

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук Баулина Романа Алексеевича
на тему: «Поляризационные эффекты в мёссбауэровской и
рентгеновской резонансной магнитной рефлектометрии магнитных
многослойных структур»
по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Баулина Р.А. посвящена развитию метода поляризационной мёссбауэровской рефлектометрии на современных источниках синхротронного излучения (СИ). Как известно, в последние 30 лет эксперименты с синхротронным излучением обеспечили один из наиболее существенных вкладов в развитие современной физики твердого тела. На синхротронных источниках был создан целый ряд новых экспериментальных методов, с использованием которых были получены важные результаты в физике твердого тела. Поляризационные эксперименты позволили исследовать магнитные свойства вещества, исследовать сложные магнитные структуры, определить такие свойства как орбитальные вклады в магнитные моменты атомов, наведенные магнетизм немагнитных атомов и т.д. Методы **ядерного резонансного рассеяния** (аналог эффекта Мессбауэра) также успешно развиваются на современных синхротронных источниках. Диссертация Р.А. Баулина посвящена развитию методов ядерного резонансного рассеяния поляризованного синхротронного излучения и их применению для исследования магнитных многослойных структур. Ультратонкие пленки и многослойные структуры обнаруживают уникальные магнитные, оптические, транспортные и др. свойства и являются ключевыми объектами в современной науке и технологии. Поляризационная мёссбауэровская рефлектометрия позволяет не только исследовать ультратонкие пленки, но также получить уникальную информацию о магнитных многослойных структурах и об изменениях магнитных свойств с

толщиной. С учетом этого тема диссертации Р.А. Баулина является актуальной и важной.

Особенностью диссертационной работы Р.А. Баулина является совмещение теоретических расчетов с проведением синхротронного эксперимента и обработкой экспериментальных данных. Необходимо отметить, что расчеты, также как и эксперимент, проводились для двух режимов измерений, временного и энергетического. Во временном (традиционном) режиме измеряются интенсивности рассеянного излучения в зависимости от времени распада возбужденных состояний ядер. Анализ этих данных в случае сложных магнитных структур достаточно сложен и неоднозначен. Энергетический метод, в котором регистрируются спектры аналогичные мессбауэровским, более привычен и информативен. Применение этого метода в синхротронных экспериментах стала возможным лишь несколько лет назад, когда был создан чисто-ядерный кристаллический монохроматор (SMS – Synchrotron Mössbauer Source), имеющий спектральную ширину $\sim 10^{-8}$ эВ, сравнимую с шириной линии резонансного ядерного перехода ^{57}Fe . Эта уникальная установка была создана на канале ID18, ESRF (Гренобль). Острая коллимация пучка позволила проводить измерения с предельным угловым разрешением, например, измерять спектры вблизи полного зеркального отражения, что позволило исследовать ультратонкие пленки и многослойные структуры. Таким образом, в диссертация Р.А. Баулина был разработан и теоретически обоснован новый метод мессбауэровской спектроскопии в условиях отражения на предельных скользких углах и с учетом поляризации падающего и отраженного излучения. Теоретические расчеты были подтверждены и проверены сравнением с экспериментом. В диссертационной работе были не только получены новые оригинальные результаты, но фактически была разработана новая методика, важная для ряда практических приложений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка цитируемой литературы, и списка опубликованных работ. Объем диссертации 152 страницы.

Во **введении** сформулированы основные характеристики диссертационной работы: актуальность проблемы, цели и задачи исследования, новизна работы, научная и практическая значимость, личный вклад автора.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации. В § 1 рассмотрены поляризационные эффекты в рентгеновской оптике. Рассмотрены публикации по нерезонансному и резонансному рентгеновскому рассеянию, описаны методы XMCD и XMLD – рентгеновского магнитного циркулярного дихроизма и магнитного линейного дихроизма, а также публикации по резонансной магнитной рефлектометрии.

В § 2 рассмотрены поляризационные эффекты в мёссбауэровской спектроскопии. Рассмотрены вопросы создания поляризованных лабораторных источников и приведены эксперименты с использованием данных источников. Рассмотрены мёссбауэровские эксперименты на синхротронах, в том числе с учетом поляризации излучения и дифракционных эффектов.

Вторая глава описывает поляризационные особенности мёссбауэровских спектров зеркального отражения с учетом π -поляризованного падающего излучения. Представлена теория ядерно-резонансного рассеяния и мёссбауэровской рефлектометрии и проанализирована чувствительность мёссбауэровских спектров отражения к ориентации сверхтонкого поля относительно пучка синхротронного излучения. Экспериментально исследованы многослойные структуры $[\text{Fe}(x)/\text{Cr}(x)]_n$ с разными толщинами слоев. Экспериментально показано изменение мёссбауэровских спектров отражения при переориентации магнитных моментов под действием внешнего поля, а также возможность

восстановления профилей намагниченности путем совместной обработки мёссбауэровских спектров отражения и ядерно-резонансных рефлектометрических кривых. Наиболее яркий результат этой главы это установление спиральной магнитной структуры в многослойных образцах $[\text{Fe}(0.8\text{нм})/\text{Cr}(20\text{нм})]_{30}$, рисунок 2.6.7.

Третья глава посвящена селекции по поляризации отраженного излучения в мёссбауэровской и резонансной магнитной рефлектометрии. Теоретически показано, что в мёссбауэровской рефлектометрии форма угловых кривых и мёссбауэровских спектров существенно отличается для $\pi \rightarrow \pi'$ и $\pi \rightarrow \sigma'$ каналов отражения. Показаны, преимущества селекции $\pi \rightarrow \sigma'$ поляризации: уменьшение числа линий в мёссбауэровских спектрах, подавление вклада от электронного рассеяния, а также увеличения селективности спектров по глубине. Экспериментальная реализация этого подхода была впервые осуществлена на станции ID18 ESRF для многослойных структур $[\text{Fe}(x)/\text{Cr}(x)]_n$. В результате был зарегистрирован сигнал $\pi \rightarrow \sigma'$ отражения, согласующийся с теоретическими представлениями. Также в данной главе представлен аналитический результат, касающийся влиянием стоячих рентгеновских волн на возбуждение поляризации ортогональной к падающей. Этот эффект проявляется как в наличии пика вблизи критического угла полного внешнего отражения для $\pi \rightarrow \sigma'$ (или $\sigma \rightarrow \pi'$) поляризации. Важно отметить, что данный результат справедлив не только для мёссбауэровской рефлектометрии, но и для рентгеновской магнитной резонансной рефлектометрии, что существенно расширяет класс исследуемых объектов. Для демонстрации этого эффекта были произведены тестовые измерения на пленке $\text{Gd}_{0.23}\text{Co}_{0.77}$ на L_2 краю поглощения гадолиния, которые были выполнены на синхротронном источнике Курчатовского института.

Заключительная, **четвертая глава** посвящена ядерно-резонансной рефлектометрии на мёссбауэровском изотопе ^{161}Dy . Редкоземельные элементы представляют колоссальный интерес в современной науке. К

сожалению, в настоящее время не существует методов монохроматизации излучения, достаточной для мёссбауэровского исследования изотопа ^{161}Dy на энергетической шкале, поэтому синхротронные эксперименты проводятся на временной шкале измерения. В диссертационной работе приведен обзор мёссбауэровских исследований на изотопе ^{161}Dy , рассмотрены разрешенные сверхтонкие переходы в ^{161}Dy и проанализированы особенности временных спектров ядерно-резонансного отражения. В главе показано влияние поляризационных характеристик на мёссбауэровские спектры с учетом σ -поляризованного падающего излучения и продемонстрировано их влияние на временные спектры ядерно-резонансного отражения. Экспериментально исследовался многослойный образец $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}(100\text{нм})/\text{Y}(50\text{нм})/[\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(6\text{нм})]_{20}/\text{Al}(10\text{ нм})$. Ядерно-резонансная рефлектометрия показала присутствие магнитной модуляции с периодом, отличным от периода сверхрешетки. Временные спектры ядерно-резонансного отражения позволили определить изменения сверхтонкого поля с температурой и зарегистрировать релаксационные процессы. Следует отметить, что ранее эксперименты на изотопе ^{161}Dy производились только в геометрии рассеяния вперед.

В целом следует отметить, что диссертация Р.А. Баулина представляет законченное научное исследование, в которой на основе выполненных теоретических расчетов и математического моделирования, а также сравнения расчетов с оригинальными экспериментальными данными, фактически был разработан новый метод поляризационной мёссбауэровской рефлектометрии синхротронного излучения.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается тщательным проведением аналитических выкладок, многочисленными модельными расчетами, взаимным соответствием теоретических и экспериментальных результатов. Результаты были неоднократно доложены на российских и международных конференциях, а также опубликованы в

ведущих российских и иностранных журналах (9 публикаций, в том числе ЖЭТФ и Phys.Rev.B).

Диссертация содержит ряд новых интересных результатов, как в области теоретического описания поляризационных эффектов, так и при анализе оригинальных экспериментальных данных.

В качестве недостатков диссертации следует указать следующие моменты:

Диссертация содержит большое число насыщенных, хорошо выполненных иллюстраций, однако, в ряде случаев описание рисунков сделано недостаточно подробно, опущены важные детали, что затрудняет понимание представленного материала (например, схемы эксперимента рис. 2.3.1 и 3.2.1., и рис. 4.3.1.)

В главе IV автором были обнаружены эффекты магнитной релаксации в многослойных структурах [Dy/Gd]. Вопросы магнитной релаксации не имеют непосредственного отношения к теме диссертации. Тем не менее, желательно, чтобы эти вопросы были рассмотрены более подробно, с обсуждением механизмов релаксации.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация Баулина Романа Алексеевича на тему: «Поляризационные эффекты в мёссбауэровской и рентгеновской резонансной магнитной рефлектометрии магнитных многослойных структур» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к кандидатским диссертациям. Автореферат последовательно отражает основное содержание работы.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно

приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Баулин Роман Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории физики наноструктур и
радиационных эффектов, Отдела Физики Атомного Ядра,

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына

АНДРИАНОВ Виктор Александрович

30 сентября 2019 г.

Контакт

тел.: [redacted] il.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защита диссертация доктора физико-математических наук:
01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

Адрес места работы:

119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, : Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-
исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
Тел.: 7(495) 939-18-18; e-mail: info@sinp.msu.ru; www.sinp.msu.ru

Подпись сотрудника НИИЯФ МГУ
В.А. Андрианова удостоверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

30 сентября 2019 г.

А. Сигаева