

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова

Профессор

А.А. Федянин

«17» ноября 2014

### ОТЗЫВ

ведущей организации — Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, тел.: 8-(495)-939-18-18, факс: 8-(495)-939-08-96, сайт: [www.sinp.msu.ru](http://www.sinp.msu.ru), эл. почта: [info@sinp.msu.ru](mailto:info@sinp.msu.ru)) о диссертации Зырянова Степана Сергеевича «Анализ и модификация поверхности твердых тел с использованием пучков ускоренных заряженных частиц», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Предметом исследования в работе Зырянова С.С. является развитие пучковых методов анализа приповерхностных слоев твердых тел. Несмотря на большое количество средств и методов элементного анализа вещества, пучковые методы и их базовый метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) тяжелых заряженных частиц прочно вошел в арсенал лабораторий, имеющих в составе ускорительную технику. Проигрывая многим методам в чувствительности и избирательности, его важным достоинством, и часто определяющим, является отсутствие необходимости в эталонных образцах, неразрушаемость исследуемого объекта и получение данных о глубинном распределении элементов. Существенным недостатком РОР является его слабая чувствительность к легким элементам: бору, углероду, азоту, кислороду, играющим чрезвычайно важную роль в модификации поверхностных слоев в результате образования боридных, карбидных, азотных, оксидных соединений, обладающих повышенной коррозионно-, термо-, износостойкостью.

Разновидностью метода обратного рассеяния является ядерное обратное рассеяние (ЯОР), при котором чувствительность к легким элементам зачастую повышается на 2-3 порядка. Однако, в отличие от РОР, ЯОР не имеет простых аналитических выражений для определения фундаментальных характеристик процесса – дифференциального сечения рассеяния, его угловой и энергетической зависимости. Имеющиеся базы данных носят весьма ограниченный характер как по угловой так и по энергетической зависимости, а также представляют весьма



ограниченный набор элементов. Получение таких данных является чрезвычайно актуальной задачей для фундаментальных и для прикладных исследований.

Во *введении* работы обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, выделен личный вклад автора в выполненной работе, отмечено, каким образом проводилась апробация работы.

В *первой главе* содержится достаточно подробное описание метода обратного рассеяния тяжелых заряженных частиц, приведен анализ факторов, влияющих на чувствительность метода, обсуждаются его возможности и преимущества. Много внимания уделено автором особенностям ядерного обратного рассеяния. Достаточно подробно проанализировано применение пучка тяжелых заряженных частиц для модификации приповерхностных слоев твердых тел, моделированию воздействия ионизирующих излучений на материалы.

*Вторая глава* посвящена краткому описанию экспериментальных установок, на которых проводились исследования, отдельно выделена их модернизация, выполненная автором, приводятся характеристики и особенности использованного оборудования. Описана аттестация измерительных электронных трактов и методик измерений, используемое программное обеспечение для обработки экспериментальных данных. Остальные главы посвящены результатам оригинальных исследований.

В *третьей главе* описывается предложенная методика определения инструментальных сечений рассеяния из энергетических спектров обратного рассеяния протонов от толстых мишеней с помощью специализированного программного обеспечения SIMNRA. В результате получены сечения ядерного обратного рассеяния протонов на угле  $160^\circ$  в энергетическом интервале 4,5-6,6 МэВ для большого набора элементов В, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn. Сравнение с имеющимися литературными данными, например для Mo, Ag, Sn (стр. 62 и 63), указывает на их хорошее согласие, что подтверждает достоверность полученных результатов. Автором предложена оригинальная методика определения энергетической границы перехода от резерфордского к ядерному обратному рассеянию путем сравнения формы энергетического спектра обратного рассеяния протонов от толстой мишени с расчетным спектром в предположении чисто кулоновского потенциала. Сравнение с экспериментами на тонких мишенях (рис.28, стр. 72) подтверждает работоспособность данного метода.

В *четвертой главе* представлены результаты исследований, проведенных с использованием полученных данных по сечениям ядерного обратного рассеяния протонов. Показано, что скорость обычной атмосферной коррозии сталей в полях ионизирующих излучений, характерных для захоронений радиоактивных отходов, увеличивается на 3 порядка. При этом ионизирующее излучение не только ускоряет процесс коррозии, но и меняет характер зависимости от влажности среды – максимум интенсивности коррозии достигается при 60% влажности, что практически совпадает с пороговым значением (50-70%) в



обычных условиях, ниже которого коррозия практически отсутствует. Исследования проведены с привлечением дополнительных методов, таких как мессбауэровская спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, что позволило установить характер протекающих радиационно-химических процессов. В отечественной практике это первое исследование по моделированию с помощью высокоэнергетичных протонов коррозионных процессов при воздействии ионизирующего излучения в комбинации с дополнительными воздействующими факторами, как, например, пары воды или иода. Обнаруженные особенности можно считать научно значимым результатом, что нашло отражение в опубликованных автором работах.

Эффективность использования ЯОР протонов для анализа состава вещества показана при исследовании процесса электроискрового легирования поверхностных слоев стали твердосплавным материалом ВК8. В результате установлена оптимальная технология нанесения покрытия, при которой преобладающим в структуре является монокарбид вольфрама, обладающий высокой износостойкостью. Впервые ядерное обратное рассеяние протонов использовано для исследования электроискрового способа нанесения износостойкого покрытия из твердосплавного материала.

Продемонстрирована возможность анализа процесса борирования поверхностных слоев железа на примере борирования в расплаве буры. На поверхности выявлено содержание элементов, близкое по соотношению к  $Fe_2B$ . При 30 мин борирования глубина легированного слоя составляет 12 мкм. Увеличение времени борирования в 2 и 4 раза приводит к увеличению слоя в 1,2 и 1,9 раза соответственно.

В пятой главе представлены результаты развития метода обратного рассеяния применительно к полимерам – материалам, которые в процессе облучения меняют свой элементный состав и структуру. Для анализа использовано ядерное обратное рассеяние ионов гелия с энергией  $\sim 3$  МэВ. Исследования проведены на двух наиболее широко используемых полимерах: полиэтилентерефталате и полиэтилене. Показано, что при деструкции полиэтилентерефталата в результате облучения ионами гелия в продуктах газовой выделенной в основном содержится кислород, тогда как для слабо ионизирующего излучения ( $\gamma$ ,  $e^-$ ) выделяются преимущественно  $CO$  и  $CO_2$ .

Обнаружено, что пострadiационное окисление полиэтилена имеет две компоненты: «быструю», которая происходит практически сразу после контакта с атмосферой, и «медленную», которая длится порядка десятка часов.

Вынесенные на защиту пять положений в полной мере отражают результаты выполненной работы. Защищаемые положения достаточно обоснованы. Полученные данные несомненно обладают новизной и практической значимостью, расширяют существующие на сегодняшний день знания о дифференциальных сечениях ядерного рассеяния протонов для значительного ряда элементов. Эти данные могут быть использованы для расчетов и оценок при использовании ЯОР протонов для анализа структуры и



состава поверхностного слоя материалов, особенно в случаях, когда требуется повышенная чувствительность к легким элементам.

Полученные в диссертации результаты найдут широкое применение в научных центрах и лабораториях, занимающихся применением пучков ускоренных заряженных частиц для анализа и модификации материалов: НИИ ядерной физики МГУ (г.Москва), Национальном исследовательском Томском политехническом университете, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко (Республика Беларусь), ФТИ УрО РАН (г.Ижевск), Институте ядерной физики национального ядерного центра Республики Казахстан (г.Астана), Физико-техническом институте имени А.Ф.Иоффе (г.Санкт-Петербург), Институте физики металлов УрО РАН (г.Екатеринбург).

По теме диссертационной работы автором опубликовано 3 работы в рецензируемых периодических изданиях из перечня ВАК. Результаты исследований докладывались на 10 международных конференциях. Это дает основание считать апробацию работы достаточно высокой.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современной аппаратуры, апробированных методов исследования, использованием последних версий компьютерных программ моделирования взаимодействия заряженных частиц с твердым телом, сравнением и согласием экспериментальных результатов с литературными данными, полученными в близких условиях.

В качестве замечаний можно указать на некоторые неточности в формулировках. Оптимальный режим нанесения покрытий для конкретной установки, скорее частный случай, имеющий практическое значение, нежели научная новизна. (Стр.7).

На 75 стр приведен рис 29, который трактуется, как свидетельство того, что в «факеле» коррозионные явления проявляются ярче, чем в пятне пучка. По-видимому, просто была выбрана слишком большая плотность тока пучка, поэтому в месте попадания пучка материал сильно распылялся.

На рисунке 56 (стр 103) приведенные концентрационные профили по непонятной причине начинаются с глубины 20 мкм, тогда как метод ЯОР имеет микронное разрешение.

На 114 стр говорится о неразрушающих пучковых методах и тут же сказано об интенсивной деструкции. Надо бы точнее формулировать понятие «неразрушающий».

Общая высокая оценка работы не снижается, несмотря на указанные недостатки.

Диссертационная работа Зырянова Степана Сергеевича «Анализ и модификация поверхности твердых тел с использованием пучков ускоренных



заряженных частиц», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики», является оригинальной и законченной научно-квалификационной работой, выполненной на стыке двух специальностей 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Актуальность, объем выполненных исследований, апробация и практическая значимость полученных результатов соответствуют п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация и отзыв на нее обсуждены и приняты на научном семинаре отдела Физики атомного ядра НИИ ядерной физики МГУ, «Физика нано атомных и ядерных систем и их взаимодействий» 6 ноября 2014 г.

Директор НИИЯФ МГУ  
д.ф.-м.н., профессор



М. И. Панасюк

Заведующий ОФАЯ НИИЯФ МГУ  
д.ф.-м.н., профессор



Н. Г. Чеченин

Отзыв составил  
д.ф.-м.н. вед. науч. сотр.



Г.П.Похил