

Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова
Физический факультет

на правах рукописи

Сыромятников Алексей Геральдович

**Теоретическое исследование
процессов формирования и
структурных свойств
металлических атомных проводов**

Специальность 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
доцент
Клавсюк Андрей Леонидович

Москва — 2020

Оглавление

Введение	1
1 Исследование формирования и структурных свойств наноструктур Co на вицинальной поверхности меди (111) (обзор литературы)	5
1.1 Вицинальные поверхности (111) и дефекты на них	6
2 Методы моделирования роста одномерных атомных структур и исследования их структурных свойств	7
3 Взаимодействие адатомов на вицинальных поверхностях металлов	10
3.1 Раздел 1	11
3.2 Раздел 2	12
3.3 Раздел 3	12
4 Формирование наноструктур на вицинальных поверхностях металлов	14
4.1 Раздел 1	15
4.2 Раздел 2	17
4.3 Раздел 3	17
5 Распределение длин одномерных островков	19
5.1 Раздел 1	20
5.2 Раздел 2	20
5.3 Раздел 3	21
6 Структурный фазовый переход в атомных цепочках Co на поверхности Cu(775)	23
6.1 Раздел 1	24
6.2 Раздел 2	25
Основные результаты и выводы	27
Литература	29

Список опубликованных работ	31
Статьи в научных журналах	31
Публикации в сборниках тезисов конференций	32

Введение

Актуальность темы

Научно-технологический прогресс в настоящее время неотделим от постоянной миниатюризации различных электронных устройств, в частности интегральных микросхем и элементов памяти. Новейшие устройства такого типа строятся на базе наноразмерных электронных компонентов, среди которых транзисторы, цепочки и провода. Характерные линейные размеры таких объектов сегодня приближаются к единицам нанометров. Оперировать атомными структурами такого размера очень трудно, поэтому прикладные и фундаментальные исследования в этой области сейчас актуальны как никогда.

Помимо этого одномерные наноструктуры обладают рядом уникальных свойств, среди которых волны спиновой и зарядовой плотности [1], квантованная проводимость [2], эффект Рашбы [3]. Свойства таких одномерных структур существенно отличаются как от свойств объемного образца, так и от свойств тонких пленок и квантовых точек. Создание наноразмерных структур на текущий момент возможно либо при помощи литографических методов, либо путем перетаскивания отдельных атомов иглой сканирующего туннельного микроскопа. Оба подхода имеют свои недостатки, не позволяющие получать такие одномерные наноструктуры в промышленных масштабах. Ситуация может измениться с использованием метода самоорганизации наноструктур путем эпитаксиального роста. Однако для того чтобы использование наноструктур в промышленности стало реальностью, необходимо уметь управлять их созданием, что невозможно без понимания механизмов, ответственных за их рост.

В связи с этим особенно актуальны исследования структурных, электронных и магнитных свойств наноструктур на поверхности металлов, а также установление закономерностей в их росте и эволюции.

Цель и задачи работы

Основной целью диссертационной работы являются исследование механизмов роста атомных структур на поверхности металлов и установление особенностей их атомной структуры с использованием современных теоретических методов. Исследование механизмов роста включает в себя не только моделирование процессов самоорганизации, но и исследование взаимодействия атомов $3d$ -металлов на поверхностях метал-

лов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать методику теоретического исследования и моделирования формирования и дальнейшей эволюции одномерных атомных структур на поверхности металлов.
2. Исследовать взаимодействие адатомов $3d$ -металлов со ступенью вицинальной поверхности меди.
3. Определить превалирующие факторы, влияющие на рост одномерных наноструктур на вицинальных металлических поверхностях.
4. Показать зависимость формы распределения длин атомных цепочек от параметров эксперимента.
5. Создать модель, описывающую распределение одномерных атомных структур, учитывающую созревание Оствальда и распад коротких одномерных структур.
6. Исследовать структурный фазовый переход из димеризованного в недимеризованное состояние у атомных цепочек кобальта.

Поставленные задачи важны как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

Научная новизна работы

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

1. На основе метода Монте-Карло разработана методика численного моделирования формирования и эволюции морфологии одномерных металлических структур на вицинальных металлических поверхностях, а также исследован структурный фазовый переход в них.
2. Определены особенности взаимодействия адатомов $3d$ -металлов со ступенью вицинальной поверхности меди и объяснена их природа. Установлена зависимость взаимодействия между двумя адатомами $3d$ -металлов на вицинальной поверхности меди от расстояния до ступени.
3. Впервые исследован рост и последующая эволюция одномерных атомных структур при двухтемпературном режиме.
4. Выявлена зависимость формы распределения длин атомных цепочек от таких параметров эксперимента, как температура, поток напыляемых атомов, степень покрытия.
5. Впервые предложен метод более точного определения значения энергии связи в одномерных атомных структурах.

6. Установлена зависимость температуры структурного фазового перехода от длины цепочки и от энергии димеризации.

Научная и практическая значимость работы

Полученные результаты могут иметь важное значение в решении прикладных задач по созданию новых методик производства элементов памяти и передачи информации в промышленности. Кроме того, модели описания роста одномерных структур необходимы для более корректного анализа экспериментальных данных.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 19-32-90045, 19-12-50010) и Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”. При выполнении работы были использованы вычислительные ресурсы Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИВЦ МГУ).

Положения, выносимые на защиту

1. Метод моделирования формирования и эволюции одномерных структур на вицинальных металлических поверхностях.
2. Микроскопический механизм формирования металлических атомных проводов на вицинальных металлических поверхностях, сценарии эволюции системы атомов при различных внешних условиях.
3. Модель для описания распределения одномерных атомных структур, в рамках которой возможно более точное определение значения энергии связи.
4. Структурный фазовый переход в атомных проводах Co на поверхности Cu(775).

Достоверность результатов

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены с использованием современных методов теоретической физики. Обоснованность и достоверность определяются адекватностью применяемых моделей и сравнением с экспериментальными данными.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации были представлены автором лично на следующих мероприятиях:

- VIII Всероссийская научная молодежная школа-конференция “Химия, физика, биология: пути интеграции” (Москва, Россия, 2020);
- 8-ая Международная мастерская по магнитным проводам IWMW-2019 (Светлогорск, Россия, 2019);

- III Международная Балтийская конференция по магнетизму IBCM-2019 (Светлогорск, Россия, 2019);
- Международная конференция по нанонауке и технологии ICN+T (Брно, Чехия, 2018);
- VI Научная молодежная школа-конференция “Химия, физика, биология: пути интеграции” (Москва, Россия, 2018);
- V Научная молодежная школа-конференция “Химия, физика, биология: пути интеграции” (с. Ершово, Московская обл., Россия, 2017);
- 32-я Европейская конференция физики поверхности ECOS-32 (Гренобль, Франция, 2016);
- 23-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2016” (Москва, Россия, 2016);
- 22-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2015” (Москва, Россия, 2015);

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных статей и тезисы к 11 докладам на научных конференциях (всего 21 печатная работа).

Личный вклад автора

Вклад автора в диссертационную работу является определяющим. Все основные результаты работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 34 страницах, включает 6 рисунка и 0 таблицы. Общее число ссылок составляет 21. Каждую главу предваряет вступительная часть, представляющая краткое содержание и основные задачи текущей главы. В конце диссертации сформулированы основные результаты, достигнутые в ней.

Глава 1

Исследование формирования и структурных свойств наноструктур Со на вицинальной поверхности меди (111) (обзор литературы)

Исследование физики и химии поверхности твердого тела в условиях сверхвысокого вакуума производится в течение уже очень долгого времени [4]. Для этого применяют самые разнообразные методы [5]. Например, спектроскопические методы, среди которых спектроскопия характеристических потерь энергии электронами [6, 7], фотоэлектронная и инфракрасная спектроскопия [8—10], которые позволяют получить информацию о химии поверхности и кинетике реакций на ней. Детальное изучение структуры поверхности стало возможным благодаря сканирующей и отражательной электронной микроскопии [11, 12], а также сканирующей туннельной микроскопии [13] (СТМ) и другим сканирующим зондовым методам, таким как атомная силовая микроскопия (АСМ) [14].

Важным элементом поверхности твердого тела являются ее дефекты. Они выступают в роли предпочитаемых мест реакции или прикрепления химически либо физически адсорбированных атомов и молекул. Чтобы иметь представление о кинетике поверхностных дефектов, необходимо иметь информацию о локальном строении поверхности.

Первой вехой в изучении локальной атомной структуры поверхностей и кинетики адатомов на ней в условиях сверхвысокого вакуума стал полевой ионный микроскоп [15] (ПИМ), ставший развитием идей, заложенных полевой электронной микроскопией [16]. ПИМ способен проводить прямые наблюдения свободных адатомов на острой металлической игле. Дифракционные методы, среди которых отражательная и низкоэнергетическая электронная микроскопия [11, 12], не ограничены небольшим

рядом материалов, в отличие от ПИМ.

Прорывом в изучении локальной атомной структуры поверхности и, в частности, локальных дефектов и их кинетики в ультравысоком вакууме стало применение СТМ [13, 17, 18]. Ранние версии СТМ могли работать только при комнатной температуре, а небольшие колебания температуры во время эксперимента существенно изменяли получаемые данные из-за теплового расширения иглы и остальных компонентов микроскопа. Появившиеся позже низкотемпературные СТМ [19], демонстрирующие очень низкий температурный дрейф, можно выделить в отдельный класс экспериментальной аппаратуры. Отдельным преимуществом низкотемпературных исследований является тот факт, что при низкой температуре граница между занятыми и незанятыми электронными состояниями проявляется очень резко, что используется в сверхчувствительной спектроскопии [20]. В зависимости от температуры и от изучаемого образца, скорость поверхностной диффузии может быть либо ниже, либо выше скорости получения СТМ изображения. В первом случае отдельные СТМ изображения представляют собой снимки структуры поверхности. Движение атомов и таких дефектов поверхности, как кинки или ступени, может быть изучено путем анализа изменений в последовательных СТМ изображениях. На сегодняшний день высокоскоростной СТМ позволяет наблюдать образец с частотой более 100 кадров в секунду в условиях постоянно меняющейся температуры [21]. Однако во втором случае поверхность изменяется во время записи одного изображения и даже между последовательными линиями сканирования — изображения несут в себе уже не только пространственную информацию, но и временную. Таким образом, информация о процессах диффузии атомов может быть извлечена только путем обращения к теоретическим моделям, которые способны связать макроскопические изменения в структуре поверхности с отдельными атомными процессами.

1.1. Вицинальные поверхности (111) и дефекты на них

...

Глава 2

Методы моделирования роста одномерных атомных структур и исследования их структурных свойств

Для определения атомной структуры на поверхности металлов существует много различных методов. Сюда относятся, в порядке уменьшения точности: “первопринципные” методы, метод молекулярной динамики (МД), использующий полуэмпирические потенциалы, методы Монте-Карло. Огромным недостатком “первопринципных” методов является их сложность и следующий из неё большой объем вычислений. Метод молекулярной динамики не позволяет исследовать эволюцию систем на больших промежутках времени. Методы Монте-Карло построены на использовании случайных чисел, что позволяет получить статистически точный ответ только по прошествии большого количества шагов.

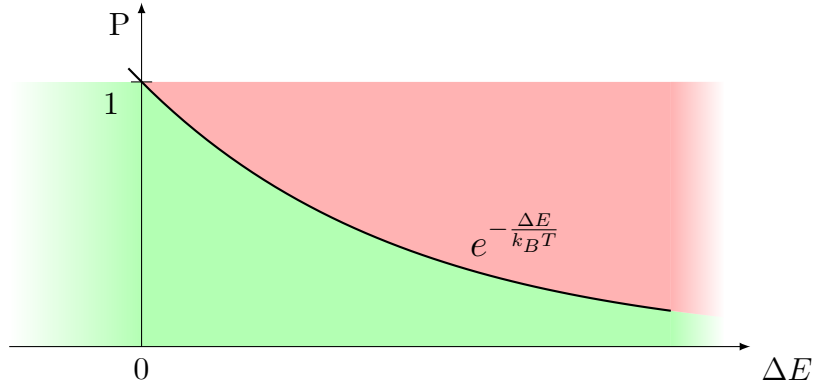


Рис. 2.1: Схематическое представление выбора событий в алгоритме Метрополиса. Кривая соответствует функции $\exp(-\Delta E/k_B T)$. В зависимости от величины потенциального барьера ΔE , событие либо принимается сразу ($\Delta E < 0$) (зеленая зона слева от нуля), либо может быть отброшено с вероятностью $1 - P = 1 - \exp(-\Delta E/k_B T)$ (красная зона над кривой и зеленая зона под кривой справа от нуля).

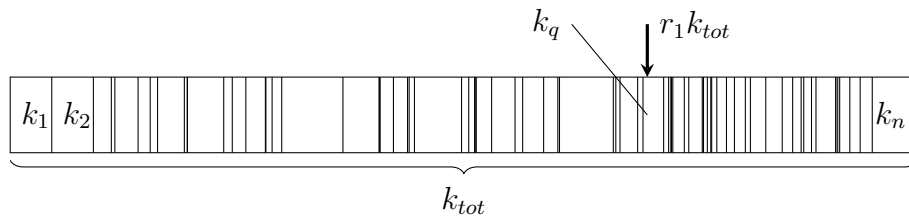


Рис. 2.2: Алгоритм случайного выбора состоявшегося события в кинетическом методе Монте-Карло на основании массива частот переходов

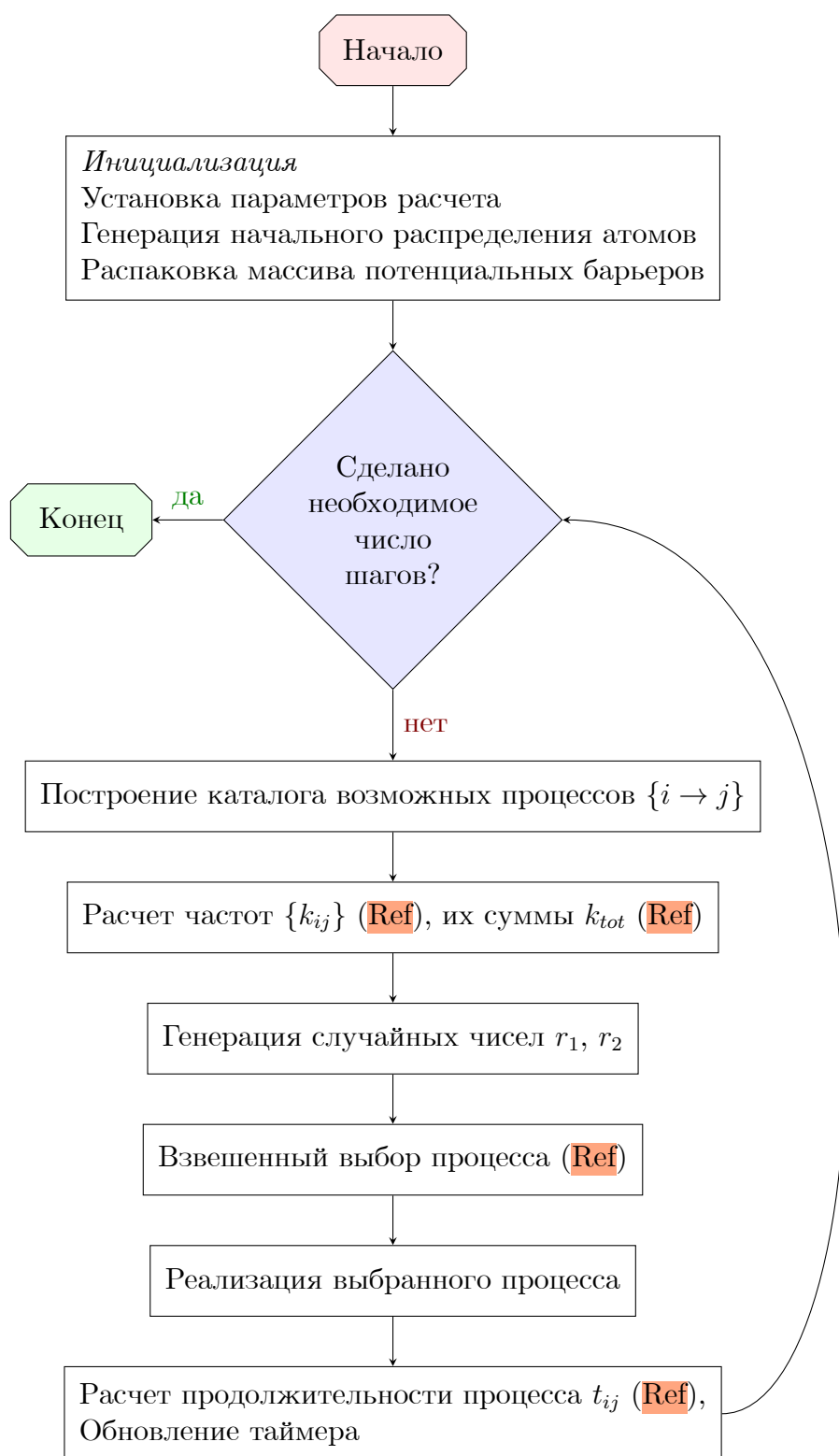


Рис. 2.3: Принципиальная схема алгоритма кинетического метода Монте-Карло с априори известными потенциальными барьерами.

Глава 3

Взаимодействие адатомов на вицинальных поверхностях металлов

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan

Результаты этой главы были опубликованы в работах А5, А6, А9, А10 из списка публикаций по теме диссертации.

nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

3.1. Раздел 1

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

3.2. Раздел 2

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

3.3. Раздел 3

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Глава 4

Формирование наноструктур на вицинальных поверхностях металлов

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan

Результаты этой главы были опубликованы в работах А4, А6, А7, А9 из списка публикаций по теме диссертации.

nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

4.1. Раздел 1

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

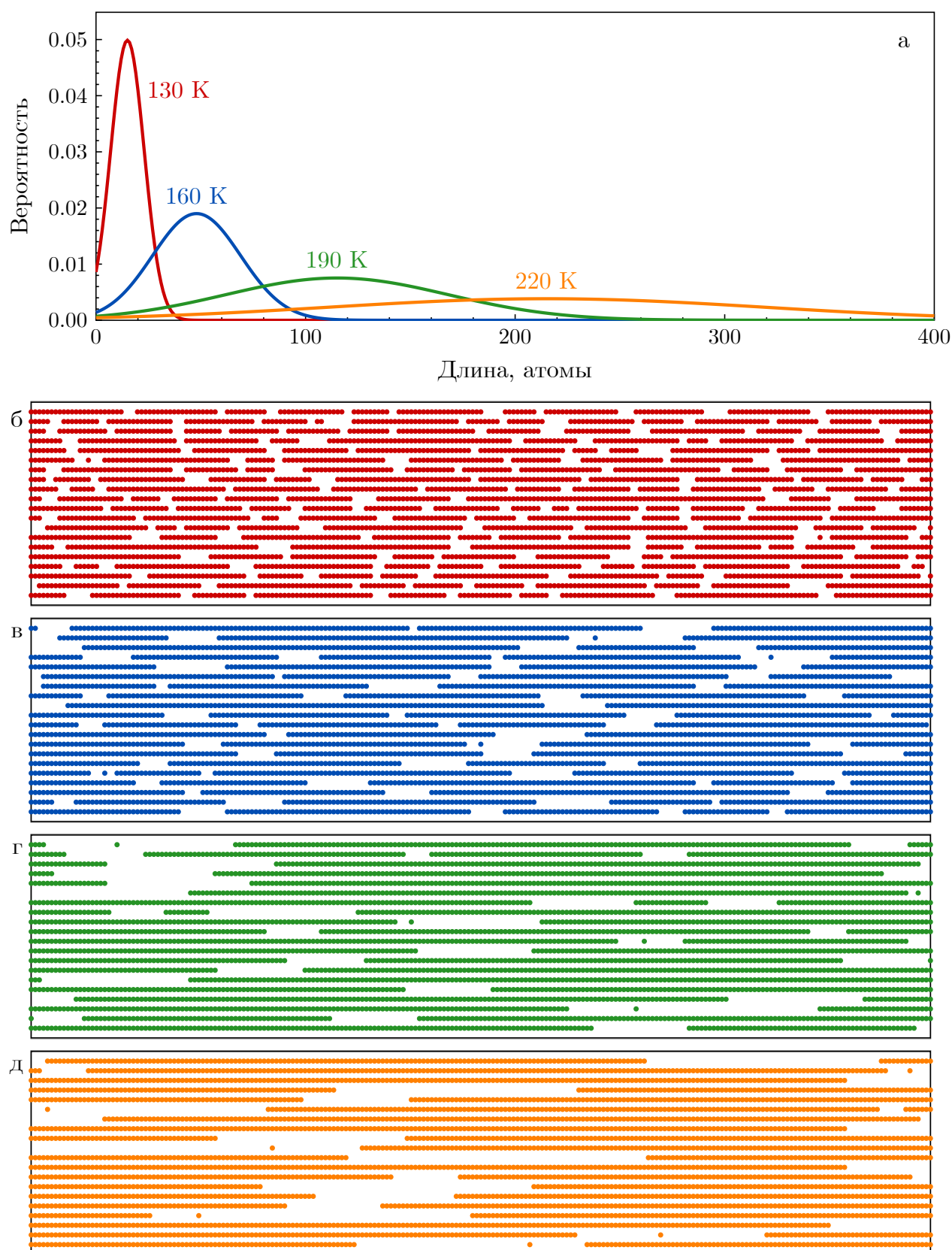


Рис. 4.1: Распределения длин атомных цепочек (а) и фрагменты массивов цепочек на вицинальной поверхности (б, в, г, д) в системе Co/Cu после напыления при четырех разных температурах: 130 К, 160 К, 190 К, 220 К соответственно. Длина расчетной ячейки составляла 600 атомов, длина представленного фрагмента составляет 200 атомов.

4.2. Раздел 2

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

4.3. Раздел 3

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Глава 5

Распределение длин одномерных островков

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim.

Результаты этой главы были опубликованы в работах A1–A4 из списка публикаций по теме диссертации.

Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

5.1. Раздел 1

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

5.2. Раздел 2

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur

eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

5.3. Раздел 3

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque,

erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Глава 6

Структурный фазовый переход в атомных цепочках Co на поверхности Cu(775)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan

Результаты этой главы были опубликованы в работах A7, A8 из списка публикаций по теме диссертации.

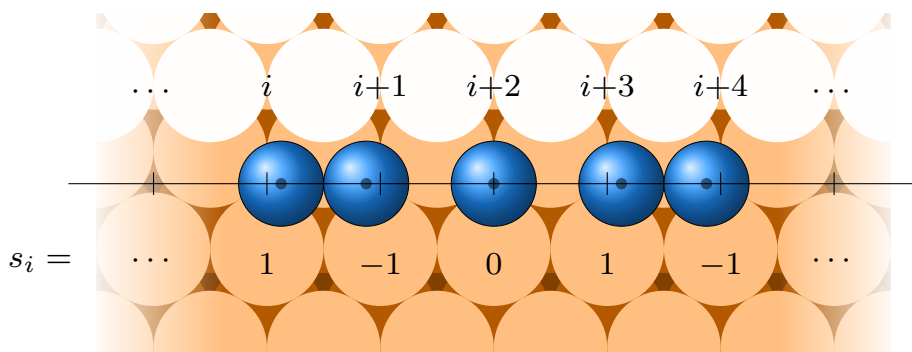


Рис. 6.1: Графическое представление способа расчета параметра порядка. Синие шарики — атомы цепочки, оранжевые круги — нижняя терраса подложки, белые — верхняя терраса подложки.

nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

6.1. Раздел 1

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas

vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

6.2. Раздел 2

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

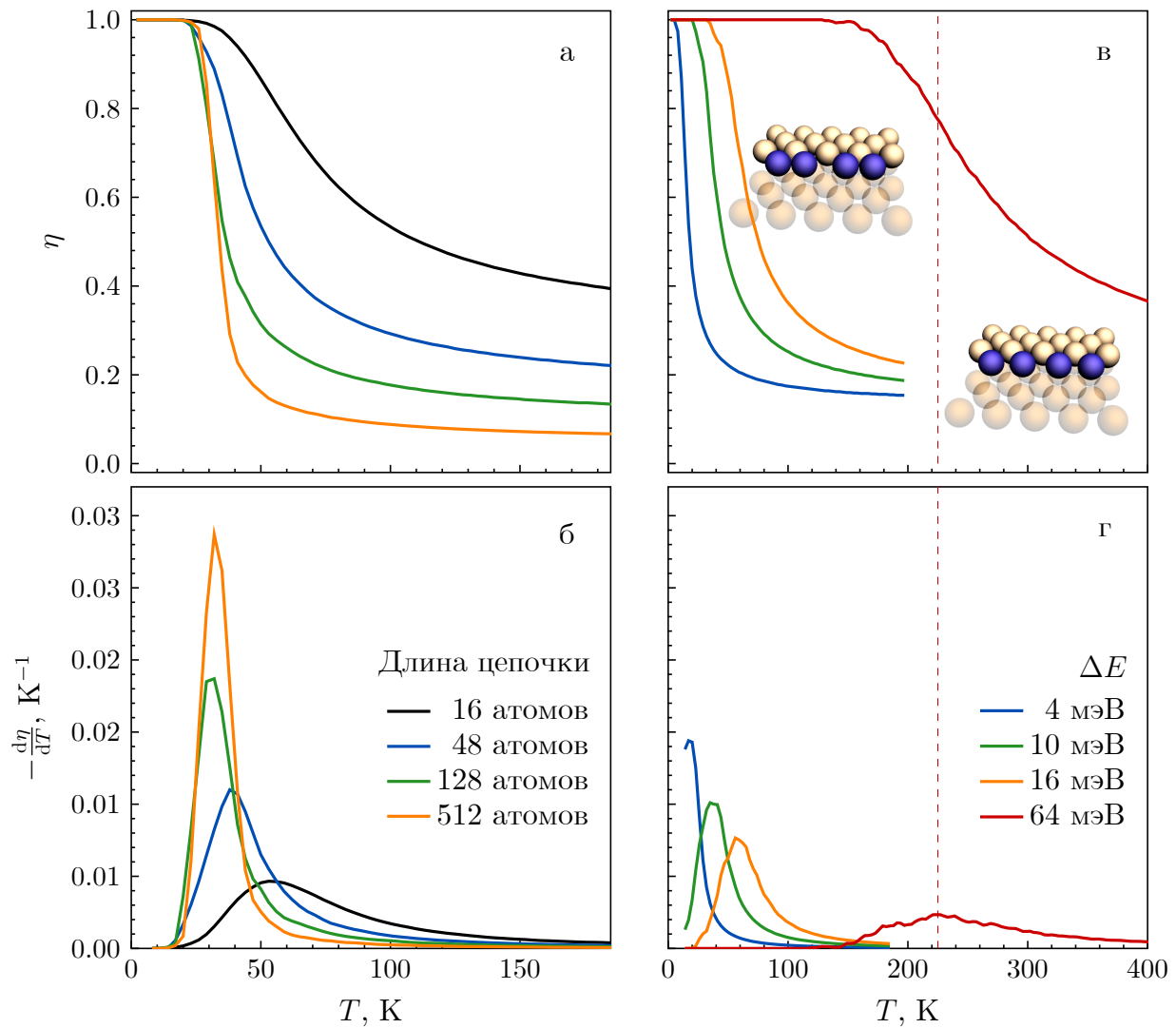


Рис. 6.2: Зависимости параметра порядка η и его производной по температуре с обратным знаком $-\frac{d\eta}{dT}$ от температуры для (а, б) цепочек различной длины с $\Delta E = 10$ мэВ и (в, г) цепочек длиной 64 атома с разными значениями энергии димеризации ΔE . Подписи к кривым общие для графиков (а) и (б), и (в) и (г). Вертикальная пунктирная линия на рисунках (в, г) соответствует температуре структурного фазового перехода для цепочки длиной 64 атома с $\Delta E = 64$ мэВ. Для наглядности слева и справа от нее на рисунке (в) схематически нарисована цепочка до и после структурного фазового перехода.

Основные результаты и выводы

1. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.
2. Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.
3. Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.
4. Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse

platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

5. Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.
6. Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Литература

1. Erwin, S. C., Himpsel, F. J. Intrinsic magnetism at silicon surfaces. *Nature Communications* **1**, 1–6 (2010).
2. Клавсюк, А. Л., Салецкий, А. М. Формирование и свойства металлических атомных контактов. *Успехи физических наук* **185**, 1009—1030 (2015).
3. Бычков, Ю. А., Рашба, Э. И. Свойства двумерного электронного газа со снятым вырождением спектра. *Письма в ЖЭТФ* **39**, 66 (1984).
4. Giesen, M. Step and island dynamics at solid/vacuum and solid/liquid interfaces. *Progress in Surface Science* **68**, 1–153 (2001).
5. Оура, К., Лифшиц, В. Г., Саранин, А. А., Зотов, А. В., Катаяма, М. *Введение в физику поверхности* (ред. Сергиенко, В. И.) (Наука, Москва, 2006).
6. Ibach, H. Electron energy loss spectroscopy: the vibration spectroscopy of surfaces. *Surface Science* **299-300**, 116–128 (1994).
7. Ibach, H. *Electron Energy Loss Spectrometers* (Springer Berlin Heidelberg, 1991).
8. Greenler, R. G. Infrared Study of Adsorbed Molecules on Metal Surfaces by Reflection Techniques. *The Journal of Chemical Physics* **44**, 310–315 (1966).
9. Bradshaw, A., Pritchard, J. Infra-red spectra of carbon monoxide on evaporated nickel films. *Surface Science* **17**, 372–386 (1969).
10. Dumas, P., Weldon, M. K., Chabal, Y. J., Williams, G. P. Molecules at Surfaces and Interfaces Studied Using Vibrational Spectroscopies and Related Techniques. *Surface Review and Letters* **06**, 225–255 (1999).
11. Bauer, E. Surface electron microscopy: the first thirty years. *Surface Science* **299-300**, 102–115 (1994).
12. Bauer, E. Low energy electron microscopy. *Reports on Progress in Physics* **57**, 895–938 (1994).
13. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., Weibel, E. Tunneling through a controllable vacuum gap. *Applied Physics Letters* **40**, 178–180 (1982).
14. Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C. Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters* **56**, 930–933 (1986).

15. Müller, E. W. Das Feldionenmikroskop. *Zeitschrift für Physik* **131**, 136—142 (1951).
16. Müller, E. W. Elektronenmikroskopische Beobachtungen von Feldkathoden. *Zeitschrift für Physik* **106**, 541—550 (1937).
17. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., Weibel, E. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. *Physical Review Letters* **49**, 57–61 (1982).
18. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., Weibel, E. 7×7 Reconstruction on Si(111) Resolved in Real Space. *Physical Review Letters* **50**, 120–123 (1983).
19. Den Haan, A. M. J., Wijts, G. H. C. J., Galli, F., Usenko, O., van Baarle, G. J. C., van der Zalm, D. J., Oosterkamp, T. H. Atomic resolution scanning tunneling microscopy in a cryogen free dilution refrigerator at 15 mK. *Review of Scientific Instruments* **85**, 035112 (2014).
20. Song, Y. J., Otte, A. F., Kuk, Y., *et al.* High-resolution tunnelling spectroscopy of a graphene quartet. *Nature* **467**, 185–189 (2010).
21. Frenken, J. W., Groot, I. M. Seeing dynamic phenomena with live scanning tunneling microscopy. *MRS Bulletin* **42**, 834–841 (2017).

Список опубликованных работ

Статьи в научных журналах

- A1. Syromyatnikov, A. G., Saletsky, A. M., Klavsyuk, A. L. Stability and magnetism on the atomic scale: atom-wide wires on vicinal metal substrate. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **510**, 166896 (1–4) (2020). IF = 2.717.
- A2. Syromyatnikov, A. G., Saletsky, A. M., Klavsyuk, A. L. One-dimensional island size distribution: From non-equilibrium to equilibrium. *Surface Science* **693**, 121528 (1–4) (2020). IF = 1.466.
- A3. Syromyatnikov, A., Klavsyuk, A., Saletsky, A. Formation and Stability of Magnetic Atomic Chains on Vicinal Metal Surfaces. *IEEE Magnetism Letters* **10**, 6111003 (1–3) (2019). IF = 1.54.
- A4. Сыромятников, А. Г., Салецкий, А. М., Клавсюк, А. Л. Равновесные и неравновесные состояния одномерных атомных структур. *Письма в ЖЭТФ* **110**, 331—334 (2019). IF = 1.399.
- A5. Сыромятников, А. Г., Салецкий, А. М., Клавсюк, А. Л. Зависимость распределения длин атомных цепочек на вицинальной поверхности от внешних параметров. *Письма в ЖЭТФ* **107**, 794—798 (2018). IF = 1.412.
- A6. Syromyatnikov, A. G., Saletsky, A. M., Klavsyuk, A. L. Distributions of atomic wire lengths. *Phys. Rev. B* **97**, 235444 (1–6) (2018). IF = 3.736.
- A7. Сыромятников, А. Г., Кабанов, Н. С., Салецкий, А. М., Клавсюк, А. Л. Формирование и структурный фазовый переход в атомных цепочках Co на поверхности Cu(775). *ЖЭТФ* **151**, 160—164 (2017). IF = 1.255.
- A8. Syromyatnikov, A. G., Kolesnikov, S. V., Saletsky, A. M., Klavsyuk, A. L. The structure phase transition in atom-wide Co wires on a vicinal Cu <111> surface. *Materials Letters* **179**, 69–72 (2016). IF = 2.572.
- A9. Syromyatnikov, A. G., Kabanov, N. S., Saletsky, A. M., Klavsyuk, A. L. Ab initio study of interaction between 3d adatoms on the vicinal Cu(111) surface. *Modern Physics Letters B* **30**, 1650218 (1–9) (2016). IF = 1.622.

- A10. Сыромятников, А. Г., Клавсюк, А. Л., Салецкий, А. М. Исследование взаимодействия адатомов Co на вицинальной поверхности Cu(111). *Письма в ЖЭТФ* **100**, 26—29 (2014). IF = 1.359.

Публикации в сборниках тезисов конференций

- T1. Сыромятников, А. Г., Клавсюк, А. Л., Салецкий, А. М. *Распределения длин одномерных наноструктур, или от равновесия к неравновесию и обратно в Сборник тезисов VIII научной молодежной школы-конференции “Химия, физика, биология: пути интеграции”* (Москва, Россия, 2020), 39.
- T2. Klavsyuk, A., Syromyatnikov, A., Saletsky, A. *Magnetism and structure on the atomic scale: Atom-wide wires on vicinal metal substrate in The 8th International Workshop on Magnetic Wires 2019 Book of Abstracts* (Svetlogorsk, Russia, 2019), 21.
- T3. Klavsyuk, A., Syromyatnikov, A., Saletsky, A. *Magnetism and structure of atom-wide Co and Fe wires on a metallic substrate in The 3rd International Baltic Conference on Magnetism 2019 Book of Abstracts* (Svetlogorsk, Russia, 2019), 49.
- T4. Syromyatnikov, A., Klavsyuk, A., Saletsky, A. *Formation and structure phase transition of Co nanowires on vicinal Cu(111) surfaces in The 3rd International Baltic Conference on Magnetism 2019 Book of Abstracts* (Svetlogorsk, Russia, 2019), 159.
- T5. Сыромятников, А. Г., Клавсюк, А. Л., Салецкий, А. М. *Моделирование самоорганизации атомных цепочек на ступенчатых поверхностях в Сборник тезисов VI научной молодежной школы-конференции “Химия, физика, биология: пути интеграции”* (Москва, Россия, 2018), 97—98.
- T6. Klavsyuk, A. L., Syromyatnikov, A. G., Saletsky, A. M. *Co atomic wires on stepped Cu(111) surface: formation, phase transition in International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T) 2018 Book of Abstracts* (Brno, Czech Republic, 2018), 229–230.
- T7. Сыромятников, А. Г. *Формирование атомных цепочек кобальта на поверхности Cu(775) в Сборник тезисов V научной молодежной школы-конференции “Химия, физика, биология: пути интеграции”* (Звенигород, Россия, 2017), 19.
- T8. Сыромятников, А. Г. *Структурный фазовый переход в нанопроводах кобальта в Сборник тезисов XXIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов — 2016”* (Москва, Россия, 2016).

- T9. Klavsyuk, A. L., Syromyatnikov, A. G., Kabanov, N. S. *Ab initio study of structure transition in atom-wide Co wires on a vicinal Cu(111) surface* in *European Conference on Surface Science (ECOSS 32) Book of Abstracts* (Grenoble, France, 2016), 443.
- T10. Сыромятников, А. Г. *Определение структуры нанопроводов Co на вицинальной поверхности Cu(111) методом молекулярной динамики* в *Сборник тезисов XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов—2015”* (Москва, Россия, 2015).
- T11. Klavsyuk, A. L., Syromyatnikov, A. G., Kabanov, N. S., Saletsky, A. M. *Atomic one-dimensional system stabilized by surface-state electrons* in *European Conference on Surface Science (ECOSS 30) Book of Abstracts* (Antalya, Turkey, 2014), 336.

Благодарности

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Работа выполнена при финансовой поддержке