

Белорусский государственный университет

УДК 539.172.3:539.107

ГУРАЧЕВСКИЙ Валерий Леонидович

**МЕТОДЫ И ТЕХНИКА МЕССБАУЭРОВСКОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ В ГЕОМЕТРИИ РАССЕЯНИЯ**

01.04.01 - техника физического эксперимента, физика  
приборов, автоматизация научных  
исследований

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск-1997

Работа выполнена на кафедре физики окружающей среды в  
Международном институте по радиозоологии им. А.Д.Сахарова

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
ЧУДАКОВ Владимир Андреевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор ШУМЕЙКО Н.М.

доктор физико-математических наук,  
профессор РУДАК Э.А.

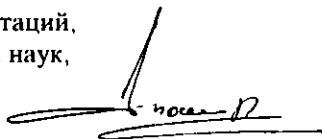
Оппонирующая организация: Институт физики твердого тела и  
полупроводников АН Республики  
Беларусь

Защита состоится 1 мая 1997 г. в 14<sup>00</sup> часов на  
заседании Совета по защите диссертаций Д02.01.10 в Белорусском  
государственном университете по адресу: 220080, г.Минск, проспект  
Скорины, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Белгосуниверситета.

Автореферат разослан 30 мая 1997 г.

Ученый секретарь Совета  
по защите диссертаций,  
доктор физ.- мат. наук,  
профессор



Апанасович В.В

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

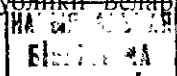
### Актуальность проблемы

Исследования эффекта Мессбауэра в геометрии рассеяния расширяют и дополняют возможности традиционной гамма-резонансной спектроскопии, основанной на геометрии пропускания. Мессбауэровская спектроскопия рассеянного излучения — мощный инструмент изучения свойств поверхности твердых тел. Возможность регистрации рассеянного и вторичных излучений различной природы (гамма- и рентгеновские кванты, конверсионные и оже-электроны) позволяет проводить селективный анализ поверхностных слоев образцов, содержащих мессбауэровские ядра, в широком диапазоне глубин. Получаемая в гамма-резонансных экспериментах информация о структуре вещества, например параметры сверхтонких взаимодействий ядер с их химическим окружением, уникальна и зачастую недоступна для других методов.

Особенности спектроскопии рассеянных и вторичных излучений таковы, что в ряде случаев измерения в геометрии рассеяния эффективнее и производительнее, чем в геометрии пропускания. Это играет очень важную роль для решения прикладных и промышленных задач, таких, как неразрушающий контроль поверхностных слоев и покрытий, дефектоскопия, концентратометрия.

Широкое использование мессбауэровской спектроскопии для решения как научных, так и прикладных задач сдерживается следующими проблемами. Получение достоверной информации, особенно при работе с необогащенными мессбауэровским изотопом образцами, сопряжено с длительным временем измерения, что предъявляет высокие требования к стабильности и спектрометрическим свойствам детектора. Регистрация вторичных излучений стандартными детекторами затруднена при исследовании образцов произвольной формы и размеров. Во многих случаях наблюдаемые эффекты малы, что требует максимального повышения энергетического разрешения, стабильности и линейности шкалы скоростей мессбауэровского спектрометра. Для производственных или полевых условий работы приборов чрезвычайно важно обеспечить устойчивость к внешним механическим и акустическим воздействиям. Решение этих проблем традиционными путями затруднено. Поэтому совершенствование известных и разработка новых методов экспериментальной техники эффекта Мессбауэра весьма актуальны.

Работы в этом направлении велись в соответствии с планами НИР Министерства образования Республики Беларусь, постановлением ГКНТ СССР № 543/228 от 21.10.85.



### Цель и задачи исследования.

Цель исследования – разработка методических основ и построение на их базе нового класса аппаратуры для научных и прикладных исследований с использованием эффекта Мессбауэра в геометрии рассеяния.

При этом решались следующие основные задачи.

1. Провести анализ физических особенностей мессбауэровской спектроскопии рассеянных и вторичных излучений для выявления путей совершенствования экспериментальной техники эффекта Мессбауэра в геометрии рассеяния.

2. Разработать комплекс новых методов, направленных на расширение экспериментальных возможностей мессбауэровской спектроскопии в геометрии рассеяния.

3. Предложить и реализовать технические решения, обеспечивающие существенное повышение стабильности, точности и производительности измерений.

4. Провести экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность найденных решений.

### Научная новизна работы

Путем оптимизации условий регистрации конверсионных и оже-электронов по световым вспышкам от инициируемых электронами микрозарядов в разреженном воздухе создан детектор вторичных электронов, превосходящий по целому ряду параметров (например, низкой чувствительности к фоновым излучениям, возможности исследования анизотропии поверхностных свойств для образцов произвольной формы и размеров, простоте реализации и эксплуатации) существующие детекторы низкоэнергетичных электронов для мессбауэровской спектроскопии. На основе метода регистрации электронов создан также резонансный детектор гамма-излучения. Разработаны новые принципы стабилизации тракта селекции резонансных событий для системы регистрации с использованием абсолютного репера.

Предложен метод накопления спектров в памяти микро-ЭВМ, основанный на слежении за мгновенной скоростью относительного движения источник-рассеиватель. Его развитие для произвольного закона изменения скорости позволило реализовать эффективные системы автоподстройки и стабилизации параметров накопления и, в итоге, создать мессбауэровские спектрометры, отличающиеся повышенной точностью сканирования резонансных линий, устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов. Созданы спектрометры переменной скорости, а также их модификации для работы в режимах с изменяющейся по

гармоническому закону и постоянной скоростью, обладающие разрешающей способностью ниже уровня скоростного шума .. значительно улучшенными по сравнению с известными приборами основными параметрами шкалы скоростей.

Показано, что следящий метод накопления для произвольного закона изменения скорости движения открывает новые возможности для задания необходимого при измерении спектров доплеровского сдвига энергии механическими, гидравлическими, пьезоэлектрическими и иными неэлектродинамическими устройствами, способными обеспечить движение массивных источников и образцов (вместе с узлами печей, криостатов) в увеличенном диапазоне скоростей. Предложен новый метод измерения сверхузких резонансных линий, основанный на задании движения в системе источник-мишень за счет механических вибраций и шумов естественного происхождения.

На созданной аппаратуре проведены исследования магнитных свойств поверхностного слоя ферромагнетика в слабых магнитных полях и анизотропных свойств поверхностных слоев металлов после направленной обработки. Создано устройство для измерения толщины покрытий, не содержащих мессбауэровские ядра, на железосодержащих образцах.

Реализованные на основе предложенной совокупности методов приборы и устройства представляют собой новый класс аппаратуры для исследований эффекта Мессбауэра в геометрии рассеяния, существенно расширяющий диапазон применений мессбауэровской спектроскопии.

#### Практическая значимость результатов.

Разработанные методы и устройства открывают ряд новых возможностей для научных и прикладных применений эффекта Мессбауэра, что подтверждается результатами исследований структурных и магнитных свойств железосодержащих образцов, испытаниями серийно выпускаемого мессбауэровского анализатора содержания касситерита в горных породах и макета мессбауэровского толщиномера защитных покрытий.

Созданный на основе автоматизированного комплекса аппаратуры учебный практикум по эффекту Мессбауэра способствует совершенствованию подготовки студентов физических специальностей вузов по общим и специальным курсам физики, автоматизации научных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Создан детектор конверсионных и оже-электронов, который, обеспечивая высокий резонансный эффект (19% при измерении спектров Fe, 26% Sn), дополнительно характеризуется возможностью селективной по энергии регистрации вторичных электронов, свойством автоматической локализации рабочего объема для образцов произвольной формы, простотой реализации и эксплуатации, благодаря чему в ряде исследований более эффективен, чем все другие известные детекторы низкоэнергетических электронов.

2. Созданный на основе метода регистрации электронов резонансный детектор гамма-излучения обеспечивает при измерении спектров железосодержащих образцов резонансный эффект  $\epsilon \sim 300\%$ , что в 1,5-2 раза выше, чем для обычно используемых сцинтилляционных и газовых пропорциональных детекторов.

3. Методом одновременной стабилизации тракта селекции резонансных событий и системы накопления в мессбауэровском спектрометре переменной скорости удается обеспечить дрейф энергетической (скоростной) шкалы, не превышающий 0,1 мкм/с за 10 часов непрерывной работы.

4. Реализация следящего метода накопления для произвольного закона изменения скорости движения обеспечивает достижение значительно более высоких, чем у известных приборов, характеристик скоростного разрешения и линейности мессбауэровского спектрометра (полуширина резонансной линии нитропруссиды натрия  $0,210 \pm 0,005$  мм/с, интегральная нелинейность шкалы скоростей 0,01%), устойчивую работу при воздействии дестабилизирующих факторов (механических вибраций, шумов), позволяет предложить ряд перспективных подходов к дальнейшему совершенствованию универсальной и специализированной аппаратуры для гамма-резонансных экспериментов, в том числе с использованием нетрадиционных систем задания движения.

Личный вклад соискателя.

Работы по мессбауэровской спектроскопии в Белгосуниверситете были инициированы профессором В.Г.Барышевским в 1975 г. Под его руководством сложилась научная группа, приступившая к систематическим исследованиям в области ядерного гамма-резонанса. Непосредственно соискателем на данном этапе был разработан и создан первый в Беларуси мессбауэровский спектрометр (при участии А.С.Солнцева), выполнен ряд исследований, в том числе поляризующих свойств мессбауэровских мишеней, начата постановка

учебного практикума по экспериментальным методам эффекта Мессбауэра.

Метод регистрации мессбауэровских спектров по световым вспышкам от микрозарядов, инициируемых вторичными электронами в разреженном воздухе, разработан соискателем совместно с А.А.Холмецким и В.А.Чудаковым. Соискателем были проведены исследования, направленные на оптимизацию рабочих параметров метода и создание детектора низкоэнергетичных электронов (помощь в этой работе оказывал М.Машлан), предложены принципы построения и создан резонансный детектор гамма-квантов.

В развитие принципов построения систем стабилизации тракта регистрации сцинтилляционных детекторов, сформулированных О.М.Аншаковым и В.А.Чудаковым, соискателем предложена и создана система стабилизации тракта селекции мессбауэровского излучения с автоматическим поиском реперного пика.

Идея осуществления следящего метода накопления мессбауэровских спектров родилась независимо у А.А.Холмецкого, В.А.Чудакова и соискателя. Ее творческое развитие осуществлялось впоследствии всеми членами группы.

Концепция автоматизации накопления спектров посредством прямого доступа в память ЭВМ, а также принципы реализации следящих систем и алгоритмы повышения стабильности скоростной шкалы с использованием ЭВМ предложены соискателем и развиты им совместно с О.В.Мисевичем.

Соискателем предложены принципы построения и с участием М. Машлана создан макет мессбауэровского толщиномера защитных покрытий.

Работа по созданию промышленного образца анализатора содержания касситерита проводилась под руководством А.Л.Холмецкого. Соискателем осуществлялась разработка методики измерений и накопления результатов, проводились полевые испытания анализатора в геологоразведочных партиях Магаданской области и Приморского края, корректировка узлов прибора по результатам испытаний.

Непосредственно соискателем осуществлялись разработка методики проведения экспериментов, измерения и обработка данных в работах по изучению структурной и магнитной анизотропии поверхностных слоев материалов и пленок.

Соискателем были завершены постановка специального практикума по изучению эффекта Мессбауэра в Белгосуниверситете, разработка методического обеспечения практикума.

### Апробация результатов.

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на I Всесоюзном совещании по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий (Москва, 1985 г.), V Всесоюзном семинаре по автоматизации исследований в ядерной физике (Ташкент, 1988 г.), III Всесоюзном совещании по физике и технологии упрочения поверхности (Ленинград, 1985 г.), Всесоюзной конференции "Достижения в области металловедения" (Свердловск, 1984 г.), расширенном заседании Белорусского Республиканского межвузовского объединения по физике (Гродно, 1981 г.), Всесоюзной научно-методической конференции по основам использования ТСО, ЭВМ и САПР в учебном процессе (Москва, 1983 г.).

### Публикации.

Результаты исследований опубликованы в 56 печатных работах, из которых 12 тезисов докладов в сборниках конференций, 20 авторских свидетельств на изобретения, 4 депонированные статьи, 18 статей в научных журналах, 2 учебных пособия (книги).

### Структура и объем работы.

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, выводов, списка использованных источников и приложения, содержащего копии документов о метрологических испытаниях разработанной аппаратуры, использовании результатов исследований; схему интерфейса и тексты программ для ЭВМ.

Объем диссертации составляет 181 стр., включая 49 рисунков и 10 таблиц на 35 стр. и по тексту, общую характеристику работы на 6 стр., библиографию из 178 наименований на 14 стр., приложения на 17 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована сущность эффекта Мессбауэра. Мессбауэровский спектрометр рассматривается в виде совокупности систем: регистрации, движения (доплеровской модуляции), накопления, а также управления, обработки и вывода результатов. Отмечено, что повышение точности, стабильности и производительности измерений сопряжено с совершенствованием каждой из этих систем

В главе 1 проведен анализ физических особенностей мессбауэровской спектроскопии в геометрии рассеяния. Важнейшие из них состоят в следующем.

Измерения в геометрии рассеяния отличаются повышенной чувствительностью, позволяющей получать информативные



спектры, начиная со значений концентрации в  $10^{12}$  мессбауэровских ядер на квадратный сантиметр и выше. Как следствие, выбор геометрии рассеяния в ряде случаев способствует повышению и производительности измерений, что играет важную роль для многих, в том числе прикладных применений эффекта Мессбауэра.

Диапазон исследуемых глубин при изучении свойств поверхности твердых тел определяется типом регистрируемого излучения (рассеянного резонансного или одного из вторичных), особенностями геометрии измерений и простирается от единиц нанометров до десятков микрометров.

Мессбауэровская спектроскопия конверсионных электронов (МСКЭ) обладает примерно на порядок более высокой пороговой чувствительностью, чем спектроскопия по рассеянному гамма- или вторичному рентгеновскому излучению. Методы МСКЭ позволяют проводить как интегральные, так и селективные по глубине исследования поверхностных слоев в диапазоне глубин от единиц до сотен нанометров.

Широкому использованию МСКЭ, особенно в прикладных исследованиях, препятствуют сложности в изготовлении и эксплуатации приемлемых детекторов низкоэнергетических электронов.

К аппаратуре, используемой для измерений в геометрии рассеяния, наряду с обычными требованиями высоких значений энергетического (скоростного) разрешения, линейности шкалы скоростей предъявляются повышенные требования стабильности работы в условиях, как правило, долговременных измерений и возможного воздействия дестабилизирующих факторов.

Таким образом, возможности мессбауэровской спектроскопии в геометрии рассеяния и пропускания не идентичны. Во-первых, существует круг задач (например, требующих повышенной чувствительности или производительности измерений), решение которых в геометрии рассеяния эффективнее. Во-вторых, ряд применений эффекта Мессбауэра, например, для изучения свойств поверхности, возможен только в геометрии рассеяния.

Особенности измерений в геометрии рассеяния накладывают определенный отпечаток на методику и технику эксперимента, что внимательным образом учитывалось в ходе всей работы.

В главе 2 рассмотрены методы регистрации излучений и повышения стабильности тракта селекции резонансных событий, а также разработанная на их основе аппаратура. В 2.1 предложен метод регистрации вторичных электронов, основанный на измерении стандартным ФЭУ интенсивности световых вспышек длительностью

$10^{-7}-10^{-8}$  с, сопровождающих инициируемые электронами микроразряды в разреженном воздухе при наличии электрического поля в зазоре катод ФЭУ – образец (см. рисунок). При давлении воздуха  $p=9 \cdot 10^3$  Па и напряженности электрического поля  $E=2,7$  кВ/см достигнута величина резонансного эффекта  $\epsilon$ , равная 19 % для спектров Fe и 26 % для спектров Sn (при естественном содержании соответствующих изотопов в образцах).

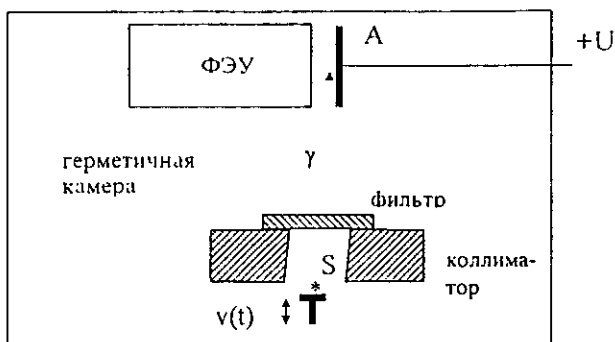


Схема измерений в методе регистрации вторичных электронов по световым вспышкам от микроразрядов в разреженном воздухе

Высокий резонансный эффект обусловлен низкой чувствительностью детектора к фоновым излучениям. Последнее, в свою очередь, объясняется невысокой вероятностью возникновения микроразрядов от высокоэнергетичных комптоновских электронов, особенностями геометрии измерений (малость рабочего объема снижает вероятность регистрации фоновых электронов, рожденных в конструктивных элементах детектора, а сам образец обладает экранирующими свойствами), возможностью подавления радиационных шумов ФЭУ выбором порога регистрации.

Путем амплитудного отбора импульсов ФЭУ возможна селективная по глубине регистрация электронов. Определенный для значения фактора насыщения  $V(x)=0,9$  диапазон исследуемых глубин в случае оловосодержащих соединений составил  $170 \div 900$  нм. К важным достоинствам созданного детектора следует также отнести:

- возможность (благодаря автоматической локализации рабочего объема) измерять спектры образцов произвольной формы и размеров;
- повышенную чувствительность к анизотропии поверхности изучаемых образцов, определяемую касательным падением излучения источника;
- простоту изготовления и эксплуатации.

В 2.2 рассмотрены особенности регистрации рассеянного и вторичного электромагнитного излучения, описана экспериментальная установка, на которой проводились исследования. Предложен новый резонансный детектор рассеянного гамма-излучения, созданный на основе метода регистрации электронов по световым вспышкам. С целью регистрации гамма-квантов между рассеивателем и катодом ФЭУ устанавливается конвертор, роль которого выполняет тонкая мишень, обогащенная резонансным изотопом. Так как сечение резонансного взаимодействия гамма-квантов существенно превышает сечения других процессов и велика вероятность распада возбужденных ядер путем внутренней конверсии, мишень служит эффективным преобразователем падающего резонансного излучения в поток электронов, попадающий в рабочий объем счетчика. Измеренная на железосодержащих образцах величина резонансного эффекта составила около 350 %.

В 2.3 предложены методы и устройства для стабилизации тракта селекции резонансных событий в системе регистрации. Одно из созданных устройств предназначено для проведения экспериментов с применением сцинтилляционного или пропорционального детектора регистрируемых квантов и использует естественный реперный сигнал от гамма-линии источника излучения. Возникающая при этом из-за относительно малого периода полураспада используемых радионуклидных источников проблема периодической подстройки параметров системы стабилизации решена путем автоматического поиска реперного пика не по признаку его фиксированной интенсивности, а по соотношению интенсивностей двух гамма-линий источника.

Работа второго устройства основана на периодической коррекции рабочего режима схемы стабилизации со светоизлучающим диодом (СИД) по положению естественного репера от рабочей  $\gamma$ -линии используемого источника. В случае проведения множественных измерений для подстройки параметров контура стабилизации по СИД удобно использовать промежутки времени, в течение которых происходит смена образца. С этой целью непосредственно за измеряемым образцом жестко крепится вспомогательная обогащенная мишень, с помощью которой и осуществляется формирование радиационного репера. Показано, что при таком подходе удастся совместить преимущества систем стабилизации, работающих как на основе СИД, так и с естественным репером.

Отмечено, что стабильность работы мессбауэровского спектрометра в целом зависит от параметров не только регистрирующей аппаратуры, но и систем движения и накопления (СД

и СН). Вопросы стабилизации СД и СН рассмотрены в следующем разделе.

Глава 3 посвящена методам накопления мессбауэровских спектров.

В 3.1 предложен метод накопления, лишенный недостатков известных модуляционного и временного методов. В его основе лежит идея одновременной равномерной дискретизации как шкалы скоростей, так и шкалы интенсивностей измеряемого спектра. Это достигается путем оцифровки текущих значений скорости СД следящим АЦП, благодаря чему возможно переключение каналов накопителя в моменты, соответствующие изменениям скорости на один квант, с измерением промежутков времени (экспозиций) между такими событиями.

Временные экспозиции в каналах накопления, зависящие от нелинейности в законе изменения скорости СД, при монотонном его характере наиболее просто выравниваются путем использования стабильного одновибратора, управляющего ключом на счетном входе накопителя. При этом высокая линейность шкалы интенсивностей достигается ценой просчетов части зарегистрированных событий. Показано, что эффективнее осуществлять нормировку числа резонансных событий на значение времени экспозиции в каждом канале, что приводит лишь к перераспределению статистической обеспеченности в отдельных каналах спектра, как это предложено в 3.2.1. В этом случае становится принципиально возможным прецизионное измерение спектра без просчетов полезной информации для любого закона изменения скорости СД, в том числе при воздействии дестабилизирующих движущих факторов.

Такой метод накопления, названный следящим, обладая целым рядом достоинств, открывает широкие возможности для дальнейшего совершенствования мессбауэровских спектрометров, что подробно рассмотрено в 3.2 и следующих подразделах.

В 3.2.1 показано, что при условии корректной работы следящей системы в случае внешних воздействий с немонотонным характером скоростное разрешение спектрометра определяется шагом квантования скорости  $\Gamma_v$  и может быть меньше уровня скоростного шума  $\delta_v$ .

Предложены и реализованы два варианта построения следящей системы накопления на базе ЭВМ, которые благодаря адекватной обработке произвольного закона изменения скорости СД позволили выбирать величину  $\Gamma_v$  в пределах  $0,1 \pm 0,5 \delta_v$ . В результате общепринятая оценка скоростного разрешения полушириной резонансной линии стандартного образца нитропруссиды натрия составила  $0,210 \pm 0,05$  мм/с, что лучше, чем у всех известных приборов.

Один из вариантов СН осуществляет автоматическое накопление значений экспозиции по каналам в отдельной зоне памяти с последующей нормировкой спектра периодически включаемой программой. Вторым вариантом СН производится аппаратная нормировка спектра логарифмическим интенсивитетом, используемым в режиме разделения времени по каналам накопления.

В 3.2.2 предлагаются методы повышения стабильности шкалы скоростей. Первый метод, предназначенный для стабилизации базовой линии следящего АЦП (САЦП), основан на оцифровке и сравнении временных интервалов, в течение которых сигнал скорости выходит за пределы динамического диапазона ЦАП в САЦП. По результатам сравнения корректируется ток смещения ЦАП. Для такого метода получены значения нестабильности цены канала 0,1 мкм/с и смещения нуля скоростной шкалы 2 мкм/с за 10 часов работы спектрометра.

С целью дальнейшего улучшения стабильности скоростной шкалы предложена система накопления с оптическим датчиком значения скорости на основе двухчастотного лазера с близкими значениями частот и двухлучевого интерферометра, позволяющая осуществлять автоматическую коррекцию параметров скоростной шкалы.

Установлено, что для исключения дрейфа сигнала скорости может быть эффективной система с дифференциальным емкостным датчиком скорости, состоящим из обкладок, закрепленных на корпусе подвижной части вибратора и на образце. Такой системе свойственно и улучшенное скоростное разрешение благодаря коррекции вибраций в системе корпус вибратора образец, а также снижению электромагнитных наводок на сигнал скорости.

3.2.3 содержит описание системы стабилизации параметров шкалы скоростей на основе абсолютного репера. В спектрометр вводится быстродействующий вспомогательный тракт регистрации спектра эталонного обогащенного образца, а вспомогательный источник закрепляется на второй стороне штока вибратора. Цифровая обратная связь управляет опорным напряжением и током смещения ЦАП в САЦП. Такой метод обеспечивает компенсацию не только дрейфа параметров САЦП и датчика скорости, но и сдвига мессбауэровских линий при изменении температуры.

В 3.2.4 предлагается метод снижения нелинейностей шкалы скорости, эффективный независимо от их характера и причин возникновения. В основе метода лежит использование калибровочной зависимости (номера канала спектра от скорости движения), полученной с помощью лазерного интерферометра или в ходе обработки прецизионного спектра эталонного образца. В соответствии с этой зависимостью, хранящейся в ПЗУ, дополнительными ЦАП формируются опорное напряжение и ток смещения для ЦАП в САЦП. При этом достигнуты значения интегральной нелинейности

скоростной шкалы, не превышающие 0,01 %, что существенно ниже, чем у всех известных приборов.

В 3.3 рассмотрены методы накопления при использовании гармонического закона движения, существенно ослабляющего требования к используемой СД. Установлено, что линейаризация шкалы скоростей в простейшей реализации следящего метода накопления с одновибратором приводит к просчету примерно трети полезной информации. В случае, когда такие потери неприемлемы, целесообразно использование одного из вариантов следящей системы с нормировкой, описанных в 3.2.1.

В 3.4 рассматриваются методы совершенствования мессбауэровских спектрометров с постоянной скоростью. С целью стабилизации скорости движения разработана система, основанная на сравнении мгновенного значения скорости с опорной величиной и формировании, при необходимости, корректирующего воздействия на СД. С целью повышения скоростного разрешения предложена система, осуществляющая регистрацию при скоростях, лежащих между двумя близкими значениями порогов. В результате внешние вибрации не могут оказать влияния на скоростное разрешение спектрометра, которое соответствующим выбором порогов может быть сделано существенно меньше уровня скоростного шума.

В 3.5 показано, что использование для задания движения механических, гидравлических, пьезоэлектрических и иных систем вместо традиционных электродинамических вибраторов позволяет приводить в движение значительные массы, существенно расширить диапазон скорости в сторону как высоких, так и низких ее значений. В отличие от известных спектрометров предлагаемые разработки благодаря следящему за произвольными изменениями скорости методу накопления обеспечивают значительно более высокие параметры шкалы скоростей без просчетов полезной информации. Так, в созданном макете при полезной нагрузке на шток в 1,5 кг величина интегральной нелинейности составила менее 0,1 %. Аналогичными параметрами обладает разработанный спектрометр с постоянной скоростью, основанный на измерении интервалов времени, в течение которых происходит линейно-изменяющееся смещение на фиксированную величину.

Развитие этих идей допускает эффективную возможность построения спектрометра без специального устройства задания скорости, использующего для доплеровской модуляции  $\gamma$ -квантов механические вибрации естественного происхождения. Такой способ накопления перспективен при исследовании мессбауэровских спектров ядер со сверхузкими резонансными линиями ( $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{67}\text{Zn}$ ,  $^{109}\text{Ag}$ ).

В главе 4 рассмотрены методы автоматизации мессбауэровских экспериментов. В 4.1 на основе анализа основных задач и используемых средств автоматизации спектрометрических

экспериментов выявлены наиболее рациональные структуры для применения в мессбауэровских спектрометрах.

В 4.2 показано, что организацию накопления и визуализации спектров целесообразнее осуществлять не программным путем, а с использованием канала прямого доступа в память ЭВМ, что высвобождает ресурсы процессора на наиболее эффективное решение задач коррекции инструментальных погрешностей, обработки данных, управления установкой, вывода результатов непосредственно в ходе измерений.

В 4.3 по результатам анализа используемых методов выявлены алгоритмы, наиболее пригодные для осуществления экспресс-обработки данных и коррекции типичных инструментальных погрешностей в микро-ЭВМ.

В 4.4 описываются созданные системы автоматизации мессбауэровских экспериментов с использованием вычислительной техники различного типа и конфигурации: на базе мини-ЭВМ, микро-ЭВМ в составе локальной сети, персональных компьютеров, модулей системы КАМАК, в том числе - с автономными крейт-контроллерами.

Глава 5 посвящена применениям разработанных методов и аппаратуры. В 5.1 описан мессбауэровский толщиномер защитных покрытий на поверхности образцов, содержащих резонансные ядра. Поскольку нерезонансное покрытие экспоненциально ослабляет интенсивность как падающего, так и рассеянного излучения, то при заранее измеренной величине резонансного эффекта без покрытия для определения его толщины достаточно измерить скорость счета детектора при наличии и в отсутствие резонанса. Отличаясь высокой избирательностью, такой метод особенно эффективен, когда малоприменимы традиционные методы, например при определении толщины хром-никелевых покрытий на железосодержащих образцах. Созданный макет толщиномера обеспечивает измерение толщины таких покрытий в диапазоне от сотых долей до 10 микрон. Использование простейшего вибратора с гармоническим заданием скорости движения способствовало упрощению конструкции. Отмечено, что существенно повысить производительность измерений при регистрации  $\gamma$ -квантов можно, применяя описанный в 2.2 резонансный детектор рассеянного гамма-излучения. Подобный прибор перспективен для решения задач неразрушающего контроля и дефектоскопии в промышленности.

В 5.2 содержится краткое описание мессбауэровского экспресс-анализатора содержания касситерита (соединения, используемого для промышленного получения олова) в горной породе. Работа прибора основана на зависимости измеряемого резонансного эффекта от концентрации резонансных ядер  $^{119}\text{Sn}$  в образцах. Повышенная по сравнению с известными разработками чувствительность и точность измерений во многом обусловлены использованием описанной в 2.3.2

системы стабилизации тракта селекции резонансных событий, а также устройства, блокирующего регистрацию в интервалах времени, когда резонансные условия для рассеяния  $\gamma$ -излучения не полностью рассогласованы. Анализатор обеспечивает измерение концентрации касситерита в диапазоне  $0,003 \pm 3\%$  с максимальным временем измерения 3 минуты. Приведенные результаты испытаний малых серий прибора свидетельствуют о его высокой эффективности в полевых геологоразведочных изысканиях.

В 5.3 представлены результаты исследований анизотропии эффекта Мессбауэра в образцах стали и чугуна после направленной механической обработки. Использовались следящий мессбауэровский спектрометр и метод регистрации конверсионных электронов с касательным падением падающего  $\gamma$ -излучения, благодаря чему достигалась высокая чувствительность к анизотропии поверхностных свойств. Измеренные спектры стальных образцов, содержащие секстет магнитной сверхтонкой структуры  $\alpha$ -Fe и монолинию  $\gamma$ -Fe, выявили намагниченность поверхностного слоя в результате шлифования, а также зависимость вероятности эффекта Мессбауэра от угла  $\theta$  между направлением шлифования и проекцией волнового вектора падающего излучения на поверхность. В спектрах образцов чугуна, кроме монолинии, наблюдались два дублета квадрупольного расщепления, изменение интенсивности которых в зависимости от угла  $\theta$  также свидетельствует о появлении кристаллографической текстуры поверхности в результате механической обработки. Детальное изучение явлений анизотропии на поверхности поликристаллических объектов может привести к развитию нового метода неразрушающего контроля и исследования структуры твердых тел.

В 5.4 приведены результаты исследования магнитных свойств поверхностного слоя ферромагнетика в слабых магнитных полях. Исследовались поликристаллические железные образцы, обогащенные ядрами  $^{57}\text{Fe}$ , в области магнитных полей с напряженностью до 10 Гс. Оценку намагниченности как и в исследованиях анизотропии эффекта Мессбауэра производили по соотношению интенсивностей линий секстета магнитной сверхтонкой структуры. Измерения осуществлялись на автоматизированном следящем спектрометре с регистрацией конверсионных электронов. Обнаружена принципиальная невоспроизводимость кривой намагничивания в длительной серии экспериментов. Выявленные закономерности можно объяснить медленными спонтанными флуктуациями тензора намагниченности в тонком ( $\sim 100$  нм) поверхностном слое ферромагнетика. Характерное время  $\tau$  этих флуктуаций не может быть существенно меньше времени измерения (80 с).

В 5.5 обсуждается роль работ по исследованию эффекта Мессбауэра и его экспериментальных методов в процессе совершенствования обучения студентов специализации "Ядерная



физика". В силу органичной связи научной работы с подготовкой специалистов эта роль достаточно важна. Знакомство с теорией эффекта Мессбауэра в лекционном курсе позволяет на конкретном, свежем и ярком примере продемонстрировать многие важные понятия, явления и закономерности ядерной физики, квантовой механики, электродинамики, физики твердого тела. Изучение многочисленных применений эффекта Мессбауэра в ходе семинарских занятий способствует углублению представлений о физической картине мира, раскрывает значение спектроскопии как мощного метода научных исследований. Соответствующий лабораторный практикум позволяет не только закрепить положения лекционного курса, методические и технические вопросы спектроскопии, ядерной электроники, обработки данных, но и максимально приблизить работу в лаборатории к характеру настоящего научного исследования. Наконец, работы по автоматизации мессбауэровского эксперимента оказали значительное позитивное влияние на применение ЭВМ в учебном процессе: при обучении основам автоматизации научных исследований, микропроцессорной техники, организации эффективного контроля подготовки студентов.

В приложениях содержатся: протокол метрологической аттестации автоматизированного следящего ЯГР-спектрометра, схема магистральной части интерфейса прямого доступа в память ЭВМ, листинг фрагментов программного обеспечения автоматизированного спектрометра, акт внедрения гамма-резонансного комплекса на линии с ЭВМ в учебный процесс Белгосуниверситета, акт испытания опытного образца мессбауэровского анализатора содержания касситерита АСК-01, акт испытаний прибора АСК-01 на надежность работы, заключение по расчету экономического эффекта от применения мессбауэровского анализатора содержания касситерита.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод регистрации вторичных электронов, а также созданные на его основе детектор конверсионных  $\beta$ -электронов и резонансный детектор гамма-излучения применимы как при исследовании физико-химических процессов, происходящих на поверхности твердых тел, так и для проведения технологических измерений в промышленности. Такая особенность детектора электронов, как касательное падение излучения источника, делает его чувствительным к анизотропии свойств поверхности, что подтверждается проведенными нами исследованиями поликристаллических железосодержащих образцов, подвергнутых механической обработке; поверхностной намагниченности ферромагнитных образцов. Детектор обеспечивает высокий резонансный эффект

(19 % - для спектров Fe, 26 % Sn) и допускает энергетическую селекцию электронов, выходящих с различных глубин поверхностного слоя образца, путем амплитудного отбора сигналов ФЭУ. Простота реализации, автоматическая локализация рабочего объема для образцов произвольных размеров и формы, низкая чувствительность к фоновым излучениям делают его более эффективным, чем все известные детекторы в целом ряде экспериментов. Перспективно использование резонансного детектора гамма-квантов, обеспечивающего при исследовании железосодержащих образцов резонансный эффект  $\sim 350\%$ , что существенно выше, чем для обычно применяемых сцинтилляционных и пропорциональных детекторов.

2. Повышение стабильности тракта селекции резонансных событий, особенно при проведении измерений в геометрии рассеяния, важная предпосылка стабильной работы мессбауэровского спектрометра в целом. При регистрации гамма-излучения в случае мессбауэровских источников с относительно малым периодом полураспада эффективна предложенная нами система стабилизации с автоматическим поиском реперного пика гамма-излучения по известному соотношению интенсивностей спектральных линий источника. В случае малоинтенсивного, нечетко выраженного гамма-репера целесообразно использование разработанной нами комбинированной системы с двумя реперами: естественным и от сигналов светонизлучающего диода. При таком подходе удается совместить преимущества систем стабилизации, работающих на основе каждого из этих реперов в отдельности.

3. Предложенный метод накопления мессбауэровских спектров в памяти микро-ЭВМ, основанный на слежении за мгновенным значением сигнала скорости, позволяет осуществлять измерения при произвольном законе скорости движения, открывает ряд реализованных нами возможностей для улучшения важнейших параметров спектрометра: энергетического (скоростного) разрешения, линейности и стабильности параметров шкалы скоростей. В созданных спектрометрах достигнуты следующие значения основных параметров: полуширина линии спектра нитропруссиды натрия -  $0,210 \pm 0,005$  мм/с, интегральная нелинейность скоростной шкалы 0,01 %, что существенно превосходит аналогичные характеристики известных приборов.

4. Универсальность следящего метода накопления подтверждают разработанные нами модификации спектрометров для случаев прямоугольного и гармонического закона изменения скорости с улучшенными по сравнению с известными разработками значениями основных параметров. Для многих применений мессбауэровской

спектроскопии особый интерес представляют спектрометры с гармоническим заданием скорости, позволяющие использовать простые малогабаритные системы движения, как это показано нами на примере создания мессбауэровского толщиномера защитных покрытий.

5. Показано, что следящий метод накопления спектров открывает новые возможности для задания необходимого при измерении спектров доплеровского сдвига энергии механическими, гидравлическими, пьезоэлектрическими и иными неэлектро-динамическими устройствами, способными обеспечить движение массивных (единицы килограмм и выше) источников и образцов (вместе с узлами печей, криостатов) в увеличенном диапазоне скоростей, что существенно расширяет области применения мессбауэровской спектроскопии. Предложен новый метод измерения сверхузких резонансных линий, основанный на задании движения в системе источник-мишень за счет механических вибраций и шумов естественного происхождения.

6. Одновременное использование разработанных методов стабилизации тракта селекции резонансных событий и системы накопления обеспечивает стабильность шкалы скоростей мессбауэровского спектрометра со значением дрейфа, не превышающим 0,1 мкм/с за 10 часов непрерывной работы. Высокая стабильность работы является предпосылкой повышения чувствительности измерений, что продемонстрировано на примере создания промышленного мессбауэровского анализатора содержания касситерита в горных породах, обеспечивающего нижний предел измерения концентрации 0,003 % при времени анализа 2-3 минуты.

7. На основе анализа основных задач и классификации уровней автоматизации спектрометрических экспериментов выявлены наиболее рациональные структуры для систем автоматизации мессбауэровских спектрометров. Показано, что организация накопления и оперативного отображения спектров посредством канала прямого доступа в память ценной незначительного усложнения интерфейса минимизирует затраты времени процессора на эти процедуры, высвобождая его ресурсы на более эффективное решение задач коррекции инструментальных погрешностей, оперативной обработки данных, управления установкой, вывода результатов в реальном масштабе времени с измерениями. Разработаны системы автоматизации мессбауэровского эксперимента на базе компьютерной техники различного типа и конфигурации, использованные нами для решения различных исследовательских, прикладных задач и в процессе подготовки специалистов.

8. Реализованные на основе предложенной совокупности методов устройства и приборы свидетельствуют о создании нового класса аппаратуры для исследования эффекта Мессбауэра в геометрии рассеяния, отличающегося повышенной точностью измерения резонансных линий, устойчивой работой в условиях дестабилизирующих факторов и способного существенно расширить диапазон применений мессбауэровской спектроскопии.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Метод регистрации конверсионных электронов для мессбауэровской спектроскопии / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, О.В.Мисевич, Пиви Пепе, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // I Всесоюзное совещание по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий: Тез. докл.- М.: Изд-во МГУ, 1985.- С. 106.
2. Мессбауэровская спектроскопия с регистрацией конверсионных электронов / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, О.В.Мисевич // Материалы 8-й республиканской конференции молодых ученых по физике: Тез. докл. - Минск, 1986. - С. 86.
3. Система автоматизации гамма-резонансных экспериментов / В.Л.Гурачевский, Н.Б.Измайлова, В.А.Коробов, А.Р.Лопатик, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // V Всесоюзный семинар "Автоматизация исследований в ядерной физике и смежных областях": Тез. докл. - Ташкент: Изд-во ФАН, 1988. - С. 22-23.
4. Автоматизированная система сбора и обработки информации для многомерного параметрического мессбауэровского спектрометра / В.Л.Гурачевский, С.М.Иркаев, В.В.Куприянов, Ю.Н.Мальцев, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // I Всесоюзное совещание по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий: Тез. докл.- М.: Изд-во МГУ, 1985.- С. 96.
5. Мобильная система накопления и обработки данных гамма-резонансных измерений для геофизических исследований / В.Л.Гурачевский, А.Р.Лопатик, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // V Всесоюзный семинар "Автоматизация исследований в ядерной физике и смежных областях": Тез. докл. Ташкент: Изд-во ФАН, 1988. - С. 191-192.
6. Альфа-гамма превращения в поверхностном слое стали после полирования / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, Г.П.Шпеньков // III Всесоюзное совещание по

- физике и технологии упрочнения поверхности: Тез. докл. Л.: Наука, 1985. - С. 81.
7. Конверсионные мессбауэровские исследования структуры поверхности серого чугуна после механической обработки / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, Г.П.Шпеньков // I Всесоюзное совещание по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий: Тез. докл. - М.: Изд-во МГУ, 1985. - С. 122.
  8. Применение эффекта Мессбауэра для изучения поверхностей металлов после механической обработки / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, Г.П.Шпеньков // Достижения в области металловедения Тез. докл. конф. - Свердловск: Изд-во УПИ, 1985. - С. 55.
  9. Изучение магнитных свойств поверхностного слоя ферромагнетика в слабых магнитных полях методом электронной ЯГР-спектроскопии / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // I Всесоюзное совещание по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий: Тез. докл. - М.: Изд-во МГУ, 1985. - С. 96.
  10. Модульная микро-ЭВМ для изучения принципов построения микропроцессорных систем / Н.М.Абрамчук, В.Л.Гурачевский, С.С.Шушкевич, В.П.Яновский // Всесоюзная научно-методическая конференция "Научно-методические основы использования ТСО, ЭВМ и САПР в учебном процессе общинженерных дисциплин": Тез. докл. - Москва: Изд-во МАИ, 1983. - С. 28.
  11. Гурачевский В.Л. Организация изучения основ автоматизации научных исследований // Научная организация учебного процесса: Тез. докл. конф. - Минск: Высшая школа, 1981. - С. 115-116.
  12. Гурачевский В.Л. Автоматизация контроля подготовки // Сб. материалов по вопросам методики преподавания физики в высшей школе. - Гродно, 1981. - С. 50.
  13. А. с. 1311439 СССР, МКИЗ G01T 1/16. Резонансный детектор / В.Л.Гурачевский, С.М.Иркаев, В.В.Куприянов, А.Л. Холмецкий, В.А.Чудаков (СССР), Машлан Мирослав (ЧССР). № 3926533; Заявлено 09.07.85; Зарегистрировано 15.01.87. - 4 с.
  14. А. с. 1102360 СССР, МКИЗ G01T 1/40. Система стабилизации энергетической шкалы детектора мессбауэровского спектрометра / О.М.Аншаков, А.Л. Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, В.И.Гуринович (СССР). № 3582313; Заявлено 26.04.83; Зарегистрировано 07.03.84. - 12 с.
  15. А. с. 1376017 СССР, МКИЗ G01N 24/00. Устройство для определения содержания олова / В.И.Гольданский,

- А.Л.Холмецкий, Е.Ф.Макаров, В.А.Чудаков, В.Н.Линев, О.В.Мисевич, Л.В.Ботов, В.Л.Гурачевский, Н.В.Киреев, И.Н.Грознов (СССР). № 4121763; Заявлено 23.09.86; Зарегистрировано 22.10.87. - 11 с.
16. А. с. 1093104 СССР, МК113 G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / А.Л. Холмецкий, В.А.Чудаков, О.М.Аншаков, В.Л.Гурачевский, В.И.Гуринович (СССР). - № 3433609; Заявлено 30.04.82; Зарегистрировано 15.01.84. - 14 с.
17. А. с. 1264722 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский (СССР). № 3811158; Заявлено 11.10.84; Зарегистрировано 15.06.86. - 4 с.
18. А. с. 1365925 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Ядерный гамма-резонансный спектрометр / С.М.Иркаев, В.Л.Гурачевский, В.В.Куприянов, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков (СССР). № 3893877; Заявлено 12.05.85; Зарегистрировано 08.09.87. - 5 с.
19. А. с. 1263074 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.В.Мисевич, Е.В.Бильдюкевич (СССР), М.Машлан (ЧССР). № 3826870; Заявлено 19.12.84; Зарегистрировано 08.06.86. - 12 с.
20. А. с. 1140587 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Ядерный гамма-резонансный спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.М.Аншаков (СССР). - № 3664468; Заявлено 15.10.83; Зарегистрировано 15.10.84. - 8 с.
21. А. с. 1149764 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский (СССР), М.Машлан (ЧССР). № 3657327; Заявлено 28.10.83; Зарегистрировано 08.12.84. - 11 с.
22. А. с. 1228663 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский (СССР). № 3714971; Заявлено 23.03.84; Зарегистрировано 03.01.86. - 7 с.
23. А. с. 1295920 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.В.Мисевич (СССР), М.Машлан (ЧССР). - № 3922691; Заявлено 28.06.85; Зарегистрировано 08.10.86. - 8 с.
24. А. с. 1223743 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.В.Мисевич (СССР). № 3780845; Заявлено 15.05.84; Зарегистрировано 08.12.85. - 12 с.

25. А. с. 1075830 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Ядерный гамма-резонансный спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.М.Аншаков (СССР) - № 3464450; Заявлено 07.07.82; Зарегистрировано 22.10.83. - 9 с.
26. А. с. 1093105 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.М.Аншаков (СССР). № 3562148; Заявлено 09.03.83; Зарегистрировано 15.01.84. - 11 с.
27. А. с. 1044179 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр с постоянной скоростью / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, О.М.Аншаков, В.Л.Гурачевский (СССР). № 3432724; Заявлено 30.04.82; Зарегистрировано 23.05.83. - 8 с.
28. А. с. 1427988 СССР, МКИЗ G01T 1/12 G01N 23/02. Способ гамма-резонансной спектроскопии / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский (СССР), М.Машлан (ЧССР). № 3864807; Заявлено 12.03.85; Зарегистрировано 01.06.88. - 5 с.
29. А. с. 1082140 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Спектрометр ядерного гамма-резонанса с постоянной скоростью / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.М.Аншаков (СССР). № 3518041; Заявлено 01.12.82; Зарегистрировано 22.10.83. - 9 с.
30. А. с. 1115562 СССР, МКИЗ G01T 1/36. Ядерный гамма-резонансный спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.М.Аншаков (СССР). № 3595307; Заявлено 24.05.83; Зарегистрировано 22.05.84 - 7 с
31. А. с. 1223742 СССР. МКИЗ G01T 1/36. Мессбауэровский спектрометр / А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский, О.В.Мисевич (СССР). № 3677518; Заявлено 23.12.83; Зарегистрировано 08.12.85. - 6 с.
32. А. с 1415160 СССР, МКИЗ G01N 24/00. Устройство для определения содержания олова / В.И.Гольданский, Е.Ф.Макаров, И.Н.Грознов, Н.В.Киреев, Л.В.Ботов, А.Л.Холмецкий, О.В.Мисевич, В.Н.Линев, В.А.Чудаков, В.Л.Гурачевский (СССР). - № 4135646; Заявлено 17.10.86; Зарегистрировано 08.04.88. - 4 с.
33. Метод ЯГР-спектроскопии тонких поверхностных слоев материалов / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // ПТЭ. -1985. -№ 5.- С. 38-41.
34. Метод мессбауэровской спектроскопии с регистрацией конверсионных электронов / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // Докл. АН БССР. 1985.- Т.29. - № 4.- С. 329-332.
35. Мессбауэровская спектроскопия тонких пленок с регистрацией конверсионных электронов / О.М.Аншаков, В.Л.Гурачевский,

- А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1984. - № 2. - С. 18-21.
36. Nuclear Gamma Resonance spectroscopy of Thin Surface Layers / A.L.Kholmetskii, V.A.Chudakov, V.L.Gurachevskii, M.Mashlan, O.V.Misevich // Instruments and Experimental Technique. 1985. - Vol.28, № 6, P. 1. - P. 1274-1277.
37. Гурачевский В.Л., Солнцев А.С. Простой мессбауэровский спектрометр с постоянным ускорением // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1980.- № 3.- С. 60-61.
38. A time modulation method for Mössbauer spectra registration / V.L.Gurachevskii, A.L.Kholmetskii, M.Mashlan, O.V.Misevich, V.A.Chudakov // Nucl. Instrum. & Meth. -1992.- В 71. - P. 461-464.
39. A Mössbauer spectrometer with nonlinear velocity signal / V.L.Gurachevskii, A.L.Kholmetskii, M.Mashlan, O.V.Misevich, V.A.Chudakov // Nucl. Instrum. & Meth. -1994.- В 84. - P. 120-121.
40. Гурачевская Т.С., Гурачевский В.Л., Хула Я. Сопряжение многоканального анализатора NTA-512 с мини-ЭВМ "Электроника-100И" / Ред. журн. ПТЭ.- 1986. 9 с. -Деп. в ВИНТИ, 1986, № 3165-В86.
41. Гамма-резонансный комплекс на линии с микро-ЭВМ / Е.В.Бильдюкевич, В.Л.Гурачевский, Ю.М.Литвинович, М.Машлан, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков / Ред. журн. ПТЭ.- 1985. - 38 с. - Деп. в ВИНТИ, 1985, № 4112-85.
42. Экспресс-обработка данных ЯГР-экспериментов в спектрометре на линии с микро-ЭВМ / Е.В.Бильдюкевич, В.Л.Гурачевский, М.Машлан, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1985.- № 3.- С. 70-72.
43. Гурачевский В.Л., Цыбулька А.Г. Простой точечный дисплей для спектрометрических экспериментов // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1983.- № 1.- С. 52-53.
44. Гамма-резонансный комплекс на линии с микро-ЭВМ / Е.В.Бильдюкевич, В.Л.Гурачевский, Ю.М.Литвинович, М.Машлан, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // ПТЭ. 1985. - № 6. - С. 62-64.
45. Гурачевская Т.С., Гурачевский В.Л., Хула Я. Сопряжение многоканального анализатора NTA-512 с мини-ЭВМ "Электроника-100И" // ПТЭ. - 1985. - № 6. - С. 67-68.
46. Gamma-resonance system on line with microcomputer / E.V.Bildyukevich, V.L.Gurachevskii, A.L.Kholmetskii, Yu.A.Litvinovich, M.Mashlan, O.V.Misevich, V.A.Chudakov // Instruments and Experimental Technique (Experimental Applications of Computer Technology). - 1985. V. 28, № 6, P. 2. - P. 1303-1304.



47. Мессбауэровский толщиномер защитных покрытий / О.М.Аншаков, В.Л.Гурачевский, М.Машлан, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1985.- № 1.- С. 15-19.
48. Изучение аустенита в поверхностном слое серого чугуна методом конверсионной мессбауэровской спектроскопии / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, Пиви Пене, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, Г.П.Шпеньков // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1987.- № 2.- С. 17-19.
49. Структурные превращения в поверхностных слоях ионно-имплантированных сталей / В.М.Анищик, В.Л.Гурачевский, М.Машлан, В.В.Понарядов, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1986.- № 2.- С. 3-5.
50. Анизотропия эффекта Мессбауэра в поверхностном слое стали после шлифования / В.Л.Гурачевский, М.Машлан, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков, Г.П.Шпеньков // Докл. АН БССР. - 1985.- Т.29. - № 10.- С. 917-919.
51. Изучение магнитных свойств поверхностного слоя ферромагнетика в слабых полях методом МСКЭ / В.Л.Гурачевский, О.В.Мисевич, А.Л.Холмецкий, В.А.Чудаков // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1988.- № 11.- С. 110-113.
52. Абрамчук Н.М., Гурачевский В.Л., Шушкевич С.С. Практикум по ядерной физике на линии с ЭВМ / Минск, 1980. - 9 с - Деп. в ВИНТИ, 1980, № 2653-80.
53. Лабораторный практикум по основам автоматизации научных исследований для студентов-физиков / Н.М.Абрамчук, В.Л.Гурачевский, С.С.Шушкевич, В.А.Фигурин, В.Е.Ямный, В.П.Яновский / Минск, 1984. - 18 с. - Деп. в НИИВШ 11.07.84, № 898-84.
54. Гурачевский В.Л., Лопарева Н.В. Поляризующие свойства мессбауэровских мишеней из естественного железа // Вестник БГУ. Сер.1, физ., мат. и мех. - 1980.- № 2.- С. 15-19.
55. Практикум по ядерной физике. Для физ. спец. вузов / Э.А.Авданина, В.Л.Гурачевский, Г.А.Драб, И.Я.Дубовская, А.М.Зайцева, Л.В.Качарская, А.Н.Перцев, В.А.Чудаков; Под ред. В.Г.Барышевского. - Минск: Изд-во БГУ, 1982. - С. 79-110.
56. Бильдюкевич Е.В., Гурачевский В.Л., Шушкевич С.С. ЭВМ и микропроцессор. Кн. для учащихся. - Минск: Нар. света, 1990.- 207 с.

Гурачэўскі Валерый Леанідавіч

## “Метады і тэхніка мёсбаўэраўскай спектраскапіі ў геаметрыі рассеяння”

*Ключавыя словы:* эфект Мёсбаўэра, гама-рэзананс, рассеяне  $\gamma$ -квантаў, канверсійныя электроны, дэтэктары выпраменьванняў, мёсбаўэраўскі спектрометр, АЛП які сачыць, аўтаматызацыя эксперымента, анізатрапія паверхні.

Распрацаваны метадычныя асновы і створаны новы клас апаратуры для даследаванняў з выкарыстаннем эфекту Мёсбаўэра ў геаметрыі рассеяння. Створаныя універсальныя і спецыялізаваныя мёсбаўэраўскія спектрометры адрозніваюцца

новымі дэтэктарамі паўторных электронаў і рассеяных  $\gamma$ -квантаў, якія па шэрагу параметраў перавышаюць вядомыя дэтэктары і здольны расшырыць вобласць прымянення мёсбаўэраўскай спектраскапіі;

новымі метадамі накаплення спектраў з выкарыстаннем мікракамп’ютэраў, якія заснаваны на цыфравым сачэнні за хуткасцю руху і забяспечваюць павышаную дакладнасць вымярэнняў, рад магчымасцей для далейшага ўдасканальвання спектрометраў;

комплексным падыходам да павышэння стабільнасці вымярэнняў з улікам знешніх уздзеянняў рознай прыроды;

эфектыўным выкарыстаннем сродкаў аўтаматызацыі вымярэнняў і апрацоўкі даных.

Высокія магчымасці апаратуры пацверджаны праведзенымі эксперыментальнымі даследаваннямі паверхневых уласцівасцей жалезазмяшчальных узораў, вынікамі выпрабаванняў мёсбаўэраўскага аналізатара ўтрымання касітэрыта ў горных пародах, макета таўшчынямера абаронных пакрыццяў.

Распрацаваныя метады і прыборы магчыма выкарыстоўваць ў прыкладных задачах неразбуральнага кантролю матэрыялаў і вырабаў, пры вывучэнні фізіка-хімічных уласцівасцей паверхні цвёрдых цел і ў іншых даследаваннях, заснаваных на эфекце Мёсбаўэра.

## РЕЗЮМЕ

Гурачевский Валерий Леонидович

### "Методы и техника мессбауэровской спектроскопии в геометрии рассеяния"

*Ключевые слова:* эффект Мессбауэра, гамма-резонанс, рассеяние  $\gamma$ -квантов, конверсионные электроны, детекторы излучений, мессбауэровский спектрометр, следящий АЦП, автоматизация эксперимента, анизотропия поверхности.

Разработаны методические основы и создан новый класс аппаратуры для исследований с использованием эффекта Мессбауэра в геометрии рассеяния. Созданные универсальные и специализированные мессбауэровские спектрометры отличаются

новыми детекторами вторичных электронов и рассеянных  $\gamma$ -квантов, по ряду параметров превосходящими известные детекторы и способными расширить области применений мессбауэровской спектроскопии;

новыми методами накопления спектров с использованием микрокомпьютеров, основанными на цифровом слежении за скоростью движения и обеспечивающими повышенную точность измерений, ряд возможностей для дальнейшего совершенствования спектрометров;

комплексным подходом к повышению стабильности измерений с учетом внешних воздействий различной природы;

эффективным использованием средств автоматизации измерений и обработки данных.

Высокие возможности аппаратуры подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями поверхностных свойств железосодержащих образцов, результатами испытаний мессбауэровского анализатора содержания касситерита в горных породах, макета толщиномеров защитных покрытий.

Разработанные методы и приборы могут быть использованы в прикладных задачах неразрушающего контроля материалов и изделий, при изучении физико-химических свойств поверхности твердых тел и в других исследованиях, основанных на эффекте Мессбауэра.

# METHODS AND TECHNIQUE OF THE MÖSSBAUER SPECTROSCOPY FOR THE SCATTERING GEOMETRY

Valery L.Gurachevsky

## SUMMARY

*Key Words:* Mössbauer effect, gamma-resonance,  $\gamma$ -quantum scattering, conversion electrons, radiation detectors, Mössbauer spectrometer, tracing ADC, experiment automation, surface anisotropy.

Methodical fundamentals and a new type of devices have been developed for investigations using the Mössbauer effects in the scattering geometry. Special features of both universal and specialized spectrometers would include:

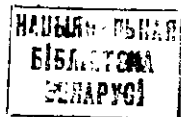
an adequate use of the measurement automation tools and data processing, the up-to-date detectors of the secondary electrons and the scattered  $\gamma$ -quanta, which outperform the known detectors on a number of parameters and offer a wider range of applications of the Mössbauer spectroscopy;

new methods of accumulating spectra with the use of microcomputers; the methods are based on tracing the velocity signal digitally and can provide a higher measuring accuracy along with the potentials for further improvements;

a diversified approach to improving the measuring stability with consideration of various external effects.

The high potentials of the devices developed have been confirmed by using them in the experimental studies of the surface properties of ferruginous samples, the results of testing the Mössbauer analyzer for the cassiterite content in rocks and also those of a protective layer thickness gauge model.

The methods and devices developed can be applied for solving the problems in the non-destructive analysis of materials and products, investigating physico-chemical surface properties of the solids and other studies based on the Mössbauer effect.

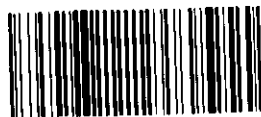


Подписано к печати 26.05.1997 г. Формат 60x84 1/16  
Объем 1,6 печ. листов. Тираж 100 экз. Заказ № 1

---

Отпечатано в копировально - множительном участке отдела ТСО  
Международного института по радиозоологии им. А.Д.Сахарова  
220009, Минск, Долгобродская, 23

2A 27102



BU 0000 1346682