

Московский государственный университет имени  
М. В. Ломоносова

*На правах рукописи*

**Сыромятников Алексей Геральдович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И  
СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АТОМНЫХ  
ПРОВОДОВ**

Специальность 01.04.07 — физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

**Научный руководитель** Клавсюк Андрей Леонидович,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический фа-  
культет, кафедра общей физики, доцент.

**Официальные оппоненты:** Таюрский Дмитрий Альбертович,  
доктор физико-математических наук, профес-  
сор, Казанский федеральный университет, заве-  
дующий кафедрой общей физики;

Кузаков Константин Алексеевич,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический фа-  
культет, кафедра физики атомного ядра и кван-  
товой теории столкновений, профессор;

Гайнуллин Иван Камилевич,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический фа-  
культет, кафедра физической электроники, до-  
цент.

Защита состоится 22 октября 2020 г. в 17 час. 00 мин. на заседании дис-  
сертационного совета МГУ.01.01 Московского государственного универ-  
ситета имени М. В. Ломоносова по адресу:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, МГУ, Физический  
Факультет, ауд. \_\_\_\_\_

E-mail: [laptin@polly.phys.msu.ru](mailto:laptin@polly.phys.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной биб-  
лиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и  
на сайте ИАС ИСТИНА

<https://istina.msu.ru/dissertations/317745379/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » сентября 2020 года.

Ученый секретарь  
кандидат физико-математических наук

Диссертационного совета МГУ.01.01  
Т. В. Лаптинская

## Общая характеристика работы

**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 металлов. 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 атомов  $3d$ -металлов со ступенью вицинальной поверхности меди.
3. Определить преобладающие 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 атомов  $3d$ -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.

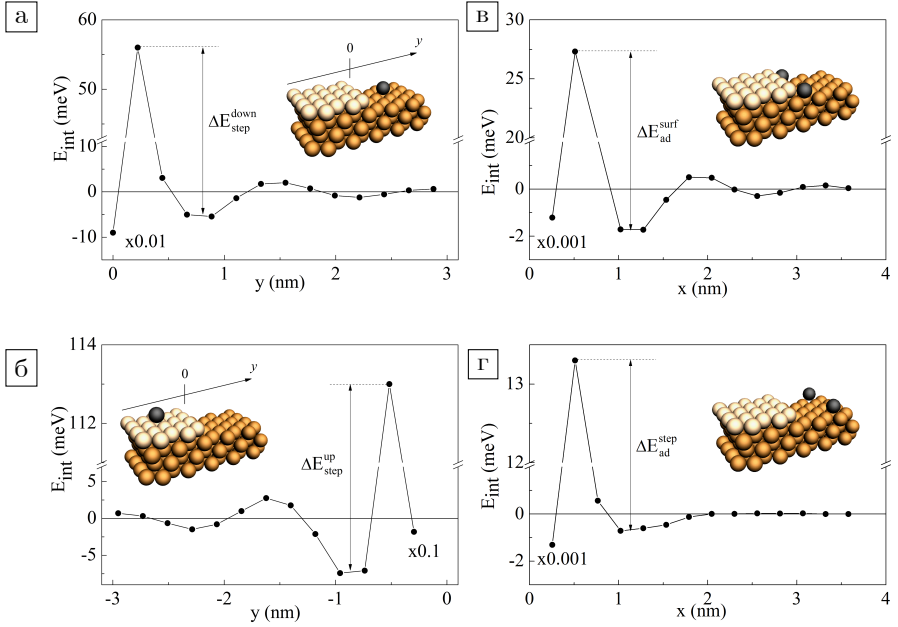
**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 117 страницах, включает 44 рисунка и 4 таблицы. Общее число ссылок составляет 173. Каждую главу предваряет вступительная часть, представляющая краткое содержание и основные задачи текущей главы. В конце диссертации сформулированы основные результаты, достигнутые в ней.

## **Краткое содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указана ее научная новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание работы по главам.

В **первой главе** приводится обзор литературы по теме диссертации. В ней проанализированы теоретические и экспериментальные работы, в которых представлены исследования свойств атомных структур, в том числе одномерных, на поверхности металлов. В частности, дан обзор работ, посвященных росту наноструктур кобальта на вицинальной поверхности меди. Проанализированы ранее полученные распределения длин одномерных наноструктур на ступенчатых поверхностях и подходы к их получению. Описан эксперимент, в котором впервые было показано наличие двух структурных фаз у кобальтовой проволоки на поверхности меди.

Во **второй главе** представлено описание методов моделирования наноструктур, использованных в данной работе, а именно теории функционала плотности и методов Монте-Карло, в частности алгоритма Метрополиса и кинетического метода Монте-Карло.



**Рис. 1:** (а, б) Взаимодействие между адатомом Ni и краем террасы вицинальной поверхности Cu(111) (а) снизу и (б) сверху от края ступени.  $y$  — расстояние от края ступени. Значение первой точки масштабировано в (а) 0.01 и (б) 0.1 раз. (в, г) Взаимодействие между адатомами Ni (в) вдали и (г) вблизи от края ступени.  $x$  — расстояние между адатомами. Значение первой точки масштабировано в 0.001 раз.

В **третьей главе** рассматривается взаимодействие адатомов  $3d$ -металлов на вицинальной поверхности меди.

В первом параграфе третьей главы описывается взаимодействие адатомов со ступенью и между собой в случае бесконечно широких террас. Взаимодействие адатомов между собой и со ступенью является суперпозицией нескольких видов взаимодействий: прямого, диполь-дипольного и взаимодействия, осуществляемого через электронный газ ступени. Предложена полуэмпирическая модель, позволяющая рассчитывать энергию взаимодействия адатомов между собой и со ступенью. Именно диполь-дипольное взаимодействие, возникающее из-за перераспределения электрического заряда вблизи ступени, и фриделевское электростатическое



взаимодействие объясняют отталкивающий барьер ступени. Результаты, полученные в рамках предложенной модели, были проверены при помощи квантовомеханических расчетов методом функций Грина Корринги-Кона-Ростокера в приближении локальной спиновой плотности.

Представленные результаты объясняют предпочтение роста одномерных атомных структур на нижней террасе вместо верхней. Различие в отталкивающих барьерах для адатома Со со ступенью может приводить к тому, что при низких температурах адатомы Со будут приближаться к ступени снизу и, как следствие, формировать структуры там. Была проведена оценка частоты подхода атомов к краю ступени снизу и сверху.

Помимо этого была рассчитана энергия взаимодействия других адатомов  $3d$ -металлов со ступенью, а также между собой. Взаимодействие между адатомом Ni и краем террасы вицинальной поверхности Cu(111), а также между двумя адатомами Ni представлено на рисунке 1.

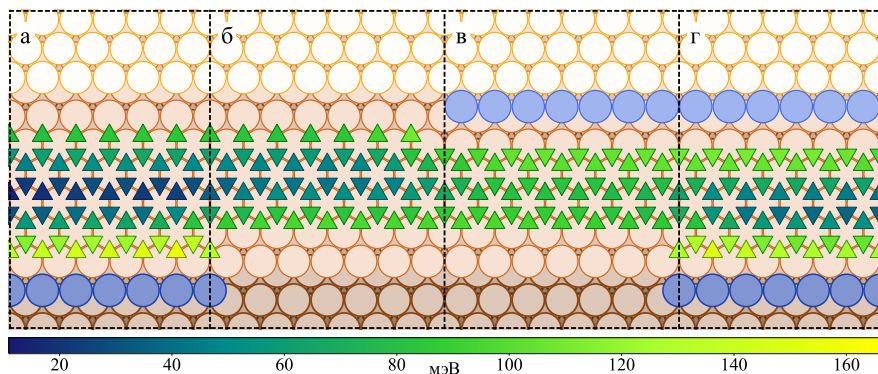
Во втором параграфе было исследовано взаимодействие адатомов со ступенью в случае узких террас (на примере поверхности Cu(775), террасы которой состоят из 6 атомных рядов). Было продемонстрировано изменение потенциальных барьеров для прыжков адатома по поверхности в зависимости от наличия цепочки на верхней или нижней террасе. Описано явление “наносемафора”. Карта потенциальных барьеров для адатома Со на вицинальной поверхности Cu(775) показана на рисунке 2.

В третьем параграфе третьей главы показана зависимость энергии связи цепочки Со на вицинальной поверхности Cu(111). Показано, что энергия связи экспоненциальным образом убывает с ростом цепочки.

В **четвертой главе** рассматривается формирование наноструктур на вицинальных металлических поверхностях.

В первом параграфе описывается комплекс программ **кМС4**, позволяющий моделировать осаждение адатомов и последующую эволюцию образующихся наноструктур.

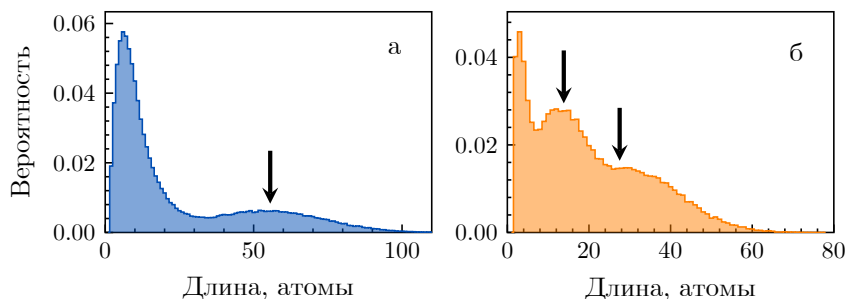
В следующем параграфе описываются результаты моделирования наноструктур, образующихся при росте в однотемпературном режиме. При моделировании учитываются такие эффекты, как перераспределение электрического заряда вблизи ступени, ранее описанный размерный эффект



**Рис. 2:** Карта потенциальной энергии для адатома Co на вицинальной поверхности Cu(775). (а) и (в) На поверхности присутствуют атомные цепочки кобальта на нижней или верхней террасах, соответственно. (б) Чистая поверхность. (г) На поверхности присутствуют атомные цепочки кобальта. Треугольниками, направленными острием вверх, обозначены ГЦК положения; направленными острием вниз — ГПУ положения.

энергии связи в цепочке и созревание Оствальда. Такие параметры эксперимента, как температура, поток осаждаемых атомов, степень покрытия, брались из экспериментальных работ. Согласно полученным результатам, распределение длин цепочек получается мономодальным и хорошо описывается распределением Гаусса. Такое распределение хорошо описывает экспериментальные данные. При этом значение наиболее вероятной длины цепочки увеличивается вместе с ростом температуры образца. Помимо прочего, форма распределения сохраняется постоянной при сохранении отношения полного числа напыляемых адатомов к длине террасы при замороженных прочих параметрах. Было показано, что при одностепенном температурном режиме на форму распределения оказывают влияние только изменения концентраций адатомов и/или дефектов, а также температуры.

В третьем параграфе описывается рост наноструктур на вицинальных поверхностях при двухтемпературном режиме. Такой режим описывает эксперимент, в котором осаждение происходит при одной температуре, а между ним и получением изображения происходит еще фаза отжига при



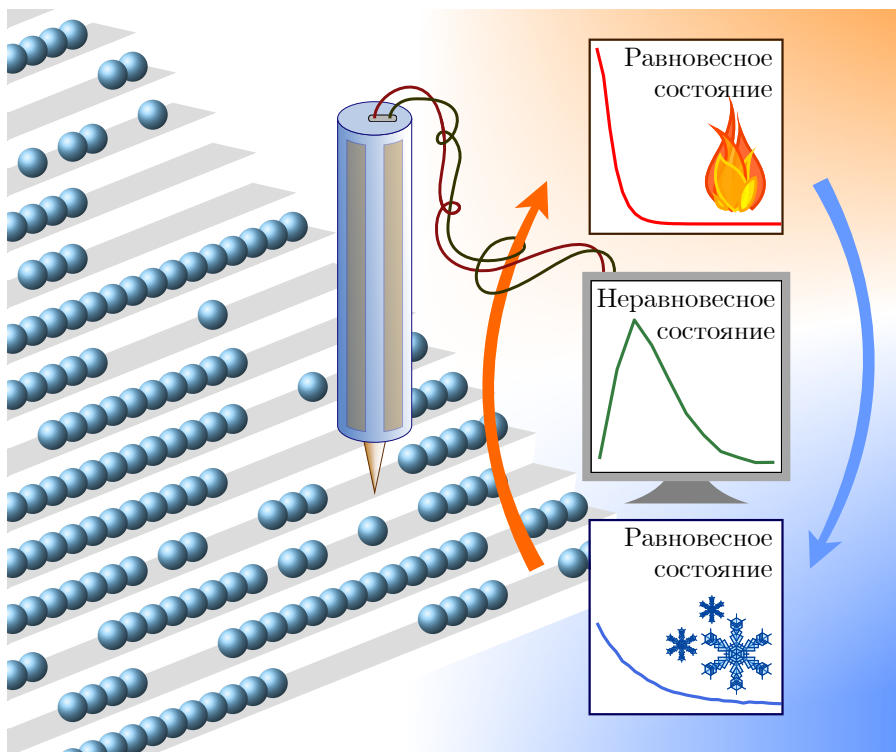
**Рис. 3:** Распределения длин атомных цепочек: напыление при температуре 160 К, отжиг при 300 К. (а) ширины террас слабо отличаются друг от друга, (б) поверхность имеет террасы с тремя характерными ширинами. Стрелками выделены пики, появляющиеся из-за разницы в ширинах террас.

другой, более высокой температуре. Было обнаружено, что даже существенное различие во временах отжига (несколько порядков) практически не влияет на форму распределения и положение его максимума. Однако в реальном эксперименте поверхность часто неидеальна и имеет несколько характерных ширин. Учитывая этот факт, были получены распределения длин цепочек, имеющие несколько пиков, как на рисунке 3. При правильном подборе ширин террас возможно получить распределения, описывающие цепочки с так называемыми “магическими” длинами [4] (см. рис. 3б).

Было показано, что если после осаждения цепочки находились в состоянии термодинамического равновесия, то в процессе отжига его сменяет неравновесное состояние. По прошествии некоторого времени неравновесное состояние снова сменяется равновесным, что схематически показано на рисунке 4. Однако часто этот процесс оказывается достаточно длительным, поэтому экспериментальный анализ длин одномерных атомных структур происходит, когда равновесное состояние еще не наступило. Это говорит о том, что не всегда можно использовать равновесные теоретические модели для определения энергии связи цепочек на поверхности.

В **пятой главе** обсуждаются равновесное и неравновесное распределения длин одномерных островков.

В первом параграфе выводится выражение для равновесной функции



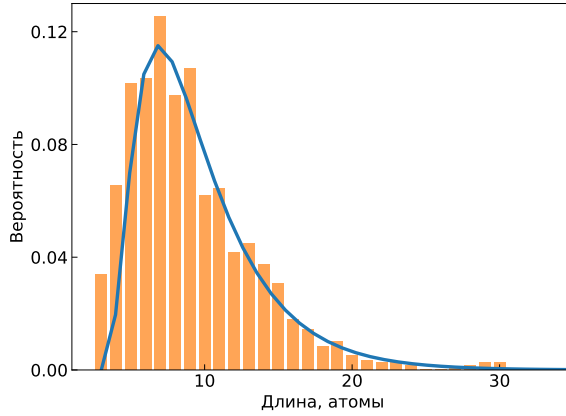
**Рис. 4:** Схематическое изображение иглы сканирующего туннельного микроскопа и неравновесного распределения длин цепочек, получаемого экспериментально, и равновесных распределений, образующихся по прошествии некоторого времени с изменением температуры.

распределения длин одномерных островков. При выводе в качестве основания берется одномерная модель решеточного газа, и далее в рамках статистической физики выводится конечное выражение. Обсуждается неявная зависимость выражения от температуры, а также функция количества островков на террасе от температуры. Показано, что число островков растет вместе с ростом температуры и выходит на плато в пределе высоких температур, причем эта зависимость носит нелинейный характер.

В следующем параграфе обсуждаются времена жизни одномерных островков. В качестве примера берутся две системы, Ag/Pt и Co/Cu. Особый упор делается на различие потенциальных барьеров для диффузии вдоль края ступени в обеих системах и энергии связи  $E_{bind}$  и на следующее отсюда различие в видах распределения длин цепочек. Система Ag/Pt может быть описана в рамках одномерной модели решеточного газа, так как в силу небольшой величины потенциальных барьеров она успевает придти к равновесию за время эксперимента. В отличие от нее система Co/Cu остается в неравновесном состоянии. Рассматривается эволюция распределения длин островков с ростом времени отжига, показано, что при этом положение максимума распределения перемещается с некоторого значения в область совсем коротких островков, то есть система приходит в термодинамически равновесное состояние. Вводится критерий устойчивости одномерного островка, отношение к единице значения  $E_{bind}/k_B T$ , где  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура. Если  $E_{bind}/k_B T \gg 1$ , то одномерный островок будет устойчивым.

В третьем параграфе выводится выражение для распределения длин одномерных островков. В процессе охлаждения переход из одного состояния термодинамического равновесия в другое происходит через неравновесное состояние. Этот переход сопровождается распадом одномерных островков. При этом распад таких островков является случайным процессом, что учитывается при выводе. Выражение для неравновесного распределения длин островков имеет вид

$$f(l, t) = A' \frac{K}{M} \left(1 - \frac{K}{M}\right)^{l-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{al}(l-2)}\right), \quad (1)$$



**Рис. 5:** Гистограмма: экспериментальное распределение размеров одномерных островков Ag на вицинальной поверхности Pt(997) [5]. Линией показано неравновесное распределение длин островков согласно (1) при  $K = 430$  и наиболее вероятной длине островка  $l_{mp} = 7$ .

где  $A'$  — константа нормировки,  $K$  — число островков,  $M$  — число осажденных атомов,  $l$  — длина островка,  $t$  — время,  $\tau_a$  — полное время случайного блуждания атома от одного островка до другого. Сравнение теоретического распределения с экспериментальным показано на рисунке 5.

Четвертый параграф посвящен вопросу определения энергии связи в одномерных островках. Обсуждается время жизни островков в контексте продолжительности эксперимента. Приводится алгоритм определения энергии связи из экспериментальных данных.

**Шестая глава** посвящена структурному фазовому переходу в одноатомной цепочке атомов кобальта на вицинальной поверхности меди.

В первом параграфе предложена модель, позволяющая изучить структурный фазовый переход в цепочке кобальта из димеризованного состояния в недимеризованное, ранее впервые наблюдавшийся экспериментально. Этот процесс был исследован при помощи алгоритма Метрополиса, энергетические барьеры для которого были получены из первопринципных расчетов. Кроме того, было показано, что в рамках теории функционала плотности возможно описать димеризованную структуру цепочки

кобальта, вопреки заключению, сделанному в работе [6]. Второй параграф посвящен влиянию различных параметров, таких как температура и длина цепочки, на критическую температуру структурного фазового перехода. Было показано, что критическая температура может изменяться в том числе и благодаря наличию над цепочкой иглы сканирующего туннельного микроскопа. Обсуждается размерный эффект. Показано, что критическая температура линейно растет вместе с  $1/\ln N$ , где  $N$  — длина цепочки.

## Основные результаты и выводы

1. С использованием теории функционала электронной плотности и метода Монте-Карло развита методика, позволяющая моделировать и исследовать формирование и эволюцию морфологии одномерных металлических структур на вицинальных металлических поверхностях в зависимости от различных параметров эксперимента, а также исследовать структурный фазовый переход в них.
2. Исследовано взаимодействие адатомов  $3d$ -металлов со ступенью вицинальной поверхности меди и объяснена их природа. Показано, что взаимодействие между двумя адатомами  $3d$ -металлов на вицинальной поверхности меди существенно зависит от расстояния до ступени.
3. Выявлены основные факторы, влияющие на рост одномерных атомных металлических структур на вицинальных металлических поверхностях. Исследованы основные этапы формирования одномерных атомных металлических структур кобальта на вицинальной поверхности меди как в однотемпературном, так и в двухтемпературном режимах.
4. Показано, как форма распределения длин атомных цепочек на вицинальных металлических поверхностях, а также положение его максимума зависит от ширины террас поверхности, степени покрытия, потока осаждаемых атомов и температуры.

5. Была предложена модель для описания распределения одномерных атомных структур, в которой были учтены такие явления, как созревание Оствальда и распад коротких одномерных структур. В рамках этой модели предложен метод более точного определения значения энергии связи.
6. В системе Co/Cu(775) обнаружено наличие двух структурных фаз для атомных цепочек кобальта. Определена зависимость температуры структурного фазового перехода от длины цепочки и от энергии димеризации.

## Список публикаций по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и SCOPUS*

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.



6. 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.
7. 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.
8. Syromyatnikov, A., Klavsyuk, A., Saletsky, A. Formation and Stability of Magnetic Atomic Chains on Vicinal Metal Surfaces. *IEEE Magnetics Letters* **10**, 6111003 (1–3) (2019). IF = 1.54.
9. 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.
10. 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.

*Иные публикации (статьи в сборниках материалов конференций)*

1. 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.
2. 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).

3. 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.
4. 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).
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Syromyatnikov, A., Klavsyuk, A., Saletsky, A. *Formation and structure phase transition of Co nanowires on vicinal Cu(111) surfaces in The 3<sup>rd</sup> International Baltic Conference on Magnetism 2019 Book of Abstracts* (Svetlogorsk, Russia, 2019), 159.
9. Klavsyuk, A., Syromyatnikov, A., Saletsky, A. *Magnetism and structure of atom-wide Co and Fe wires on a metallic substrate in The 3<sup>rd</sup> International Baltic Conference on Magnetism 2019 Book of Abstracts* (Svetlogorsk, Russia, 2019), 49.

10. Klavsyuk, A., Syromyatnikov, A., Saletsky, A. *Magnetism and structure on the atomic scale: Atom-wide wires on vicinal metal substrate in The 8<sup>th</sup> International Workshop on Magnetic Wires 2019 Book of Abstracts* (Svetlogorsk, Russia, 2019), 21.
11. 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.

### Список литературы

1. Erwin, S. C., Himpfel, 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. Mocking, T. F., Bampoulis, P., Oncel, N., Poelsema, B., Zandvliet, H. J. W. Electronically stabilized nanowire growth. *Nature Communications* **4**, 2387 (2013).
5. Gambardella, P., Brune, H., Kern, K., Marchenko, V. I. Equilibrium island-size distribution in one dimension. *Physical Review B* **73**, 245425 (2006).
6. Zaki, N., Park, H., Osgood, R. M., Millis, A. J., Marianetti, C. A. Failure of DFT-based computations for a stepped-substrate-supported correlated Co wire. *Physical Review B* **89**, 205427 (2014).