

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета о диссертационной работе Тарасова Артема Вячеславовича «Развитие методик анализа фотоэмиссии квазидвумерных структур на примере графена и 4f-систем», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа А.В. Тарасова посвящена развитию ряда фотоэмиссионных методов анализа поверхности (фотоэмиссионная спектроскопия (ФЭС), фотоэлектронной дифракции (ФД) и фотоэлектронной голографии (ФГ)), и демонстрации применения разработанных теоретических и экспериментальных подходов для анализа электронных и структурных свойств поверхностей на примере редкоземельных интерметаллидов и систем на основе графена.

Решение данной задачи необходимо для дальнейшего развития и усовершенствования методов анализа атомной и электронной структуры поверхностей твердых тел, двумерных и квази-двумерных систем с целью получения полной информации о структурных и электронных свойствах поверхности и приповерхностного слоя, что и определяет **актуальность работы**.

В диссертации для исследования редкоземельных интерметаллидов ( $\text{CeIrIn}_5$ ,  $\text{TbRh}_2\text{Si}_2$  и  $\text{EuIr}_2\text{Si}_2$ ) и систем на основе графена (чистый и легированный бором графен на поверхности  $\text{Co}(0001)$ ) использовались различные методы и подходы: фотоэмиссионной спектроскопии (ФЭС), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) и фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭСУР), дифракция медленных электронов (ДМЭ), фотоэлектронная дифракция (ФД) и фотоэлектронная голография (ФГ). Для анализа экспериментальных данных применялись теоретические расчеты, которые были выполнены в рамках теории функционала плотности (ТФП), используя современные программные пакеты.

Использование соискателем комплексного подхода, включающего в себя современные спектроскопические экспериментальные методы и теоретические расчеты, определяет высокий уровень диссертационной работы.

**Научная новизна работы** соискателя состоит в разработке нового подхода для изучения структуры двумерных систем с высоким пространственным разрешением,

а также новой методики определения ориентации магнитных моментов редкоземельных ионов в приповерхностных слоях кристаллов, позволившей впервые обнаружить различия в ориентации моментов на поверхности по отношению к объему в интерметаллическом соединении TbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>. Впервые показана возможность использования отдельных компонент 4f-мультиплетов сложной формы для проведения структурного анализа методом ФД.

**О достоверности результатов** можно судить по сопоставлению экспериментальных данных, полученных различными методами, а также совпадению данных, полученных соискателем, с данными других исследователей. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на российских и международных конференциях и опубликованы в ведущих зарубежных журналах. Количество и качество опубликованного материала соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении сформулирована и обоснована цель исследований.

В главе 1 рассматриваются методики анализа структуры поверхности с помощью фотоэлектронной дифракции, изучение магнетизма поверхности с помощью фотоэмиссии, а также исследуемые материалы.

В главе 2 приводятся экспериментальные и теоретические методы.

В главе 3 приводятся результаты по фотоэлектронной дифракции и голографии для исследования квазидвумерных систем. Проведен теоретический анализ дифракционных картин, а также применена фотоэлектронная дифракция для изучения атомной структуры поверхности CeIrIn<sub>5</sub>. Продемонстрирована новая методика фотоэлектронной голографии для квазидвумерных систем и для анализа структуры примесных центров квазидвумерных систем. Приведены результаты исследования интерфейса графен/Co(0001) и В-графен/Co(0001).

В главе 4 проведено моделирование фотоэмиссии из открытой 4f-оболочки, определены направления магнитных 4f-моментов с помощью фотоэлектронной эмиссии, а также изучен поверхностный магнетизм системы TbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>. Продемонстрировано использование фотоэлектронной дифракции для определения

валентности и магнетизма отдельных атомных слоев. 4f-фотоэмиссия использовалась для исследования кристаллического поля.

К основным и наиболее интересным результатам можно отнести следующие:

1) продемонстрирована высокая эффективность совмещенного ФД-ФГ анализа, предназначенного для структурного анализа 2D-материалов и их интерфейсов с использованием фотоэлектронов с низкими КЭ.

2) Применение ФД для исследования слоистого редкоземельного интерметаллического материала с незаполненной 4f оболочкой, дает важную информацию о структуре поверхности кристалла, химическом состоянии атомов редкоземельных элементов и их связи с магнитным порядком с высоким разрешением по глубине.

3) Показано, что магнитные моменты Tb в TbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, имеющие в объеме АФМ порядок с выделенным направлением вдоль оси *c* кристалла, имеют тенденцию к тому, чтобы в первом атомном слое Tb-терминации легкая ось находилась в плоскости *ab*.

Из вышесказанного следует, что автором выполнен большой объем исследовательских работ и получен ряд новых результатов. Работа выполнена на высоком научном уровне, с использованием современных экспериментальных и теоретических методов физических исследований. Достоверность полученных результатов следует из высокого экспериментального и теоретического уровня, на котором проводились исследования, воспроизводимости результатов и их соответствия данным, полученным другими исследователями.

Материалы диссертации опубликованы.

Хотя в целом работа написана обстоятельно, по диссертации можно сделать следующие замечания.

1. К сожалению, основные результаты и выводы не представлены в сжатом и четко сформулированном виде. Заключение является, скорее, кратким пересказом глав диссертаций, что осложняет анализ и оценку полученных новых результатов.
2. Основное замечание касается формулировки новизны пункта «Благодаря применению метода ФД была экспериментально обнаружена **реконструкция** индиевой терминации кристалла CeIrIn<sub>5</sub>(001) и определена ее структура.» и

защищаемого положения «Факт реконструкции индиевой терминации кристалла CeIrIn5(001), полученной сколом при низкой температуре, и атомное строение поверхности.».

Прямым методом исследования реконструкции поверхности является метод дифракции медленных электронов, который использовался автором для интерпретации структуры поверхности CeIrIn5(001), полученной сколом в вакууме. На рисунке 3.2 (а) приведена ДМЭ картина поверхности CeIrIn5(001), которая, по утверждению автора, отражает реконструированную поверхность ( $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ )  $R45^\circ$ . На мой взгляд и опыт, показанная дифракционная картина отражает структуру (1x1), а интерпретация на основе построенной обратной решетки (рис. 3.2 (b)) только подтверждает это. Выделенные решетки на рис. 3.2 (b) по сути являются одинаковыми, при этом красная ячейка не является элементарной. В ДМЭ картине при реконструкции присутствуют «объемные» рефлексы, а относительно них определяется поверхностная структура, т.е. реконструкция. Согласно интерпретации рис. 3.2 (b) весь кристалл повернулся на соответствующий угол, что могло бы легко быть определено ориентацией кристалла, определив кристаллографические направления (оси). Количественная оценка параметров решетки в ДМЭ, как правило, не используется в силу низкой точности измерений. Более того, полученная картина является суммой от двух окончаний поверхности (терминаций). Если CeIn- терминация является нереконструированной, то, где её вклад в ДМЭ? Из текста я не смог сделать вывод, чему все-таки равно соотношение CeIn- и In- терминаций? Аналогичные вопросы можно задать и к методу фотоэлектронной дифракции для изученной поверхности. С другой стороны, на все эти вопросы можно было бы достаточно легко ответить, используя метод СТМ и СТС.

3. К моему сожалению, в многочисленных благодарностях я не увидел упоминания о, фактически, основателе метода фотоэлектронной дифракции в нашей стране – Кузнецове Михаиле Владимировиче.

Отмеченные недостатки не затрагивают основных выводов и защищаемых положений диссертации и не снижают хорошее впечатление от работы. Рассматриваемая диссертация является законченной научно-исследовательской

работой, выполненной на высоком уровне. Особенно хотелось бы отметить умение автора сочетать экспериментальную работу, выполненную на высоком уровне, с последующей математической обработкой данных и сопоставлением с теоретическими расчетами. Полученные автором результаты важны для понимания электронной и спиновой структуры квазидвумерных систем и комплексных систем на основе графена.

Совокупность представленных результатов и сформулированных автором выводов позволяют сделать вывод, что диссертационная работа А.В. Тарасова удовлетворяет основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Тарасов Артём Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Заведующий лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, доктор физико-математических наук (01.04.10 – физика полупроводников), профессор РАН



Терещенко Олег Евгеньевич

«21» января 2023 г.

Тел. +7 (383) 330-78-83, e-mail: teresh@isp.nsc.ru

пр-т Академика Лаврентьева, д. 13, Новосибирск, 630090, Россия

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН) Терещенко Олега Евгеньевича удостоверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



Аржанникова София Андреевна