

А.К. Шоканов¹, Е.А.Смихан¹, Е.А.Оспанбеков¹

¹*Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан*

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЭФФЕКТА МЕССБАУЭРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВНУТРИЯДЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Аннотация

В работе на ряде примеров показано, что одним из перспективных методов изучения физико-химического состояния вещества является мессбауэровская спектроскопия со всем многообразием ее методических подходов. Процессы, происходящие в оболочке атомов, оказывают мизерные влияния на внутриядерные явления, и часто оказываются недоступными для обнаружения другими методами. Мессбауэровская спектроскопия эти влияния обнаруживает. Реализовано четыре методических подхода и создана экспериментальная база для наблюдения резонансного поглощения γ -квантов ядрами ^{57}Fe . Методики на поглощение (МС), эмиссионная мессбауэровская спектроскопия (ЭМС), характеристическое рентгеновское излучение (ХРИ), конверсионная электронная мессбауэровская спектроскопия (КЭМС) позволяют, практически без ограничений по элементному составу и от геометрических размеров образцов (от массивных до нанометровых) проводить исследования.

Ключевые слова: Мессбауэровская спектроскопия, γ -квант, детектор электронов, лавинный детектор, радионуклид, фотоэлектрон.

Аңдатпа

А.Қ. Шоқанов¹, Е.А. Смихан¹, Е.А. Оспанбеков¹

¹*Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан*

МЕССБАУЭР ЭФФЕКТИСІНІҢ ҚАТТЫ ДЕНЕЛЕРДІҢ ЯДРОШІЛІК ҚҰБЫЛЫСТАРЫН ШЕШУДЕГІ ФИЗИКАЛЫҚ ПРИНЦИПТЕРІ

Бұл жұмыста бірнеше мысалдарды қолдана отырып, заттың физика-химиялық күйін зерттеудің перспективті әдістерінің бірі - оның барлық әдіснамалық тәсілдері бар Мессбауэр спектроскопиясы екендігі көрсетілген. Атомдардың қабығында жүретін процестер ядролық ядро ішіндегі құбылыстарға әсері өте кішкентай және көбінесе басқа әдістермен табу мүмкін емес болып шығады. Мессбауэр спектроскопиясы осы әсерді анықтайды.

Төрт әдіснамалық тәсілдер енгізіліп, ^{57}Fe ядроларымен γ -кванттардың резонанстық жұтулуын бақылау үшін тәжірибелік база жасалды. Жұту әдістері (МС), эмиссиялық Мессбауэр спектроскопиясы (ЭМС), өзіндік рентгендік сәулелендіру (ӨРС), конверсиялық электрондық Мессбауэр спектроскопиясы (КЭМС) іс жүзінде элементтердің құрамына және геометриялық өлшемдеріне шектеусіз зерттеу жүргізуге мүмкіндік береді (үлкен өлшемнен нанометрлік өлшемге дейін).

Түйін сөздер: Мессбауэр спектроскопиясы, γ -квант, электронды детектор, көшкінді детектор, радионуклид, фотоэлектрон.

Abstract

PHYSICAL PRINCIPLES OF THE MOSSBAUER EFFECT FOR SOLVING INNER-NUCLEAR PHENOMENA IN SOLIDS

Shokanov A.K.¹, Smikhan Y.A.¹, Ospanbekov Y.A.¹

¹*Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan*

In this work, using a number of examples, it is shown that one of the promising methods for studying the physicochemical state of matter is Mössbauer spectroscopy with all the variety of its methodological approaches. The processes occurring in the shell of atoms have a negligible effect on intranuclear phenomena, and often turn out to be inaccessible for detection by other methods. Mössbauer spectroscopy reveals these influences. Four methodological approaches have been implemented and an experimental base has been created for observing the resonant absorption of quantum-quanta by ^{57}Fe nuclei. Techniques for absorption (MS), emission Mössbauer spectroscopy (EMS), characteristic X-ray radiation (CXR), conversion electron Mössbauer spectroscopy (CEMS) allow, practically without restrictions on the elemental composition and geometric dimensions of samples (from bulk to nanometer), to carry out studies.

Keywords: Mössbauer spectroscopy, γ -quantum, electron detector, avalanche detector, radionuclide, photoelectron.

Более 60 лет прошло со времени открытия эффекта Мессбауэра. Но и в настоящее время мессбауэровская спектроскопия продолжает интенсивно развиваться и широко используется в различных областях физики и химии, геологии и минералогии, биологии и медицины, материаловедении и индустрии.

Так мессбауэровская спектроскопия является мощным средством для исследования минералогии железосодержащих минералов и широко использовалась для лабораторного анализа, образцов лунного грунта и метеоритов. Однако, до 2004 года ни одна межпланетная экспедиция не использовала мессбауэровский спектрометр. Эта ситуация изменилась с посадкой на марс двух американских марсоходов. Аппараты «Spirit» и «Opportunity» содержали миниатюризированные мессбауэровские спектрометры, которые успешно проработали в течение 90 марсианских суток и внесли значительный вклад в определение минералогической особенности марсианского грунта. В частности, был обнаружен минерал гематит, указывающий на существование воды на поверхности планеты в отдаленном прошлом.

Мессбауэровская спектроскопия позволяет определить валентное состояние резонансных атомов, степень симметрии кристалла вокруг них, наличие магнитного поля или градиента электрического поля и т.д. По этим данным можно судить о фазовом составе или структуре кристаллической решетки образцов.

Одна из актуальных задач современной физики твердого тела связана с исследованиями структурного состояния приповерхностных слоев материалов. Задача заключается в том, что основные физико-химические свойства материалов определяются состоянием атомов именно в этих слоях.

Например, при окислении и коррозии, лазерной обработке поверхностей материалов, ионной имплантации, пластической деформации, поверхностной модификации путем нанесения на их поверхность тонких покрытий ионно-плазменным методом с последующей термической обработкой и др.

Изучению физико-химического состояния вещества с помощью мессбауэровской спектроскопии со всем многообразием ее методических подходов посвящено большое количество монографий и оригинальных статей [1-5]. Известно, что распад резонансно возбужденного ядра может происходить по двум каналам: 1) переизлучение резонансного γ -кванта; 2) процесс внутренней конверсии при котором, наряду с конверсионными и Оже-электронами испускается также и характеристическое рентгеновское излучение. В случае эффекта Мессбауэра на ядрах ^{57}Fe на 100 мессбауэровских γ -квантов, захваченных ядрами без потери энергии на отдачу, вследствие внутренней конверсии мессбауэровского перехода образуется 10 γ -квантов с энергией 14.4 КэВ. Вместе с тем, высветится 90 электронов внутренней конверсии с энергией 7.3 КэВ, испускание которых сопровождается высвечиванием 27 рентгеновских квантов характеристического излучения с энергией 6.4 КэВ и 63 Оже-электрона с энергиями, близкими к 5.6 КэВ. Следовательно, имеется возможность реализации четырех методик наблюдения резонансного поглощения γ -квантов ядрами ^{57}Fe .

Все эти методические подходы подробно описаны в литературе имеют свои преимущества и недостатки и используется исходя из конкретных задач.

В этом случае, измеряется ослабление первичного пучка γ -квантов за счет их взаимодействия с поглотителем, содержащим мессбауэровский изотоп (к примеру ^{57}Fe). Следует отметить, что ядерные гамма резонансные (ЯГР) спектры, полученные в геометрии на поглощение, несут усредненную по толщине поглотителя информацию о состоянии атомов резонансного изотопа. При этом поглотитель, по известным причинам, должен быть оптимальной толщины, что ограничивает применимость методики, как неразрушающего метода контроля состояния образца.

Метод на пропускание в методическом плане является довольно простым, поэтому широко применяется в различных областях науки и техники. Неудивительно, что большинство работ с применением эффекта Мессбауэра выполнено в геометрии на поглощение. Однако, для решения ряда проблем наиболее предпочтительным может оказаться методика резонансного рассеяния без отдачи и сопровождающих этот процесс вторичных излучений. Это в первую очередь относится к исследованию приповерхностных слоев массивных образцов и тонких пленок.

ЭМС на пропускании используется в трех случаях:

1) Объектом исследования является поглотитель, содержащий мессбауэровский изотоп ^{57}Fe , а в качестве источника гама-излучения используется ^{57}Co в парамагнитной матрице с кубической сингонией;

2) Исследуется образец, не содержащий мессбауэровского изотопа. В этом случае, источником γ -квантов является радиоактивный препарат, внедренный по известной технологии в исследуемый образец. В качестве поглотителя используется материал с кубической структурой парамагнитного типа. Так, ЭМС была успешно использована при исследовании взаимодействия точечных дефектов в молибдене и ниобии методом ядерного гамма-резонанса [6];

3) Методика селективной регистрации первично выбитых атомов (ПВА) и их конечных состояний реализована в ИЯФ Казахстан с использованием изохронного циклотрона У-150 [7, 8]. Методика позволяет избирательно зондировать малые локальные области образца, значительно повысить чувствительность ЯГР к радиационным эффектам и изучать структуру материала в зоне торможения ПВА. Метод заключается в регистрации эмиссионного ЯГР спектра мессбауэровского радионуклида ^{57}Co , образованного в ядерной реакции облученного образца. Метод позволяет расширить применение ЯГР на объекты, которые в исходном состоянии не содержали мессбауэровского элемента. Подробное описание методики и уникальных результатов аустенитно-мартенситных превращений в области ПВА нержавеющей стали облученной протонами содержится в [7].

Так как все из перечисленных процессов связаны с резонансным поглощением γ -квантов, регистрируя любое из вторичных излучений можно наблюдать эффект ядерного γ -резонанса. С наибольшей вероятностью процесс внутренней конверсии идет на К-электронах. Отношение числа испущенных электронов к числу испускаемых γ -квантов называется коэффициентом внутренней конверсии и для ^{57}Fe он достаточно велик и равен 9.0. В случае поглотителя из Fe энергия электронов равняется 7.3 кэВ, что соответствует толщине эффективного слоя около 100 нм.

Следовательно, получая резонансные спектры с регистрацией электронного излучения, можно исследовать относительно тонкие слои твердых тел, т.е. существенно расширить, по сравнению с методом поглощения, круг решаемых научных и практических задач. Кроме того, можно получить значения резонансного эффекта больше, чем в геометрии на поглощение, т.к. коэффициенты внутренней конверсии мессбауэровских переходов относительно велики.

В середине 70-х годов прошлого века указанные особенности электронной мессбауэровской спектроскопии привлекли внимание исследователей, а к концу десятилетия количество опубликованных работ по этой методике резко возросло и продолжает расти [12-15].

К настоящему времени создано несколько типов устройств для получения ЯГР-спектров с регистрацией конверсионных и связанных с ними Оже-электронов. Их условно можно разделить на две группы: устройства, основанные на выделении различных энергетических групп из общего потока вылетающих из поглотителя электронов, а также устройства, регистрирующие интегральный поток электронов. Каждый из указанных типов приборов имеет свои особенности.

Впервые мессбауэровские спектры с регистрацией различных энергетических групп конверсионных электронов были получены для ^{119}Sn в [9], а для ^{57}Fe – в работе [10]. Подробное описание спектрометра для наблюдения ядерного гамма-резонанса по электронам конверсии изложено в [11]. В литературе описано несколько типов мессбауэровских спектрометров, отличающихся способами регистрации конверсионных электронов:

- а) устройства на основе вторично-электронных умножителей;
- б) газоразрядные пропорциональные детекторы электронов;
- в) газоразрядный лавинный детектор электронов.

Указанные методики регистрации конверсионных и Оже-электронов были реализованы в Лаборатории ядерной гамма-резонансной спектроскопии Института ядерной физики (ИЯФ) РК. Было сконструировано и изготовлено два типа детекторов. Ниже приводится конструкция, принцип работы и специфические особенности каждого из них.

Основным элементом детектора является кассета (рисунок 1), содержащая исследуемый образец – катод и натянутую параллельно образцу вольфрамовую нить – анод. В зазоре (рабочий объем) между катодом и анодом (3 мм) создается разность потенциалов ~ 1.0 КэВ. Кассета помещается в вакуумную камеру, передняя часть которой закрыта фланцем с окном из алюминиевой фольги для прохождения γ -квантов к образцу и фильтрации рентгеновского излучения ^{57}Co . Для уменьшения фона фотоэлектронов, образованных γ - и характеристическим излучением, внутренняя поверхность камеры покрыта оргстеклом. Вакуумная камера соединена с форвакуумным насосом и газовым баллоном с He-8% CH_4 смесью. При подготовке детектора к работе, камера вакууммируется и заполняется гелий-метановой смесью до атмосферного давления. При резонансном поглощении γ -квантов из поверхности образца вылетает конверсионный электрон, который теряет энергию на

ионизацию и возбуждение молекул газовой смеси, в результате чего создается количество электрон-ионных пар, пропорциональное энергии электрона, с которой он начал движение в газе. В электрическом поле рабочего объема детектора положительные ионы дрейфуют к катоду, а электроны – к аноду.

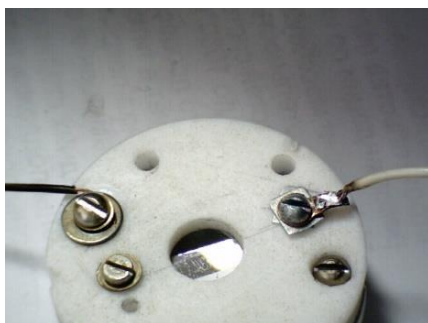
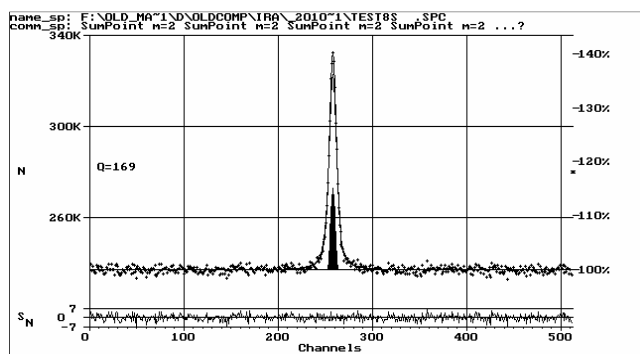


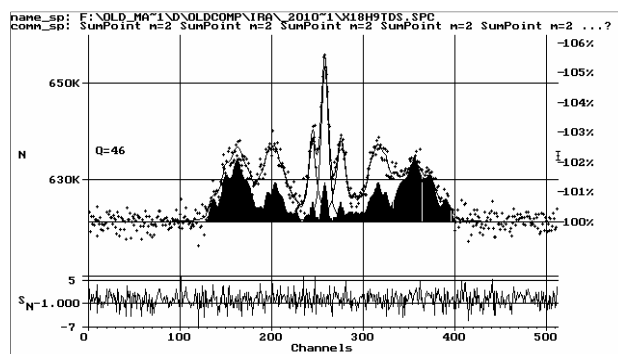
Рисунок 1. Общий вид кассеты для КЭМС с нитевидным вольфрамовым анодом диаметром 25 мкм.

Вблизи анода создаются условия для развития лавинообразования, за счет чего осуществляется газовое усиление. Электрический заряд, собранный на аноде, пропорционален числу первичных пар ионов. Более подробную информацию о методике регистрации электронов газоразрядным пропорциональным детектором можно найти в [9, 11].

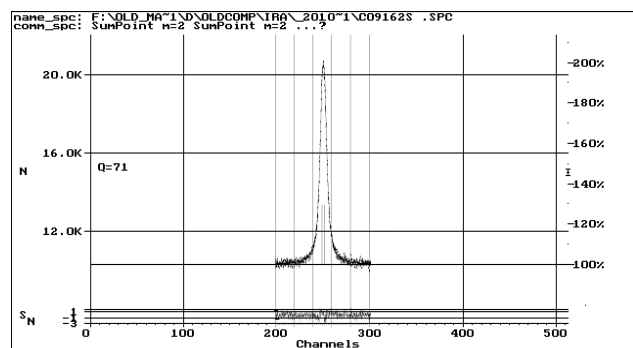
На рис. 2 приведены мессбауэровские спектры, полученные с помощью эмиссионной мессбауэровской спектроскопии (ЭМС) на ядрах ^{57}Co (^{57}Fe) и конверсионной эмиссионной мессбауэровской спектроскопии (КЭМС) на ядрах ^{57}Fe нержавеющей стали X18H10T, подвергнутой термической обработке и пластической деформации.



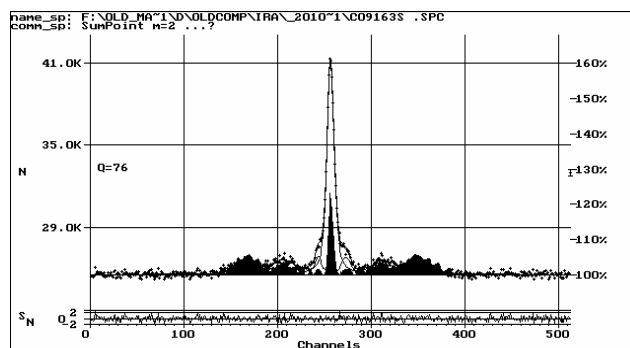
а) отож. КЭМС



б) деформ. КЭМС



в) отож. ЭМС



з) деформ. ЭМС

Рисунок 2. Мессбауэровские спектры, полученные с помощью конверсионной эмиссионной мессбауэровской спектроскопии (КЭМС) на ядрах ^{57}Fe нержавеющей стали X18H10T – а), б) и эмиссионной мессбауэровской спектроскопии (ЭМС) на ядрах ^{57}Co (^{57}Fe) – в) и з)

Образец для исследований методом эмиссионной мессбауэровской спектроскопии был приготовлен путем нанесения радиоактивного ^{57}Co на фольгу из нержавеющей стали X18H10T электролитическим методом с последующей термодиффузией изотопа в матрицу образца при температуре 700°C в условиях глубокого вакуума.

Радиоактивный препарат безносительного хлорида кобальта, полученного на изохронном циклотроне У-150 ИЯФ НЯЦ РК по ядерной реакции $^{58}\text{Ni}(p,2n)^{57}\text{Co}$, выделяли из никелевой мишени радиохимическим методом после ее облучения протонами. Часть фольги использовалась для КЭМС. Термическую обработку и пластическую деформацию образцов проводили в одинаковых условиях.

Известно [4], что наиболее эффективно резонансные γ -кванты выходят с глубины 1-2 мкм. Следовательно, в случае ЭМС информацию о состоянии мессбауэровских атомов получаем из объема образца толщиной до 2 мкм, а при КЭМС – из приповерхностного слоя толщиной до 0,1 мкм. Из рисунка 2 видно, что спектра отожженных образцов показывают монолинии, характерные для нержавеющей стали аустенитной структуры. Спектры прокатанных образцов (степень пластической деформации 30%) на фоне аустенитной фазы показывают присутствие мартенсита. Причем, наличие мартенсита в приповерхностном слое значительно больше, чем в объеме.

Следовательно, аустенитно-мартенситному превращению при прокатке на вальцах более интенсивно подвержена поверхность стали.

Конструкция газоразрядного лавинного детектора мало чем отличается от конструкции газоразрядного пропорционального детектора электронов. В пропорциональном детекторе в качестве материала анода используется вольфрам, имеющий большое сечение фотоэффекта, что приводит к образованию нерезонансных фотоэлектронов и как следствие, к уменьшению резонансного эффекта. Отличие лавинного детектора от пропорционального связано с конструкцией анода и газовым наполнением. В лавинном детекторе вместо вольфрамовой нити в качестве анода использована прозрачная для γ -квантов пластина из бериллия. Поверхность ее, обращенная к катоду, отполирована. Зазор (3 мм) между катодом (исследуемый образец) и анодом является чувствительным объемом детектора. При подготовке детектора к работе камеру откачивали форвакуумным насосом и заполняли парами ацетона или спирта до давления 80 кгс/см^2 .

Поток γ -квантов мессбауэровского источника проходит через окошко – фильтр из алюминиевой фольги, затем через бериллиевую пластину и чувствительный объем, падает на поверхность образца. Учитывая то, что детектор заполнен газом при относительно низком давлении регистрацией γ - и рентгеновских квантов можно пренебречь. Низкоэнергетический электрон, вылетевший из поверхности образца, вызывает ионизацию газа, что в сильном электрическом поле чувствительного объема создает электронно-ионную лавину, а в цепи питания детектор-источник - импульс напряжения, соответствующий акту регистрации электрона. При повышении напряжения на аноде скорость счета монотонно возрастает до начала самостоятельного газового разряда в детекторе. Устойчивая работа детектора наблюдается при напряжении на аноде на 10% ниже предельного. Подробный анализ работы газоразрядного лавинного детектора электронов можно найти в [2]. Отметим лишь некоторые преимущества перед другими способами детектирования электронов.

В лавинном детекторе меньшим энергиям электронов соответствуют большие амплитуды импульсов, что вызывает пониженную эффективность к регистрации нерезонансных электронов средних энергий. Поскольку детектор малоэффективен к другим видам излучений, то удастся понизить уровень фона, т.е. повысить резонансный эффект и проводить исследования радиоактивных образцов.

На рисунке 3 приведен спектр образца, вырезанного из чехла отработанного ТВЭЛ энергетического реактора БН-350 с последующим утонением до толщины 0.34 мм путем шлифовки и электрополировки. Несмотря на высокую активность образца удалось получить удовлетворительный мессбауэровский спектр по электронному каналу с использованием газоразрядного лавинного детектора.

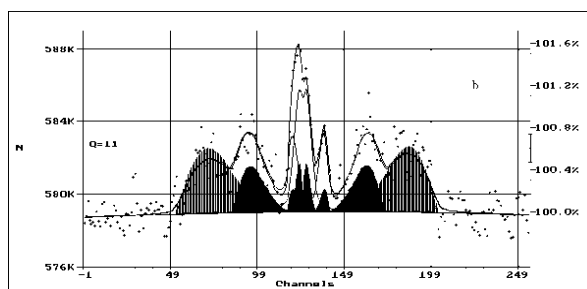


Рисунок 3. КЭМС спектр образца, вырезанного из чехла отработанного ТВЭЛ энергетического реактора БН-350

Создана методическая база для наблюдения резонансного поглощения γ -квантов ядрами ^{57}Fe . Показано, что методики на поглощение, отражение, эмиссионной и конверсионной мессбауэровской спектроскопии позволяют практически без ограничений по элементному составу и геометрическим размерам, исследовать металлы, сплавы и химические соединения металлургической, геологической, минералогической, биологической и других областей науки и техники. Созданная методика КЭМС позволяет изучать железосодержащие образцы с естественным содержанием ^{57}Fe . Показано, что использование КЭМС существенно расширяет круг научных и практических задач, поддающихся решению с помощью ядерной гамма-резонансной спектроскопии.

Список использованной литературы:

- 1 Химические применения мессбауэровской спектроскопии. Под редакцией Гольданского В.И. М.: Мир, 1970. 502 с.
- 2 Шпинель В.С. Резонанс γ -лучей в кристаллах. М.: Наука, 1969.
- 3 Вертхейм Г. Эффект Мессбауэра. Принципы и применение. М.: Мир, 1966.
- 4 Иркаев С.М., Кузьмин Р.Н., Опаленко А.А. Ядерный гамма-резонанс (аппаратура и методика). М.: Из-во МГУ, 1970. 207с.
- 5 Калашиникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966. С.150.
- 6 Шоканов А.К. Исследование взаимодействия точечных дефектов в молибдене и ниобии методом ядерного гамма-резонанса: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. - Алматы, 1985. - 155 с.
- 7 Ibragimov Sh.Sh., Vereshchak M.F., Zhantikin T.M. Study of plastic deformation and proton irradiation influence on phase transitions in C18N9T stainless steel. *Hyperfine Interactions*, 1986, 29, P. 1293-1296.
- 8 Zhetbaev A.K., Vereshchak M.F., Zhantikin T.M. Investigation of radiation damage in amorphous $\text{Fe}_{70}\text{Ni}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$. *Hyperfine Interactions*, 1986, 29, P. 1297-1300.
- 9 Bonchev Z.W., Jordanov A., Minkova A. Nucl. Method of analysis of thin surface layers by the Mössbauer effect. *Nucl. Instr. And Meth.* 1969. №70, P.36-40.
- 10 Грузин П.Л., Петрикин Ю.В., Родин А.М. Наблюдение эффекта Мессбауэра на ядрах ^{57}Fe по электронам конверсий. XII Совецание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна. 1971, С.196.
- 11 Грузин П.Л., Петрикин Ю.В., Стукан Р.А. Установка для наблюдения ядерного γ -резонанса по электронам конверсии. ЛТЭ. 1975. №3, С.48.
- 12 Верецак М.Ф., Кадыржанов К.К., Плаксин Д.А., Русаков В.С., Сулов Е.Е., Туркебаев Т.Э. Мессбауэровские исследования слоистой системы железо-алюминий. *Хабаршысы, Серия физическая*, 2003, № 2 (15), С. 94-100.
- 13 Озерной А.Н., Верецак М.Ф., Манакова И.А., Тлеубергенов Ж.К., Бедельбекова К.А. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия в исследовании наноразмерных композитов. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2017, Т.8, №5, С. 492-496.
- 14 Озерной А.Н., Верецак М.Ф., Бедельбекова К.А., Манакова И.А., Сергеева Л.С., Шоканов А.К. Исследование наноразмерных металлических покрытий методом эмиссионной мессбауэровской спектроскопии. *Материалы 7-ой Международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент»*, Караганда, 2010, С. 358-361.
- 15 Шоканов А.К., Верецак М.Ф., Манакова И.А., Озерной А.Н., Тлеубергенов Ж.К., Бедельбекова К.А., Яскевич В.И. Мессбауэровские исследования карбидов железа, сформированных термовакуумным напылением. *Кристаллография*, 2020, Т.65, №3, С. 375-378.

References

- 1 Gol'danskogo V.I. (1970) Himicheskie primeneniya messbaujerovskoj spektroskopii [Chemical applications of Mössbauer spectroscopy]. Mir. 502. (In Russian)
- 2 Shpinel' V.S. (1969) Rezonans luchej v kristallah [Resonance of X-rays in crystals]. Nauka. (In Russian)

- 3 Verhejm G. (1966) *Jeffekt Messbaujera. Principy i primenenie [The Mossbauer effect. Principles and application]. Mir. (In Russian)*
- 4 Irkaev S.M., Kuz'min R.N., Opalenko A.A. (1970) *Jadernyj gamma-rezonans (apparatura i metodika) [Nuclear gamma-resonance (equipment and methods)]. Iz-vo MGU. 207. (In Russian)*
- 5 Kalashnikova V.I., Kozodaev M.S. (1966) *Detektory jelementarnyh chastic [Detectors of elementary particles]. Nauka. 150. (In Russian)*
- 6 Shokanov A.K. (1985) *Issledovanie vzaimodejstvija tochechnyh defektov v molibdene i niobii metodom jadernogo gamma-rezonansa [Investigation of the interaction of point defects in molybdenum and niobium by the nuclear gamma-resonance method]. Almaty. 155. (In Russian)*
- 7 Ibragimov Sh.Sh., Vereshchak M.F., Zhantikin T.M. (1986) *Study of plastic deformation and proton irradiation influence on phase transitions in C18N9T stainless steel. Hyperfine Interactions, 29, 1293-1296. (In English)*
- 8 Zhetbaev A.K., Vereshchak M.F., Zhantikin T.M. (1986) *Investigation of radiation damage in amorphous Fe₇₀Ni₁₀P₁₃C₇. Hyperfine Interactions, 29, 1297-1300. (In English)*
- 9 Bonchev Z.W., Jordanov A., Minkova A. (1969) *Nucl. Method of analysis of thin surface layers by the Mössbauer effect. Nucl. Instr. And Meth. №70, 36-40. (In English)*
- 10 Gruzin P.L., Petrikin Ju.V., Rodin A.M. (1971) *Nabljudenie jeffekta Messbaujera na jadrah ⁵⁷Fe po jelektronam konversij [Observation of the Mossbauer effect on ⁵⁷Fe nuclei by conversion electrons]. XII Soveshhanie po jadernoj spektroskopii i teorii jadra. Dubna, 196. (In Russian)*
- 11 Gruzin P.L., Petrikin Ju.V., Stukan R.A. (1975) *Ustanovka dlja nabljudenija jadernogo rezonansa po jelektronam konversii LTJe [Installation for the observation of nuclear \square - resonance by conversion electrons. LTE]. №3, 48. (In Russian)*
- 12 Vereshhak M.F., Kadyrzhanov K.K., Plaksin D.A., Rusakov V.S., Suslov E.E., Turkebaev T.Je. (2003) *Messbaujerovskie issledovanija sloistoj sistemy zhelezo aljuminij [Messbauer studies of the layered iron-aluminum system]. Habarshysy, Serija fizicheskaja, № 2 (15), 94-100. (In Russian)*
- 13 Ozernoj A.N., Vereshhak M.F., Manakova I.A., Tleubergenov Zh.K., Bedel'bekova K.A. (2017) *Jadernaja gamma-rezonansnaja spektroskopija v issledovanii nanorazmernih kompozitov [Nuclear gamma-resonance spectroscopy in the study of nanoscale composites]. Jadernaja fizika i inzhiniring, , T.8, №5, 492-496. (In Russian)*
- 14 Ozernoj A.N., Vereshhak M.F., Bedel'bekova K.A., Manakova I.A., Sergeeva L.S., Shokanov A.K. (2010) *Issledovanie nanorazmernih metallicheskih pokrytij metodom jemissionnoj messbaujerovskoj spektroskopii [Investigation of nanoscale metal coatings by the method of emission Mössbauer spectroscopy]. Materialy 7-oj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Haos i struktury v nelinejnyh sistemah. Teorija i jeksperiment», Karaganda, 358-361. (In Russian)*
- 15 Shokanov A.K., Vereshhak M.F., Manakova I.A., Ozernoj A.N., Tleubergenov Zh.K., Bedel'bekova K.A., Jaskevich V.I. (2020) *Messbaujerovskie issledovanija karbidov zheleza, sformirovannyh termovakuumnym napyleniem [Messbauer studies of iron carbides formed by thermal vacuum deposition]. Kristallografija, T.65, №3, 375-378. (In Russian)*