

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Зырянова Степана Сергеевича «Анализ и модификация поверхности твёрдых тел с использованием пучков ускоренных заряженных частиц», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и Приложения. Материал работы изложен на 146 страницах, содержит три таблицы и 68 рисунков. Список цитируемой литературы включает 116 наименований. В Приложении имеется 14 таблиц

Актуальность темы исследования. Методы обратного резерфордского рассеяния (ОРР) и ядерного обратного рассеяния (ЯОР) высокоэнергетичных протонов и альфа-частиц диапазона 5-15 МэВ для анализа свойств приповерхностных слоёв веществ с высоким разрешением (порядка 0,1 мкм и менее) начали широко применяться в исследовательской практике с 60 -70-х годов 20 века, особенно с развитием полупроводниковой и интегрально-оптической техники. Тем не менее накопленный экспериментальный материал методов ядерно-физического анализа по спектрам ОРР и ОЯР во всём мире продолжает пополняться благодаря всё расширяющемуся его применению в различных областях техники, в особенности при разработке различных поверхностных покрытий и новых производств. Особенно привлекательны эти методы своими возможностями по анализу профилей распределения как тяжёлых так и лёгких элементов в приповерхностных слоях.

По этой причине в последние годы особенно востребованными являются разработки принципиально новых инструментальных методик и расширение их применения, особенно в область методов модификации материалов пучками высокоэнергетических частиц, в том числе в условиях многофакторных воздействий, что подчёркивает актуальность темы представленной диссертации С.С.Зырянова с научной точки зрения и для технических приложений.

Во **введении** приводится обоснование актуальности темы исследования, указаны цели и основные задачи работы, аргументируется научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

Кроме того, чётко обозначен личный вклад автора в выполненных этапах исследований.

В первой главе диссертации проведён обзор известных литературных источников, в которых разработаны и описаны принципы и энергетические пределы методов ОРР и ЯОР, методики обработки спектров рассеяния, форма которых в большой степени видоизменяется из-за электронных потерь энергии рассеиваемых частиц, даны ссылки на основные теоретические подходы, учитывающие структуру поля ядерных сил и методы моделирования процессов рассеяния. Большое внимание в обзоре уделено особенностям практического использования этих методов, в том числе возможностям и преимуществам при модельных экспериментах в области материаловедения атомной энергетики и технологиях ионной имплантации.. Указаны также основные трудности учёта коррозионного воздействия такого активного продукта реакторных технологий, как иод, на многие конструкционные материалы и обсуждаются возможные подходы к решению этих задач, учитывающие многофакторность воздействия ионизирующих излучений. Из проблем, обозначенных в обзоре, естественно вытекает необходимость и актуальность поставленных автором целей и сформулированных задач исследования.

Вторая глава содержит описание основных характеристик получаемых пучков частиц в различных режимах работы ускорительной установки и главные требования к этим пучкам для эффективного их применения в предложенных и развитых автором методиках измерений, а также приведено подробное описание конструкции удобной многофункциональной исследовательской камеры, спроектированной для проведения экспериментов. Описана также автоматизированная вакуумно-блокировочная система, предотвращающая возникновение аварийных ситуаций при случайной разгерметизации измерительного канала. Особое внимание уделено энергетической калибровке спектрометрической части установки и выявлению основных источников погрешностей определения энергии ускоренных частиц. Для математической обработки спектров рассеяния автор использовал аттестованное и проверенное программное обеспечение. Приведённое описание свидетельствует о соблюдении методических и метрологических требований к исследовательским установкам, что является необходимым условием получения достоверных результатов.

В главе 3 автор анализирует полученные спектры обратного рассеяния для 12 элементов с порядковым номером от 5 (бор) до 50 (олово) для энергии протонов 6,6 МэВ и функции зависимости сечения рассеяния от энергии в диапазоне 4,6-6,6 МэВ и описывает развитый им экспериментальный метод определения нижней энергетической границы обратного ядерного рассеяния на «толстых» мишенях для конкретных химических элементов. Сравнение с результатами других исследователей, имеющихся в базах данных, даёт хорошее согласие, что подтверждает обоснованность первого защищаемого положения. Этим методом для четырёх металлов по спектрам рассеяния протонов от толстых мишеней определён уровень энергии частиц пучка, сравнимой с величиной кулоновского барьера, при котором наблюдается заметное отклонение спектра ОР от резерфордского.

Важность этих результатов состоит не только в определении значений фундаментальных характеристик ядерного поля данных элементов, но и в прикладном плане возможностью значительно увеличить чувствительность анализа на лёгкие элементы в матрице тяжёлых атомов. Это продемонстрировано диссертантом измерением профилей распределения бора и углерода в твёрдых покрытиях на основе железа и вольфрама, что служит подтверждением второго и четвёртого защищаемых положений.

В главе 4 описаны результаты измерений радиационно-стимулированной коррозии конструкционных материалов как в атмосферных условиях, так и в присутствии паров иода, что моделирует такой важный фактор деградации прочности металлов в рабочих условиях реакторов. Проведя широкий цикл количественных исследований скорости коррозии в зависимости от температуры, влажности и химической среды автор обнаружил ускорение коррозии почти на три порядка в зависимости от флюенса за счёт радиационно-химических процессов. Комплексное применение высокоинформативных методов мёссбауэровской и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для идентификации природы химических связей убедительно свидетельствует о расшифровке вещественного состава образующихся соединений в сложных процессах коррозии и обосновывает достоверность защищаемого положения 3 и является научно значимым результатом.

Пятая глава диссертации посвящена такому новому применению метода обратного рассеяния - исследованию изменения свойств в процессе облучения таких радиационно нестойких материалов, как широко используемые в качестве

электроизоляции полимеры – полиэтилен и лавсан. Важным эффектом, обнаруженным автором, является установление величины пороговой дозы, при которой в материале изменяется соотношение химических элементов и структура. В качестве пятого защищаемого положения им показано принципиальное различие в радиационно-химическом поведении при облучении этих материалов ядрами гелия и при воздействии редкоионизирующим излучением – электронным либо рентгеновским пучком, приводящему к заметному изменению динамики процесса взаимодействия атомов кислорода и углерода.

Представленные диссертантом результаты имеют ясное фундаментальное физическое и практическое значение, поскольку значительная их часть пополняет базы данных по сечениям ядерного обратного рассеяния, используемые физиками-теоретиками, а исследования процессов формирования поверхностных модифицированных слоёв для различных применений являются заметным вкладом в технологический арсенал современной промышленности.

Следует отметить достаточно широкую апробацию полученных автором результатов: они доложены на 10 международных конференциях и подробно изложены в трёх статьях в рецензируемых периодических изданиях, включённых в перечень ВАК.

Таким образом, внимательное прочтение диссертации Зырянова С.С. убеждает в достоверности и надёжности полученных им результатов, что обеспечивается применением современных высокоинформативных методов исследования, согласием полученных в процессе калибровки установок численных результатов с имеющимися в литературе базами данных для близких условий эксперимента. Научные положения и выводы обоснованы, имеют заметную научную и практическую значимость.

Текст и графический материал автореферата диссертации соответствует её содержанию, основные результаты приведены в перечисленных публикациях.

В качестве замечаний к тексту диссертации можно указать на недостаточно внимательно прописанные в тексте формулы (1), исчезновение формул (11) и (12), не указаны единицы измерения в формуле (7) и при определении концентрации иода, ошибочно указанная величина увеличения массы образца на рисунке 40, а также незначительные неточности терминологии (типа «ошибка» эксперимента, вместо «погрешность») (с.41), не ясно, почему поверхностная концентрация атомов кислорода 10^{16} атомов/см²,

соответствующая 5-7 моноатомных слоёв, названа незначительной, хотя она уверенно появляется в спектре ОР. Эти опечатки и неточности терминологии имеют частный характер, не снижают ценности работы и не влияют на высокую оценку диссертации.

Общее заключение

В целом диссертационная работа Зырянова Степана Сергеевича «Анализ и модификация поверхности твёрдых тел с использованием пучков ускоренных заряженных частиц» показывает, что автор проявил научный подход в формулировании цели исследований, проявил экспериментальное мастерство и вложил большой труд в решение конкретных задач исследования, развив новые методики в сложной технике фундаментальных исследований в области физики твёрдого тела с применением пучков частиц высоких энергий.

Диссертация может быть защищена на стыке двух специальностей 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, так как соответствует указанным специальностям.

По значимости результатов эта работа соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Зырянов Степан Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

24 декабря 2014



Емлин Рафаил Вениаминович

Кандидат физико-математических наук

Старший научный сотрудник

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

620016, г.Екатеринбург, ул. Амундсена, дом 106

Телефон 8(343)2678826

E-mail: lfid@iep.uran.ru

Подпись Емлина Рафаила Вениаминовича подтверждаю

Учёный секретарь Института электрофизики УрО РАН

Кокорина Елена Евгеньевна

