

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Андрюшечкина Бориса Владимировича «Структурные фазовые переходы на поверхности металлов при взаимодействии с галогенами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Андрюшечкина Бориса Владимировича посвящена детальному изучению структурных фазовых переходов на поверхностях г.ц.к. металлов при взаимодействии с галогенами с помощью экспериментальных методов физики поверхности и первопринципных расчетов. Результаты, представленные в диссертации, охватывают период около 20 лет. В это время активно развивались направления, связанные с исследованием свойств низкоразмерных систем и фазовых переходов в них, с эпитаксиальным ростом, методами подготовки и обработки поверхности. Получил развитие целый ряд новых областей в физике твердого тела, касающихся в том числе изучения однослойных материалов и структур на их основе. Тематика диссертационной работы тесным образом связана со всеми перечисленными областями, так что ее актуальность не вызывает никаких сомнений. Содержание диссертационной работы изложено на 333 страницах. Диссертация включает 99 рисунков и список литературы из 328 наименований. Результаты по материалам диссертации опубликованы в 28 статьях, в том числе без соавторов в отдельной главе 8-томной международной монографии «Surface and Interface Science».

Во введении обоснована актуальность исследования, указаны цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, кратко описаны методология и методы исследований, приведены положения, выносимые на защиту, и обоснования достоверности полученных результатов, описан личный вклад автора. Обращает на себя внимание широкая апробация результатов работы, которые были представлены на полусотне российских и международных конференций.

Первая глава диссертации — подробный обзор литературы, в котором диссертант рассматривает основные явления, происходящие на поверхности твердых тел и сопровождающие структурные переходы, приводит примеры

экспериментального изучения фазовых переходов, а также описывает состояние исследований систем галоген/металл. В конце главы формулируется постановка задачи.

Во второй главе подробно описаны как использовавшиеся методы экспериментального исследования, так и методы первопринципных расчетов, которыми дополняется обсуждение практически всех экспериментальных результатов. Основными экспериментальными методами исследований являются сверхвысоковакуумная сканирующая туннельная микроскопия (в том числе низкотемпературная), позволяющая, в том числе, изучать структуры, не дающие картин дифракции, а также дифракция медленных электронов и Оже-спектроскопия. Все методы реализованы *in situ* в едином вакуумном объеме, что является несомненным достоинством данной работы.

Результаты проведенных исследований изложены в четырех последующих главах. Все результаты оригинальны, автор демонстрирует владение всеми перечисленными методами экспериментальных исследований и анализа экспериментальных данных, а также глубокое знание и понимание физики изучаемых систем. Оппонент хотел бы отметить высочайшее качество исходных данных, прежде всего результатов изучения поверхности методами сканирующей туннельной микроскопии — практически все ключевые изображения исследуемых поверхностей получены с атомным разрешением без каких-либо лишних шумов, а в ряде случаев с деталями, которые были пропущены предыдущими исследователями, если подобные измерения проводились ранее. Во всех главах для анализа экспериментальных результатов используются результаты первопринципных расчетов, причем значительное внимание уделяется выяснению преобладающих взаимодействий, приводящих к появлению тех или иных структур.

В главе 3 представлены результаты изучения фазовых переходов при малых (субмонослойных) уровнях покрытия поверхности. Изучены системы Cl/Au(111), Cl/Cu(111), Cl/Ag(111). На этих поверхностях продемонстрировано формирование нанопористых и/или цепочечных структур, которые в ряде случаев трансформируются при увеличении степени покрытия хлором. Большим достоинством проведенных исследований является проведение целого ряда исследований при температуре жидкого гелия, что позволило получить атомное разрешение для ряда структур. Важнейшими результатами этой главы можно считать объяснение происхождения цепочечных структур, а также аномально малого расстояния между атомами хлора.

В главе 4 представлены результаты изучения фазовых переходов «соразмерная-несоразмерная фаза» на примере систем Cl/Ag(111), Cl/Cu(111), I/Cu(111), I/Ag(111), I/Ag(100), I/Cu(100), I/Ag(110), I/Cu(110). Такие переходы возникают при покрытиях, близких к монослойным. Важнейшим и, по мнению оппонента, самым красивым экспериментальным результатом диссертационной работы является обнаружение и детальное исследование краудионов — объектов, возникающих при внедрении избыточного атома в монослой. Более того, оказалось, что эти объекты могут иметь различную хиральность, что делает их привлекательными топологически нетривиальными объектами.

В главе 5 описаны реконструкционные фазовые переходы на поверхностях Cl/Ag(111) и Cl/Cu(110). В этой главе расшифрован ряд реконструкций и представлены экспериментальные доказательства, подтвержденные первопринципными расчетами, что адсорбция галогенов может вызывать реконструкцию поверхности металлов. В этой главе в наибольшей степени раскрываются все возможности как экспериментальных исследований, так и методов анализа полученных результатов. Особенно впечатляют расшифровки реконструкции 3x3 поверхности Cl/Ag(111) (раздел 5.1.3), атомной структуры разреженных доменных стенок системы Cl/Cu(110) и сжатия решетки c(2x2) на хлорированной поверхности Cu(110) (раздел 5.2.6), для которых было протестировано множество структурных моделей.

Глава 6 посвящена изучению формирования поверхностных галогенидов на поверхностях Cl/Au(111), Cl/Ag(111) и I/Ag(100). Структуры, о которых идет речь в данной главе, являются самыми сложными из всех рассмотренных в диссертации, а их расшифровка на основе первопринципных расчетов потребовала прекрасного знания особенностей межатомного взаимодействия на поверхности и рассмотрения многочисленных возможных вариантов. В результате проведенных исследований обнаружено и обосновано формирование новых поверхностных галогенидных фаз и нового типа объектов, в том числе кластеров поверхностного хлорида серебра Ag₃Cl₇.

Заключительная глава посвящена подведению итогов диссертационной работы — в ней сформулированы основные полученные результаты.

Таким образом, в диссертации представлены обширные результаты многолетних экспериментальных исследований диссертанта в области физики поверхности. Хотелось бы отметить высокую культуру изложения обширного материала, логичность и структурированность диссертации. По материалам диссертации опубликовано 28 работ, причем больше половины в ведущих международных журналах уровня Physical Review B и

Surface Science. Полученные результаты представляют собой заметный вклад в физику поверхности и послужили стимулом для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в этой области, что подтверждается большим количеством ссылок на ключевые работы диссертанта (по несколько десятков ссылок).

Что касается замечаний по диссертационной работе, то их можно поделить на две группы. Во-первых, при ознакомлении с диссертацией у оппонента возникло несколько вопросов, ответы на которые в диссертации он не нашел:

1. В разделе 4.2.1.4 образование доменных стенок из краудионов описано как фазовый переход. В то же время тема фазовых переходов не раскрыта на обычно используемом для их описания языке — не указано, какого рода данный переход, какой параметр можно выбрать в качестве параметра порядка (если переход второго рода), какими потенциалами данный переход описывается. Существует ли подобное описание?

2. В главе 4 размытая часть изображения на рис. 4.32(a) (система I/Cu(100)) интерпретируется как наличие жидкой фазы. Хотелось бы отметить, что изображение получено при большом потенциале на туннельном зонде (1.9 В) и большом туннельном токе (0.45 нА), что, в принципе, может приводить к перемещению атомов зондом. Вывод о наличии жидкой фазы был бы более убедителен, если бы это изображение воспроизвелось бы и при меньшем воздействии со стороны зонда (меньшем потенциале или токе).

Два замечания касаются терминологии.

1. В заключении к главе 3 для описания структур, возникающих на поверхностях Au(111), Cu(111) и Ag(111), использованы различные термины: одноатомные цепочки (поверхность золота), цепочечные структуры (поверхность меди), квазиодномерные цепочки (поверхность серебра). Означает ли это, что существует принципиальное различие между такими цепочками?

2. Не уточняется, что подразумевается под словом «кинк» (под которым часто понимается состояние солитонного типа — данное слово используется только в главе 4), и чем он отличается от доменных стенок.

Несмотря на большой объем диссертации, опечаток и ошибок практически нет. Единственное замечание по стилю изложения относится к заключению к главе 3, где все разделы начинаются со слов «Таким образом...», что делает текст трудночитаемым.

Все указанные замечания носят принципиальный характер и не влияют на положительную оценку диссертации. Считаю, содержание работы Андрюшечкина Бориса Владимировича и форма ее представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в

редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

Официальный оппонент,
зам. директора ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
доктор физ.-мат. наук

С.В. Зайцев-Зотов

ФГБУН Институт радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7, e-mail: serzz@cplire.ru, тел.: (495) 629 34 47.

Подпись С.В. Зайцева-Зотова заверяю
Ученый секретарь Института

07 октября 2019 г.



И.И. Чусов