

На правах рукописи

МАТЕЦКИЙ Андрей Владимирович

**Адсорбция фуллеренов C_{60} на поверхностные
реконструкции систем Au/Si(111), In/Si(111)**

Специальность — 01.04.10

Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук



Владивосток
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, РФ.

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, профессор
Саранин Александр Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Галкин Николай Геннадьевич

доктор физико-математических наук,
Молочков Александр Валентинович

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук,**
г.Хабаровск

Защита состоится 17 сентября 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, ИАПУ ДВО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, ИАПУ ДВО РАН.

Автореферат разослан 13 августа 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Гамаюнов Е.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования. Рост исследований в области нанотехнологий во многом связан с теми проблемами, которые ставила перед учеными и инженерами интенсивно развивающаяся технология кремниевой электроники. Увеличение мощности вычислительных приборов, их быстродействия, уменьшение стоимости - все эти задачи требовали всё более точных инструментов. До сих пор, для решения данных задач использовались технологии литографии - подход „сверху-вниз“, в рамках которого различными технологическими ухищрениями удавалось уменьшать размеры существующих кремниевых чипов. Успех данного подхода хорошо иллюстрирует „закон Мура“: последние 30 лет, каждые 18-24 месяца число элементов в чипе удваивалось. Однако, предполагается, что данный подход достиг своего физического предела. Это связано с тем, что при достаточно малых размерах функциональных элементов такие факторы, как квантовое туннелирование, чрезмерная диссипация энергии, флуктуация концентрации примесных атомов, начинают играть не последнюю роль. Всё это стало причиной поиска альтернатив нынешней технологии микроэлектроники, одной из которых является молекулярная электроника.

Технологии молекулярной электроники предполагают использование подхода „снизу-вверх“, когда создание структурных элементов цепи происходит путем самосборки их из молекул. Электронные свойства, структура, морфология, состав, размер и т.д. молекул как строительных блоков может при этом варьироваться в широких пределах. Помимо решения задачи получения молекул с заданными свойствами, которая лежит скорее в области химического синтеза, для реализации технологии молекулярной электроники необходимо изучить изменения, которые происходят в молекулах и подложке при их объединении в комплекс, при внесении функционального интерфейса, электрических контактов, при протекании тока, при приложении внешних сил и т.д. Такие исследования помогут выработать необходимые основные принципы для строительных блоков молекулярной электроники. Наконец, для конечной реализации парадигмы „снизу-вверх“ необходимо разработать методы для организации молекулярных блоков и структурных элементов на масштабах различного размера. Это включает в себя не только упорядочение строительных блоков в плотноупакованный взаимосвязанный массив, но и сохранение проектной архитектуры предполагаемого устройства с необходимыми промежуточками и связями между элементами.

Ввиду возможности использования хорошо развитых кремниевых тех-

нологий, поверхность кремния является перспективным кандидатом для использования в качестве интерфейса при создании молекулярных структур. Некоторым препятствием здесь служит большое количество химически активных ненасыщенных связей на поверхности кремния, что зачастую приводит к диссоциации молекул при адсорбции и образованию плохоупорядоченных слоев [1]. Модификация поверхности кремния с помощью формирования на ней субмонослойных металлических слоев приводит к снижению плотности оборванных связей, что частично или полностью решает данную проблему. Кроме того, при такой реконструкции значительно меняются физические и химические свойства поверхности, что дает еще один способ для управления процессами самоорганизации молекул.

Молекулы фуллеренов выглядят перспективными кандидатами в качестве строительного блока при разработке технологии молекулярной электроники. Это связано с высокой стабильностью и степенью симметрии, способностью к самоорганизации [2] фуллеренов, а также богатым набором электронных свойств, которые могут быть изменены путем легирования данных молекул [3].

Все вышесказанное определило актуальность выбранного направления исследований — изучение молекулярных массивов, образованных при адсорбции фуллеренов C_{60} на поверхностных реконструкциях систем Au/Si(111), In/Si(111).

Целью диссертационной работы является изучение адсорбции фуллеренов C_{60} на реконструированных поверхностях кремния и тех взаимодействий вида молекула-подложка, которые сопровождают данный процесс.

Для достижения поставленной цели предполагалось решить следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать адсорбцию фуллеренов C_{60} на поверхностной реконструкции $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In и изучить роль, которую играют поверхностные дефекты в процессах формирования молекулярного массива.
2. Провести экспериментальные исследования стабильности поверхностных реконструкций системы In/Si(111) при адсорбции на них фуллеренов.
3. Экспериментально исследовать адсорбцию фуллеренов C_{60} на реконструкциях вида $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ системы Au/Si(111) без оборванных связей

и изучить влияние антифазных границ на структуру молекулярного слоя.

4. Изучить массивы „магических“ островков C_{60} на $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - (Au,In) и выяснить причины их формирования.

Научная новизна работы. В работе получены новые экспериментальные результаты, основными из которых являются следующие:

1. Изучена роль дефектов замещения при адсорбции C_{60} на $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - In , которые определяют адсорбционные места на начальных этапах роста плёнки. Кроме того, исследовано влияние молекул C_{60} , оказываемое на локальную структуру поверхности, выраженное в смещениях атомных рядов и захвате мобильных вакансий.
2. Обнаружены фазовые переходы между реконструкциями системы $In/Si(111)$ при адсорбции C_{60} – от менее плотной к более плотным. Данные переходы объяснены вытеснением атомов индия фуллеренами.
3. Сформированы гексагональные плотноупакованные упорядоченные массивы молекул C_{60} на поверхности $Si(111)-\alpha-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - Au . Изучена природа различного СТМ контраста фуллеренов в слое, которая объяснена различием электронной структуры фуллеренов.
4. Сформированы гексагональные плотноупакованные упорядоченные массивы молекул C_{60} на поверхности $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - (Au,In) . Обнаружена структура муара с периодом решетки $\sqrt{129} \times \sqrt{129}$, образуемая при наложении гексагональной решетки 1×1 , сформированной фуллеренами, на гексагональную решетку $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ кремния. В данной структуре появление более высокого СТМ контраста у части фуллеренов являются следствием того, что молекулы C_{60} периодически занимают энергетически невыгодные положения над тримерами золота. В этих положениях они выглядят на СТМ изображениях выше на 1-1.5 Å, чем окружающие молекулы C_{60} .
5. На поверхности $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - (Au,In) обнаружены островки C_{60} исключительно стабильных форм и размеров по отношению к другим островкам (магические островки). Показано, что причиной их появления является рельеф энергии адсорбции, обусловленный несоответствием решеток подложки и адсорбата и имеющий наименее выгодное положение адсорбции над тримером золота. Показана возможность формирования практически монодисперсного массива фуллереновых островков.

Практическая ценность работы заключается в апробации методологического инструментария, который обеспечивается применением поверхностных реконструкций при создании молекулярных структур. На примере $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$ показано, что, при наличии оборванных связей, именно они определяют будущее пространственное расположение молекулярных структур. При их отсутствии, молекулы легко формируют пленки со структурой, соответствующей их молекулярным кристаллам, как это было показано для случая $\text{C}_{60}/\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ и $\text{C}_{60}/\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-(Au,In)}$. При этом следует учитывать, что атомы в используемых реконструкциях должны быть сильно связаны с кремнием и друг с другом, иначе адсорбция молекул приведет к разрушению реконструкции и образованию связи молекула-кремний и/или к изменениям структуры поверхности, как это наблюдается в той или иной степени для случая реконструкций системы $\text{In}/\text{Si}(111)$.

В работе предложен и опробован новый подход, в котором процессы самоорганизации направляются рельефом энергии адсорбции, образованным наложением решеток подложки и адсорбата, который может быть использован для создания массива магических молекулярных кластеров.

На защиту выносятся следующие основные положения

1. Адсорбция C_{60} на $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$ приводит к формированию неупорядоченного массива. На поверхности фуллерены ориентированы либо пятиугольным, либо шестиугольным углеродным кольцом вверх. На первых этапах напыления предпочтительными местами адсорбции фуллеренов служат положения над атомами In, которые являются ближайшими соседями дефекта замещения. Адсорбированные фуллерены приносят некоторое напряжение в реконструкцию, которое иногда снимается через смещение атомов In из положения T_4 в положение H_3 по направлению к мобильным вакансиям, случайно оказавшимся в напряженной области в процессе блуждания. При этом происходит „захват“ мобильной вакансии.
2. Адсорбция C_{60} на $\text{Si}(111)\text{-}2 \times 2\text{-In}$, $\text{Si}(111)\text{-hex-}\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$ приводит к формированию неупорядоченных массивов. Фуллерены ориентированы шестиугольным кольцом вверх. При адсорбции одна молекула C_{60} вытесняет $\sim 1\text{-}2$ и $\sim 3\text{-}6$ атомов индия на поверхностях $2 \times 2\text{-In}$ и $\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-hex}$, соответственно. Это приводит к структурному переходу от менее плотной фазы к более плотной: $\text{Si}(111)\text{-}2 \times 2\text{-In}$ замещается $\text{Si}(111)\text{-hex-}\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$, а $\text{Si}(111)\text{-hex-}\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$ замещается $\text{Si}(111)\text{-rec-}\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$.
3. Фуллерены, адсорбированные на поверхности $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$,

формируют упорядоченный массив. На поверхности присутствуют два типа доменов: повернутые на 1° и на 19.1° относительно направления $\langle 10\bar{1} \rangle$. Наложение гексагональной решетки 1×1 , образованной фуллеренами, на гексагональную решетку $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ кремния, содержащую сеть антифазных границ приводит к формированию муарных линий в слое фуллеренов, которые перпендикулярны антифазным границам подложки. Электронная структура фуллеренов в линиях муара и вне их различна. Данное различие в электронной структуре фуллеренов наследуется следующими слоями после первого вплоть до четвертого.

4. Адсорбция C_{60} на поверхность $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,In)$ приводит к формированию упорядоченного массива. На поверхности присутствуют два типа доменов: повернутые на 1° и на 19.1° относительно направления $\langle 10\bar{1} \rangle$. Фуллерены в 1° -доменах имеют различный контраст, а те из них, которые лежат строго над тримерами золота, находятся в наименее выгодных энергетических положениях и выглядят выше в СТМ изображениях, чем остальные. Они образуют решетку с периодом $\sqrt{129} \times \sqrt{129}$.
5. Дозревание при комнатной температуре массива островков C_{60} , сформированных при низких температурах (110-115 К), приводит к формированию массива островков с дискретным распределением по размерам (только определенные, „магические“ конфигурации островков являются стабильными). Наиболее стабильным для покрытия 0.05–0.1 MC_{60} и комнатной температуры является островок из 37 фуллеренов (до 80 % всех островков). Причиной появления магических островков является рельеф энергии адсорбции с наименее выгодным положением над тримером золота, масштабированный несоответствием решеток подложки и адсорбата. Такой рельеф можно представить как периодическое потенциальное поле с решеткой $\sqrt{129} \times \sqrt{129}$, в узлах которой находятся максимумы потенциальной энергии.

Апробация результатов работы Основные результаты работы докладывались на международных, российских и региональных конференциях, в том числе на:

Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (г. Владивосток, Россия, 2010 г.); Русско-японском семинаре по поверхностям полупроводников RJSS-9 (г. Владивосток, Россия, 2010 г.); Азиатской школе-конференции по физике и технологии наноструктурных материалов ASCO-NANOMAT (г. Владивосток, Россия, 2011 г.); Международном симпозиуме "Нанопизика и нанoeлектроника"(г.Нижний Новгород, Россия, 2011 г.); Азиатской школе-

конференции по физике и технологии наноструктурных материалов ASCO-NANOMAT (г. Владивосток, Россия, 2010 г.); Международной конференции по пленкам и поверхностям твердых тел ICSFS-15 (г. Пекин, Китай, 2010 г.); Международном симпозиуме "Нанозифика и наноэлектроника"(г. Нижний Новгород, 2012 г.); Международном симпозиуме по науке о поверхности и нанотехнологии ISSS-6 (г. Токио, Япония, 2011 г.); Десятой региональной научной конференцией "ФИЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБРАЗОВАНИЕ"(г. Владивосток, 2011 г.); Международной конференции и Школе молодых учёных „Кремний-2012“ (г. Санкт-Петербург, 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в научных журналах, входящих в Перечень ведущих периодических изданий ВАК.

Личный вклад автора заключается в подготовке и проведении экспериментов, и интерпретации полученных результатов. Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, включая 55 рисунков и список литературы из 132 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отображена актуальность темы исследования, научная новизна и практическая ценность работы, сформулирована ее цель и задачи, указаны основные защищаемые положения, представлен список конференций, семинаров и школ, на которых докладывались результаты диссертационной работы, приведен список публикаций по тематике диссертационной работы, а также даны краткие сведения об объеме и структуре самой диссертации.

Первая глава является обзорной. Описаны строение и электронные свойства молекул C_{60} , рассмотрены технологии молекулярной электроники с использованием этих фуллеренов в качестве строительного блока

и возможности исследования фуллеренов с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и спектроскопии (СТС); проведен анализ литературных данных по адсорбции C_{60} на атомно-чистых поверхностях металлов и кремния и на поверхностных реконструкциях Si(111); дано сравнение данных поверхностей в качестве подложек для роста молекулярных структур и показана перспективность использования поверхностных реконструкций для управления процессами самоорганизации молекул на поверхности.

Во второй главе кратко рассмотрены условия проведения эксперимента и метод СТМ. Эксперименты выполнялись на сверхвысоковакуумной установке Omicron STM-XA, оснащенной СТМ с возможностью нагрева и охлаждения образца во время сканирования, оборудованием для подготовки подложки и напыления различных металлов и C_{60} .

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию адсорбции фуллеренов C_{60} на поверхностные реконструкции системы In/Si(111). В начале главы дано рассмотрение структуры и способов приготовления используемых в работе поверхностных фаз системы In/Si(111). Далее приведены экспериментальные данные по взаимодействию фуллеренов C_{60} с точечными дефектами реконструкции Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In (далее $\sqrt{3}$ -In).

Адсорбция C_{60} на фазу $\sqrt{3}$ -In не приводит к формированию пленки с дальним порядком (рис. 1 (а)). Кроме того, на СТМ изображениях хорошо различима внутримолекулярная структура, т.е. вращение фуллеренов подавлено, что, как и отсутствие упорядоченных молекулярных массивов, указывает на достаточно сильную связь адсорбата с подложкой. Анализ СТМ данных и сопоставление их с известным пространственным распределением LUMO и LUMO+1 [4] показали, что молекулы на поверхности $\sqrt{3}$ -In ориентированы либо пятиугольными, либо шестиугольными углеродными кольцами вверх („5“ и „6“ на вставке рис.1 (а), соответственно).

На поверхности $\sqrt{3}$ -In оборванные связи насыщены и единственным их источником являются дефекты замещения, которые играют определяющую роль на первых этапах адсорбции C_{60} . Сопоставление СТМ изображений одного и того же места до и после адсорбции $\sim 0.1 \text{ MC}_{60}$ (1 фуллереновый монослой $\approx 1.16 \times 10^{14}$ молекул/см²) показало, что все C_{60} можно разбить на три группы по местам адсорбции: первая – C_{60} , связанные с дефектами замещения, вторая – C_{60} , связанные с другими фуллеренами, но не с Si-дефектами, третья – изолированные фуллерены. Статистический анализ показал, что фуллерены преимущественно связа-

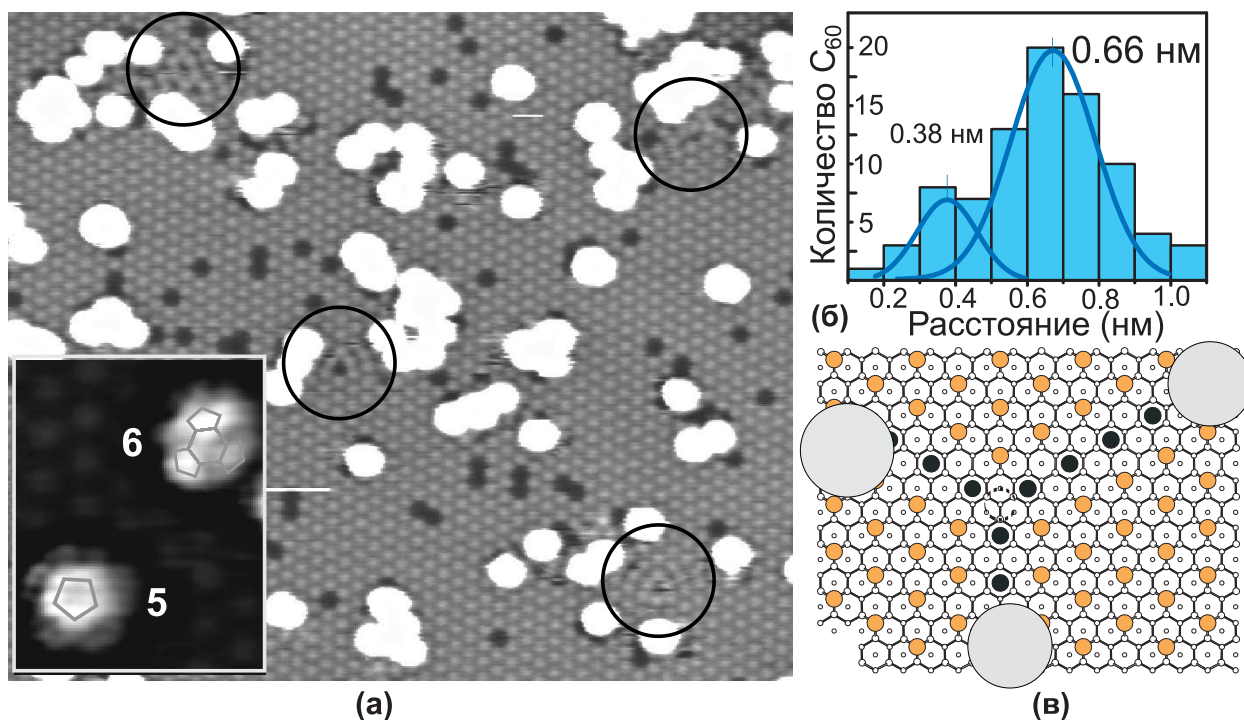


Рис. 1: $C_{60}/\sqrt{3}\text{-In}$: (а) – Изображение СТМ ($300 \times 250 \text{ \AA}^2$) поверхности $\sqrt{3}\text{-In}$ после адсорбции 0.1 MC_{60} при КТ. Области с нарушенным упорядочением обозначены окружностями. Во вставке – СТМ изображение ($40 \times 50 \text{ \AA}^2, V_s = 2.5 \text{ В}, I = 0.9 \text{ нА}$) фуллеренов со схематически наложенными углеродными кольцами, адсорбированных на $\sqrt{3}\text{-In}$: цифрами „5“ и „6“ отмечены фуллерены, ориентированные вверх пятиугольными и шестиугольными кольцами, соответственно. (б) – Гистограмма радиального распределения C_{60} по расстоянию от Si-дефекта, которым он был захвачен. (в) – схематическая модель упорядочения атомов в искаженной области. Захваченная вакансия обозначена штрихованной окружностью. Атомы In в регулярных позициях T_4 обозначены серыми кружками, а смещенные в позиции H_3 - черными кружками. C_{60} обозначены большими светло-серыми кружками.

ны с Si-дефектами ($\sim 75\%$), $\sim 20\%$ относятся ко второй группе и $\sim 5\%$ к третьей. Такое распределение указывает на то, что фуллерены имеют тенденцию к образованию двумерных островков, но в процессе миграции могут быть захвачены Si-дефектами.

Детальный анализ пространственного распределения C_{60} из первой группы (рис. 1 (б)) показывает, что они преимущественно расположены на расстоянии 0.66 нм от дефекта замещения, что соответствует постоянной решетки подложки $\sqrt{3}a_0$ (a_0 – постоянная решетки кремния 0.384 нм). Таким образом, большинство C_{60} лежат над атомами In, которые являются ближайшими соседями Si-дефекта. Кроме того, на распределении в дополнение к основному максимуму заметен небольшой максимум при $\sim 0.38 \text{ нм}$ ($\approx a_0$), который соответствует положению T_4 в центре треугольника, образуемого Si-дефектом и двумя атомами In.

Было обнаружено, что фуллерены в свою очередь оказывают заметное влияние на исходную структуру поверхности $\sqrt{3}\text{-In}$. На рис. 1 (а) видны локальные нарушения периодичности, возникающие в областях,

окруженных несколькими фуллеренами (обозначены чёрными окружностями). Схематическое изображение атомного упорядочения для одной такой области представлено на рис. 1 (в). Главными особенностями данной области являются появление вакансии в центре треугольника из трех C_{60} (помечена штрихованной окружностью) и смещение атомов индия из исходных положений T_4 в положения H_3 вдоль линий, соединяющих C_{60} и вакансию в центре.

Теоретические данные [5] указывают на то, что помимо адатомов диффузии на поверхности подвержены также вакансии. Такие мобильные вакансии, были обнаружены на $\sqrt{3}$ -In при низких температурах в процессе исследований в рамках данной работы. Вышеописанные нарушения структуры можно связать с „захватом“ мобильной вакансии, когда напряжение, вносимое фуллеренами в индиевый слой, снимается через смещение атомов по направлению к ней.

В следующем разделе приведены экспериментальные данные исследования адсорбции фуллеренов C_{60} на поверхностных фазах In/Si(111), характерные взаимными фазовыми переходами при напылении дополнительного индия при КТ [6]: Si(111) 2×2 -In (далее 2×2 -In), Si(111)-*hex*- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In (далее $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex), Si(111)-*rec*- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In (далее $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec). Эти реконструкции отличаются покрытием: 2×2 -In – 0.75 МС, $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex – 1 МС, $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec – 1.2 МС.

Как и в случае с $\sqrt{3}$ -In, фуллерены адсорбируются на $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex и 2×2 -In в качестве индивидуальных молекул или двумерных островков случайной формы, внутри которых они не формируют упорядоченного массива (рис. 2). На изображениях СТМ высокого разрешения (вставки на рис. 2 (а) - 2×2 -In, (г) - $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex) видна внутримолекулярная структура фуллеренов: практически все они выглядят как трилистный клевер, что как и в случае адсорбции на поверхность $\sqrt{3}$ -In, предполагает ориентацию фуллерена шестигранным углеродным кольцом вверх [4].

Несмотря на то, что исходная поверхность не выглядит искаженной после адсорбции фуллеренов, воздействие их на исходную структуру значительно. При адсорбции C_{60} на 2×2 -In и $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex происходит постепенный структурный переход менее плотной индиевой фазы в более плотную: при адсорбции C_{60} на 2×2 -In она переходит в $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex (рис. 2 (а–в)), а $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex в $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec (рис. 2 (г–е)). Здесь можно провести аналогию с адсорбцией фуллеренов на металлические поверхности, когда C_{60} формируют ямки, вытесняя нижележащие атомы металла, увеличивая тем самым энергию связи с подложкой [7].

На протяжении процесса осаждения C_{60} количество индия остается постоянным, и для каждого момента времени выполняется равенство:

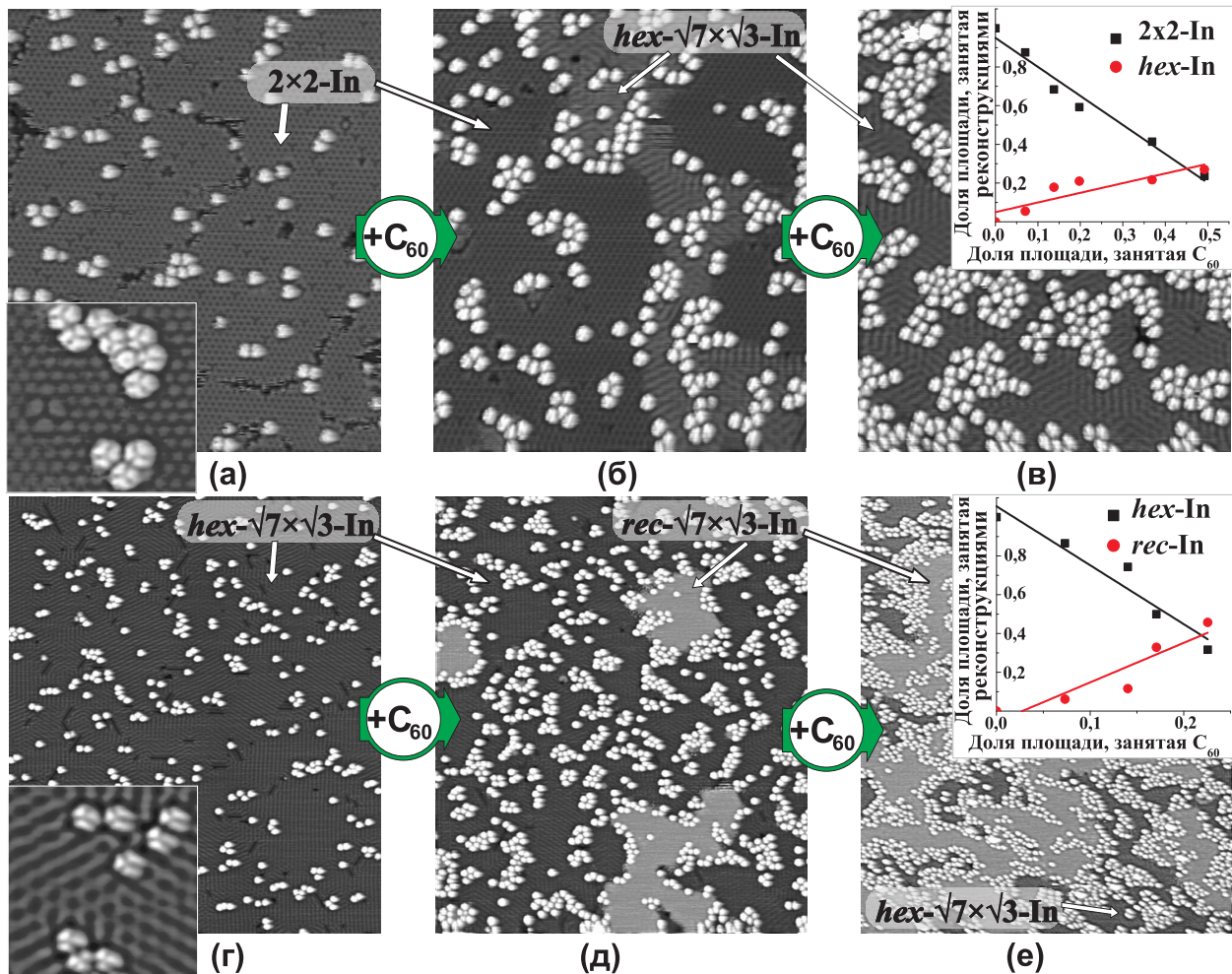


Рис. 2: Серии СТМ изображений, иллюстрирующие структурные переходы между фазами системы In/Si(111) при адсорбции фуллеренов: (а–в) – 2×2 -In $\rightarrow \sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex (размер СТМ изображений $420 \times 500 \text{ \AA}^2$), (г–е) – $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex $\rightarrow \sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec (размер СТМ изображений $840 \times 1000 \text{ \AA}^2$). На вставках (а,г) – СТМ изображение ($10 \times 10 \text{ \AA}$, $V_s=2.0 \text{ В}$, $I=0.8 \text{ нА}$) высокого разрешения фуллеренов, адсорбированных на 2×2 -In (а) и на $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex (г). В обоих случаях видна внутримолекулярная структура в виде трилистного клевера, что говорит об ориентации C_{60} шестиугольным углеродным кольцом вверх. Доли площади, занимаемые фазами в процессе напыления, для соответствующих экспериментов представлены на вставках: (в) – 2×2 -In $\rightarrow \sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex, (е) – $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex $\rightarrow \sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec.

$$\Theta_\alpha S_\alpha + \Theta_\beta S_\beta + \Theta_x S_{C_{60}} = const, \quad (1)$$

где S_α , S_β и $S_{C_{60}}$ - площади, занимаемые фазами с покрытиями $\Theta_\alpha < \Theta_\beta$ и фуллеренами соответственно, а Θ_x – среднее покрытие индия под фуллеренами. Продифференцировав (1) по $S_{C_{60}}$, получаем:

$$\Theta_\beta \frac{\partial S_\beta}{\partial S_{C_{60}}} + \Theta_x = -\Theta_\alpha \frac{\partial S_\alpha}{\partial S_{C_{60}}} \quad (2)$$

На графиках во вставках на рис. 2 (в,е) представлена зависимость долей площадей, занимаемых фазой β и фазой α , от доли площади занятой фуллеренами: (в) эксперимент 2×2 -In $\rightarrow \sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex, (е) эксперимент

$\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex \rightarrow $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec. Очевидно, что наклоны на графиках соответствуют производным в (2). Подставляя их значение и значения для покрытий $\Theta_{2 \times 2} = 0.75$ МС, $\Theta_{hex} = 1$ МС, $\Theta_{rec} = 1.2$ МС, получаем:

$$\Theta_x^{2 \times 2 \rightarrow hex} = 0.625 \pm 0.025 \text{ МС} \quad \Theta_x^{hex \rightarrow rec} = 0.6 \pm 0.1 \text{ МС}$$

Площадь, занимаемая одним фуллереном на экспериментальных СТМ изображениях равнялась $1.4 \pm 0.2 \text{ нм}^2$. Тогда, количество атомов индия, вытесняемых одним фуллереном из поверхностной фазы равно $1.4 \cdot 7.83 \cdot (\Theta_\alpha - \Theta_x)$, что соответствует с учетом ошибок: для 2×2 -In – 1-2 атомам, для $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex – 3-6 атомам.

Адсорбция C_{60} на $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec в отличие от 2×2 -In и $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex не приводит к фазовому переходу, а адсорбция на поверхность состоящую из $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec с редкими и небольшими участками $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex, приводит к тому, что островки C_{60} зарождаются и растут именно на доменах $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex или на границе $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec и $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex. Когда же вся поверхность $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -hex оказывается занятой, начинается рост второго фуллеренового слоя, что указывает на смену режима роста с послойного на островковый, из чего следует, что C_{60} не смачивают поверхность $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -rec.

Четвёртая глава диссертационной работы посвящена исследованию адсорбции фуллеренов C_{60} на поверхностные фазы системы Au/Si(111) с решеткой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$: Si(111)- α - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au (далее α - $\sqrt{3}$ -Au) и Si(111)- h - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,In) (далее h - $\sqrt{3}$ -(Au,In)). Вторая является модификацией первой, в которой отсутствует характерная сеть из большого числа антифазных границ (АГ), и присутствует дополнительный индий в виде адатомного газа [8].

Исследования показали, что фуллерены на поверхности Si(111)- α - $\sqrt{3}$ -Au проявляют поведение схожее со случаем адсорбции на металлических поверхностях. Они образуют компактные двумерные островки, центром зарождения которых чаще всего служат ступени подложки. Островки имеют упакованную гексагональную структуру (рис. 3 (а)) с постоянной решетки равной, исходя из результатов преобразования Фурье, примерно 10 \AA . Фуллерены в большинстве доменов лежат вдоль основного направления поверхности Si(111) – $\langle 10\bar{1} \rangle$. Однако в некоторых из них они повернуты на 19.1° относительно данного направлений.

Ключевой особенностью фуллеренового слоя на α - $\sqrt{3}$ -Au является наличие фуллеренов с более высоким СТМ контрастом, которые образуют структуру похожую на сеть АГ исходной подложки (рис. 3 (а)): в слое наблюдаются линии из C_{60} (далее КЛ – от „контрастные линии“), СТМ контраст которых зависит от приложенного смещения также как

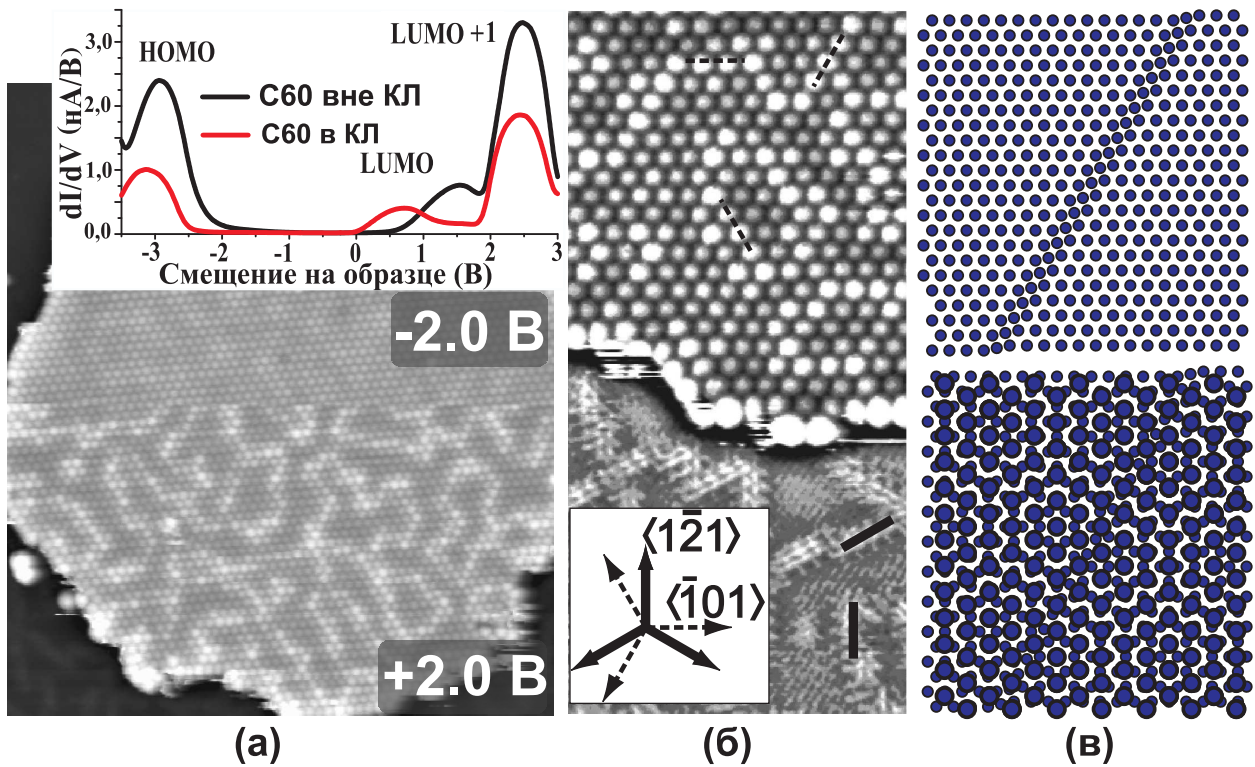


Рис. 3: $C_{60}/\alpha\text{-}\sqrt{3}\text{-Au}$: (а) – СТМ изображение ($700 \times 750 \text{ \AA}^2$) островка фуллеренов, записанное при смещении на образце $\pm 2 \text{ В}$. Видны линии из рядов C_{60} , которые выглядят ярче при $+2 \text{ В}$ и темнее при -2 В , повторяя тем самым зависимость контраста АГ подложки от смещения. (б) – СТМ изображение ($250 \times 130 \text{ \AA}^2$), обработанное с применением высокочастотного фильтра, которое иллюстрирует направление АГ подложки и линий фуллеренового слоя. (в) – Модель, иллюстрирующая появление дополнительных муарных линий в гексагональном фуллереновом слое, осажденном на гексагональную кремниевую решетку $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ с одной АГ (верх – подложка, низ – подложка+адсорбат).

контраст АГ $\alpha\text{-}\sqrt{3}\text{-Au}$ [8]. Зависимость от смещения, как и разница в электронной структуре C_{60} в КЛ и вне них (спектры туннельной спектроскопии показаны на вставке рис. 3 (а)), говорит о том, что различие в контрасте фуллеренов является электронным эффектом, а не топографическим. Кроме того, данный контраст сохраняется с некоторым размытием вплоть до четвертого слоя пленки фуллерита.

В то же время, следует отметить, что структура КЛ слоя фуллеренов не просто повторяет структуру сети АГ подложки. При детальном рассмотрении оказывается, что КЛ фуллеренового слоя перпендикулярны АГ $\alpha\text{-}\sqrt{3}\text{-Au}$. Так, АГ подложки имеют направление $\langle 12\bar{1} \rangle$ (т.е. вдоль направления основных векторов решетки $\sqrt{3}$), а КЛ фуллеренового слоя – $\langle \bar{1}01 \rangle$ (рис. 3 (б)). Данный эффект можно объяснить тем, что при наложении решетки фуллерита плоскостью (111) на решетку подложки, помимо основного муара возникают дополнительные линии муара на группах АГ. Направление этих линий при этом перпендикулярно АГ (рис. 3 (в)).

Для исследования адсорбции фуллеренов на поверхность без доменных стенок была выбрана та же поверхность $\alpha\text{-}\sqrt{3}\text{-Au}$, но модифициро-

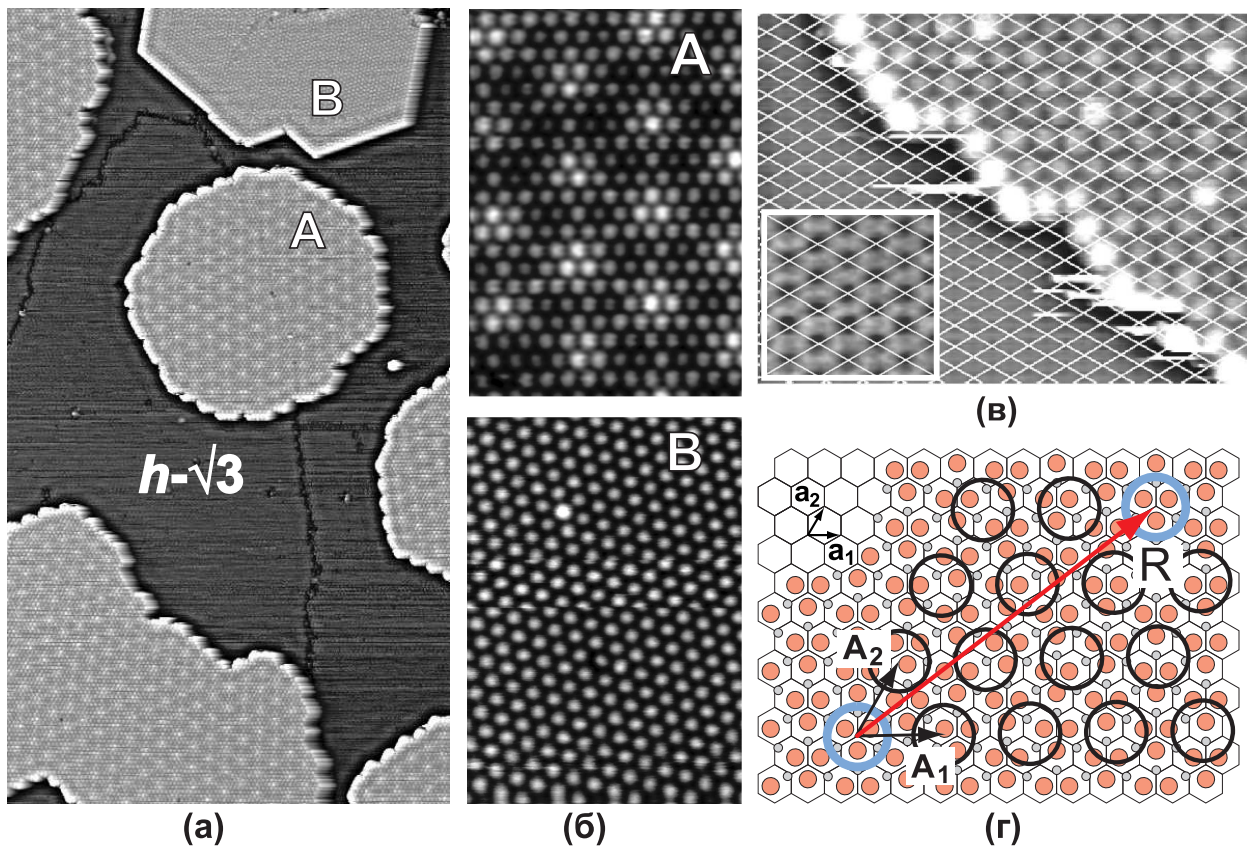


Рис. 4: $C_{60}/h-\sqrt{3}-(Au,In)$: (а) – СТМ изображение ($1000 \times 1920 \text{ \AA}^2$) различных доменов C_{60} , ряды молекул в которых направлены: А – вдоль $\langle 10\bar{1} \rangle$, В – под 19.1° к $\langle 10\bar{1} \rangle$. (б) – крупный план ($200 \times 140 \text{ \AA}^2$) доменов А и В. (в) – СТМ изображение ($150 \times 90 \text{ \AA}^2$) участка поверхности на границе фуллеренового островка и $h-\sqrt{3}-(Au,In)$. На изображение наложена гексагональная сетка решетки $h-\sqrt{3}-(Au,In)$. Во вставке – увеличенное изображение подложки с наложенной сеткой, узлы сетки располагаются в темных пятнах в центрах сот и соответствуют тримерам золота. (г) – Схематическая модель плотноупакованного массива C_{60} , наложенного на решетку $\alpha-\sqrt{3}-Au$ без доменных стенок. Яркие C_{60} , обозначенные светлыми кружками, находятся строго над золотыми тримерами. Элементарные вектора трансляции поверхности Si(111) обозначены \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 , а решетки фуллерита \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 . \mathbf{R} – Трансляционный вектор суперрешетки $\sqrt{129} \times \sqrt{129}$.

ванная индием – Si(111)- $h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,In)$ (далее $h-\sqrt{3}-(Au,In)$). Осаждение фуллеренов на $h-\sqrt{3}-(Au,In)$, также как и в случае $\alpha-\sqrt{3}-Au$, приводит к формированию плотноупакованного молекулярно слоя, большинство доменов которого направлены вдоль основных кристаллографических направлений подложки, а часть повернуты на 19.1° относительно него (рис. 4 (а), обозначены „А“ и „В“, соответственно). Детальное рассмотрение данного молекулярного массива показало, что фуллерены домена В не отличаются по контрасту, в то время как в доменах А более высокие по контрасту фуллерены образуют практически идеальную двумерную решетку муарного типа (рис. 4 (б)).

Наложение гексагональной сетки подложки (рис. 4 (в)) на островок домена „А“ показало, что яркие C_{60} располагаются над СТМ минимумами, которые соответствуют тримерам золота [8]. Наиболее вероятно,

что их более высокий контраст частично связан с их большей высотой ($\sim 1 \div 1.5 \text{ \AA}$ на СТМ изображениях), так как наблюдаемая муарная картина не зависит от приложенного смещения. Следует заметить, что, как и в случае с $\alpha\text{-}\sqrt{3}\text{-Au}$, муарная картина распространяется на следующие после первого слоя с некоторым размытием.

На рис. 4 (г) исходная структура $h\text{-}\sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ сопоставлена с наблюдаемой муарной картиной молекулярного слоя. Вектор трансляции фуллереновой суперрешетки \mathbf{R} может быть представлен как $\mathbf{R}=2\mathbf{A}_1+3\mathbf{A}_2$ в единицах решетки C_{60} ($A=10.0 \text{ \AA}$). Длина вектора \mathbf{R} составляет $\sqrt{19}A=43,59 \text{ \AA}$. С другой стороны, вектор \mathbf{R} может быть представлен в единицах решетки Si(111), $a=3,84 \text{ \AA}$, и тогда $\mathbf{R}=5\mathbf{a}_1+8\mathbf{a}_2$, и имеет длину $\sqrt{129}a=43,61 \text{ \AA}$. Данная оценка демонстрирует, что муарная суперрешетка C_{60} и решетка Si(111) практически идеально совпадают. Однако следует заметить, что углы между \mathbf{R} и векторами трансляции \mathbf{A}_1 и \mathbf{a}_1 составляют 36.587° для суперрешетки $\sqrt{19}A$ и 37.589° для суперрешетки $\sqrt{129}a$. Таким образом, для идеального совпадения массив C_{60} должен быть повернут на $1^\circ 0' 8''$ относительно подложки, как это и изображено на модели.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию магических островков C_{60} в системе $C_{60}/h\text{-}\sqrt{3}\text{-(Au,In)}$. Магическими островками (магическими кластерами) называют островки, состоящие из определенного числа N_m частиц, обладающие более высокой стабильностью по сравнению с другими на данной поверхности [9]. Чтобы способствовать самоорганизации частиц в большие островки и уменьшить их дисперсию по размерам, в качестве подложек используют поверхности с негомогенными адсорбционными позициями [7]. В данной работе рассмотрен другой подход, когда процессы самоорганизации задаются динамическим муаром и соответствующим ему потенциальным рельефом системы подложка-адсорбат.

Расчеты, основанные на теории функционала плотности, показали, что для $h\text{-}\sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ наиболее выгодным является положение C_{60} над атомом кремния, а наименее выгодным – положение над тримером золота, разница в энергии между этими позициями составляет 0.29 эВ. Таким образом, в домене „А“ слоя $C_{60}/h\text{-}\sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ для фуллеренов имеется периодическое потенциальное поле энергии адсорбции, представляющее собой решетку $\sqrt{129} \times \sqrt{129}$ потенциальных пиков, пространственное положение которых определяется суперпозицией фуллереновой решетки и решетки подложки.

Данное поле интересным образом направляет процессы самоорганизации. На рис. 5 (б) представлено СТМ изображение массива фулле-

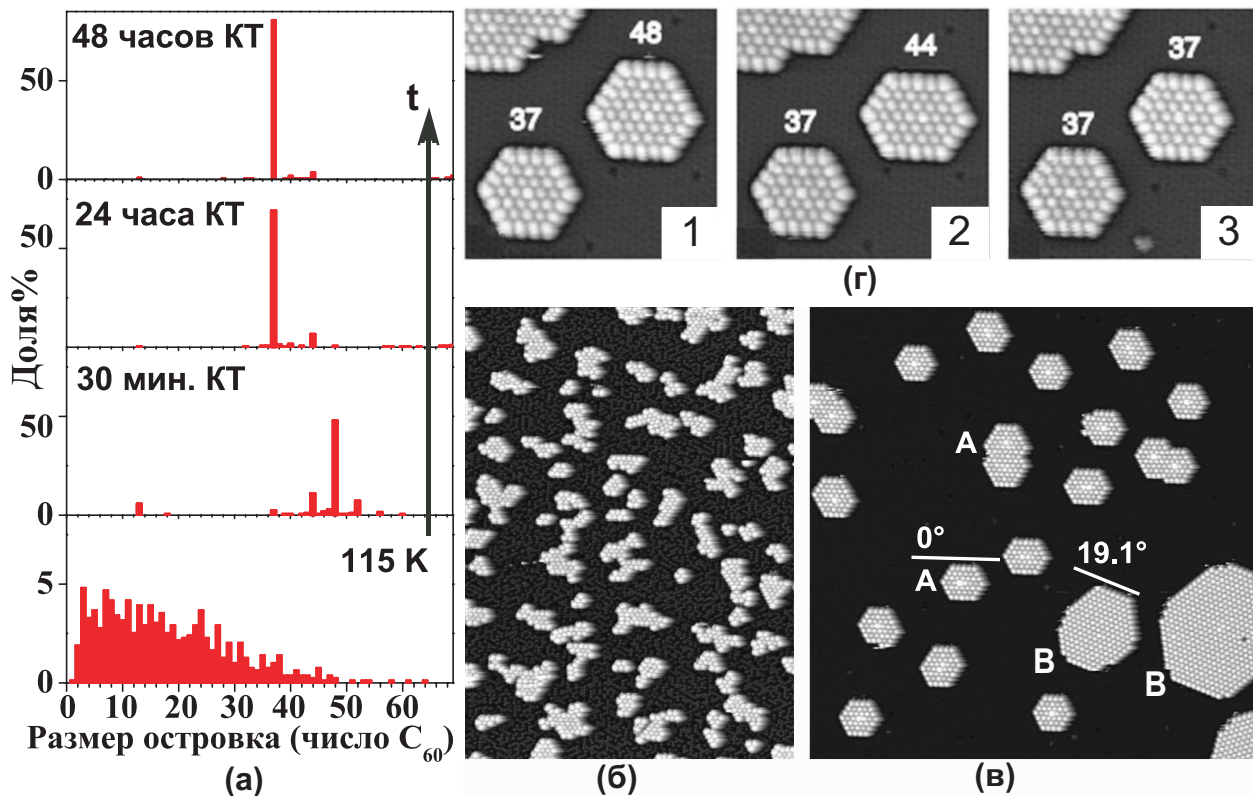


Рис. 5: Отжиг до КТ и последующее дозревание при КТ массива островков C_{60} , сформированного адсорбцией при 115 К: (а) – Гистограммы распределения островков по размерам для соответствующих экспериментов. (б) – Исходный массив островков при 115 К (в) – Массив (а) после отжига до комнатной температуры. Буквами обозначены соответствующие домены. (г) – Дозревание островков до 37-меров: (1)-(3) – Серия из трех СТМ изображений ($175 \times 175 \text{ \AA}^2$), иллюстрирующая эволюцию менее стабильных 48-мера и 44-мера в 37-мер в процессе отжига при КТ. Подобные процессы определяют динамику распределения островков по размерам в (а).

реновых островков различных размеров и форм, образованного при напылении C_{60} (0.11 MC_{60}) на $h\sqrt{3}$ -(Au,In) при 115 К. Распределение островков по размерам данного массива представлено широким пиком с размером среднего островка $\sim 15 C_{60}$ (гистограмма „115 К“, рис. 5 (а)). Последующий отжиг вплоть до КТ приводит к укрупнению островков и появлению правильных кристаллических форм (рис. 5 (в)). Направление фуллереновых рядов внутри островков как и для случая пленок может или совпадать с основным кристаллографическим направлением Si(111) (такие островки обозначены буквой „А“ на рис. 5 (в), или быть развернутым на 19.1° („В“). Наибольший интерес, однако, вызывает распределение островков по размерам после такой процедуры (гистограмма „30 мин.“, рис. 5 (а)). Вместо широкого пика оно представлено несколькими дискретными пиками, которые соответствуют стабильным конфигурациям островков (магическим островкам).

На рис. 6 представлены СТМ изображения нескольких магических островков, полученных при различных условиях. Все островки можно разделить на группы по количеству перекрывающихся гексагонов, их

составляющих, которое также равно количеству пятен из ярких фуллеренов в них. Видно, что маленькие островки (рис. 6 (а)) не имеют ярких фуллеренов в своем составе (будем называть их островками 0-ого поколения), которые имеются у более крупных островков (рис. 6 (б), 1,2,3 перекрывающихся гексагона с соответствующим числом пятен – островки 1-ого, 2-ого, 3-его поколения соответственно). Так как яркие фуллерены занимают самые не выгодные позиции над тримерами золота, становится ясно, почему некомпактная форма маленьких островков (отношение сторон для 13-мера, изгибы для 19-мера и 30-мера) оказывается наиболее выгодной конфигурацией. Данная форма позволяет наложить данные островки на большой островок домена „А“ так, чтобы ни один из фуллеренов, их составляющий, не занял невыгодную позицию над золотым тримером (рис. 6 (в)). Для более крупных островков 1-ого и т.д. поколения дальнейшее уклонение от занятия невыгодных позиций через принятие сложной формы становится, по-видимому, менее выгодным и они принимают компактную форму, располагаясь однако при этом так, чтобы минимизировать число фуллеренов в позициях над тримерами золота. Это происходит как раз тогда, когда невыгодные позиции находятся в центрах гексагонов (рис. 6 (в)). Потенциальные позиции над тримерами золота, окружающие островки, определяют, таким образом, границы, вне которых добавление фуллерена к островку оказывается энергетически невыгодным.

Такой потенциальный рельеф определяет также дальнейший рост островков между поколениями, когда вначале островок распространяется на новую территорию по долинам между потенциальными пиками, избегая позиций над тримерами (рис. 6 (в) вставка), и только по достижению некоторого критического размера происходит формирование нового гексагона с ярким пятном. Из-за этого зависимость размера островка от времени напыления имеет ступенчатый характер, где плато соответствуют этапу занятия следующей невыгодной позиции, а склоны – интенсивному росту нового гексагона в рамках области, ограниченной потенциальными позициями над тримерами золота.

Наконец, указанный потенциальный рельеф ответственен за необычное созревание массива островков. СТМ наблюдения за массивом во время отжига при КТ показало, что островки обмениваются фуллеренами. В качестве примера на рис. 5 (г) показано, как 48-мер (1) вначале становится 44-мером (2), а затем 37-мером (3). В то же время 37-мер сохраняет свои размеры и форму, что указывает на то, что он стабильнее 48-меров и 44-меров, которые как и он относятся к островкам 1-го поколения. Подобные процессы характерны для всего массива. Как показано на гистограммах на рис. 5 (а) после непродолжительного отжига (30

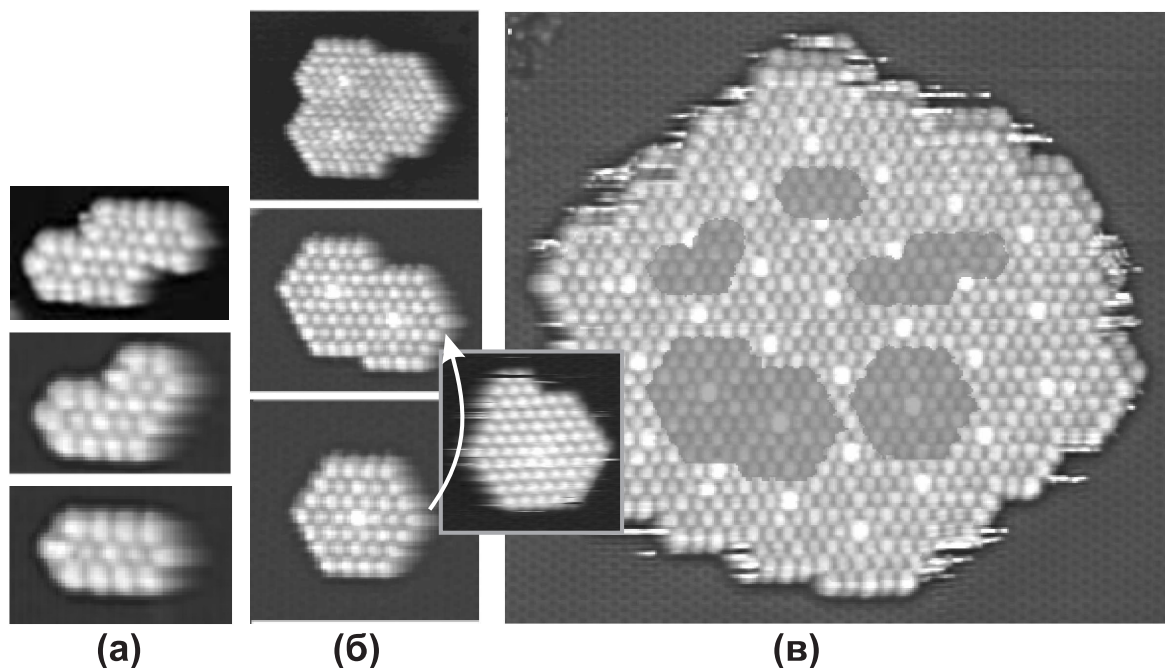


Рис. 6: Магические островки $C_{60}/h-\sqrt{3}-(Au,In)$, наблюдаемые в эксперименте: (а) – Маленькие островки, наблюдаемые после отжига до КТ: 13-мер – “блок”, 19-мер – “бумеранг”, 30-мер – “молния”. (б) – Средние островки наблюдаемые после отжига до КТ, состоящие из гексагона или перекрывающихся гексагонов и содержащие 1, 2 и 3 ярких пятна внутри. (в) – Большой островок фазы „А“, образованный при напылении C_{60} на $h-\sqrt{3}-(Au,In)$ при КТ, с муарной структурой. Изображения маленьких (13-мер, 19-мер, 30-мер) и некоторых средних островков наложены на данный островок в виде более темных областей. На вставке приведен промежуточный островок между 1-ым и 2-ым поколением.

минут) массив состоит преимущественно из 48-меров и, во-вторых, из 44-меров и 52-меров. После 24-часового отжига преобладают 37-меры, при этом сохраняется заметная доля 44-меров. Спустя 48 часов, система становится практически монодисперсной, в которой 37-меры составляют около 80% всех островков.

Такая эволюция является совершенно нетипичной для процесса созревания, который обычно протекает с монотонным смещением максимума распределения по размерам в область бóльших островков. Здесь же система начинает с максимумом около 44 C_{60} , а затем дозревает до меньшего значения в 37 C_{60} . Всё это указывает на то, что энергия Гиббса как функция размера островка имеет глубокий и широкий минимум с центром на 37 C_{60} и простирающийся вплоть до 52 C_{60} .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

С помощью СТМ исследовано формирование массивов молекул C_{60} на поверхностных реконструкциях систем In/Si(111) и Au/Si(111). На ос-

нове результатов выполненных исследований были сделаны следующие выводы:

1. На поверхности $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$ фуллерены вначале адсорбируются рядом с дефектами замещения, над одним из шести ближайших атомов индия. В дальнейшем молекулы C_{60} также присоединяются к фуллеренам, адсорбированным ранее. У всех фуллеренов подавлено вращение, и они ориентированы 6-ти и 5-ти угольными углеродными кольцами вверх. Подавленное вращение у молекул и отсутствие упорядоченных массивов указывают на достаточно сильную связь фуллеренов с атомами подложки.
2. Установлено, что на поверхности $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$ присутствуют мобильные вакансии. На бездефектной области поверхности $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$, окруженной молекулами C_{60} , может происходить захват такой вакансии, который сопровождается смещением рядов атомов In из исходных положений T_4 в положения H_3 по направлению к центру этой области.
3. Исследование адсорбции молекулы C_{60} на поверхностях $\text{Si}(111)\text{-hex-}\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$ и $\text{Si}(111)2 \times 2\text{-In}$ показало, что для данных фаз происходит вытеснение атомов индия фуллеренами, а освободившийся индий при этом формирует более плотную фазу. Количество индия, вытесняемого из фазы одной молекулой C_{60} , составляет 1-2 атома и 3-6 атомов для поверхностей $2 \times 2\text{-In}$ и $\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-hex}$, соответственно. Кроме того, обнаружено, что молекулы C_{60} не смачивают поверхность $\text{Si}(111)\text{-rec-}\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$.
4. На поверхности $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ фуллерены C_{60} образуют гексагональные плотноупакованные массивы с доменами двух типов: ряды C_{60} повернуты в них или на 1° , или на 19.1° относительно направления $\langle 10\bar{1} \rangle$. В молекулярном массиве фуллерены C_{60} имеют различный СТМ контраст, вызванный различием их электронной структуры. Узор, формируемый различными по контрасту фуллеренами, соответствует линиям муара, возникающим при наложении гексагональной решетки 1×1 , образованной фуллеренами, на гексагональную решетку $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ подложки с сетью антифазных границ. Контраст наследуется последующими после первого слоями фуллереновой пленки вплоть до четвертого слоя.
5. Как и в случае поверхности $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$, на поверхности $\text{Si}(111)\text{-h-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ фуллерены C_{60} образуют два типа гексагональных массивов. В массиве, в котором ряды фуллеренов C_{60} повернуты на 1° относительно кристаллографического направления

$\langle 10\bar{1} \rangle$, молекулы имеют различный СТМ контраст. Однако, различие со случаем $C_{60}/Si(111)-\alpha-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-Au$ состоит в том, что природа различного контраста фуллеренов слоя связана с несоразмерностью решеток гексагонального слоя фуллеренов и подложки и различной энергией адсорбции молекулы C_{60} в различных адсорбционных положениях на поверхности $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,In)$. Теоретические расчеты показали, что энергетически невыгодным является положение фуллерена C_{60} над тримером Au. Молекула C_{60} в таком положении выглядит более „яркой“ на СТМ изображениях, а при наложении фуллереновой гексагональной решетки на решетку подложки $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ фуллерены будут регулярно занимать данные положения, образуя картину муара с периодичностью $\sqrt{129} \times \sqrt{129}$.

6. Масштабированный суперпозицией решеток подложки и слоя фуллеренов рельеф энергии адсорбции молекул C_{60} на поверхности $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,In)$ оказывает значительное влияние на кинетические процессы роста и дозревания островков. В частности, он ответственен за появление магических островков (островков идентичного размера и форм, к которым приходит молекулярный массив в процессе дозревания), а также за ступенчатый характер роста островков.

Основные результаты диссертации представлены в следующих печатных работах (жирным шрифтом выделены издания, входящие в Перечень ВАК РФ)

1. *Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A.* Modulated C_{60} monolayers on $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}-Au$ reconstructions. // **Physical Review B**. –2011. – Т.83. – С.195421.
2. *Gruznev D.V., Matetskiy A.V., Zotov A.V., Saranin A.A., Chou J.P., Wei C.M., Wang Y.L.* Interplay between adsorbed C_{60} fullerenes and point defects on a $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}-In$ reconstructed surface // **Surface science**. –2011. – Т.605. – С.2050-2054.
3. *Gruznev D.V., Matetskiy A.V., Gvozde I.V., Zotov A.V., Saranin A.A.* C_{60} adsorption onto the one-atomic-layer In films on $Si(111)$ surface // **Surface science**. – 2011. –Т.605. – С.1951-1955.
4. *Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A.* C_{60} layers growth on $Si(111)-\alpha-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-Au$: crystalline and electronic structure // Abstracts of Sixth International Symposium on Surface Science, December 11-15, 2011, Tokyo, Japan, P.8.

5. *Зотов А.В., Грузнев Д.В., Матецкий А.В., Саранин А.А.* Фуллерены на реконструированных поверхностях кремния. // Труды XV-го Международного симпозиума "Нанозифика и нанозлектроника 14-18 марта, 2011, Нижний Новгород, Россия, Т.1, С.48-49.
6. *Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Gvozhd I.V., Zotov A.V., Saranin A.A.* Interaction of C₆₀ fullerene with defects of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In reconstruction. // Proceedings of the Ninth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces (RJSSS-9), September 26-30, 2010, Vladivostok, Russia, P.78-81.
7. *Gvozhd I.V., Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A.* Fullerenes on a flexible layer. // Proceedings of the Ninth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces (RJSSS-9), September 26-30, 2010, Vladivostok, Russia, P.89.
8. *Матецкий А.В., Грузнев Д.В., Зотов А.В., Саранин А.А.* Взаимодействие фуллеренов C₆₀ с дефектами реконструкции Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In. // Proceedings of Asian School-Conference on Physics of Nanostructures and Nanomaterials (ASCO-NANOMAT 2010), September 27-30, 2010, Vladivostok, Russia, P.138-141.
9. *Zotov A.V., Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Saranin A.A.* Adsorption of C₆₀ fullerenes on In-induced Si(111) reconstructions. // Abstracts of the 15th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-15), Tsinghua University, Beijing, China, October 5-10, 2010. Beijing: Physics Department, Tsinghua University, 2010, С.60.
10. *Матецкий А.В., Бондаренко Л.В., Грузнев Л.В., Утас Т.В., Зотов А.В., Саранин А.А.* Магические островки C₆₀ на поверхности Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,In). // Тезисы докладов Десятой региональной научной конференции "Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование 1-3 ноября, 2011, Владивосток, Россия, С.40.
11. *Зотов А.В., Грузнев Д.В., Матецкий А.В., Бондаренко Л.В., Утас О.А., Саранин А.А.* Самоорганизация фуллеренов на поверхности: от случайного роста островков до формирования магических кластеров. // Труды XVI-го Международного симпозиума "Нанозифика и нанозлектроника 12-16 марта, 2012, Нижний Новгород, Россия, Т.2, С.492-493.
12. *Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A.* Crystalline and electronic structure of C₆₀ monolayers on Si(111)- $\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au. // Proceedings of Asian School-Conference on Physics of Nanostructures

and Nanomaterials (ASCO-2011), August 21-28, 2011, Vladivostok, Russia, P.61-62.

Список литературы

- [1] *Guisinger N.P., Elder S.P., Yoder N.L., Hersam M.C.* Ultra-high vacuum scanning tunneling microscopy investigation of free radical adsorption to the Si(111)-7×7 surface. // *Nanotechnology*. – 2007. – V. 18, N. 4. – P.044011–6.
- [2] *Y. Wada, M. Tsukada, M. Fujihira, K. Matsushige, T. Ogawa, M. Haga, S. Tanaka.* Prospects and Problems of Single Molecule Information Devices. // *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*. – 2000. – V. 39, N. 7A. – P.3835–3849.
- [3] *A.F. Hebard, M.J. Rosseinsky, R.C. Haddon, D.W. Murphy, S.H. Glarum, T.T.M. Palstra, A.P. Ramirez, A.R. Kortan.* SUPERCONDUCTIVITY AT 18-K IN POTASSIUM-DOPED C-60. // *Nature*. – 1991. – V. 350, N. 6319. – P.6000–6001.
- [4] *Wang H., Zeng C., Wang B., Hou J. G.* Orientational configurations of the C60 molecules in the (2×2) superlattice on a solid C60 (111) surface at low temperature. // *Physical Review B*. – 2001. – V. 63. – P. 085417.
- [5] *van Gastel R., Somfai E., van Albada S.B., van Saarloos W., Frenken J.W.M.* Nothing moves a surface: Vacancy mediated surface diffusion. // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 86, N. 8. – P.1562–1565.
- [6] *Saranin A.A., Zotov A.V., Numata T., Kubo O., Ignatovich K.V., Lifshits V.G., Katayama M., Oura K.* Structural transformations at room temperature adsorption of In on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In surface: LEED–AES–STM study. // *Surf. Sci.* – 1997. – V. 388, N. 1/3. – P.299–307.
- [7] *Zhang X., Tang L., Guo Q.* Low-temperature growth of C60 monolayers on Au(111): island Orientation control with site-selective nucleation. // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2010. – V. 114. – P.6433–6439.
- [8] *Gruznev D.V., Filippov I.N., Olyanich D.A., Chubenko D.N., Kuyanov I.A., Saranin A.A., Zotov A.V., Lifshits V.G.* Si(111)- α - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au phase modified by In adsorption: Stabilization of a homogeneous surface by stress relief. // *Phys. Rev. B*. – 2006. – V. 73, N. 11. – P.115335–7.
- [9] *Wang Y.L., Saranin A.A., Zotov A.V., Lai M.Y., Chang H.H.* Random and ordered arrays of surface magic clusters. // *International Review of Physical Chemistry*. – 2008. – V. 27, N. 2. – P.317–360.

Матецкий Андрей Владимирович

Адсорбция фуллеренов C_{60} на поверхностные реконструкции систем Au/Si(111), In/Si(111)

Автореферат

Подписано к печати 06.08.2012 г. Усл.п.л. 1,2 Уч.-изд.л. 1,0
Формат 60×84/16. Тираж 110 экз. Заказ № 16

Издано ИАПУ ДВО РАН. 690041, г. Владивосток, ул.Радио,5
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.
690041, г. Владивосток, ул.Радио,5