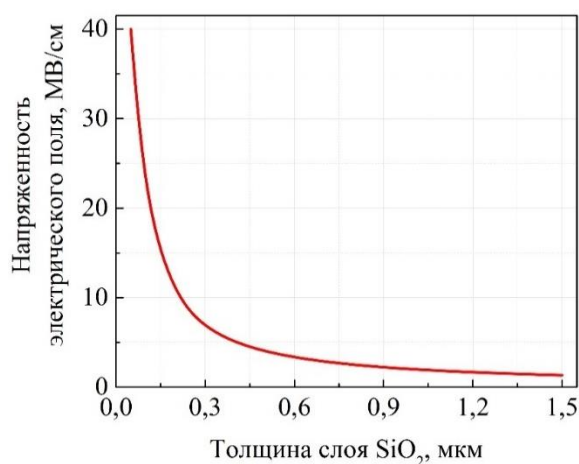


Рисунок 2.3 – Зависимость электрической прочности диэлектрика SiO₂ от толщины слоя [50]

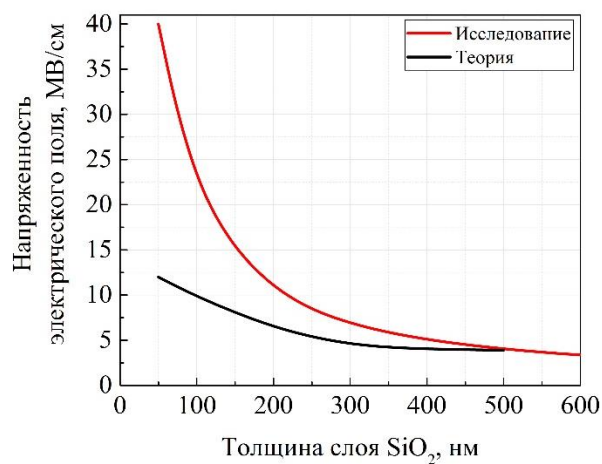
Для определения влияния толщины слоя SiO₂ на напряженность электрического поля в нем необходимо провести моделирование распределения напряженности в слое изолятора. Оно позволит определить максимальное допустимое прикладываемое напряжение и оптимальную толщину диэлектрика в исследуемой структуре.

В данном исследовании из-за максимальной величины в диапазоне изменения толщин диэлектрика 1,5 мкм, высота автокатода была увеличена до 1,65 мкм для поддержания фиксированного положения вершины эмиттера на уровне начала слоя анода (Рисунок 2.1). Таким образом, при моделировании будут изменять только параметры h_2 , h_3 и h_4 в диапазонах, указанных в таблице 2.1.

Результат теоретического исследования представлен на рисунке 2.4, а. Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что кривая полностью соответствует теоретическим выводам по физике процессов, происходящих в диэлектрике при изменении его толщины и фиксированном напряжении ($E = \frac{U}{d}$, где d - толщина диэлектрика). Сравнение полученных значений с данными, представленными на рисунке 2.3 электрической прочности пленки диэлектрика от её толщины, показало (Рисунок 2.4, б), что при данном



а)



б)

Рисунок 2.4 – Зависимость напряженности электрического поля в диэлектрике от его толщины при исследовании (а) и сравнении с теорией (б) межэлектродном напряжении можно использовать пленку SiO₂ с минимальной допустимой толщиной 500 нм. Если выращивать слой диэлектрика меньше данного значения, то при приложении напряжения в 200 В скорее всего будет наблюдаться пробой. Применение меньших значений толщин SiO₂ без пробоя возможно при одновременном снижении межэлектродного напряжения.

Например, возможно использовать диэлектрический слой толщиной в 50 нм при 60 В, но при таком напряжении автоэлектронная эмиссия для данной неоптимизированной геометрии и компоновки электродов наблюдаться не будет, из-за низкой напряженности электрического поля на вершине автокатода.

Таким образом, при межэлектродном напряжении в 200 В возможно использовать диэлектрический слой SiO₂ с толщиной от 500 нм. Также, на основании полученных данных была произведена оценка пробивного напряжения для толщины изолятора в 1 мкм, при котором U_{пр} составило 400 В.

2.5. Исследование напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера при различной толщине слоя SiO₂

Данное исследование необходимо для оценки степени влияния отношения толщины диэлектрического слоя к толщине Ni катодного слоя на напряженность поля на вершине автокатода. Моделирование производилось при тех же параметрах, что и предыдущее исследование (Рисунок 2.5). Результаты исследования представлены на рисунке 2.6.

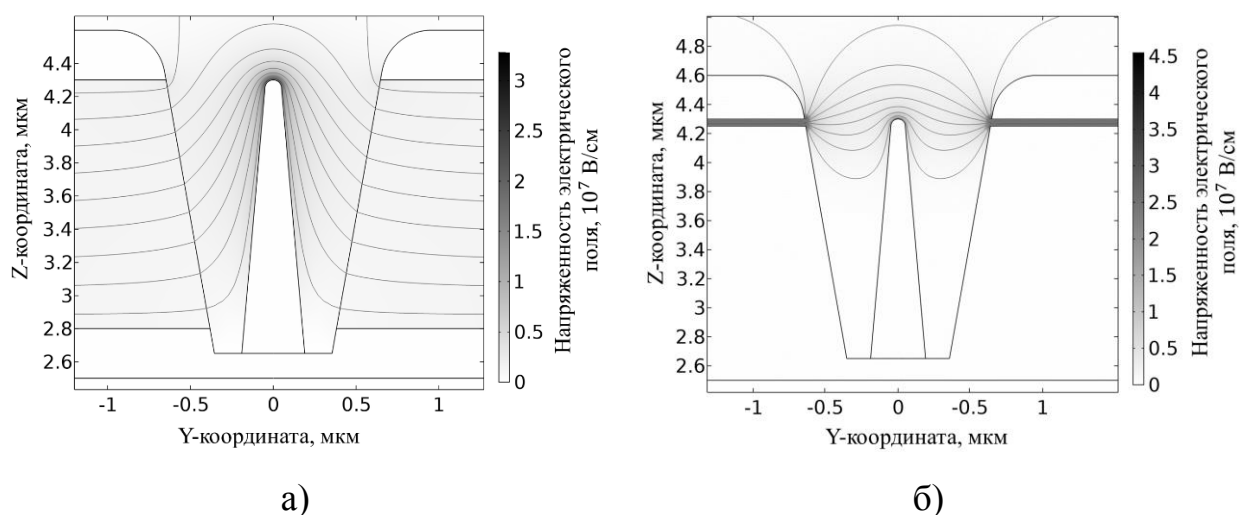


Рисунок 2.5 – Картины распределения напряженности электрического поля в автоэмиссионной ячейке при толщине SiO₂ 1,5 мкм (а) и 50 нм (б)

Из анализа полученных графиков следует, что уменьшение толщины слоя диэлектрика приводит к снижению напряженности электрического поля на вершине W эмиттера (Рисунок 2.6, а). Это связано с тем, что контактный слой Ni оказывает экранирующий эффект на вершину автоэмиссионного катода. Увеличение толщины Ni-слоя способствует усилению экранирующего эффекта и уменьшению напряженности электрического поля (Рисунок 2.6, б).

Таким образом, для обеспечения максимальной напряженности поля необходимо формировать слой диэлектрического материала не менее 1 мкм. В данном исследовании при толщине SiO₂ 1,5 мкм удалось достичь значения напряженности $3,33 \cdot 10^7$ В/см.

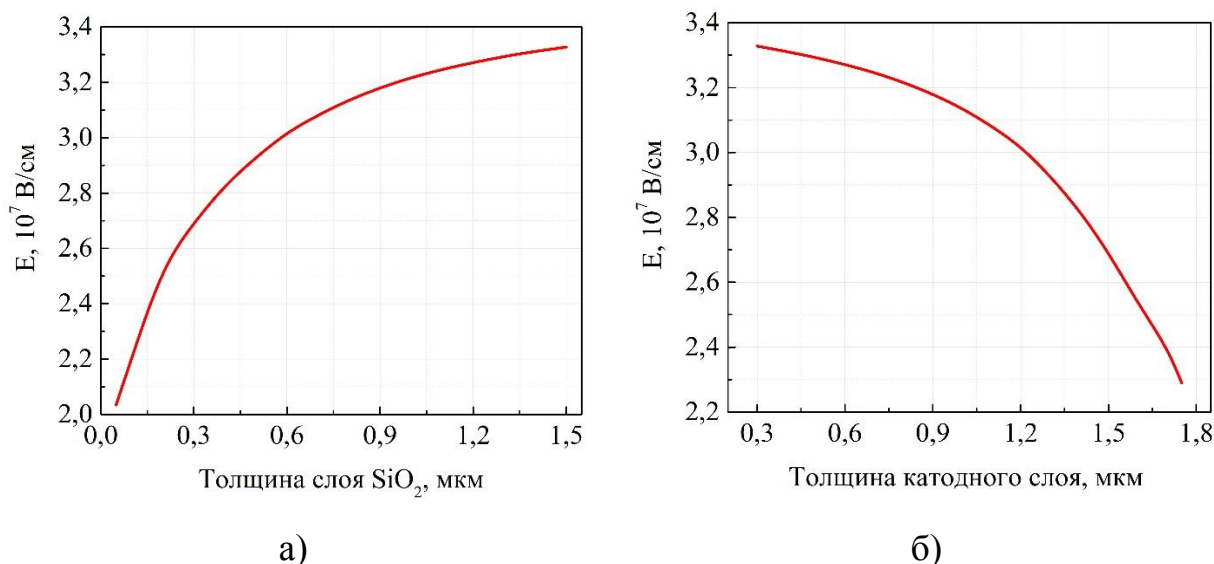


Рисунок 2.6 – Зависимость напряженности электрического поля на вершине автокатода от толщины диэлектрика (а) и толщины катодного слоя (б)

2.6. Исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от его высоты при различной толщине анодного слоя

Взаимное расположение электродов в автоэмиссионной ячейке является важным параметром при её формировании, управление которым может производиться в основном за счет изменения высоты эмиттера, толщины анодного слоя и диаметра ячейки, напрямую связанного с расстоянием анод-автокатод. В данном разделе будет выполнено исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от его высоты при различной толщине анодного слоя.

Результаты моделирования представлены на рисунке 2.7. Из анализа полученного графика следует, что кривые имеют несколько участков. Первый сопровождается линейным ростом E при изменении H , что соответствует сближению автокатода и анода, т. е. уменьшению межэлектродного расстояния.

Второй участок имеет некоторую область насыщения при высотах эмиттера $\sim 1,3-1,6$ мкм, что соответствует прохождению эмитирующей

области W автокатада через слой анода и неизменному межэлектродному расстоянию на некоторый момент, который связан с вертикальностью боковых стенок ячейки. Причем продолжительность участка насыщения зависит от толщины анодного слоя и, соответственно, увеличивается с возрастанием h_1 .

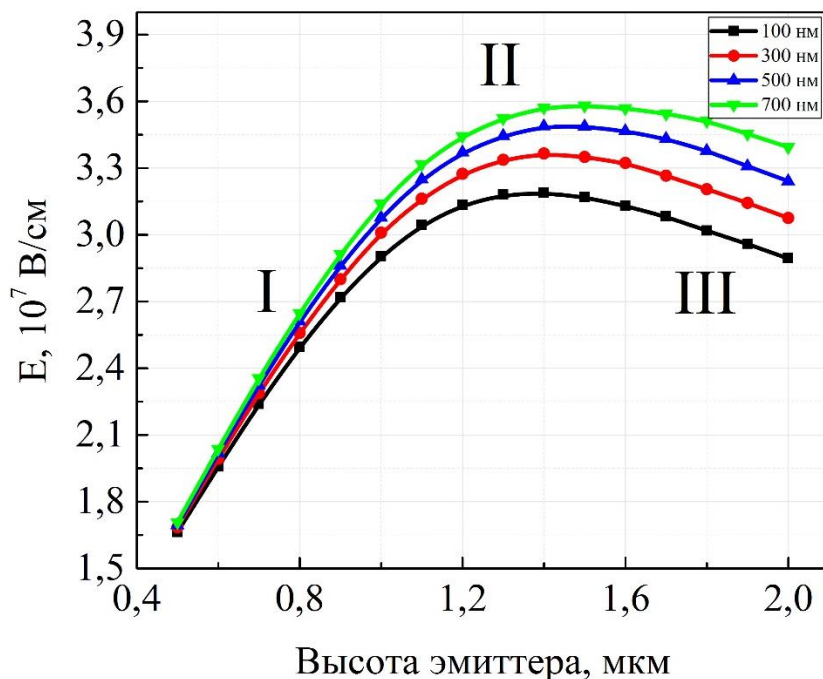


Рисунок 2.7 – Зависимость напряженности электрического поля на вершине W эмиттера от его высоты при различных значениях толщины анодного слоя

Дальнейшее возрастание высоты эмиттера приводит к уменьшению напряженности электрического поля на его вершине в связи со всё большим удалением эмитирующей поверхности от приёмного слоя Ni анода (участок III).

Толщина анодного слоя влияет не только на продолжительность участка насыщения, но и на величину напряженности электрического поля на вершине автокатада. Из анализа графика следует, что значение E увеличивается с ростом толщины анодного слоя. Так при высоте эмиттера 1,4 мкм напряженность электрического поля возросла от $3,19 \cdot 10^7$ В/см (для 100 нм h_1) до $3,57 \cdot 10^7$ В/см (для 700 нм h_1). Скорее всего, это связано как с увеличением площади приёмной поверхности, так и с увеличением эмитирующей области автокатада и определенным распределением поверхностного потенциала

анода, позволяющего “вытягивать” из наноразмерного эмиттера больше электронов, за счет понижения потенциального барьера, вызванного увеличением напряженности электрического поля на конце W эмиттера.

Таким образом, для достижения максимального значения напряженности электрического поля необходимо стремиться к увеличению толщины анодного слоя и расположению вершины эмиттера вблизи середины Ni электрода.

2.7. Исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от радиуса закругления острия и диаметра ячейки

Радиус закругления вершины автокатода и диаметр автоэмиссионной ячейки оказывают наибольшее влияние на значение напряженности поля на острие. Результаты проведенных исследований, а также картины распределения напряженности электрического поля в автоэмиссионной ячейке представлены на рисунке 2.8 и 2.9, соответственно.

Анализ полученных данных показывает, что наибольшее влияние на напряженность электрического поля оказывает радиус закругления острия, в то время как диаметр влияет не так сильно и практически линейно, в отличие от r с её экспоненциальной зависимостью. Такой ход кривых $E(r)$ (уменьшение радиуса закругления способствует резкому нарастанию E), представленных на рисунке 2.8, а, обусловлен понижением потенциального барьера на границе металл/вакуум и связан со снижением его толщины.

Также, стоит отметить, что с увеличением радиуса закругления автоэмиссионного катода напряженность поля уменьшается, и при некоторых значениях для получения стабильной электронной эмиссии необходимо будет прикладывать более высокие напряжения. Возможно, это будет полезно при создании высоковольтных вакуумных автоэмиссионных диодов.

Из анализа графика на рисунке 2.8, б следует, что с уменьшением диаметра ячейки напряженность электрического поля на вершине автокатода

возрастает. Это связано со сближением острия и поверхности, принимающей эмитированные электроны, то есть со снижением межэлектродного расстояния.

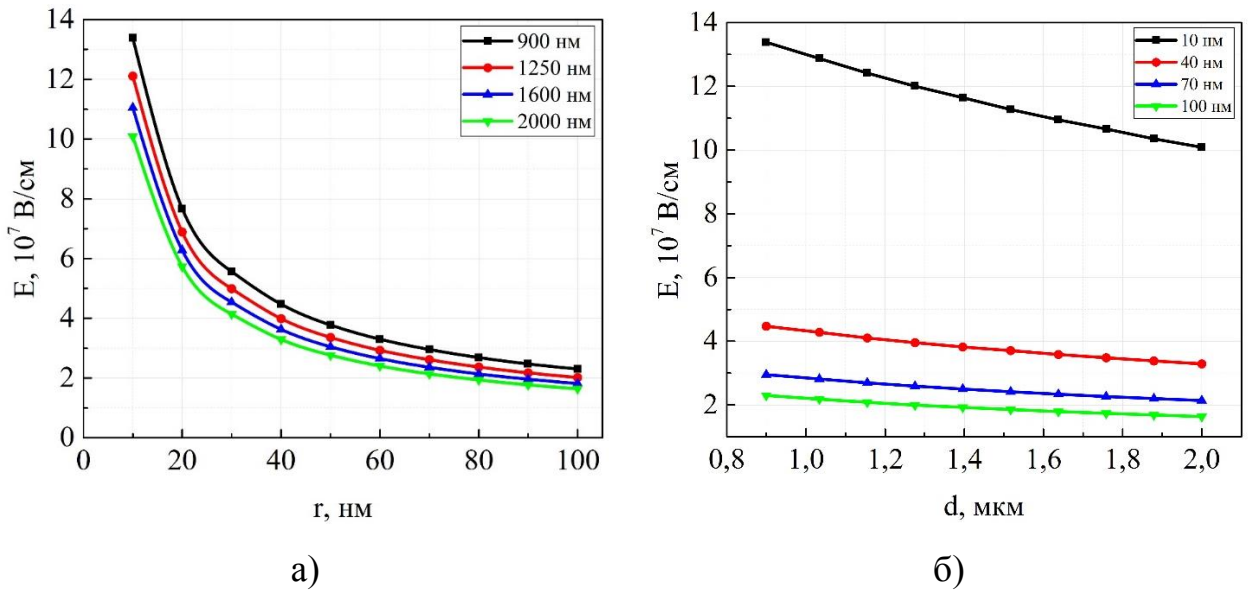
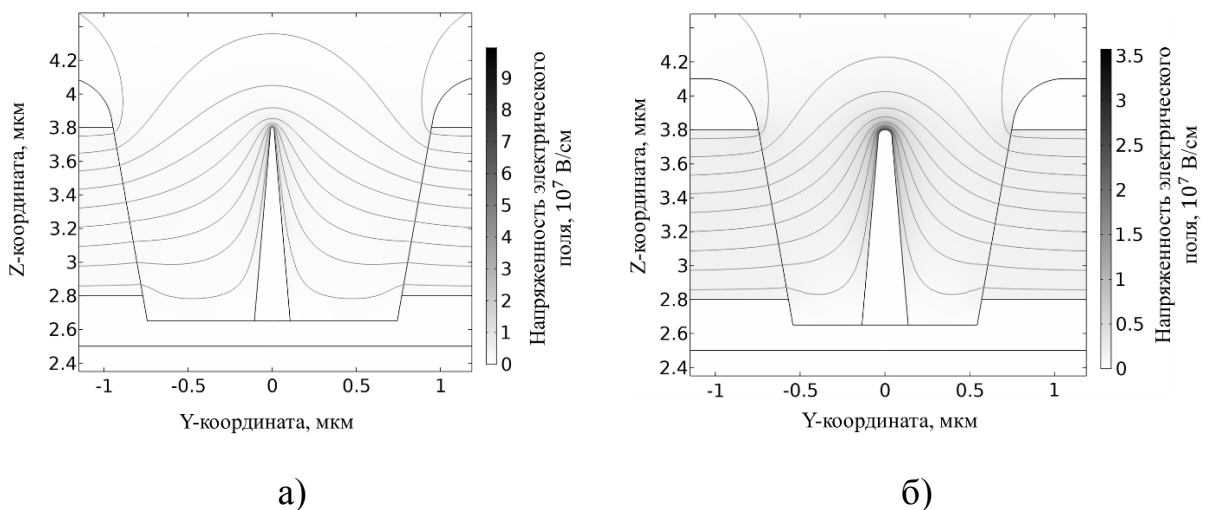


Рисунок 2.8 – Зависимость напряженности электрического поля на вершине W эмиттера от радиуса закругления острия при диаметре ячейки, изменяющемся от 900 нм до 2 мкм (а), и от диаметра ячейки при радиусах закругления, варьирующихся от 10 нм до 100 нм (б)



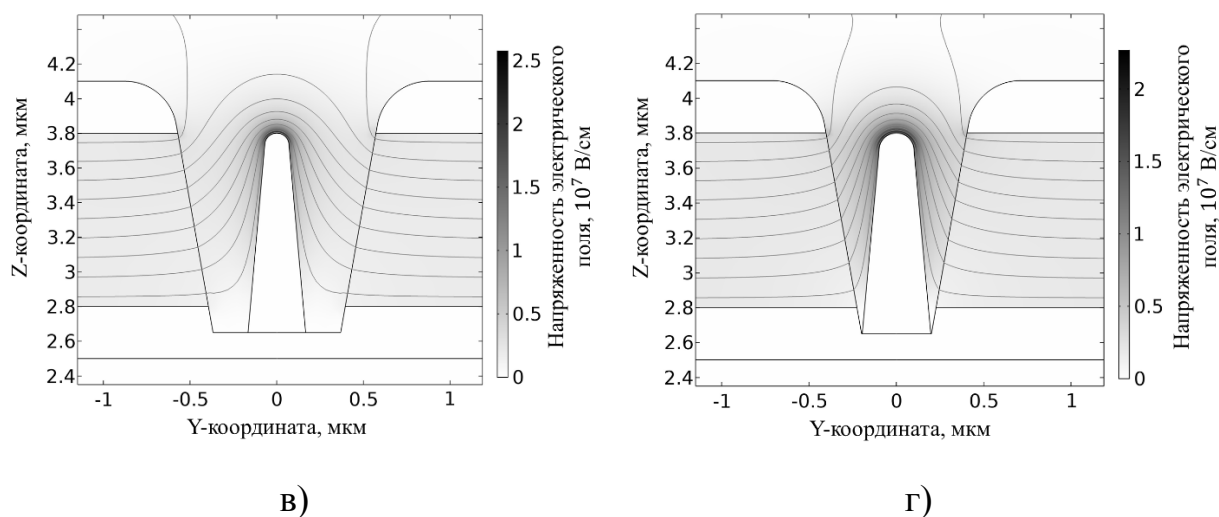


Рисунок 2.9 – Картины распределения напряженности электрического поля в автоэмиссионной ячейке при $r = 10$ нм и $d = 2$ мкм (а), $r = 40$ нм и $d = 1,6$ мкм (б), $r = 70$ нм и $d = 1,25$ мкм (в), $r = 100$ нм и $d = 0,9$ мкм (г)

Таким образом, уменьшения радиуса закругления вершины автоэмиссионного катода со 100 нм до 10 нм способствует увеличению напряженности электрического поля на вершине эмиттера в $5,82 \div 6,15$ раз. А уменьшение диаметра автоэмиссионной ячейки способствует росту E в $1,33 \div 1,4$ раз. Соответственно, для достижения максимальных значений напряженности электрического поля следует стремиться к минимальным описанным выше величинам.

2.8. Исследование зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от угла наклона боковой поверхности автокатаода и автоэмиссионной ячейки

Данное исследование обусловлено применяемым методом ФИП при формировании автоэмиссионной ячейки. Получаемый профиль итоговой структуры будет обязательно иметь отклонение боковых стенок ячейки и автокатаода от нормали засчет специфической формы ионного луча. Соответственно, необходимо оценить влияние данного параметра на значение

напряженности на вершине эмиттера. Результаты исследования представлены на рисунке 2.10.

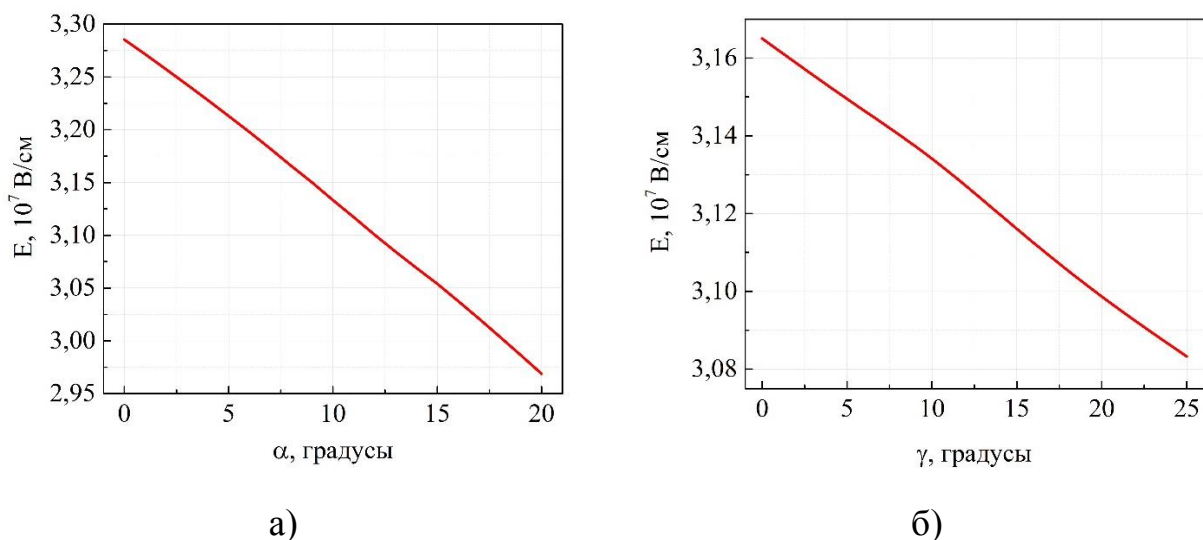


Рисунок 2.10 – Зависимости напряженности электрического поля на вершине W-эмиттера от угла наклона боковой поверхности автокатода (а) и автоэмиссионной ячейки (б)

Анализ полученных данных показывает, что напряженность электрического поля сильно зависит от угла боковой поверхности автокатода (Рисунок 2.10, а). Увеличение угла α способствует уменьшению E на вершине эмиттера, что может быть связано с изменением плотности распределения напряженности электрического поля, вследствие, изменения площади эмитирующей поверхности и расстояния отдельных точек автокатода до анода.

Линейная зависимость E от γ (Рисунок 2.10, б) возможно вызвана тем, что при увеличении угла боковой поверхности автоэмиссионной ячейки геометрическая форма растрова анода, полученная из-за формы ФИП, немного искажается и некоторые точки поверхности могут находиться уже на другом расстоянии от автокатода, что приводит к снижению значения напряженности электрического поля.

Таким образом, при формировании автоэмиссионных ячеек ФИП необходимо тщательно подбирать и исследовать параметры ионного пучка для

снижения искажений полученной структуры и минимизации описанных в данном исследовании параметров.

2.9. Основные выводы по главе

Таким образом, в данной главе было выполнено моделирование автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером методом конечных элементов. Представлены результаты влияния основных геометрических и электрофизических параметров на напряженность электрического поля на вершине автокатода, которые в дальнейшем позволят повысить её энергоэффективность и снизить пороговое напряжение начала эмиссии. Сделаны основные выводы и оценки по полученным зависимостям, которые на практике позволят сформировать автоэмиссионную ячейку с оптимизированной конструкцией.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛОКАЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФИП Ga^+

Процесс формирования топологии наноразмерных структур, в том числе и элементов нанoeлектроники, при субмикронном профилировании поверхности методом ФИП определяется такими параметрами ионного пучка как ток, ускоряющее напряжение, время воздействия в точке (Dt), количество проходов, степени перекрытия пучка (OL), а также ряда характеристик шаблона и параметров системы перемещения ионного пучка.

В данном разделе проводились экспериментальные исследования для оценки степени влияния технологических параметров ФИП на геометрические характеристики наноразмерных структур с использованием двухлучевого растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды), оснащенного системой ФИП. Экспериментальные

исследования и анализ полученных результатов выполнялись с использованием оборудования НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ.

3.1. Исследование закономерностей процессов локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама и углерода

На данном этапе проводились исследования общих закономерностей влияния технологических параметров и режимов ФИП на локальное ионно-стимулированное осаждение вольфрама и углерода. В качестве химически-активных газов-прекурсоров (ХАГ) при локальном ионно-стимулированном осаждении углерода и вольфрама использовались C_2H_4 и $W(CO)_6$ соответственно.

3.1.1. Исследование точности переноса рисунка шаблона на подложку

В ходе экспериментальных исследований на кремниевой подложке методом ФИП формировался массив из 25 наноразмерных окружностей с различным диаметром, изменяющимся в диапазоне от 10 (левая верхняя окружность) до 250 (правая нижняя окружность) нм с шагом 10 нм. Разработанный шаблон позволяет сформировать выборку для статистической обработки экспериментальных результатов и произвести оценку кинетики процесса ионно-стимулированного осаждения, как в нормальном, так и в латеральном направлении.

Осаждение наноразмерных структур производилось при следующих основных параметрах ионного пучка: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка изменялся в диапазоне от 1 пА до 50 пА, время воздействия пучка в точке (Dt) 1,6 мкс, заданная высота структур в шаблоне 200 нм, степень перекрытия пучка (OL) 0 % и давление (при открытом инжекторе) 2×10^{-3} Па. Время осаждения всего массива изменялось в соответствии изменению тока пучка и составило: 190 с – 1 пА; 20 с – 10 пА; 7 с – 30 пА; 4 с – 50 пА.

РЭМ изображения полученных наноразмерных структур представлены на рисунке 3.1.

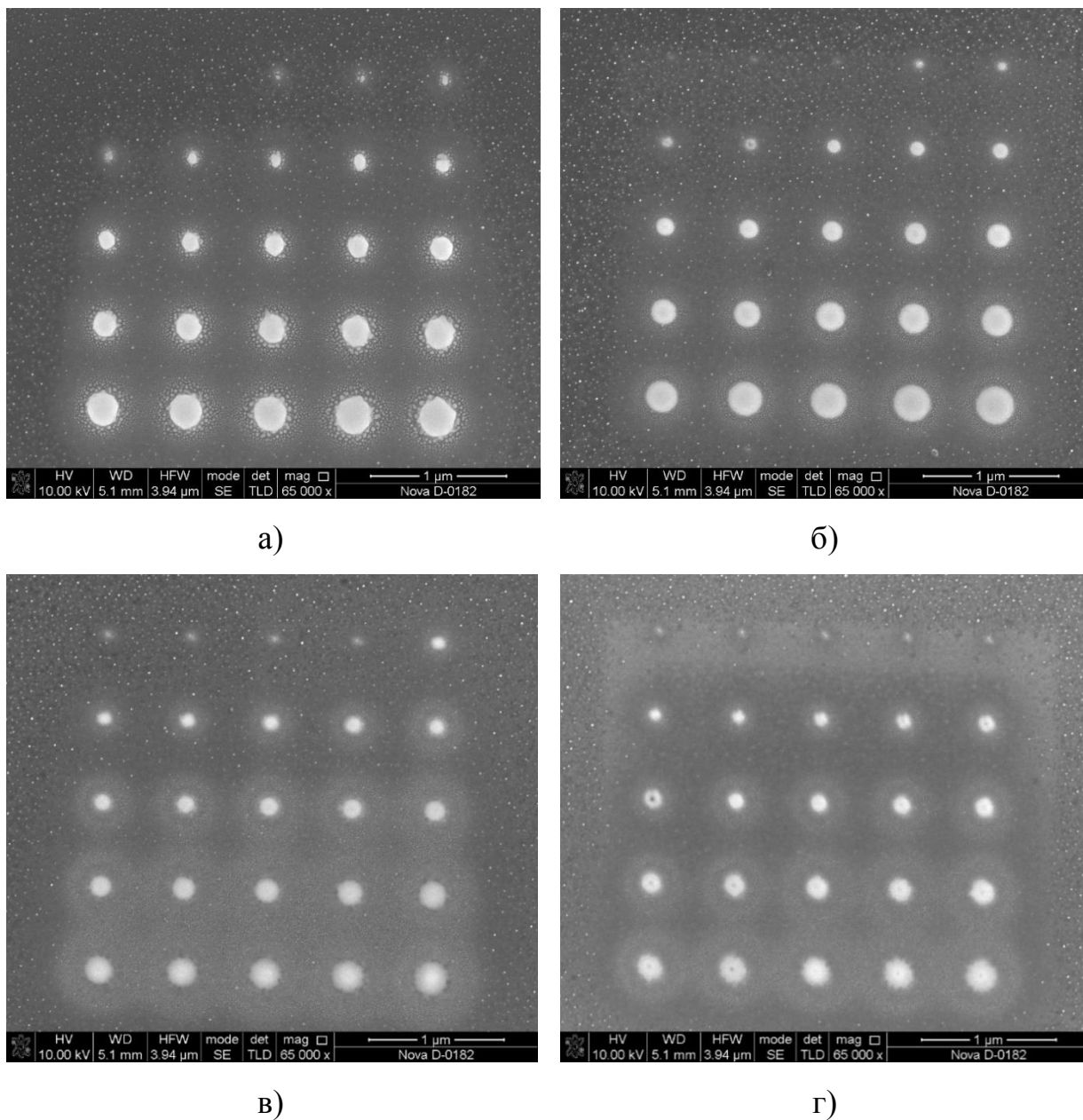
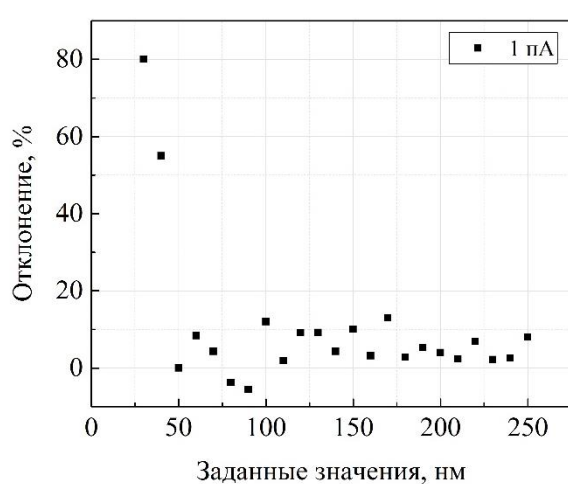


Рисунок 3.1 – РЭМ изображения массивов окружностей, сформированных локальным ионно-стимулированным осаждением вольфрама при токе пучка 1 пА (а), 10 пА (б), 30 пА (в), 50 пА (г)

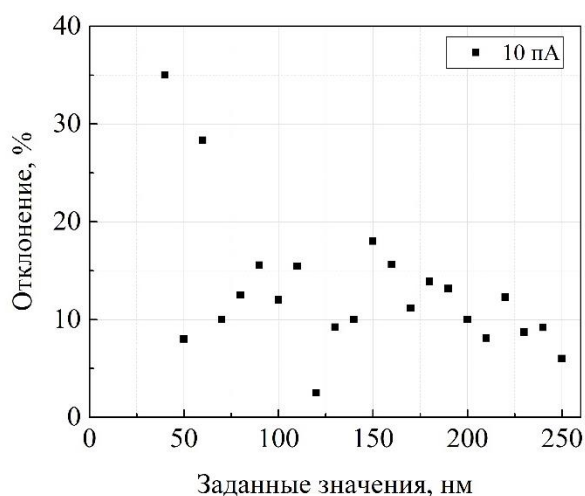
Из полученных РЭМ изображений видно, что наиболее правильная передача формы заданной в шаблоне окружности получается при осаждении с током пучка 10 пА (Рисунок 3.1, б), тогда как осаждение с токами 1, 30 и 50 пА имеет некоторые неточности при переносе рисунка шаблона на подложку, такие как, например, рваные края получаемой структуры, неравномерность

формы и углубление в центре (Рисунок 3.1, г), связанное с высоким временем воздействия пучка в точке (Dt) и величиной самого тока ионного пучка. Также, в каждом массиве в 1 строке для структур с диаметром менее 50 нм обнаруживается либо отсутствие окружностей, либо сильно искаженные формы, которые при измерении могут быть аппроксимированы окружностью, но этот фактор повысит погрешность полученных результатов. Из этого следует, что ионно-стимулированное осаждение вольфрамовых структур размером менее 50 нм требует более детального исследования параметров, влияющих на их формирование, для наиболее точного переноса рисунка шаблона на поверхность подложки. В первом приближении это может быть связано с недостаточным временем воздействия, то есть необходимо увеличить время осаждения одной структуры.

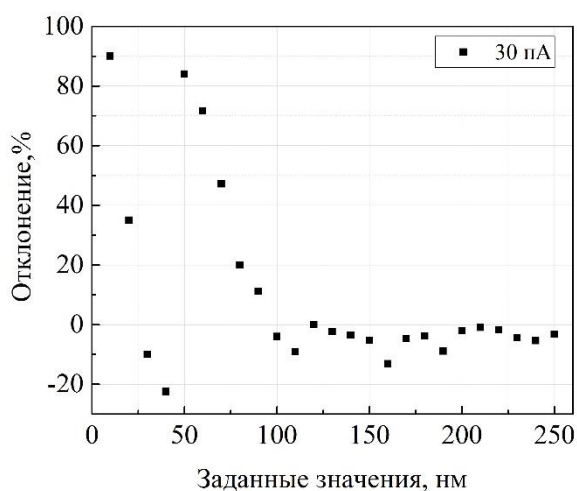
Измерение диаметра полученных окружностей производились на основе РЭМ-изображений при помощи специализированного программного обеспечения SIS Software Scandium. Результаты были проанализированы и на их основе построена зависимость отклонения заданных значений диаметра окружности от полученных экспериментально. Графики построены в пакете программного обеспечения Origin и представлены на рисунке 3.2.



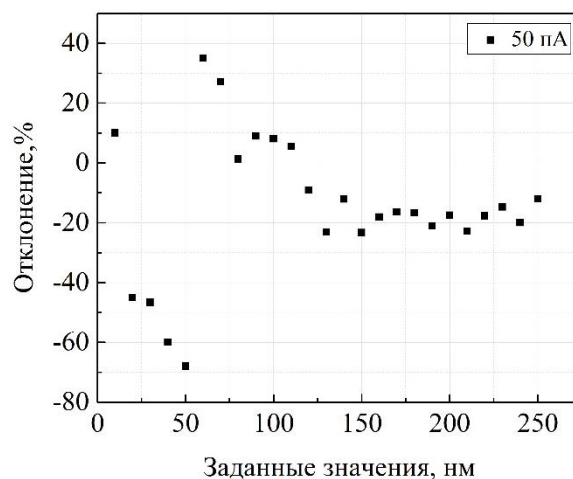
а)



б)



в)



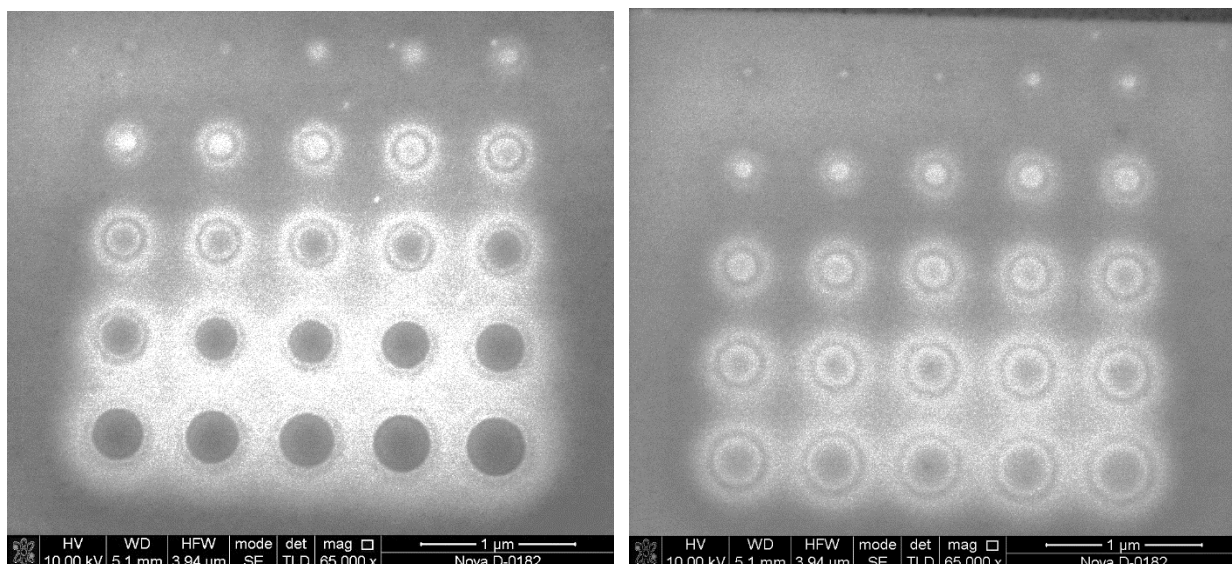
г)

Рисунок 3.2 – Зависимости отклонения заданного диаметра структур от экспериментально полученного при токе пучка 1 пА (а), 10 пА (б), 30 пА (в), 50 пА (г)

На графиках отображены точки, соответствующие проценту отклонения полученного размера от заданного в стандартной программе формирования шаблонов микроскопа, где положительные значения % показывают, на сколько измеренный диаметр превышает установленный и, наоборот, отрицательные значения показывают, на сколько структура получилась меньше на практике. Построение корректной аппроксимирующей кривой для графиков на рисунке 3.2 является затруднительной задачей, так как разброс полученных величин довольно большой и неравномерный, что, при формировании огибающей точек, может привести к нежелательной погрешности и различным неточностям, которые в итоге могут сильно исказить итоговый результат. Таким образом, для данных зависимостей аппроксимация выполнена не будет, будут представлены только точки со значениями отклонения заданных величин диаметра окружности от полученных экспериментально. Но, некоторый тренд всё-таки прослеживается, что может быть использовано для дальнейшего анализа, формирования определенных выводов и оценки отклонения указанных параметров в шаблоне от практически полученных.

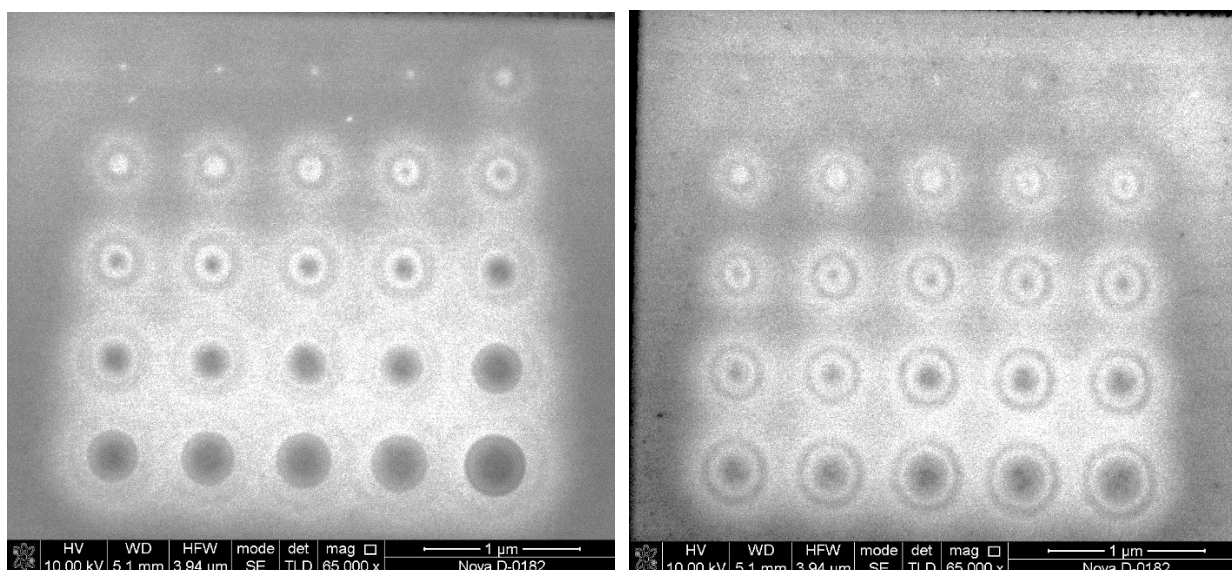
Анализ полученных графиков показал, что структуры менее 70 нм обладают бóльшим процентом отклонения, нежели оставшийся диапазон заданных значений, в которых изменения находятся в пределах 10 – 20 %. Это может быть связано со сложностью получения минимального диаметра пучка ионов для формирования наноразмерных объектов менее 70 нм и с различными физическими эффектами, возникающими при взаимодействии фокусированного ионного пучка с молекулами газа. Таким образом, предсказать результат локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама с достаточной точностью можно вплоть до размеров структур 70 нм, дальнейший тренд кривой может иметь различную форму, поэтому для более малого диапазона заданных значений необходимо экспериментально подбирать параметры ФИП, такие как время воздействия пучка в точке (Dt), заданная высота структуры в шаблоне, степень перекрытия (OL), и отслеживать их влияние на получаемые нормальные и латеральные размеры нанообъектов.

Локальное ионно-стимулированное осаждение углерода производилось при тех же параметрах ФИП, что и вольфрама. РЭМ изображения полученных массивов представлены на рисунке 3.3 в режиме инверсии цвета. Этот способ позволяет получать фотографии объектов, обладающих малой контрастностью, то есть состоящих из материала, имеющего низкий атомный номер, такого как углерод, например, по сравнению с вольфрамом.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.3 – РЭМ изображения массивов окружностей, сформированных локальным ионно-стимулированным осаждением углерода при токе пучка 1 пА (а), 10 пА (б), 30 пА (в), 50 пА (г)

Из РЭМ изображений видно, что при использовании всех указанных токов ФИП осажденные структуры из углерода получаются вполне правильной заданной формы, указанной в шаблоне. По сравнению с вольфрамом, объекты из углерода получаются точнее, это может быть связано с физико-химическими свойствами ХАГ. Также, в первой строке каждого массива нет пустых областей, как при осаждении вольфрама, что означает правильность подобранных параметров ФИП для выращивания структур из

углерода. На рисунке 3.4 представлены результаты измерения диаметра полученных структур.

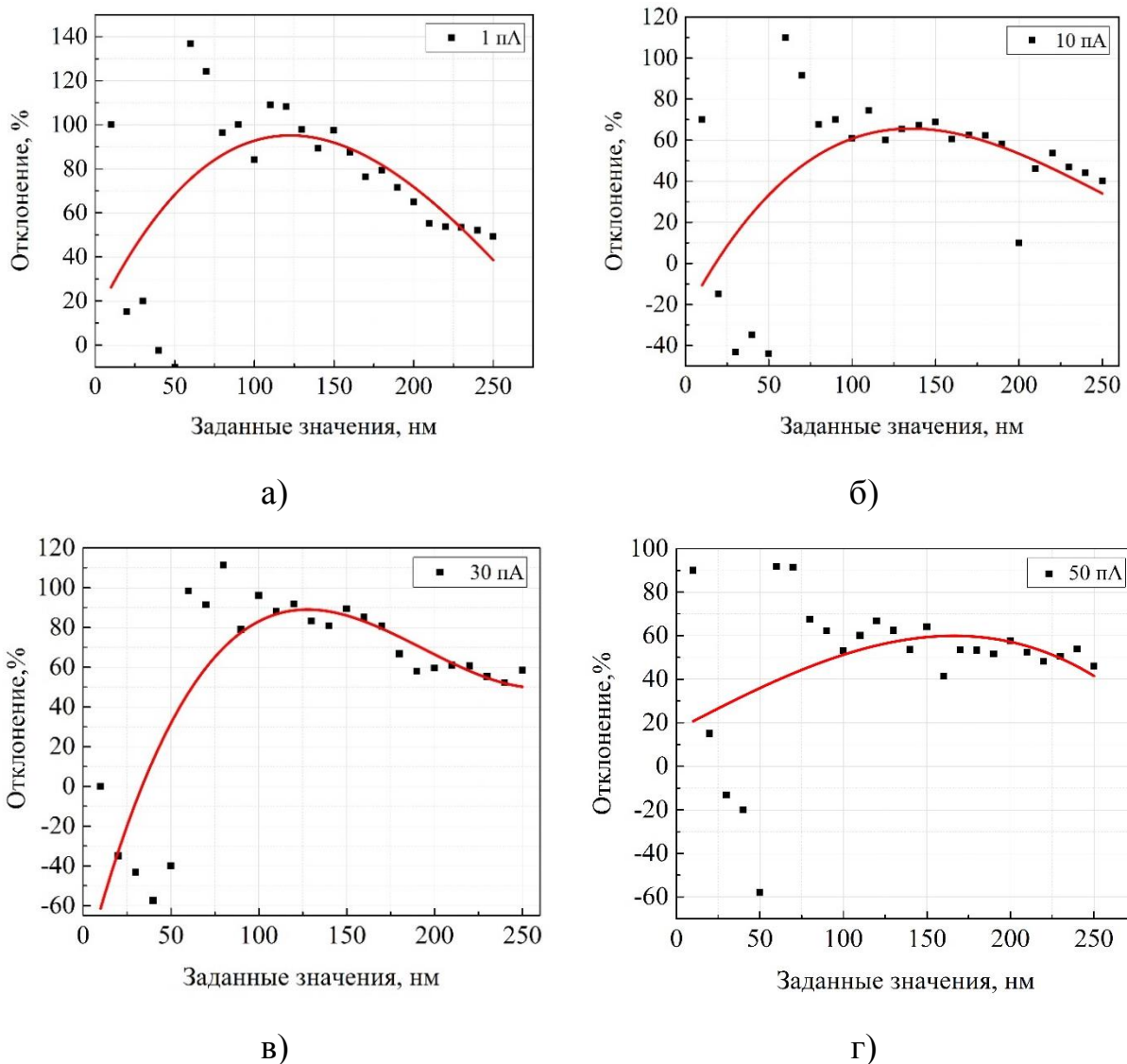


Рисунок 3.4 – Зависимости отклонения заданного диаметра структур от экспериментально полученного при токе пучка 1 пА (а), 10 пА (б), 30 пА (в), 50 пА (г)

Из анализа зависимостей следует, что осаждение углеродных структур методом ФИП обладает довольно сильным разбросом. Имеется такая же область от 70 до 250 нм, как и у вольфрамовых объектов, где колебания отклонения находятся в пределе от 40 до 80 %. Только в данном случае неточность переноса рисунка шаблона на поверхность подложки увеличилась на 30 – 60 %. Также, при значениях диаметра окружности в шаблоне менее 70 нм полученный размер структур становится сложно предсказуемым и требует

более детального подбора параметров ФИП для обеспечения уменьшения % отклонения. Большее отклонение латеральных размеров окружностей, по сравнению с вольфрамовыми структурами, при ионно-стимулированном осаждении углерода связано с более высокой скоростью разложения ХАГ.

Для уменьшения значения отклонений при локальном ионно-стимулированном осаждении вольфрама и углерода ФИП Ga^+ необходимо исследовать и другие параметры ФИП, одними из них являются: время воздействия пучка в точке (Dt) и степень перекрытия пучка (OL).

3.1.2. Исследование влияния времени воздействия пучка в точке и степени перекрытия на локальное ионно-стимулированное осаждение вольфрама и углерода

Для данного исследования была разработана методика, согласно которой в управляющей программе модуля ФИП формировался графический шаблон в виде матрицы квадратов из 56 структур размерами 2×2 мкм, как показано на рисунке 3.5.

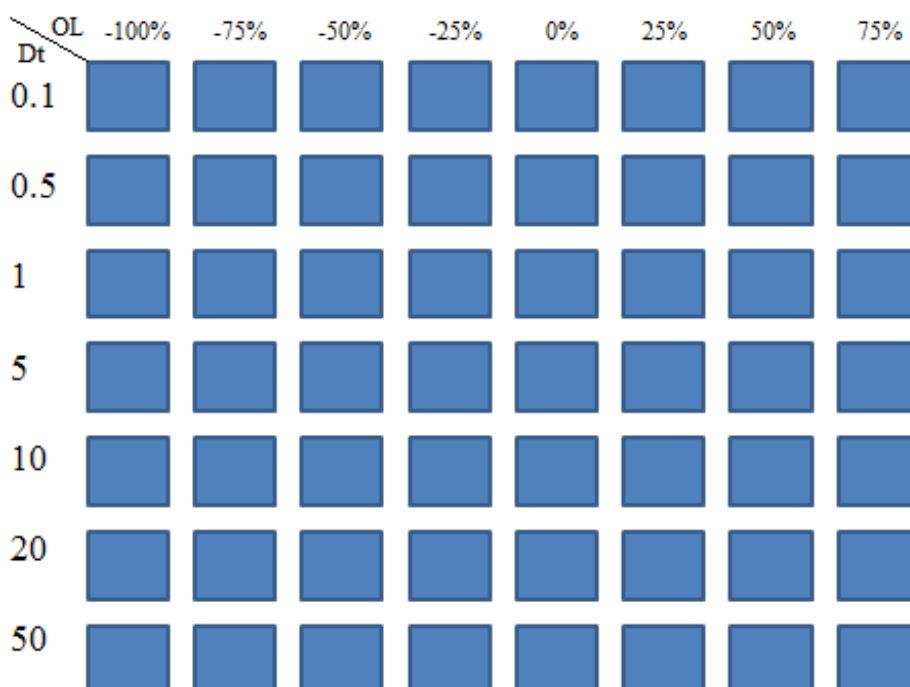
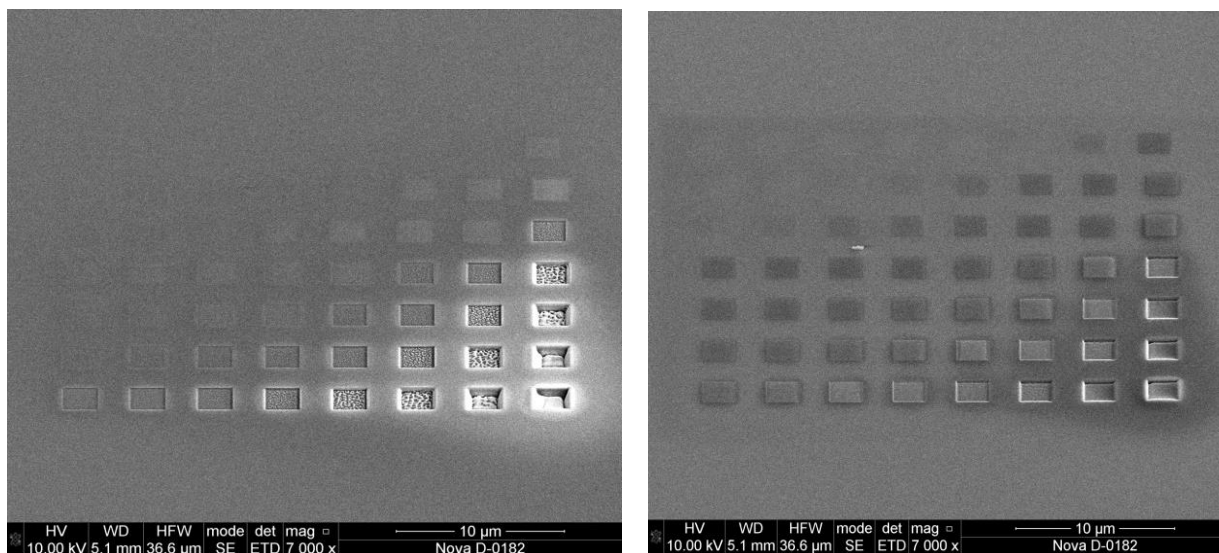


Рисунок 3.5 – Схема структуры шаблона для исследования влияния Dt и OL на ионно-стимулированного осаждения вольфрама и углерода

Для структур, в строках матрицы изменялась степень перекрытия ФИП между двумя точками воздействия (от -100 до 75%). Для структур в столбцах изменялось время воздействия пучка в точке (Dt) (от 0.1 до 50 мкс). Диапазон значений токов ФИП изменялся от 1 до 500 пА. Количество проходов ФИП изменялось (от 3 до 115 шт) в зависимости от тока ФИП для поддержания общего времени локального ионно-стимулированного осаждения структур равного 5 минутам.

После проведения обработки и анализа экспериментальных данных установлено, что локальное ионно-стимулированное осаждение углерода и вольфрама происходило не во всех структурах. При определенных сочетаниях технологических параметров, в частности, при больших значениях I, OL и Dt вместо локального ионно-стимулированного осаждения, наблюдалось ионно-лучевое травление подложки Si, как показано на рисунке 3.6.



а)

б)

Рисунок 3.6 – РЭМ-изображение сформированных структур вольфрама (а) и углерода (б) при токе ФИП 300 пА

Возможным объяснением данного эффекта является удаление адсорбированного на поверхности подложки Si ХАГ вместе с приповерхностными атомами подложки пучком ионов Ga⁺ высокой

плотности, при определенных сочетаниях технологических параметрах ФИП. При этом наблюдается ионно-лучевое травление поверхности подложки вместо осаждения.

Отмечено, что локальное ионно-стимулированное осаждение углерода происходит эффективнее, чем вольфрама, что связано с физико-химическими свойствами ХАГ.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что с уменьшением тока ФИП, эффективность локального ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама смещается в сторону меньших значений области перекрытия и времени воздействия ФИП, что связано с необходимостью повышения плотности тока ФИП для сохранения локального ионно-стимулированного осаждения.

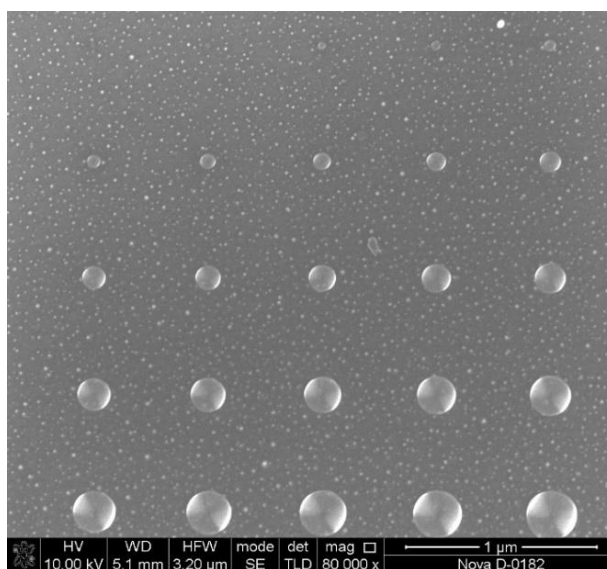
Таким образом, экспериментально определены режимы локального ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама, при которых процессы ионно-стимулированного осаждения преобладают над процессами ионно-лучевого травления и протекают наиболее эффективно. Установлено, что ключевым фактором локального ионно-стимулированного осаждения является плотность тока ФИП.

3.2. Локальное электронно-стимулированное осаждение вольфрама

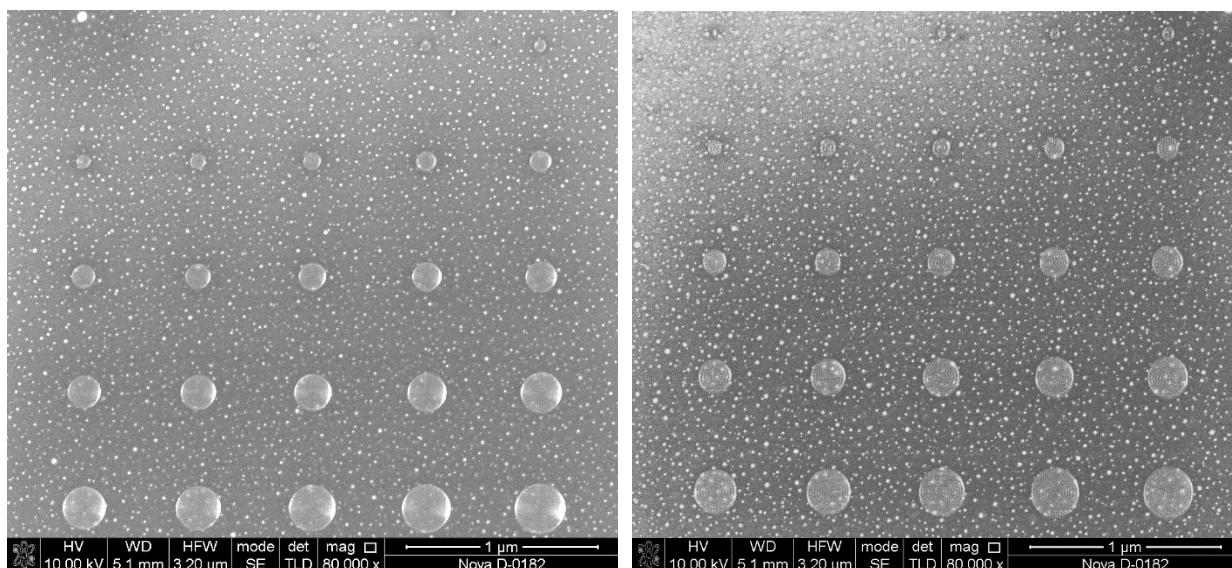
В данном разделе проводились исследования общих закономерностей влияния технологических параметров и режимов электронного пучка на локальное электронно-стимулированное осаждение вольфрама. Исследование роста наноразмерных структур из углерода затруднено из-за конструкции микроскопа и ГИС, не предназначенных для осаждения углерода электронным пучком, а также сложностью точного позиционирования образца и молекулярного потока газа, следовательно, в данной работе результатов по этому направлению представлено не будет.

3.2.1. Исследование точности переноса рисунка шаблона на подложку

В ходе экспериментальных исследований, которые были проведены по методике аналогичной той, что была описана в 3.1.1, применялся аналогичный шаблон, состоящий из 25 окружностей разного диаметра. Осаждение производилось электронным пучком с применением иммерсионной линзы, которая позволяет сфокусировать пучок до минимального диаметра, что является благоприятным фактором при формировании структур менее 100 нм. Основные параметры исследования: ускоряющее напряжение 10 кВ, ток пучка 0,13-2,1 нА, время воздействия пучка в точке (Dt) 10 мс, высота структур, заданных в шаблоне, 500 нм, давление в камере микроскопа (при открытом инжекторе) 2×10^{-3} Па и степень перекрытия пучка (OL) 60 %. Время осаждения всего массива изменялось в соответствии изменению тока пучка и составило: 344 с – 0,13 нА; 93 с – 0,54 нА; 27 с – 2,1 нА. РЭМ изображения полученных наноразмерных структур представлены на рисунке 3.7.



a)



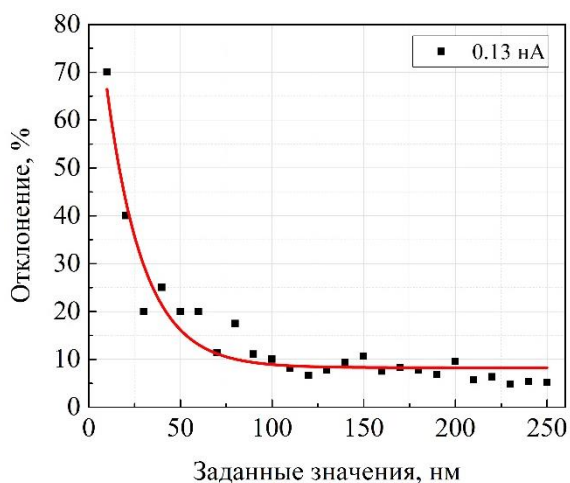
б)

в)

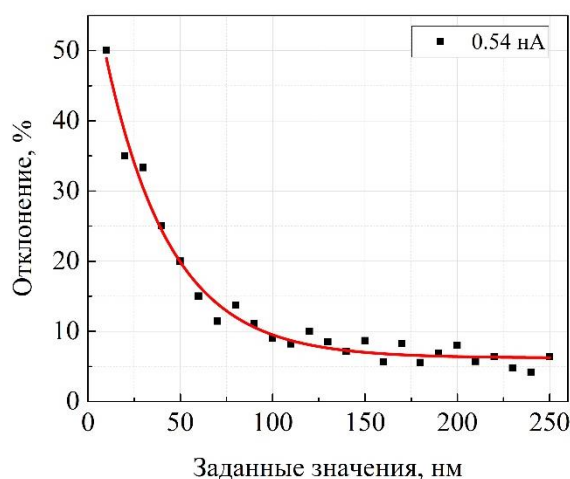
Рисунок 3.7 – РЭМ изображения массивов окружностей, сформированных локальным электронно-стимулированным осаждением вольфрама при токе пучка 0,13 нА (а), 0,54 нА (б), 2,1 нА (в)

Из полученных изображений видно, что осаждение, любым из указанных токов электронного пучка, обеспечивает точный перенос рисунка шаблона на поверхность подложки. Отсутствуют такие искажения формы как рваные края структур и травление в середине полученной окружности, как это наблюдалось при осаждении вольфрама ФИП. Также в первой строке каждого массива имеются все заданные в шаблоне окружности, причем их форма так же не имеет каких-либо неточностей. Единственным видимым различием между полученными массивами является высота структур. Так, с увеличением тока пучка от 0,13 до 2,1 нА уменьшается высота сформированных окружностей, это связано с временем формирования одного массива, которое также уменьшалось.

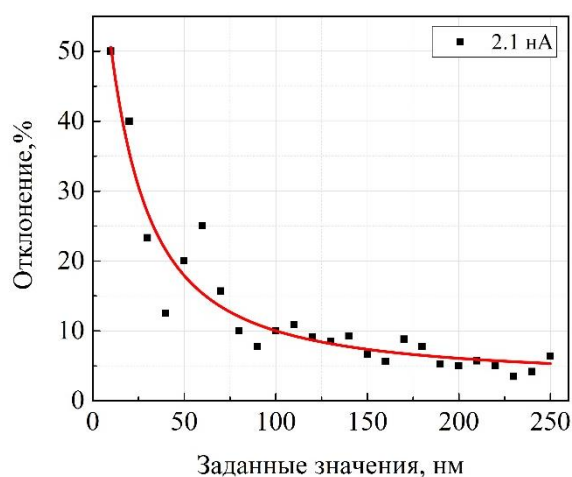
Зависимости отклонения заданного диаметра структур от экспериментально измеренного представлены на рисунке 3.8.



а)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Зависимости отклонения заданного диаметра структур от экспериментально полученного при токе пучка 0,13 нА (а), 0,54 нА (б), 2,1 нА (в)

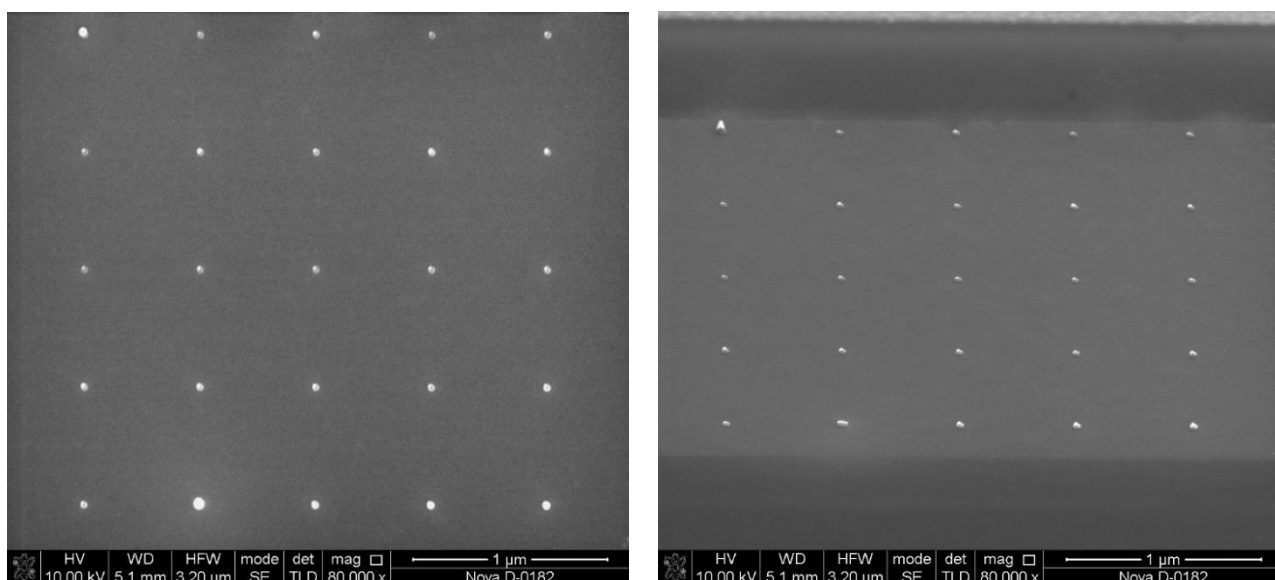
Из анализа графиков следует, что, как и в случае с осаждением ФИП, имеются две области: в первой колебания отклонения являются минимальными, а во второй отклонения имеют, довольно выраженный характер. К первой области относится диапазон заданных значений от 100 до 250 нм, в нем изменение отклонения установленного значения от измеренного не превышает 10 – 15 % и сохраняется на протяжении всего диапазона. Ко второй же области относится диапазон значений менее 100 нм, где уменьшение диаметра окружности вплоть до 10 нм вызывает резкое увеличение процента отклонения, что связано со сложностью получения

минимального диаметра пучка электронов для формирования наноразмерных объектов менее 100 нм, даже с применением иммерсионной линзы, а также с различными физическими эффектами, возникающими при взаимодействии фокусированного электронного пучка с молекулами газа. Но, в основном, значения отклонений являются не такими большими и разнообразными, как при осаждении вольфрама ФИП. Тренд кривой довольно предсказуем и равномерен, что дает возможность по аппроксимации точек прогнозировать экспериментальные результаты.

Для уменьшения значения отклонений при локальном электронно-стимулированном осаждении вольфрама необходимо исследовать такой параметр электронного пучка как время воздействия пучка в точке (Dt).

3.2.2. Исследование влияния времени воздействия пучка в точке на локальное электронно-стимулированное осаждение вольфрама

Для данного исследования в программе управления микроскопом был сформирован шаблон, состоящий из 25 окружностей с различными значениями Dt , со следующими параметрами структур и ФИП: диаметр окружностей 20 нм, высота объектов 500 нм, ускоряющее напряжение 10 кВ, ток пучка 0,54 нА, давление в камере микроскопа $2e-3$ Па, степень перекрытия пучка (OL) 60 % и время воздействия пучка в точке (Dt), изменяющееся в пределах от 0,4 мс (левая верхняя структура) до 10 мс (правая нижняя структура) с шагом 400 мкс. Полученные РЭМ изображения структур представлены на рисунке 3.9.



а)

б)

Рисунок 3.9 – РЭМ изображения структур под углом 0° (а) и 52° (б), полученных с помощью локального электронно-стимулированного осаждения вольфрама, с различными Dt

Из анализа полученных изображений следует, что время воздействия электронного пучка в точке (Dt) никак не влияет на нормальные и латеральные размеры получаемых осадением структур. Зависимость измеренного диаметра от величины Dt показана на рисунке 3.10.

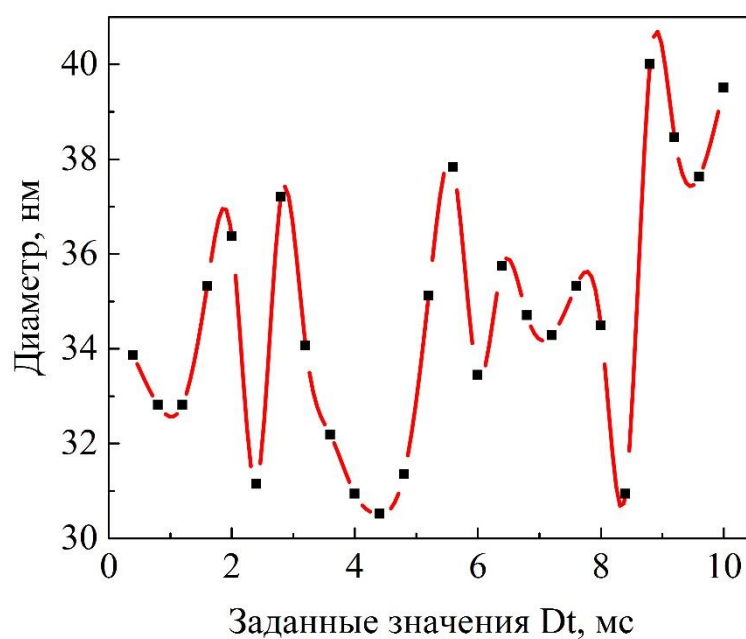


Рисунок 3.10 – Зависимость измеренного диаметра от величины Dt

Измерение же нормальных величин полученных структур затруднено из-за низкой высоты сформированных нанообъектов. Из анализа графика следует, что измеренные значения полученного диаметра окружностей неравномерно и случайно отличаются от заданного в шаблоне и различны для каждой точки исследуемого диапазона величин Dt . Это, скорее всего, связано с определенным уровнем погрешности измерений наноразмерных структур и образованием различных дефектов на некоторых объектах, искажающих истинный результат, из-за физических эффектов взаимодействия ХАГ с потоком электронов при осаждении наноразмерных структур, которые, возможно, связаны с распространением газа до областей воздействия на подложке под различным углом, что наиболее заметно на рисунке 3.9, б. Также, отсутствует какая-либо четкая тенденция или зависимость одних параметров от других, а построение аппроксимирующей кривой является довольно сложной задачей, выполнение которой в итоге приведет к ещё большим неточностям.

Отсутствие какого-либо влияния Dt на геометрические размеры получаемых структур может быть связано с тем, что все поступившие газы-прекурсоры в зону воздействия электронного пучка сразу же разлагаются и осаждаются на поверхность подложки, а дальнейшее воздействие пучка в этой области не позволяет новым молекулам газа вступить в химическую реакцию и образовать связи для продолжения роста, но это также и не вызывает травления, как в случае с осаждением ионным пучком при некоторых параметрах ФИП, из-за недостаточной энергии электронов для распыления поверхности материала.

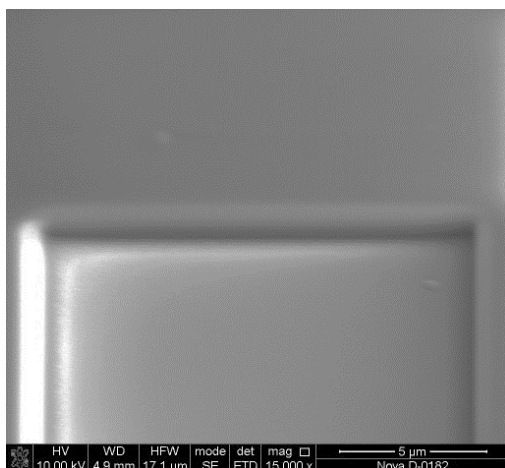
3.3. Локальное ионно-лучевое травление

3.3.1. Разработка методики контроля глубины травления и идентификации границ слоев при травлении ФИП

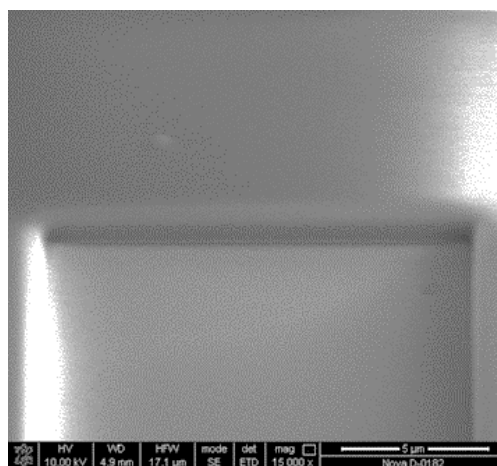
Данное исследование обусловлено необходимостью обработки многослойных подложек, используемых для формирования автоэмиссионных ячеек. Структура состоит из 4 слоев Si/Ni/SiO₂/Ni. Причина выбора именно этих материалов детально описана в разделе 2.2. Во время процесса травления ФИП о значении глубины полученной структуры и текущем материале травления можно узнать только получив РЭМ изображение и выполнив с ним ряд измерений, а затем анализ полученных результатов. Но это не всегда возможно, так как при профилировании поверхности ФИП и формировании, например, углублений менее 1 мкм, измерить глубину структуры не получится, из-за невозможности наблюдения нижней части объекта (дна), связанной с геометрическими параметрами объекта и ограничениями микроскопа. Измерения могут быть выполнены только после заращивания углубления с помощью локального ионно-стимулированного осаждения ФИП, а затем травления по шаблону cross-section, чтобы получить структуру в разрезе. Эти операции займут довольно продолжительное время и потребуют подбора параметров осаждения. Таким образом, необходима методика оценки и контроля глубины травления и определения текущего материала травления ФИП как для больших структур, так и для объектов менее 1 мкм.

Разработанная методика основана на комбинации показаний и анализе данных полученных с пикоамперметра 6485/E (KEITHLEY), который соединен со столиком и держателями образцов растрового электронного микроскопа, и специализированного графика, встроенного в программное обеспечение микроскопа в блоке End Point Monitor, на котором отображается зависимость генерируемого тока от времени.

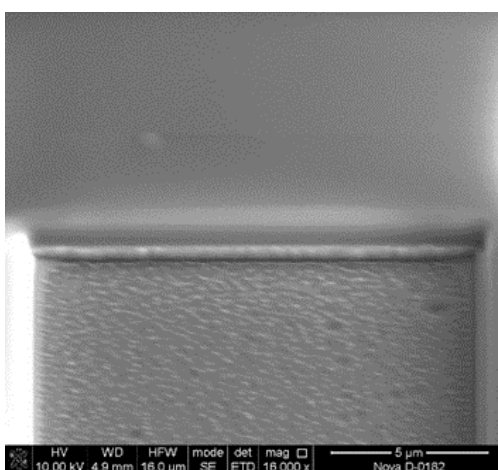
Соответственно, для проверки работоспособности методики в программе управления ФИП был сгенерирован шаблон травления квадрата 10×10 мкм с основными параметрами ионного пучка: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 3 нА, время воздействия пучка в точке 1 мкс (Dt), давление в камере микроскопа $1e-3$ Па и степень перекрытия пучка (OL) 50 %. Во время процесса травления производилась фиксация и анализ полученных значений с пикоамперметра и графика с зависимостью генерируемого тока от времени. Таким образом, в начальный момент времени показания на пикоамперметре были равны 0, затем с увеличением времени травления произошел скачок тока до 2,7 нА, что свидетельствует о профилировании первого слоя Ni и увеличению количества генерируемых носителей заряда металлом, а далее значение тока плавно снизилось до 2,3 нА (Рисунок 3.11, а), что соответствует травлению диэлектрического слоя. Дальнейшее увеличение глубины травления способствует постепенному росту тока, в данном случае до 7,1 нА, что соответствует удалению слоя SiO_2 и началу бомбардировки ускоренными



а)



б)



в)

Рисунок 3.11 – РЭМ изображения и соответствующие им значения генерируемого тока, измеренного пикоамперметром, основных этапов травления ФИП

ионами второго металлического слоя Ni. Затем значение тока плавно снижается до 6,2 нА и остается постоянным до следующего слоя, в связи с полностью очищенной поверхностью Ni от диэлектрика (Рисунок 3.11, б). Дальнейшее изменение тока на пикоамперметре вызвано уменьшением

толщины металла и переходом травления на Si слой, при этом значении тока равно 5,5 нА и слабо изменяется с течением времени (Рисунок 3.11, в).

Также, все токовые изменения были отображены на графике рисунка 3.12, на котором видна зависимость генерируемого тока подложкой от времени, и,

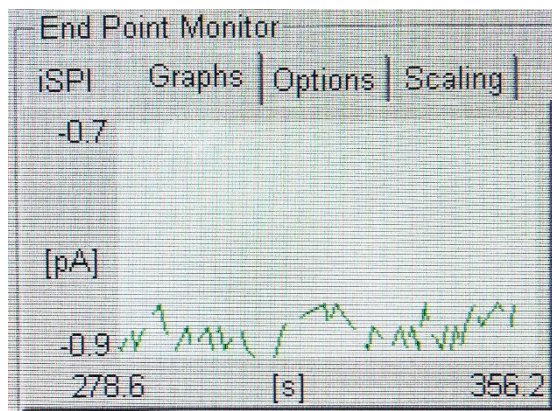


Рисунок 3.12 – Зависимость генерируемого тока подложкой от времени воздействия ФИП

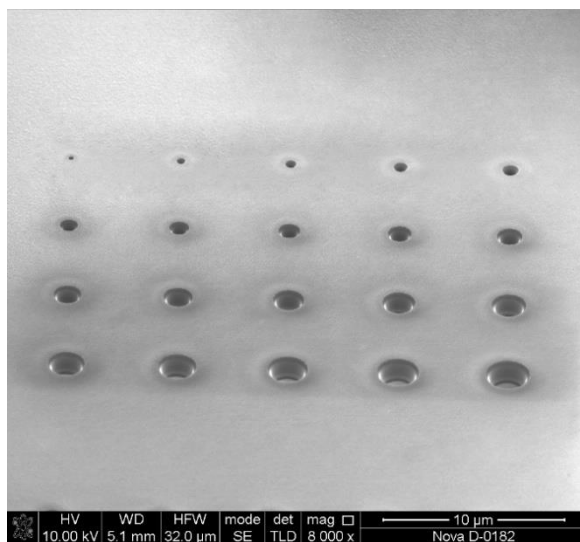
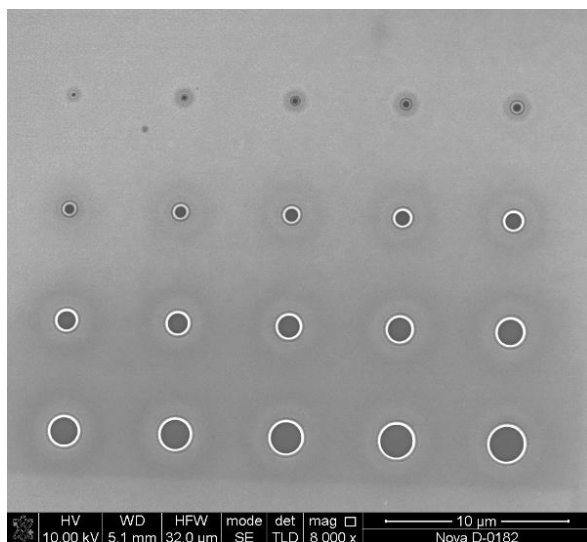
следовательно, по полученной кривой можно определить какой материал травится в данный момент, например, пику соответствует увеличение тока вследствие вскрытия слоя металла, как было представлено выше на показаниях пикоамперметра.

Таким образом, данная методика является вполне работоспособной и позволяет выполнить оценку и контроль глубины травления и определить момент перехода между соседними слоями при травлении ФИП.

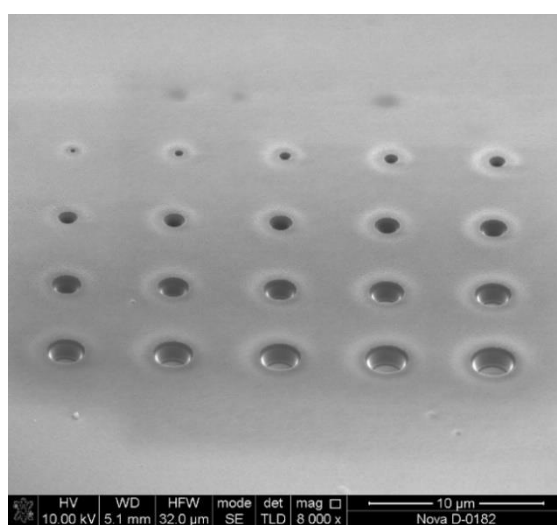
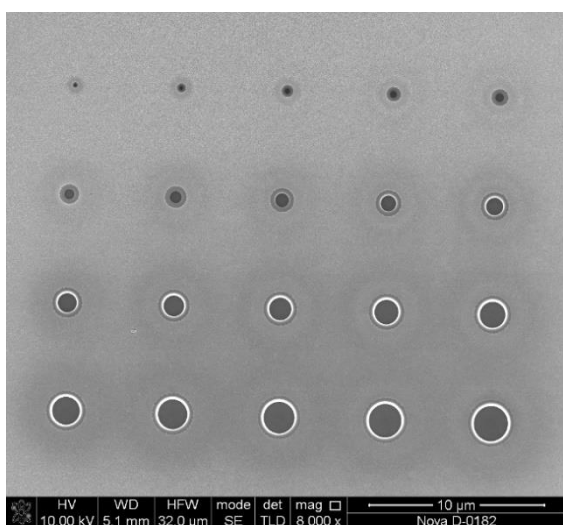
3.3.2. Исследование точности переноса рисунка шаблона на подложку

Так как, для формирования автоэмиссионной ячейки потребуется использовать травление ФИП, то необходимо исследовать точность переноса рисунка шаблона на подложку. Для этого в программе управления ионным пучком был сгенерирован шаблон, состоящий из 20 окружностей с различными диаметрами, изменяющимися в диапазоне от 0,1 мкм (левая верхняя структура) до 2 мкм (правая нижняя структура) с шагом 100 нм. Основные параметры ФИП:

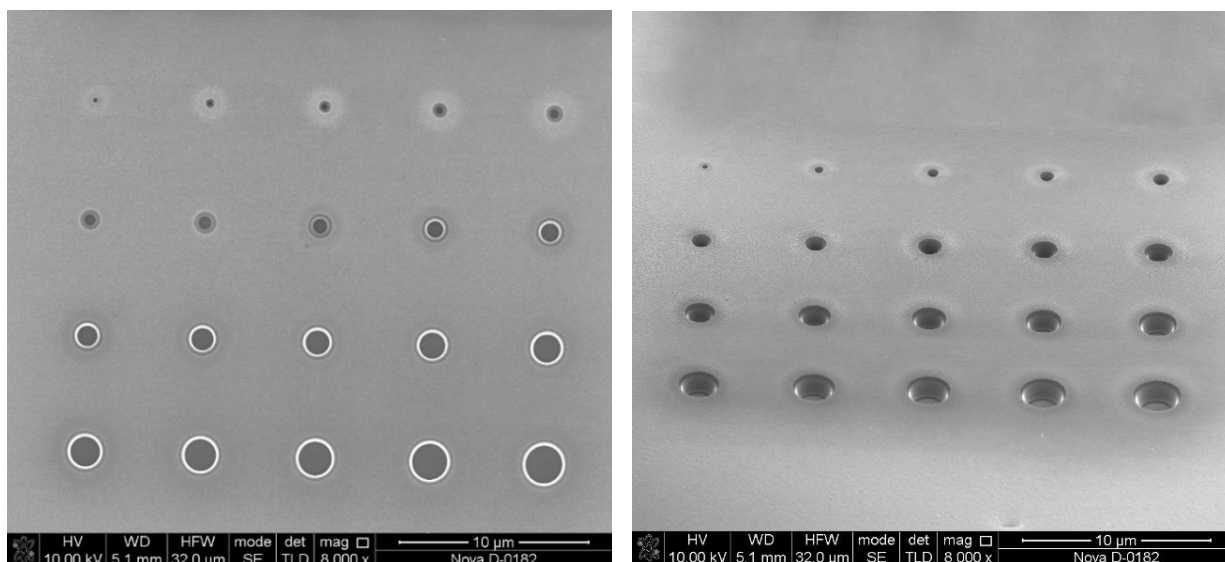
ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 0,1-0,5 нА, время воздействия пучка в точке (Dt) 1 мкс, давление в камере микроскопа $1e-3$ Па и степень перекрытия пучка (OL) 50 %. Время травления одного массива и изменение генерируемого тока подложкой при токах ионного пучка 0,1 нА, 0,3 нА и 0,5 нА соответственно равны: 1291 с. и 0,1-0,28 нА, 420 с. и 0,27-0,79 нА, 240 с. и 0,47-1,28 нА. РЭМ изображения полученных структур представлены на рисунке 3.13. Стоит отметить, что все исследования проводились для структур с одинаковой полученной высотой, равной около 1,3 мкм.



а)



б)



в)

Рисунок 3.13 – РЭМ изображения массива структур после травления с током ФИП 0,1 нА (а), 0,3 нА (б) и 0,5 нА (в) под углом 0° и 52°

Из анализа РЭМ изображений видно, что экспериментально полученные структуры имеют растрав поверхности вблизи окружности, который наиболее заметен на изображении под углом, и угол боковой поверхности углублений отличный от 90° . Это обусловлено тем, что ФИП имеет довольно сложную форму пучка, которую можно описать законом нормального распределения или функцией Гаусса (Рисунок 3.14). В связи с этим профиль травления подложки сильно отличается от заданного в шаблоне и имеет указанные неточности при переносе рисунка шаблона на подложку.

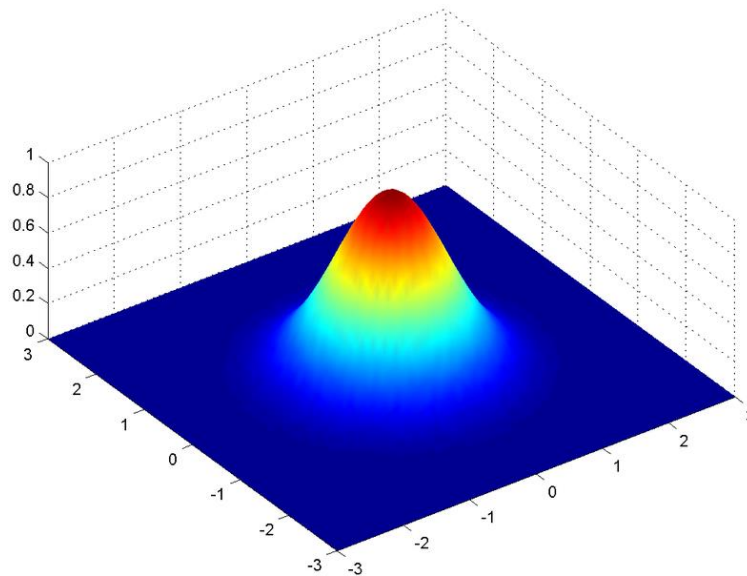
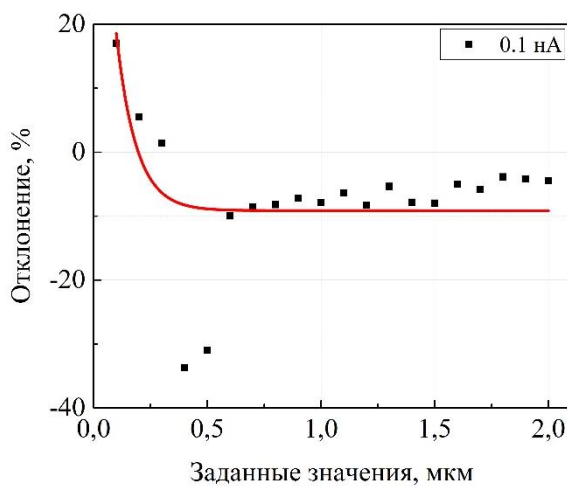
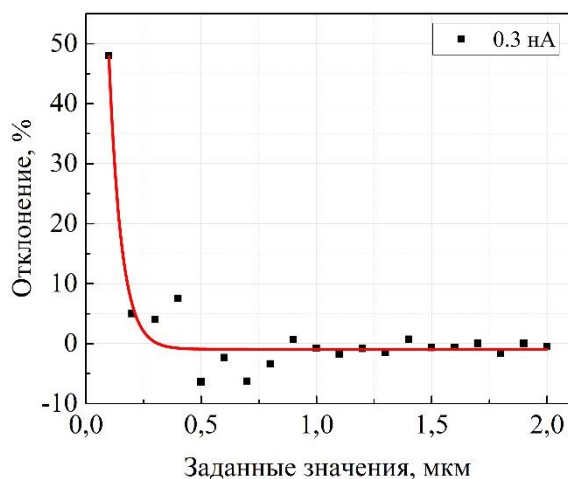


Рисунок 3.14 – Форма ионного пучка, описанная через функцию Гаусса

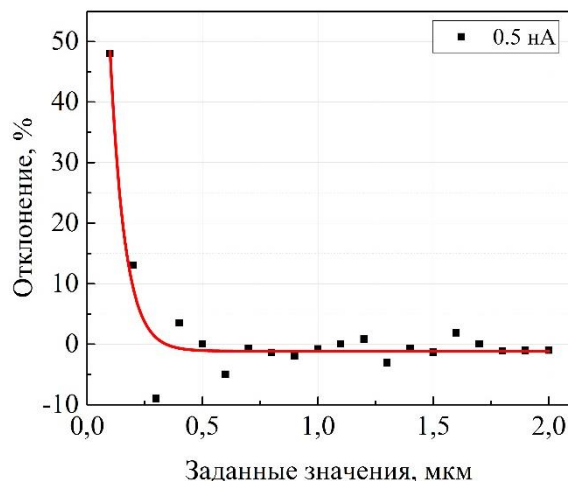
В связи с этим для построения зависимостей отклонения, заданных величин в шаблоне от полученных значений экспериментально, в качестве измеренного значения диаметра структуры будет использован результат измерения внутренней окружности, полученной на дне вытравленного объекта, так как она является той плоскостью, на которой в дальнейшем будет выращиваться автоэмиссионный катод и, именно она определяет полезную площадь необходимую для формирования эмиттера. Таким образом, были построены зависимости отклонения заданной величины от практически полученной для внутреннего диаметра окружности, представленные на рисунке 3.15.



а)



б)



в)

Зависимости отклонения заданного диаметра структур от экспериментально полученного при токе ФИП 0,1 нА (а), 0,3 нА (б), 0,5 нА (в)

Из полученных зависимостей следует, что, в целом, процент отклонений имеет не слишком большие значения и их разброс. Экспоненциальная зависимость вызвана наличием крайних точек, таких как 100 нм, которые немного искажают реальную картину и вызывают некоторые неточности при переносе рисунка шаблона на подложку. Как и в предыдущих исследованиях, это связано с физическими ограничениями ФИП при формировании структур 100 нм и менее. Также, на графике имеются две области, от 0 до 500 нм и от 500 до 2 мкм, которые, как и в случае с осаждением ФИП, объясняются теми же базовыми физическими представлениями об ионном пучке. Таким образом, для формирования структур с размерами менее 500 нм предпочтительнее использовать ток ФИП равным 0,1 нА так как в данной области он обеспечивает наиболее точный перенос рисунка шаблона на поверхность подложки, а также для некоторых значений диаметра возможно получение меньших измеренных величин, что может быть актуально для создания элементов нанoeлектроники. Для формирования же структур больше 500 нм оптимальным является ток ФИП 0,5 нА, так как, при схожем разбросе

процента отклонения с данными, полученными на графике для тока 0,3 нА, он обеспечивает меньшее время травления.

3.3.3. Исследование влияния тока ФИП и времени воздействия пучка в точке на отклонение боковой поверхности углублений от нормали при локальном ионно-лучевом травлении поверхности

Как было показано на рисунке 3.13 профиль травления ФИП подложки сильно отличается от заданного в шаблоне и имеет отклонение внутренних стенок углублений от нормали к поверхности. Так как угол наклона боковой поверхности эмиссионной ячейки является одним из основных параметров, влияющих на напряженность поля на вершине эмиттера, то, следовательно, необходимо провести исследование влияния основных параметров ФИП, к которым относится ток пучка и время воздействия пучка в точке (Dt), на отклонение стенок углублений от нормали. Таким образом, из результатов предыдущего исследования были получены значения разницы диаметров для всех структур, которые отображены на рисунке 3.16 в соответствие применяемому току ФИП при травлении массивов и заданному значению диаметра окружности в шаблоне.

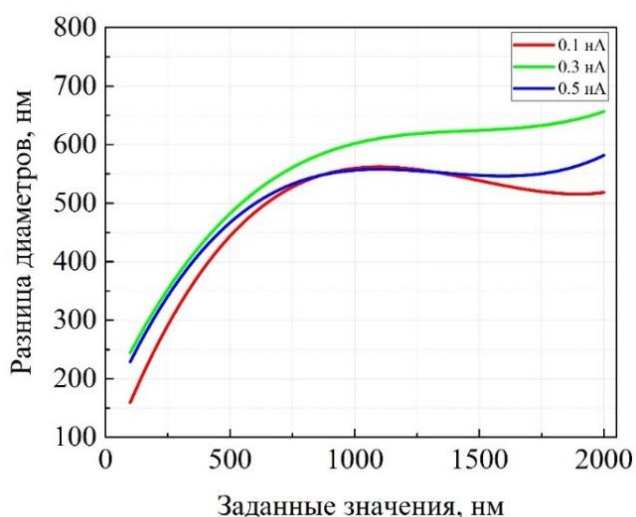


Рисунок 3.16 – Зависимость разницы внешнего и внутреннего (на дне) диаметра от заданных значений в шаблоне при различных токах травления ФИП

Из анализа полученного графика следует, что отклонение боковой поверхности углублений от нормали, выраженное через разницу диаметров, имеет две области: область, практически, линейной зависимости и область некоторого насыщения. Насыщение наступает при значении заданной величины около 700 нм и объясняется результатами отклонений, полученных на рисунке 3.15. Видно, что оптимальным током для формирования углублений, сочетающим в себе скорость травления и схожие значения отклонения боковой поверхности углублений от нормали с током 0,1 нА, является ток 0,5 нА. Травление с током 0,1 нА может быть использовано для наиболее прецизионных применений ФИП, но в таком случае время формирования структур будет дольше.

Расположение кривой для тока 0,3 нА выше, чем 0,5 нА, скорее всего, связано с тем, что время формирования массива структур при токе 0,5 нА меньше, чем при 0,3 нА, это необходимо для поддержания одинаковой глубины травления, и, следовательно, травление одного объекта тоже, соответственно, растрав, связанный с формой ионного луча, не такой сильный, как у структур полученных с током 0,3 нА, за меньшее время он не успевает достичь больших значений и, также, разница диаметров вследствие этого

увеличивается. Можно предположить, что при одинаковом времени травления массива структур равным 420 с (как это было для тока 0,3 нА) будет наблюдаться несколько иной результат, скорее всего, значения разницы диаметров для 0,5 нА будут выше из-за большей величины применяемого тока ФИП и эффекта, описанного на рисунке 3.14.

Влияние времени воздействия пучка в точке (Dt) на отклонение боковой поверхности углублений от нормали оценивалось при помощи специально сформированного шаблона, который включает в себя 20 окружностей с изменяющимся Dt в диапазоне от 400 нс до 8 мкс с шагом 400 нс с основными параметра ФИП: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 0,5 нА, давление в камере микроскопа $8e-4$ Па, степень перекрытия пучка (OL) 50 %, диаметр и высота окружности в шаблоне 0,8 мкм. РЭМ изображение и зависимость Dt от полученной разности диаметров структур представлены на рисунке 3.17.

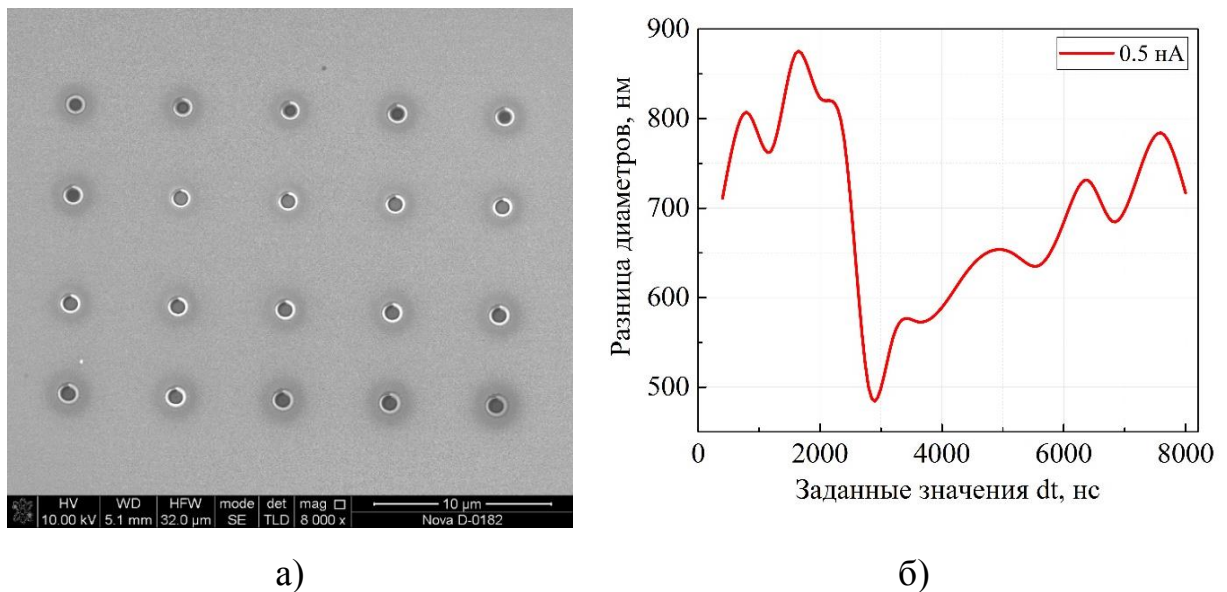


Рисунок 3.17 – РЭМ изображение структур с различными Dt (а) и зависимость влияния Dt на отклонение боковой поверхности углублений от нормали (б)

Из полученной зависимости видно, что график имеет резкий спад на значении Dt равном 2,9 мкс при этом разница диаметров составляет 480 нм, что является минимальным значением в исследуемом диапазоне, которому отвечает наименьшее отклонение боковой поверхности углубления от

нормали. При этом внутренний диаметр (на дне) структуры на данном значении Dt равен 680 нм, в соответствии с зависимостью, полученной на рисунке 3.18, при заданном в шаблоне 800 нм.

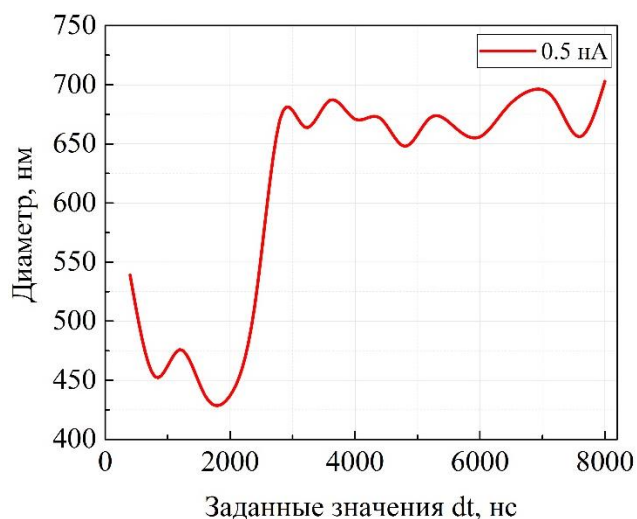


Рисунок 3.18 – Влияние Dt на внутренний диаметр получаемых структур

Полученное значение Dt позволяет повысить точность переноса рисунка шаблона на поверхность профилируемой подложки и увеличить полезную площадь необходимую для формирования автоэмиссионного катода.

3.4. Основные выводы по главе

Таким образом, в данной главе были проведены экспериментальные исследования степени влияния основных технологических параметров ФИП и электронного пучка, к которым относятся: ток пучка, время воздействия в точке (Dt), количество проходов, степень перекрытия пучка (OL), а также ряд характеристик шаблона и параметров системы перемещения пучка, на геометрические характеристики получаемых наноразмерных структур. Представлены результаты в виде зависимостей, на основе которых сделаны выводы и произведены оценки. Полученные экспериментальные данные будут использованы в главе 4 для формирования автоэмиссионных ячеек с оптимальными геометрическими параметрами.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФИП И ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУЧЕННЫХ СТРУКТУР

Результаты данной главы позволят оценить применимость и перспективность метода ФИП при формировании различных конструкций автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером и элементов вакуумной наноэлектроники. Будут представлены результаты по технологии формирования описанных выше структур, основным параметрам ФИП при локальном ионно-стимулированном осаждении и ионно-лучевом травлении поверхности подложки, а также вольт-амперные характеристики полученных элементов наноэлектроники.

4.1. Исследование толщин сформированных слоев и нанесение маркерных знаков

Как было отмечено ранее в разделе 2.2., для автоэмиссионной ячейки предпочтительнее всего использовать, в случае с вакуумным диодом, четырехслойную подложку, состоящую из Si/Ni/SiO₂/Ni. Таким образом, на первом этапе исследования необходимо оценить толщины сформированных технологических слоев.

Исследование подложки проводилось при помощи травления ФИП стандартным шаблоном cross-section, сгенерированным в программе управления ионным пучком. Основные параметры ФИП: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 0,5 нА, время воздействия пучка в точке 1 мкс, давление в камере микроскопа 1e-3 Па и степень перекрытия пучка (Overlap) 50 %. РЭМ изображение с измеренными толщинами слоев представлено на

рисунке 4.1. Таким образом, толщина катодного, диэлектрического и анодного слоев, соответственно равны 440 нм, 1 мкм и 190 нм.

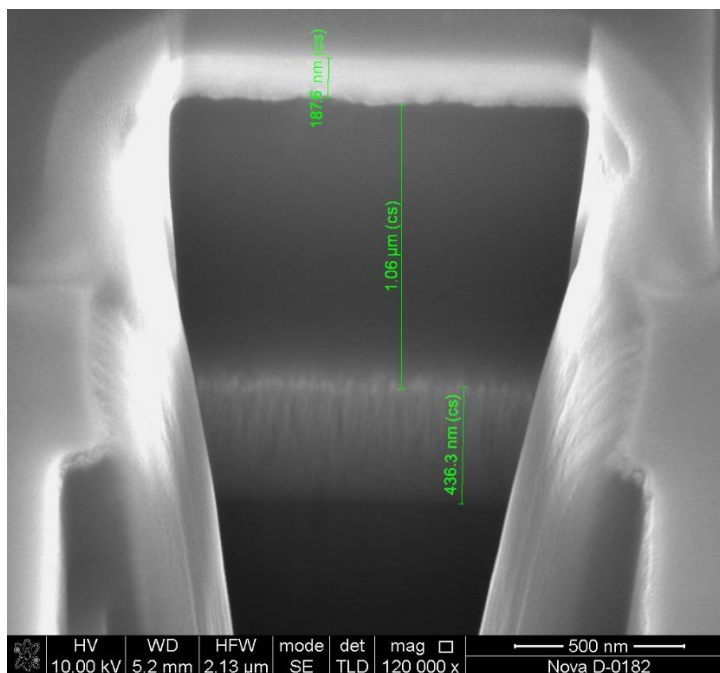


Рисунок 4.1 – РЭМ изображение слоев экспериментальной подложки

Полученные значения для Ni-ых электродов немного отличаются от применяемых в теоретическом исследовании, но, исходя из результатов моделирования, эта разница практически не повлияет на изучение электрических характеристик ячеек и ВАХ автоэмиссионного диода.

Также, необходимо нанести маркерные знаки на поверхность подложки для совмещения с технологическими процессами традиционной микроэлектроники и обеспечения возможности дальнейшего нахождения структуры для её исследования. Маркерные знаки были сформированы методом ионно-лучевого травления ФИП при максимальном токе пучка равным 20 нА и ускоряющем напряжении 30 кВ. РЭМ изображение профилированной подложки представлено на рисунке 4.2.

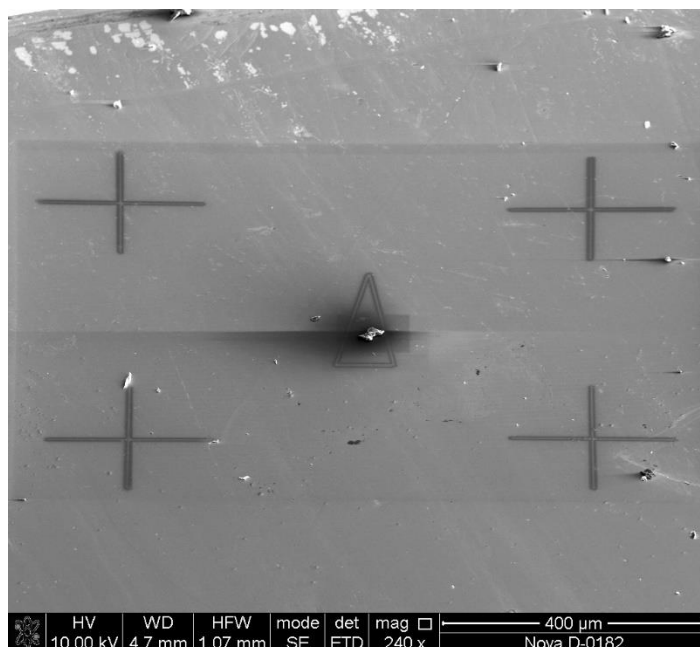


Рисунок 4.2 – РЭМ изображение маркерных знаков на поверхности исследуемой подложки

4.2. Формирование отдельного, вертикально ориентированного автоэмиссионного катода

В данной работе разработано несколько конструкций и технологий формирования автоэмиссионных ячеек. Первой и самой простой из всех является конструкция отдельного, вертикально ориентированного автокатаода, выращенного методом локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама, на основе результатов, полученных в главе 3. РЭМ изображение полученной структуры представлено на рисунке 4.3. Стоит также отметить, что для большего уменьшения радиуса заострения вершины сформированного автоэмиссионного катода было применено локальное ионно-лучевое травление ФИП по шаблону, представленному на рисунке 4.4, который содержал несколько окружностей, имеющих помимо внешнего ещё и внутренний диаметр. Это позволяет производить травление, затрагивающее не всю область структуры, а только точно выбранную, что в итоге приводит к заострению автокатаода. Таким образом, удалось сформировать эмиттер с

радиусом закругления вершины равным около 20 нм и углом наклона боковой поверхности автокатода около 5 °.

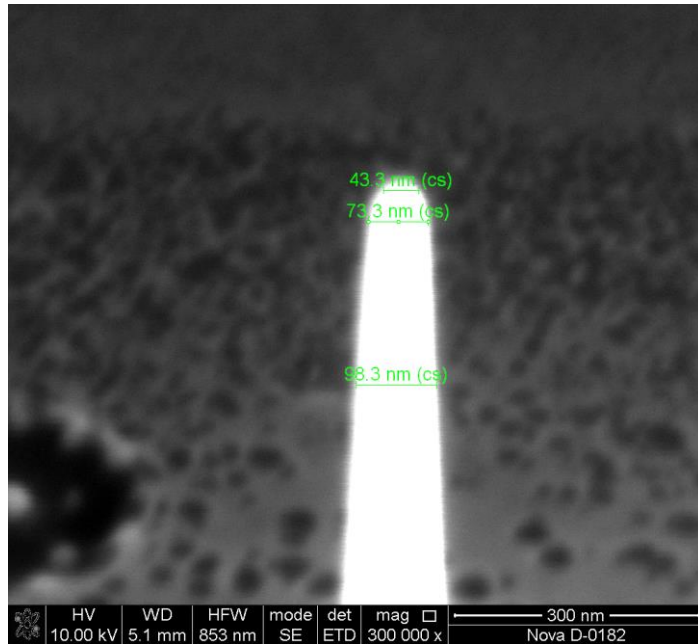


Рисунок 4.3 – РЭМ изображение отдельного, вертикально ориентированного автоэмиссионного катода

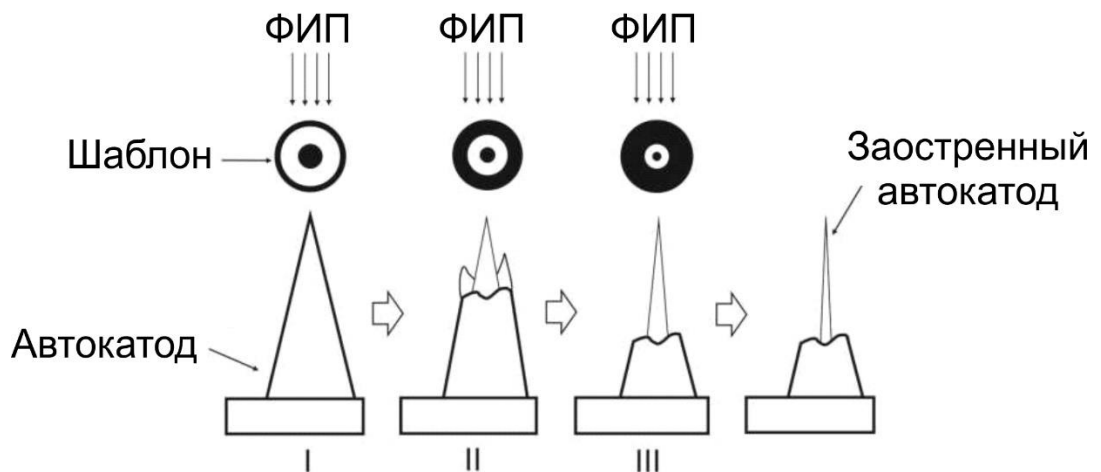


Рисунок 4.4 – Схема шаблона травления ФИП

Следующим этапом исследования данной конструкции автоэмиссионной ячейки является измерение ВАХ. Исследование эмиссионных характеристик сформированной структуры производилось с использованием сканирующего зондового микроскопа Ntegra Vita (ЗАО «НТ-МДТ», Россия) по схеме, представленной на рисунке 4.5.

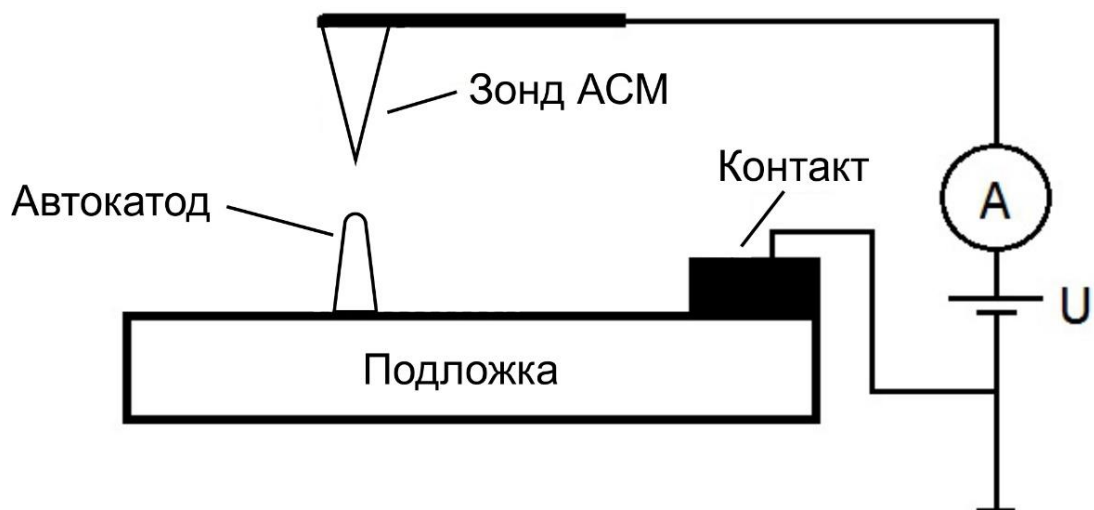


Рисунок 4.5 – Схема измерения ВАХ автокатода

В ходе проведения измерений проводящий АСМ зонд с покрытием W_2C , являющийся анодом, подводился к эмиттеру на расстояние 1 мкм, после чего измерялась ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до 10 В. Нижним контактом или катодом являлся слой никеля на поверхности подложки, соединенный с общей схемой посредством прижимной “лапки” (на схеме контакт), специально предназначенной для этих целей. Анализ измеренной ВАХ (Рисунок 4.6) показывает наличие нелинейного участка характерного для автоэлектронной эмиссии.

Значение порогового напряжения эмиссии составляет $\sim 0,5$ В. При напряжении катод-анод равном 10 В ток автоэлектронной эмиссии составляет 1,8 нА. Приложение большего напряжения затруднительно в данной схеме измерения, так как связано с ограничениями установки АСМ. Использование массивов автоэлектронных эмиттеров позволит пропорционально увеличить плотность эмиссионного тока, что расширит сферу применения приборов на их основе.

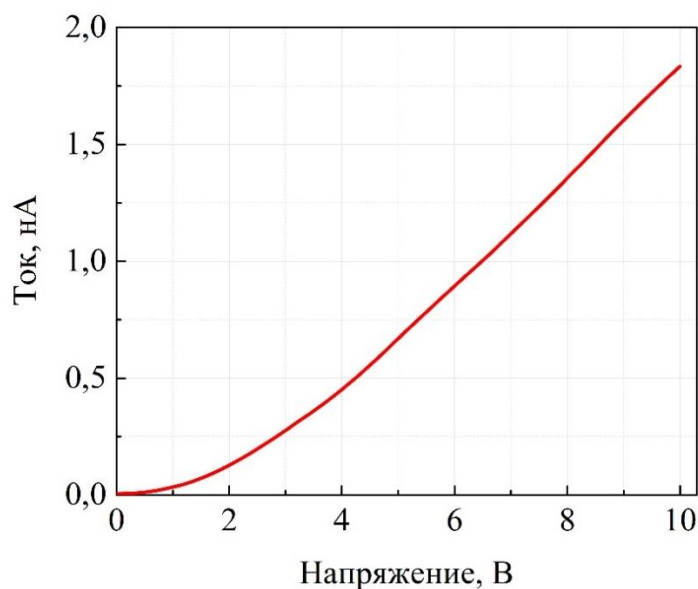


Рисунок 4.6 – Результаты измерения ВАХ автокатода

4.3. Формирование автоэмиссионной ячейки с эмиттером, сформированным методом ионно-стимулированного осаждения

4.3.1. Исследование глубины залегания ионов Ga^+ при формировании автоэмиссионной ячейки

Следующей, разработанной в данной ВКР конструкцией автоэмиссионной ячейки является структура, в которой автокатод выращен на дне углубления с применением комбинации методов травления и осаждения ФИП.

Перед формированием данного типа ячейки необходимо оценить глубину залегания ионов галлия в приповерхностный слой боковой стенки структуры при травлении углубления. Так как, в используемом двухлучевом микроскопе для генерации ионов используется жидкометаллический источник, то при применении технологии ФИП может происходить шунтирование электродов, разделенных диэлектрическим слоем, за счет образования тонкого поверхностного металлического проводящего канала после травления. В таком случае, кривая полученной ВАХ будет отображать

результат и выполнение обычного закона Ома.

Для расчета профилей распределения имплантированных ионов Ga^+ в материале могут применяться различные методы. Широкое распространение получил метод стохастического моделирования на основе алгоритма Монте-Карло. В настоящей работе для численного моделирования параметров взаимодействия ионов с подложкой методом Монте-Карло применялся программный пакет SRIM\TRIM 2008 для воздействия 5000 ионов галлия под углом $89,9^\circ$, что соответствует, практически, параллельности ионного луча и боковой стенки ячейки. Такое количество ионов обусловлено выбором оптимального соотношения времени машинного расчета и достоверности полученных данных. Результатом моделирования является график распределения ионов по их глубине залегания в материале травления SiO_2 (Рисунок 4.7).

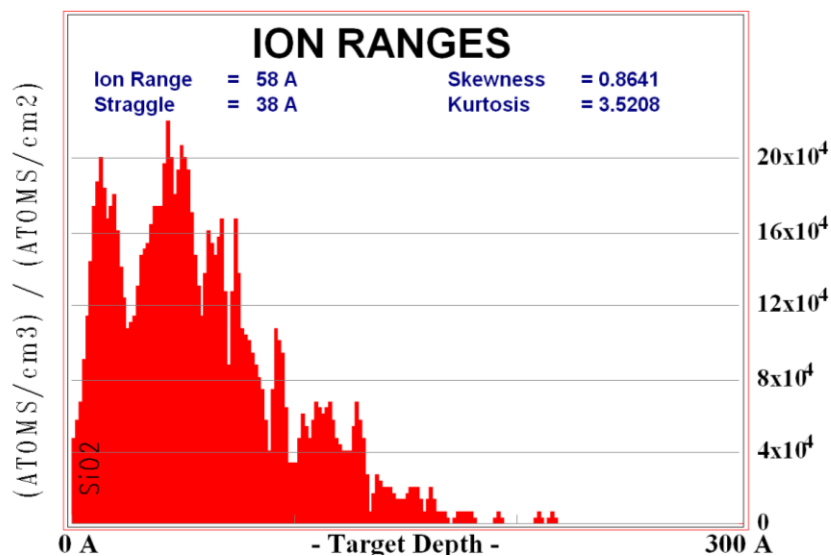


Рисунок 4.7 – Профиль распределения имплантированных ионов Ga^+ в материале SiO_2

Из анализа графика видно, что, в основном, имплантирование ионов в материал, находящийся под углом $\sim 90^\circ$, происходит на глубину от 0 до 10 нм с пиком залегания в ~ 4 нм и количеством отраженных ионов равным 4224 (84.5%).

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод о том, что образование тонкого проводящего приповерхностного канала между

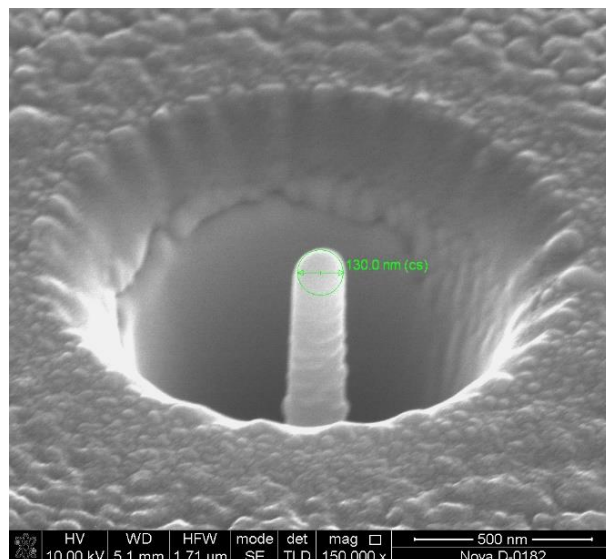
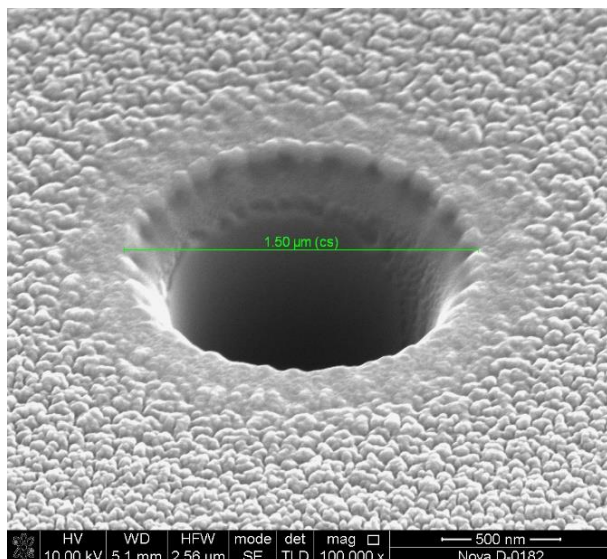
электродами автоэмиссионной ячейки, разделенными диэлектрическим слоем, при травлении ФИП маловероятно, за счет низкого и неравномерного значения глубины внедрения ионов в материал и значительного количества отраженных ионов, вследствие их большого угла падения на поверхность.

4.3.2. Формирование автокатода в углублении

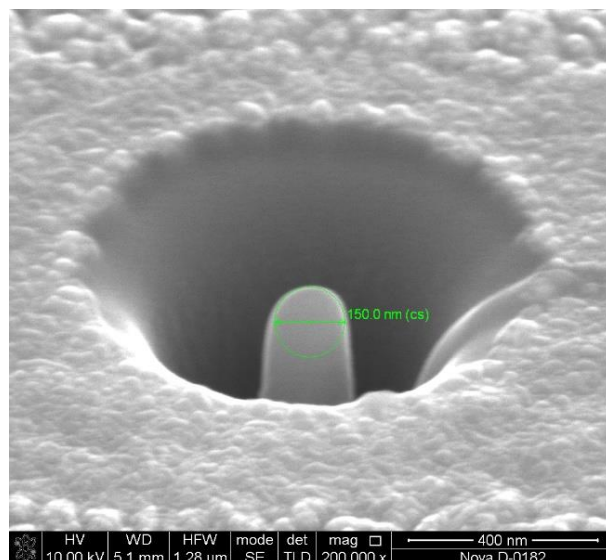
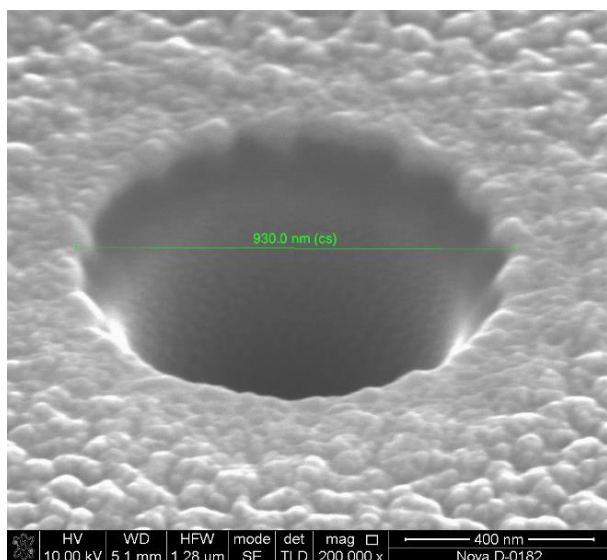
Формирование автоэмиссионной ячейки с эмиттером, выращенным на дне углубления, производилось в два этапа. Сначала методом локального ионно-лучевого травления ФИП было получено само углубление, а затем с использованием ионно- и электронно-стимулированного осаждения на дне структуры выращивался автокатод. Формирование ячейки производилось на основе данных, полученных в главе 3 для параметров шаблона и ФИП. РЭМ изображения полученных автоэмиссионных ячеек представлены на рисунке 4.8.

Так, при формировании углубления для осаждения W эмиттера ФИП (Рисунок 4.8, а), минимально возможным диаметром ячейки является значение 1,5 мкм, что в соответствие с зависимостью, представленной на рисунке 3.15, позволяет найти величину диаметра на дне ячейки, равную ~ 1 мкм. Формирование структур с меньшим значением диаметра ячейки невозможно, так как это связано с полным зарастанием углубления материалом осаждения, вызванным иной физикой распространения и взаимодействия ХАГ с ионным лучом в субмикронных объектах. Для автокатода из С (Рисунок 4.8, б) и W (Рисунок 4.8, в), сформированного ФИП и электронным пучком, соответственно, удалось достичь значения диаметра ячейки 930 нм, что равно ~ 500 нм на дне структуры. Высота полученного эмиттера, как и высота ячейки для всех случаев составляла около 1,3 мкм. Время осаждения острий из W и С ФИП, соответственно равно, 84 с. и 28 с., а электронным пучком 45 с. Радиус заострения вершины автоэмиссионного катода для структур на рисунке 4.8 составляет 65 нм, 75 нм и 5 нм, в соответствие подписям к РЭМ изображениям.

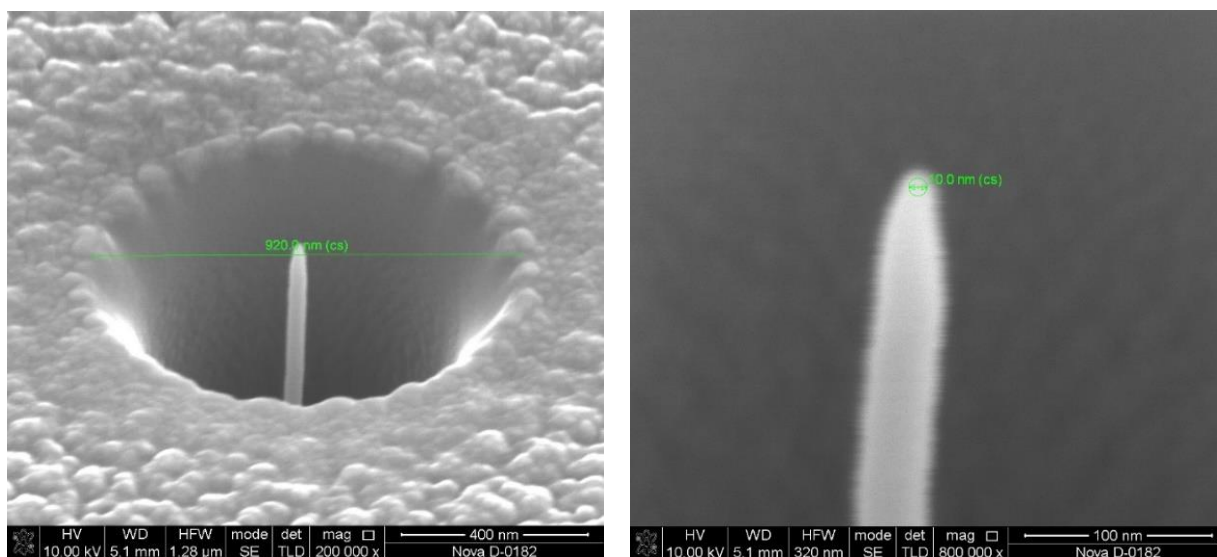
Также видно, что при осаждении автокатаода из углерода обнаруживается негативный фактор, связанный с переосаждением материала на стенках ячейки, что приводит к шунтированию электродов и отсутствию автоэлектронного эффекта.



a)



б)



в)

Рисунок 4.8 – РЭМ изображения сформированных автоэмиссионных ячеек методом ФИП с вертикально ориентированным эмиттером из W (а) и С (б), а также электронным пучком с автокатодом из W (в)

Стоит также отметить, что уменьшение радиуса заострения вершины эмиттера по схеме, представленной на рисунке 4.4, невозможно, так как распыляемый ионным пучком материал в таком замкнутом объеме будет переосаждаться на стенках ячейки, что непременно приведет к короткому замыканию всей структуры.

Измерение вольтамперных характеристик вакуумной автоэмиссионной ячейки производились на установке Analytical Submicron Prober EM-6040A при помощи системы измерения параметров полупроводников KEITHLEY 4200-SCS.

Один зонд, находящийся под положительным потенциалом, был размещен на верхнем Ni слое, другой на контактной площадке, полученной ионно-лучевым травлением ФИП на нижнем слое никеля, на которую подавалось отрицательное смещение. Измерение ВАХ происходило в диапазоне от 0 до 30 В. Результаты измерения представлены на рисунке 4.9.

Из анализа кривой следует, что пороговое напряжение начала эмиссии для данного типа конструкции и технологии формирования автоэмиссионных ячеек составляет около 5 В. При межэлектродном напряжении равном 30 В ток

автоэлектронной эмиссии составляет 300 нА.

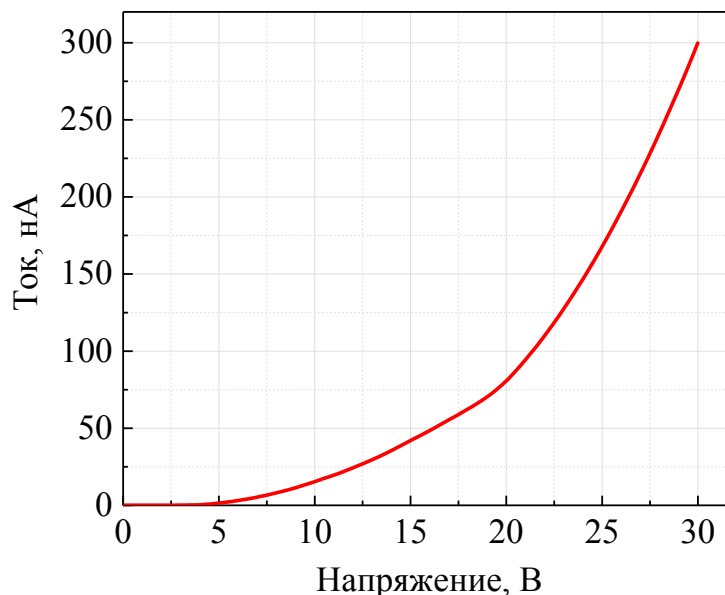
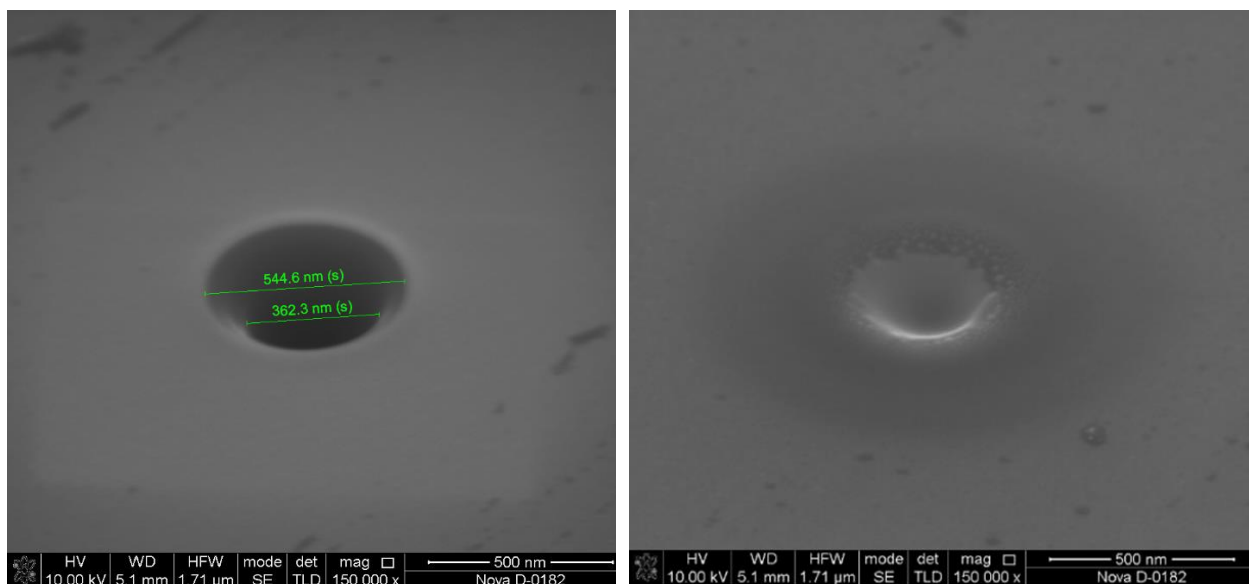


Рисунок 4.9 – ВАХ автоэмиссионной ячейки с вертикально ориентированным эмиттером, выращенным на дне углубления

4.4. Формирование закрытой автоэмиссионной ячейки

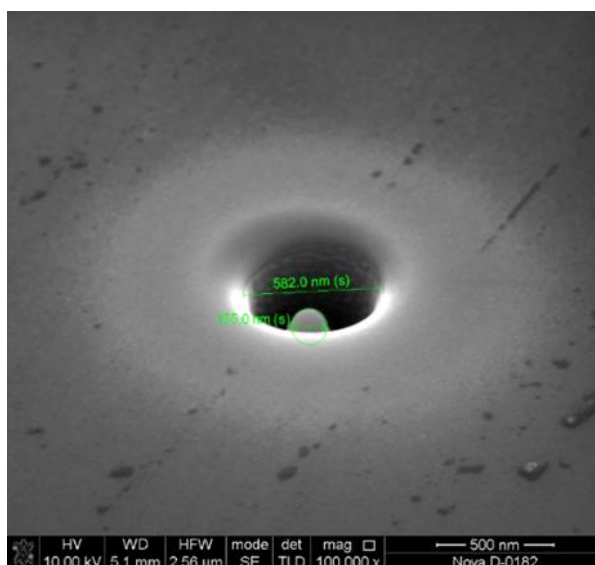
Дальнейшее снижение значения межэлектродного расстояния, за счет уменьшения диаметра ячейки, может быть достигнуто с применением следующей технологии формирования автоэмиссионной ячейки.

На первом этапе было получено углубление высотой около 1,3 мкм и диаметром 360 нм (Рисунок 4.10, а). Параметры шаблона и ФИП были выбраны на основании результатов, полученных в главе 3. Далее сформированная структура была заращена с применением локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама ФИП (Рисунок 4.10, б).



а)

б)



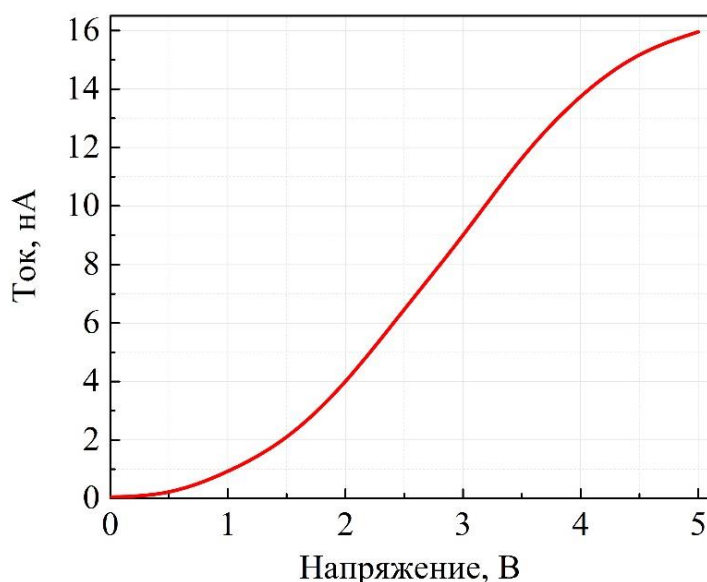
в)

Рисунок 4.10 – РЭМ изображения процесса формирования автоэмиссионной ячейки с эмиттером, полученным из заращенного углубления: травление углубления (а); заращивание углубления (б); формирование итоговой структуры (в)

Затем, в системе управления ионным пучком был сгенерирован шаблон окружности с внешним и внутренним диаметром равным 500 нм и 200 нм соответственно, который использовался для получения финальной структуры и полировки боковых стенок автоэмиссионной ячейки от остатков материала (Рисунок 4.10, в). Таким образом, удалось получить значение диаметра ячейки 580 нм, что на 61,3 % меньше, чем для автоэмиссионной ячейки, с

выращенным W эмиттером ФИП на дне структуры, и радиусом закругления вольфрамового автокатода ~ 75 нм. Дальнейшие экспериментальные исследования описанной методики позволят снизить межэлектродное расстояние и радиус заострения автокатода до более низких значений.

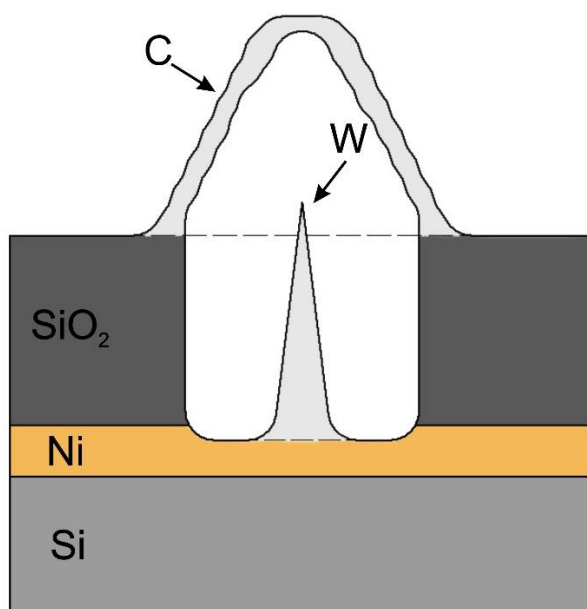
Результат измерения ВАХ представлен на рисунке 4.11. Из анализа графика следует, что пороговое напряжение начала эмиссии составляет менее 0,5 В, а значение тока при разности потенциалов 5 В равно 16 нА.



ВАХ автоэмиссионной ячейки с эмиттером, полученным из зарощенного углубления

4.5. Формирование автоэмиссионной ячейки со сложной формой анода

Данная конструкция автоэмиссионной ячейки со сложной формой анода была разработана для совмещения стадий формирования и вакуумирования готовой структуры в едином технологическом процессе и установке. Макет разработанной конструкции представлен на рисунке 4.12 и включает в себя автокатод, зарощенный сверху анодом, геометрически выполненным в виде “крышки”.



Макет автоэмиссионной ячейки со сложной формой анода

Преимущество такой компоновки электродов и их геометрической формы заключается в том, что это позволяет формировать автоэмиссионные ячейки полностью вакуумными, так как все технологические процессы происходят в камере растрового электронного микроскопа, где поддерживается постоянное низкое давление (около 10^{-5} Па).

Данный технологический маршрут формирования ячейки совместим с предыдущими методами по выращиванию автокатода в углублении представленными в разделах 4.3 и 4.4. Соответственно, для осаждения представленной геометрической формы анода ячейки был сгенерирован шаблон в виде окружностей с уменьшающимся диаметром. Основные технологические параметры ФИП при формировании анода: ток пучка – 500 пА, ускоряющее напряжение – 30 кВ, время воздействия пучка в точке – 800 мкс, степень перекрытия пучка – 60 %, давление в камере микроскопа 6×10^{-4} Па. Результат осаждения заданной структуры представлен на рисунке 4.13.

Стоит также отметить, что в качестве материала положительного электрода был выбран углерод, так как, исходя из экспериментальных исследований формирования такой геометрической формы анода был сделан вывод о том, что вольфрам не обладает достаточными физико-химическими свойствами ХАГ для создания такой “крышки-анода”. При её осаждении

наблюдается сильное переосаждение и полное несоответствие заданного рисунка в шаблоне и полученной структуры. Углерод же лишен этих недостатков, за счет более высокой скорости разложения и лучших физико-химическими свойств ХАГ для поставленной задачи.

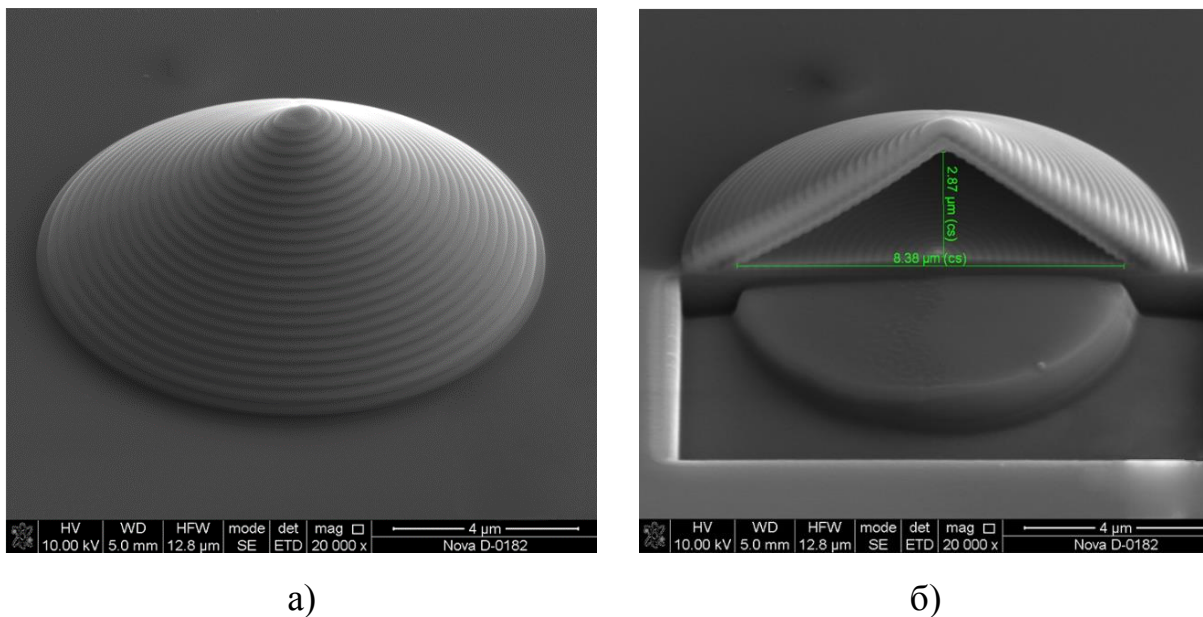
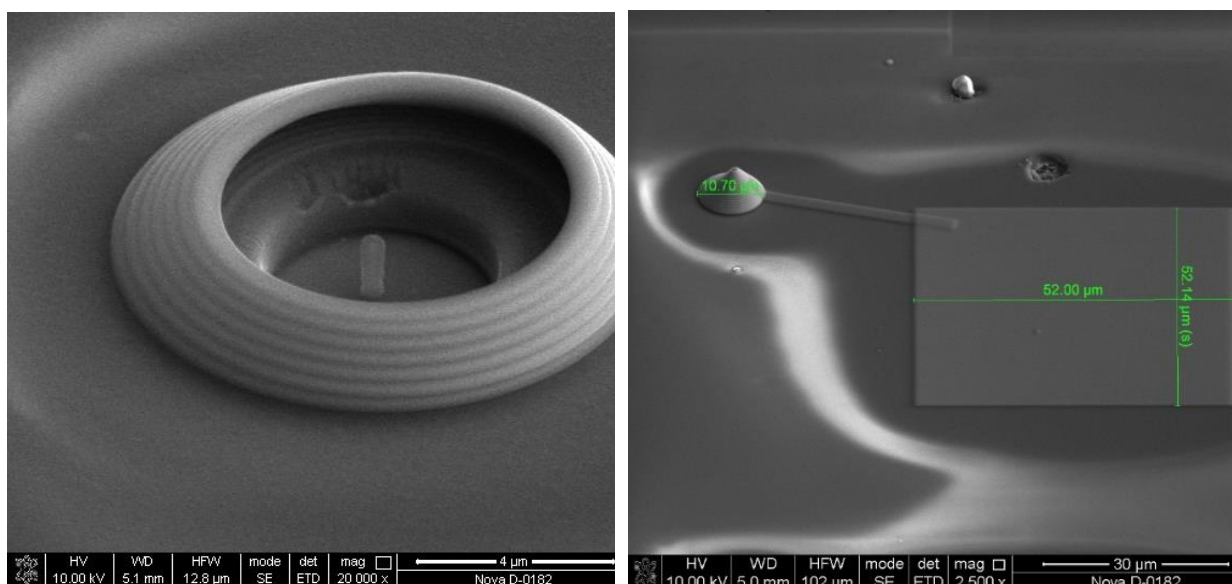


Рисунок 4.13 – РЭМ изображения сформированного анода сложной геометрической формы (а) и анода в разрезе (б)

Из анализа полученных РЭМ изображений следует, что высота сформированной структуры составляет около 2,9 мкм, а диаметр окружности внутри анода у его основания равен 8,4 мкм. Дальнейшие исследования данной структуры позволят уменьшить получаемые значения высоты и диаметра для улучшения электрофизических характеристик автоэмиссионной ячейки. Также, видно, что осаждение происходит и на поверхности подложки под каждым слоем окружности сформированного анода. Это обстоятельство может вызвать шунтирование электродов и отсутствие автоэмиссионного эффекта.

Таким образом, была сформирована автоэмиссионная ячейка на основе макета рисунка 4.12. На рисунке 4.14, а представлено РЭМ изображение завершающей стадии формирования ячейки, то есть, осаждение анода и вакуумирование. Далее было произведено измерение ВАХ полученной структуры, где положительное значение напряжение подавалось на анод через

контактную площадку размером 52x52 мкм, полученную осаждение ФИП (Рисунок 4.14, б).



а)

б)

Рисунок 4.14 – РЭМ изображения завершающей стадии формирования ячейки (а) и готовой структуры с контактной площадкой (б)

Результат измерения ВАХ представлен на рисунке 4.15 для диапазона напряжений от 0 до 50 В. Из анализа кривой видно, что ток появляется сразу же при подаче напряжения, что нехарактерно для автоэлектронной эмиссии. Также значения тока с одного автокатода сильно не соответствуют предыдущим измерениям и ВАХ-ам представленным в разделе 1.3.

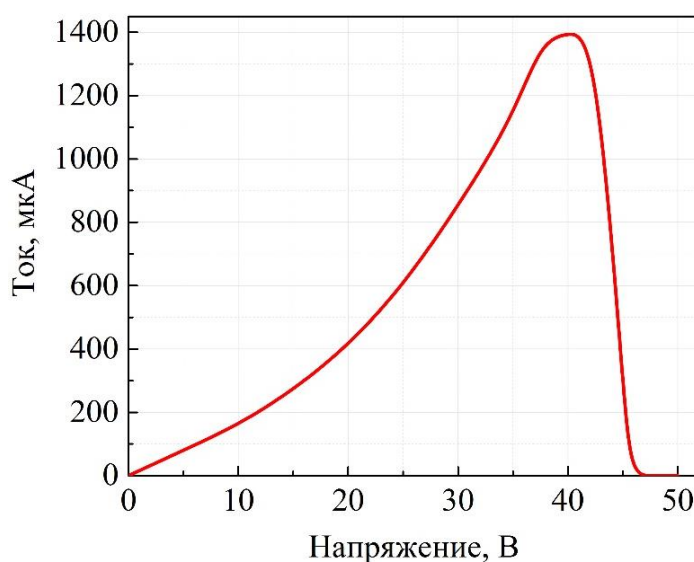


Рисунок 4.15 – ВАХ автоэмиссионной ячейки со сложной формой анода

Наличие некоторого насыщения при напряжении около 40 В, говорит о предельном режиме работы полученной структуры, что тоже является несвойственным фактором для вакуумной наноэлектроники, так как существует большое количество литературы, в которой описано применение напряжений свыше 1 кВ [22, 48, 51]. Падающий участок кривой, скорее всего, свидетельствует о том, что произошло перегорание токоведущего канала, сформированного из-за переосаждения материала анода на автокатод и стенки ячейки, и дальнейшее увеличение напряжения уже не приводит к какому-либо изменению тока.

Таким образом, данный тип конструкции вакуумной автоэмиссионной ячейки (рисунок 4.12) не может быть правильно сформирован при помощи комбинации методов локального профилирования поверхности подложки ФИП, из-за эффектов переосаждения материала анода на внутренние поверхности ячейки. В итоге ВАХ соответствует обычному закону Ома, то есть, прохождению тока через токоведущий канал с определенным сопротивлением при некоторой разности потенциалов.

4.6. Формирование автоэмиссионных ячеек на основе тонких пленок металлов

Метод ФИП так же позволяет формировать планарные автоэмиссионные ячейки на основе тонких пленок металлов. Так, в данной работе для демонстрации возможностей ФИП при создании подобных структур, были получены планарные ячейки с различными межэлектродными расстояниями. РЭМ изображение полученных структур представлено на рисунке 4.16.

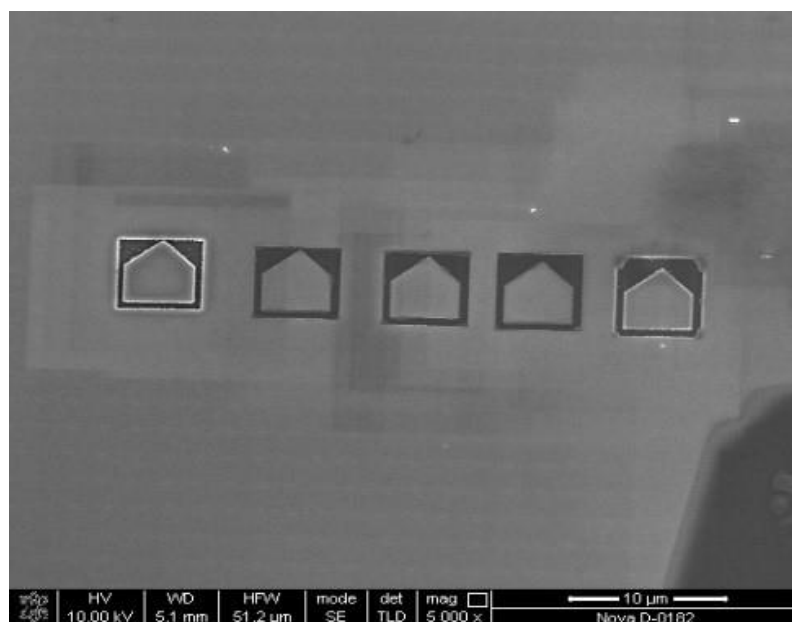


Рисунок 4.16 – РЭМ изображение автоэмиссионных структур планарного типа (слева направо увеличение межэлектродного расстояния от 250 до 900 нм)

В качестве подложки использовался полуизолирующий GaAs (удельное сопротивление $5 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) с тонкой пленкой Ni (26 нм) на поверхности, полученной методом магнетронного распыления. При помощи локального ионно-лучевого травления фокусированным пучком галлия были сформированы планарные структуры с радиусом закругления вершины автокатода около 50 нм и межэлектродными расстояниями: 250 нм, 300 нм, 500 нм, 700 нм, 900 нм. Травление производилось при следующих основных параметрах ФИП: ускоряющее напряжение пучка 30 кВ, ток пучка – 50 пА, время воздействия пучка в точке - 100 мкс.

Результаты исследования электрических параметров подобных планарных структур подробно описаны в работах [41, 42, 45, 46].

Таким образом, результаты, представленные в данной главе, показали, что формирование различных конструкций автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером комбинацией методов локального профилирования поверхности ФИП возможно. Были измерены ВАХ, которые подтвердили наличие автоэмиссионного эффекта в сформированных

структурах. Также, представлены технологии формирования ячеек с основными параметрами шаблонов и ФИП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку конструктивно-технологических решений создания элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники методом фокусированных ионных пучков для создания перспективной элементной базы. Были представлены результаты моделирования влияния основных геометрических и электрофизических параметров автоэмиссионной ячейки с вертикально ориентированным эмиттером на напряженность электрического поля на вершине автокатода. Также были проведены экспериментальные исследования режимов локального профилирования поверхности ФИП Ga^+ . Полученные данные позволили сформировать различные конструкции и технологии создания автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером комбинацией методов локального профилирования поверхности ФИП. Также, были представлены результаты измерения электрических характеристик полученных структур и выполнены оценки порогового напряжения начала эмиссии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нанотехнологии в электронике. Выпуск 3.1. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 480с.
2. Нанoeлектроника: теория и практика [Электронный ресурс] : учебник / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, А. Л. Данилюк, Е. А. Уткина. — 4-е изд. (эл.). — Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 369 с.). — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — (Учебник для высшей школы).
3. Нанoeлектроника. Часть I. Введение в нанoeлектронику / Под ред. А.А. Орликовского - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 720 с.: ил. - (Сер. Электроника).
4. Электронное издание на основе: Введение в отказоустойчивые технологии высокопроизводительных вычислительных систем (суб)микронного, супрамолекулярного и нанометрового диапазона/ Г.М. Алакоз, М.В. Курак , А.П. Сериков, А.А. Попов, А.В. Котов - М.: Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ", 2016.
5. Brodie I. Keynote address to the First International Vacuum Microelectronics Conference, June 1988; Pathways to vacuum microelectronics // IEEE Trans. Electron. Dev. 1989 V. 36, № 11. P. 2637-2640.
6. Skidmore K. The comeback of the vacuum tube: Will semiconductor versions supplement transistors? // Semiconductor International. 1988. V 11, № 9. P 15-17.
7. Cole B.O. Everything old is new again // Electronics 1989. V 62, № 12. P. 74-77.
8. Liao F. Vacuum microelectronics // Acta Electronica Sinica. 1991. V. 19, № 3. P. 89-96.
9. Spindt C.A., Holland C.E., Rosengreen A., Brodie / Field emitter arrays for vacuum microelectronics // IEEE Trans. Electron Dev. 1991 V. 38, № 10. P 2355-2363.

10. Holland C.E., Rosengreen A., Spindt C.A. A study of field emission microtriodes // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991. V. 38, № 10. P. 2368-2372.
11. Hunt C.E., Trujillo J.T., Orvis W.J. Structure and electrical characteristics of silicon field-emission microelectronic devices // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991 V. 38. № 10 P 2309-2313.
12. Nordheim L W. The effect of the image force on the emission and reflection of electrons by metals // Proc. Roy Soc. London A. 1928. V. 121, P. 626- 639
13. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия — М Государственное издательство физико-математической литературы, 1958.
14. Spindt C.A., Holland C.E., Rosengreen A., Brodie / Field emitter arrays for vacuum microelectronics // IEEE Trans. Electron Dev. 1991 V. 38, № 10. P 2355-2363.
15. Holland C.E., Rosengreen A., Spindt C.A. A study of field emission microtriodes // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991. V. 38, № 10. P. 2368-2372.
16. Hunt C.E., Trujillo J.T., Orvis W.J. Structure and electrical characteristics of silicon field-emission microelectronic devices // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991 V. 38. № 10 P 2309-2313.
17. Глазанов Д.В., Баскин Л.М., Фурсей Г.Н. Кинетика импульсного нагрева острых автокатодов реальной геометрии эмиссионным током высокой плотности // ЖТФ (Ж. техн. физ.) 1989. Т. 59, Вып. 5, С. 60-68.
18. Андриянов Ю.В., Баздырев В.Н., Борисов В.А., Жуков В.М. Предельные плотности тока автоэмиссии в поле СВЧ // Радиотехн и электрон 1986. Т. 31, Вып 6, С. 1193-1195.
19. Shoulders K.R. Microelectronics using electron beam activated machining techniques // Advances in Computers. 1961 V. 2. P 135-239
20. Шоулдерс К.Р. Комплексные системы на микроминиатюрных электровакуумных приборах // Микроэлектроника и большие системы / Под ред. В.Г Толстова - М Мир 1967 - С. 119-144
21. Spindt C.A. A thin-film field-emission cathode // J Appl Phys. 1968 V 39, № 7. P 3504-3505.

22. Татаренко Н. И., Кравченко В. Ф. Автоэмиссионные наноструктуры и проборы на их основе. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. — 192 с.
23. Лихарев, К. К. О возможности создания аналоговых и цифровых интегральных схем на основе эффекта дискретного туннелирования / К. К. Лихарев // Микроэлектроника. – 1987. – Вып. 3. – С. 195–200.
24. Одноэлектронные транзисторы на основе эффектов кулоновской блокады и квантовой интерференции / З. Д. Квон [и др.] // Успехи физических наук. – 1999. – Вып. 169. – С. 471–474.
25. Элементы и устройства нанoeлектроники: учебное пособие / В. А. Сергеев. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – 137 с.
26. Чурилов А.Б. Введение в нанoeлектронику: Учеб. пос. / Яросл. гос. ун-т. Ярославль, 2002. 132 с.
27. Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е. Физические основы нанoeлектроники: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с.
28. Averin, D. V. Coherent oscillations in small tunnel junctions / D. V. Averin, Likharev, K. K. // JETP. – 1986. – Вып. 2. – С. 427.
29. Semiconductor and metal nanocrystals. Edited by V. Klimov. New York, Marcel Dekker Inc. 2004.
30. Васильев Р.Б., Дирин Д.Н. Квантовые точки: синтез, свойства, применение: Метод. мат. / МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2007. 34 с.
31. Шик А. Я. Квантовые нити // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - № 5. – С. 87 – 92.
32. Кутузов, Леонид Вячеславович. Электрофизические свойства металлических нанопроводов, полученных методом селективного изменения атомного состава: диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.01 / Кутузов Леонид Вячеславович; [Место защиты: Нац. исслед. центр "Курчатовский институт"].- Москва, 2012.- 142 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-1/482.

33. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов/Дж. Р. Брюэр, Д. С. Гринич, Д. Р. Херриот и др.; Под ред. Дж. Р. Брюэра: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1984. — 336 с., ил.
34. McCord, M. A.; M. J. Rooks. 2 // SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication (англ.). — 2000.
35. Нан Яо, Чжун Лин Ван, Справочник по микроскопии для нанотехнологии - М.: Научный мир, 2011, стр.256-259.
36. Коломийцев А.С., Ильин О.И., Громов А.Л., Лисицын С.А., Катханов Б.С. Субмикронное структурирование поверхности подложек кремния методом фокусированных ионных пучков // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11-3. – С. 615-618.
37. Коломийцев А. С. Разработка технологических основ субмикронного профилирования поверхности подложек методом фокусированных ионных пучков для создания микро- и наноструктур: диссертация ... кандидата технических наук: 05.27.01 / Коломийцев Алексей Сергеевич; [Место защиты: Технол. ин-т Южного федер. ун-та]. - Таганрог, 2011. – 187 с.
38. Wu S., Huang Y., Hsueh T., Liu C. Fabrication of nanopillars comprised of InGaN/GaN multiple quantum wells by focused ion beam milling // Japanese Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 47. №6. P. 4906–4908.
39. Wu S., Liu C., Hsueh T., Chung H., Wang C., Wang C. Anomalous formation of InGaN/GaN multiple-quantum-well nanopillar arrays by focused ion beam milling // Nanotechnology. 2007. №18 (445301). P. 1-6.
40. Wu S., Liu C. Direct writing of Si island arrays by focused ion beam milling // Nanotechnology. 2005. №16. P. 2507 -2511.
41. Jityaev I L, Ageev O A, Svetlichnyi A M, Kolomiytsev A S and Spiridonov O B 2016 Journal of Physics: Conference Series 741 012011.
42. Jityaev I L, Svetlichnyi A M, Kolomiytsev A S, Volkov E Yu, Polyakova V V and Ageev O A 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 256 012021.

43. I V Panchenko, N A Shandyba, A S Kolomiytsev and S A Lisitsyn 2019 IOP Journal of Physics: Conference Series 1400 044005.
44. I V Panchenko, N A Shandyba, A S Kolomiytsev 2019 IOP Journal of Physics: Conference Series 1410 012236.
45. I L Jityaev, A M Svetlichnyi, V I Avilov, I N Kots, A S Kolomiytsev, O A Ageev 2018 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 443 012012.
46. Светличный А.М., Коломийцев А.С., Житяев И.Л., Спиридонов О.Б. Известия ЮФУ. Технические науки – Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, № 9, 2015. С.14-23.
47. Abhishek K. S. Field emission and explosive electron emission process in focused ion beam fabricated platinum and tungsten three-dimensional overhanging nanostructure // Nuclear Inst, and Methods in Physics Research. 2018. Vol. 425. P. 26–31.
48. Н.В. Егоров, Е.П. Шешин Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы: Учебник-монография / Н.В. Егоров, Е.П. Шешин - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. — 704 с.
49. Фурсей Г. Н. Автоэлектронная эмиссия. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 320 с.: ил. (+ вклейка, 2 с.) — (Учебники для вузов. Специальная литература).
50. Коробейников С.М. Диэлектрические материалы: Учебное пособие, Новосибирск. НГТУ. 2000. 67 с.
51. Закиров И. И. Исследование низкопороговой полевой электронной эмиссии из графеноподобных структур: диссертация ... кандидата Технические наук: 05.27.01 / Закиров Ильдар Илюсович; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»], 2019.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ

на процесс формирования вакуумной автоэмиссионной ячейки с вертикально ориентированным эмиттером методом фокусированных ионных пучков с использованием двухлучевого растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды), оснащенного системой ФИП

Настоящая техническая инструкция предусматривает технологический процесс формирования вакуумной автоэмиссионной ячейки с вертикально ориентированным эмиттером методом фокусированных ионных пучков с использованием двухлучевого растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды), оснащенного системой ФИП. Метод формирования ячейки основан на проведении процесса сверхпрецизионного ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения проводящих материалов, при низком давлении посредством фокусированного ионного пучка Ga^+ . Процесс осуществляется на основе модуля FIB CVD двухлучевого растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды).

1. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА

1.1. Материалы для подготовки поверхности подложек к формированию вакуумных автоэмиссионных структур.

1.1.1. Спирт этиловый ректификатный, высший сорт, ГОСТ 18300-87.

1.1.2. Бензин авиационный Б-70 ГОСТ 1012-72 или бензин-растворитель для резиновой промышленности БР-1 ГОСТ443-76.

1.1.3. Моющее средство лабамид-203 ТУ 38-307.47.001-00.

1.1.4. Перчатки резиновые хирургические ГОСТ 20010-74.

1.1.5. Нитепрошивное полотно ТУ 17-240-77. Арт.912215, либо ткань хлопчатобумажная бязевой группы ГОСТ 11680-76 арт.50, либо салфеточное полотно ГОСТ 11027-71.

1.1.6. Вода питьевая водопроводная ГОСТ 2874-82.

1.2. Условия, обеспечивающие нормальную работу двухлучевого растрового электронного микроскопа.

1.2.1. Питание установки осуществлять от трехфазной 4-проводной с нулевым проводом электросети переменного тока напряжением 380 В + 10 % частотой 50 + 0,5 Гц. Нормы качества электрической энергии по ГОСТ13109-67.

1.2.2. Холодная вода по ГОСТ 2874-73 под давлением не менее $2,01 \times 10^5$ Па, температурой не менее 15 °С, расходом не менее 8 л/мин.

1.2.3. Вентиляция - Помещение должно быть оборудовано системой приточно-вытяжной вентиляции. Степень фильтрации подаваемого воздуха и кратность воздухообмена выбираются в соответствии действующими нормами для данного класса чистых помещений.

1.2.4. СанПиН 2.2.4548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»

1.2.5. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2002 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды».

1.2.6. Атмосферное давление 760 ± 25 мм. рт. ст.

1.2.7. Электромагнитные поля < 2 мГс

1.2.8. Акустические шумы для частот > 100 Гц < 55 дБ(А), для частот < 100 Гц < 40 дБ(А)

1.2.9. Механические вибрации для частот < 15 Гц 1.5 мкм/сек, для частот > 15 Гц 20 мкм/сек

1.3. Вспомогательные материалы, обеспечивающие нормальную работу установки и проведение технологического процесса.

1.3.3. Спирт этиловый ректифицированный высшего качества ГОСТ 59 для очистки внутренней поверхности камеры и контактных деталей оборудования.

1.3.4. Перчатки хлопчатобумажные ГОСТ 5007-87.

1.3.5. Аммиак жидкий особой чистоты ТУ 2114-004-23102861-99, давлением $1,1 \times 10^5$ Па (1,1 кгс/см²)

1.3.6. Азот газообразный особой чистоты (99,999 %) ГОСТ 9293-74, давлением $1,05 \times 10^5$ Па (1,05 кгс/см²);

2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

2.1. Общие требования.

2.1.1. К работе на двухлучевом растровом электронном микроскопе Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды), оснащенного системой ФИП, допускается только специально обученный и аттестованный персонал в возрасте не моложе 18 лет, прошедший медицинский осмотр, инструктаж по безопасности труда на данном оборудовании, подготовленный к обслуживанию электроустановок с напряжением выше 1000 В, имеющий опыт работы с вакуумным оборудованием, изучивший устройство и правила работы на растровом электронном микроскопе, знающий требования безопасности при работе сжатыми газами и изучившим настоящую инструкцию.

2.1.2. В помещении, где установлено оборудование, запрещается доступ лицам без соответствующего разрешения администрации.

2.1.3. Все элементы установки должны быть заземлены голым медным проводом или шиной сечением не меньше 6 мм. Состояние заземления должно замеряться не реже одного раза в год.

2.1.4. Сигнальные цвета и знаки безопасности использовать по ГОСТ12.4.026-76

2.1.5. Работающим на установке запрещается:

работать при отсутствии средств пожаротушения и аптечки медицинской;
работать при снятых обшивках и кожухах, выдвинутых блоках, открытых дверях и закороченных блокировках;

оставлять без наблюдения установку, находящуюся под напряжением;
самостоятельно производить какие-либо работы по устранению неисправностей в электрооборудовании при отсутствии разрешающих документов.

2.2. Правила электробезопасности.

2.2.1. Источниками электроопасности являются высоковольтные трансформаторы, выпрямители, конденсаторы и высоковольтные вводы.

2.2.2. Во избежание поражения электрическим током перед началом работы внешним осмотром проверить исправность защитного заземления установки, целостность заземляющих проводников и плотность их контактов, целостность токоведущих наружных проводов и их изоляции, целостность электрических разъемов.

2.2.3. При необходимости доступа к элементам источника высокого напряжения отключить питание установки.

2.3. Правила пожарной безопасности.

2.3.1. Источником пожарной опасности являются легковоспламеняющиеся жидкости (спирт, бензин, ацетон), масла и использованный протирочный материал.

2.3.2. ЛВЖ должны храниться в герметичной таре с надписью 'СПИРТ. ОГНЕОПАСНО', 'БЕНЗИН. ОГНЕОПАСНО', "АЦЕТОН. ОГНЕОПАСНО" в вентилируемом шкафу. Запас их не должен превышать потребностей на одну смену.

2.3.3. Использованный протирочный материал должен храниться в специальном металлическом ящике с крышкой.

2.3.4. Помещение должно быть снабжено углекислотными или порошковыми огнетушителями.

2.4. Охрана окружающей среды.

2.4.1. Процесс формирования автоэмиссионных ячеек осуществляется в вакууме и является экологически безвредным.

2.7. Инструкции, соблюдение которых необходимо при проведении работ по формированию автоэмиссионных ячеек.

2.7.1. Инструкция предприятия-изготовителя по ТБ для работающих на установке.

2.7.2. Инструкция по охране труда для работающих с модулем FIB CVD.

2.7.3. Инструкция по безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3.1. Организация трудового процесса.

3.1.1. Обеспечение материалами должно производиться в начале смены либо по графику.

3.1.2. Работать в специальной одежде.

3.1.3. Все работы внутри вакуумной камерой выполнять в капроновых перчатках.

3.1.4. Мастеру или технологу проводить инструктаж с обслуживающим персоналом по технологии один раз в месяц с записью в журнале.

3.1.5. Технологический процесс проводить в специальном помещении, отвечающим требованиям вакуумной гигиены.

3.1.6. Стирку спецодежды проводить один раз в неделю.

3.2. Подготовка рабочего места.

3.2.1. Получить у мастера или технолога инструменты или детали и необходимые материалы.

3.2.2. Проверить на рабочем месте наличие документации.

3.2.3. Произвести внешний осмотр крепления составных частей системы газового напуска, системы водоснабжения, крепления и целостности кабелей и жгутов установки, установки в целом.

3.2.4. Проверить работоспособность сигнализации утечки газов.

3.2.5. В случае обнаружения каких-либо неисправностей доложить технологу, к дальнейшей работе приступить только после их устранения.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

4.1. Основные положения.

4.1.1. Технологический процесс получения автоэмиссионных ячеек с вертикально ориентированным эмиттером состоит из следующих структурных стадий:

- химическая очистка поверхности подложки от возможных загрязнений;
- помещение подложки в камеру микроскопа;
- откачка камеры до вакуума не хуже 10^{-4} Па;
- подготовка шаблона для формирования структуры;
- формирование автоэмиссионных ячеек комбинацией методов травления и осаждения ФИП.

- развакуумирование камеры загрузки;

- извлечение подложки;

4.1.2. Химическая очистка поверхности подложки производится с целью удаления полировочных паст, жировых и иного рода загрязнений, которые ухудшают качество покрытия.

4.1.3. Помещение подложки в камеру микроскопа производится на специализированный столик подложкодержателей в специальном держателе с углеродным, токопроводящим скотчем.

4.1.4. Откачка камеры до вакуума не хуже 10^{-4} Па осуществляется с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насоса. Показания

степени вакуума контролируются по соответствующим данным на экране монитора.

4.1.5. Подготовка шаблона для формирования автоэмиссионной структуры осуществляется в специальной программе управления ионным пучком.

4.1.6. Формирование автоэмиссионной ячейки осуществляется с помощью локального сверхпрецизионного травления и осаждения из продуктов образующихся в результате разложения металлоорганических соединений из газовой-инжекционной системы под действием фокусированного ионного пучка.

4.1.7. Основные факторы, влияющие на качество формируемых структур:

- химическая чистота поверхности пластин;
- длительность процессов;
- параметры ионного пучка;
- степень вакуума в модуле.

4.2. Подготовка установки к работе.

4.2.1. Установить все органы управления на стойках питания и управления в исходное положение: переключатели на передних панелях блоков и стоек в положение "ВЫКЛ".

4.2.2. Проверить работу насосов.

4.2.3. Выставить температуру воды в чиллере на 18 °С.

4.2.4. Включить сигнализацию утечки газов.

4.2.5. Открыть краны в газовых шкафах на баллонах с азотом и обеспечить их подачу в магистраль.

4.3. Подготовка поверхности подложки к формированию структур.

4.3.1. Все подготовленные подложки поместить в посуду с моющим средством лабomid и прокипятить в течении не менее 5 мин.

4.3.2. После кипячения подложки промыть тщательно деионизованной водой

4.3.3. Наличие ворсинок из ткани на отмытых подложках не допускается

4.3.4. Отмытые подложки установить на заранее подготовленный подложкодержатель (очищенный и обезжиренный).

4.3.5. Рекомендуется для очистки поверхности подложек использовать ультразвуковые ванны, используя при этом те же технические моющие средства.

4.3.6. Технические моющие средства выбирать в зависимости от степени загрязненности поверхности и конструкции.

4.4. Установка подложек в держатель образцов.

4.4.1. Подготовьте образец и подложкодержатель, с нанесенным на него углеродным скотчем.

4.4.2. Поместите образец на подложкодержатель.

4.4.3. Установите подложкодержатель в предметный столик микроскопа.

4.4.4. Зафиксируйте подложкодержатель при помощи шестигранной отвертки.

4.4.5. Зафиксируйте предметный столик микроскопа прижимной балкой.

4.5. Получение вакуума в камере микроскопа.

4.5.1. Закройте камеру микроскопа.

4.5.2. Запустите программу управления микроскопом.

4.5.3. В первой вкладке нажмите на кнопку PUMP. В результате начнется автоматический процесс откачивания камеры форвакуумным и турбомолекулярным насосами.

4.5.4. Откачайте камеру до рабочего давления (10^{-4} Па).

4.6. Формирование автоэмиссионных ячеек комбинацией методов травления и осаждения ФИП

4.6.1. Произвести запуск электронной и ионной пушки нажав на кнопку WAKE UP.

4.6.2. Выполнить юстировку, подобрать и сохранить рабочие параметры апертуры и напряжения, подаваемого на фокусирующие линзы.

4.6.3. Привести столик микроскопа в перпендикулярное положение ионной колонне, указав значение угла в 52° в программе управления микроскопа в разделе положения столика с подложкодержателями.

4.6.4. Найти и зафиксировать точку эвцентрики.

4.6.5. Подготовить газовой-инжекционную систему путем нагрева источников молекулярного газа. Для этого выбрать инжектор и нажать кнопку COLD.

4.6.6. Подготовить шаблон для травления и осаждения ФИП, с помощью простых, встроенных в программное обеспечение геометрических фигур.

4.6.7. Задайте параметры области или областей для модификации. Укажите размер области модификации задав с клавиатуры значение параметра Square size в мкм.

4.6.8. Выберите тип объекта – прямоугольник, используя кнопки, расположенные над окном получения изображения. С помощью мыши укажите область в окне получения изображения (при нажатой левой кнопке мыши потянуть до нужного размера и отпустить).

4.6.9. По показаниям контроллера ионного насоса камеры источника ФИП убедитесь, что давление в камере источника не хуже 10^{-7} Па, в противном случае работа не может быть продолжена.

4.6.10. Задайте местоположение области, введя значения параметров Offset X, Offset Y, Rotation. При графическом обозначении области в окне получения изображения (с помощью мыши) значения параметров Offset X, Offset Y, Rotation определяются автоматически.

4.6.11. Расположить шаблон в необходимом месте на подложке. Смещать область сканирования, можно используя бегунки Offset X и Offset Y, расположенные на панели SCANNING CONTROL главного окна программы FIB CONTROL. При этом необходимо учитывать увеличение (ручка Magnification), так как при изменении увеличения изменяются пределы Offset X и Offset Y. С помощью ручки Rotation или поля ввода внутри нее задается угол поворота области сканирования. В процессе сканирования можно регулировать контрастность изображения (ручка CONTRAST) с помощью блока аналогового интерфейса. Яркость подстраивается автоматически.

4.6.12. Задайте время воздействия, количество проходов и рабочие условия в окне визуализации.

4.6.13. Для запуска травления поверхности нажмите кнопку Start Milling. Если по каким-либо причинам необходимо остановить распыление в конце текущего цикла нажмите кнопку Stop Milling.

4.6.14. После травления откройте резервуар выбранной инжекционной магистрали в окне программы управления GIS Client, установив флажок Valve в строке параметров данной магистрали.

4.6.15. Произведите рост эмиттера в сформированном углублении ФИП, материалом, выбранным в предыдущем пункте.

4.6.16. Для процесса осаждения в сгенерированном шаблоне необходимо установить параметр материала как Cdep или Wdep в соответствии необходимому материалу автокатаода.

4.6.17. Перед закрытием программы управления колонной FIB сохраните настройки режима работы, выбрав в главном меню команду Operation -> Save as.

4.6.18. В главном меню выберите команду Files -> Exit. В результате закроется пневматический клапан, отделяющий источник ионов от объектива; будет отключена подача всех высоких напряжений;

аппретурная диафрагма будет установлена в начальное положение; закроется программа управления.

4.6.19. Закройте клапан резервуара, сняв флажок Valve в строке параметров рабочей магистрали (панель Injection Controller окна программы Client GIS).

4.6.20. Отключите разогрев резервуара, нажав кнопку Off, справа от поля ввода Target Res.

4.6.21. Проведите дегазацию всех резервуаров, задействованных в работе, чтобы сохранить свойства прекурсоров.

4.6.22. Закройте окна использованных программ.

4.6.23. Выключите контролеры расположенные в шкафу электроники в обратной последовательности.

5. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СФОРМИРОВАННЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ СТРУКТУР

5.1. С помощью электронной пушки в той же камере микроскопа проверить качество сформированных структур, соответствие размеров полученных и заданных в шаблоне, по которому производилось травление и осаждение.

5.2. С помощью атомно-силовой микроскопии проверить регулярность полученных структур.

5.3. При наличии на изделии указанных в п.5.1-5.2. недостатков изделие отбраковать.