

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА
МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКАХ ПОЗИТРОНОВ

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА ПРОЕКТА-PAS

Тема

ЛЯП: Е. В. Ахманова, А. Г. Кобец, И. Н. Мешков, О. С. Орлов, А. Ю. Рудаков, К. Семек,
А. А. Сидорин, Л. В. Соболева, В. И. Хилинов, С. Л. Яковенко

ЛФВЭ: В. В. Кобец

ЛНФ: М. Кулик

ЛЯР: В. А. Скуратов

**Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М. В. Ломоносова,
Архангельск:** М. К. Есеев

Институт ядерной физики ПАН, Краков, Польша: П. Хородек, Е. Дрызек, К. Сковрон

Томский политехнический институт: Р. С. Лаптев, А. М. Лидер

Центр ядерных технологий, Хошимин, Вьетнам: Лу Ан Туен

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА А. Г. Кобец, К. Семек

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА И. Н. Мешков

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ **21.04.2020 г.**

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЗОБОСНОВАНИЯ НА СЕМИНАРЕ ЛАБОРАТОРИИ
20.03.2020 г.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА
МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКАХ ПОЗИТРОНОВ

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА ПРОЕКТ - PAS

Тема

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА А.Г. Кобец, К. Семек
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА И. Н. Мешков

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ	_____	« ____ » _____ 20 г.
	(Подпись)	(Дата)
СОГЛАСОВАНО: ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ	_____	« ____ » _____ 20 г.
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ	_____	« ____ » _____ 20 г.
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ОИЯИ	_____	« ____ » _____ 20 г.
НАЧАЛЬНИК НОО	_____	« ____ » _____ 20 г.
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____	« ____ » _____ 20 г.
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____	« ____ » _____ 20 г.
РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА	_____	« ____ » _____ 20 г.
	_____	« ____ » _____ 20 г.
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	_____	« ____ » _____ 20 г.
ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	_____	« ____ » _____ 20 г.

Содержание	
Аннотация	3
Введение.....	4
Состояние исследований	4
Цели и задачи проекта на 2021-2023гг.	10
Краткий ССВУ- анализ.	12
Оценка кадровых ресурсов.....	13
Заключение	14
Литература	14

Аннотация

Для исследований структуры различных материалов и дефектов, возникающих при различных физических воздействиях (старение, внешние нагрузки, радиационное воздействие) требуются высокоточные методы, способные различать неоднородности кристаллической структуры на нанометровом уровне. Одним из таких методов является позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС). Этот метод является чувствительным к детектированию различных (так называемых «open-volume») дефектов размером от 0,1 до 1 нм с минимальной концентрацией до 10^{-7} см⁻³. Метод ПАС имеет на 4 порядка лучшее пространственное разрешение по сравнению с просвечивающим электронным микроскопом.

Прикладные исследования в области твердого тела методами ПАС и развитие техники проведения экспериментов при помощи данных методов являются целью проекта. Для исследования дефектов в материалах применяется метод доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ) реализованный как на автономном источнике, так и на потоке медленных монохроматических позитронов. Спектрометр ДУАЛ выполнен по стандартной схеме. Так же применяется метод Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS) реализованный на автономном источнике ²²Na. Для развития экспериментальной базы разрабатывается метод PALS на потоке медленных монохроматических позитронов. Группой предложен оригинальный вариант этого метода, основанный на формировании упорядоченного потока медленных позитронов [1].

Введение

Существует три основных класса материалов, которые до сих пор были изучены с помощью ПАС. Исторически первое применение ПАС было направлено на исследования металлов и сплавов. Затем методами ПАС начали исследовать полупроводники. Для двух этих направлений позитрон играет роль зонда. Третья область применения ПАС, которая в настоящее время интенсивно развивается как экспериментально, так и теоретически, связана с исследованием полимеров и других высокомолекулярных материалов, содержащих большие зоны, свободные от вещества.

Прикладные исследования методами ПАС включают, например, изучение усталостного повреждения материалов, которые должны переносить широкий спектр механических, радиационных или тепловых нагрузок за время службы. Длительное старение и внешние нагрузки, включая облучение, приводят к развитию мелких дефектов в материале. Этот процесс является движущей силой охрупчивания. Например, радиационное охрупчивание является критическим для сосудов высокого давления в ядерных реакторах. Применение распространенных методов для изучения подобных проблем (например, высокоразрешающей электронной микроскопии), не всегда подходят или не дают нужной точности. Различные методы позитронной аннигиляционной спектроскопии, в данных случаях, могут быть более точными и предоставлять дополнительную информацию о процессах, происходящих в материале [2].

Применение методов ПАС для выявления дефектов в полупроводниках, где дефекты атомарных размеров являются электрически активными и играют важную роль в электрических и оптических свойствах материалов, имеет три преимущества. Во-первых, у ПАС высокая чувствительность к дефектам вакантного типа, что делает их идентификацию простой. Во-вторых, позитронная спектроскопия строго доказана, а электронно-позитронная аннигиляция может быть рассчитана теоретически. В-третьих, позитронная аннигиляция может быть применена к любому материалу, независимо от его структуры и проводимости [3].

Нанопористые материалы имеют широкий спектр промышленного применения, благодаря чрезвычайно высокой площади поверхности, содержащей участки, которые могут быть использованы (например, в катализе) для захвата и разделения молекул. Поскольку функциональное применение нанопористых материалов определяется их пористостью (в том числе размером и концентрацией пор), поровая структура, специально подбирается (формируется) в зависимости от их предназначения, и многочисленные технологии, такие как молекулярная абсорбция, (с использованием N_2CO_2 и других молекул) и ртутная метрия были развиты в качестве характеристических средств. Однако, большинство из этих подходов имеют ограничения. Методы визуализации, такие как просвечивающая электронная микроскопия, способны выявлять информацию о распределении нанопор, но они требуют специальной подготовки образца, которая может изменить распределение пор. Таким образом, доступные сегодня методы определения распределения пор в наноинженерии требуют значительного улучшения, в то время как метод ПАС способен охарактеризовать нано-пористость, особенно когда поры закрыты и, следовательно, недоступны, например, для методов газовой адсорбции [4].

Таким образом, исследования методами ПАС являются необходимым инструментом для прикладных исследований в области физики твердого тела, а их совершенствование расширит круг задач для изучения.

Состояние исследований

В период 2017-2020гг. работы в рамках проекта включали в себя исследования

методами ПАС в области физики твердого тела и развитие экспериментальной базы. Реализована спектроскопия методом PALS по стандартной схеме от автономного источника ^{22}Na (Рис. 1). Этот изотоп через 3,3 пс после эмиссии позитрона испускает гамма квант с энергией 1274 кэВ, который используется в качестве сигнала запуска спектрометра для измерения времени жизни. Сигналом остановки служит регистрация гамма кванта с энергией 511 кэВ. Разница во времени обоих сигналов и дает значение времени жизни позитрона в образце. Позитронный источник покрыт двумя тонкими фольгами (около 5 мкм) и помещен между двумя одинаковыми образцами. Этот «сэндвич» располагают перед двумя счетчиками (сцинтилляторы и фотоумножители рис. 1) BaF_2 . В спектрометре PALS используется ФЭУ фирмы Hamamatsu. Для анализа сигналов на совпадение используется спектрометр времени жизни APV8702 и компьютер. Обычно, для анализа времени необходим ряд модулей измерения излучения, таких как дифференциальные CFD, линия задержки, ТАС, СМА, и т. д. В APV8702 все они интегрированы. В результате получается спектр времени жизни позитронов, и последующий анализ позволяет оценить время жизни позитрона в образце.

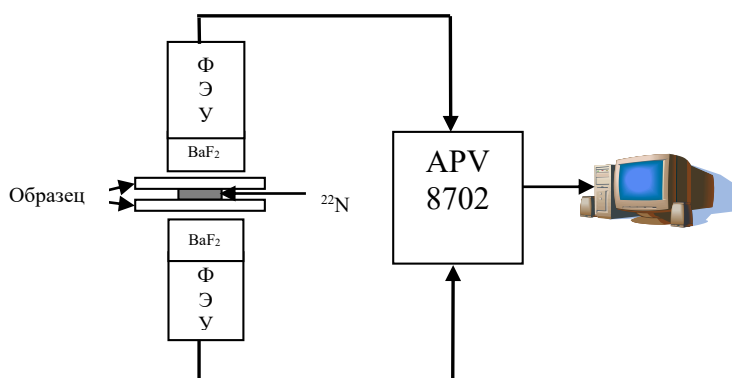


Рис.1. Схема спектрометра PALS, выполненного по стандартной схеме.

Спектрометр ДУАЛ выполнен по стандартной схеме (Рис. 2). Этот спектрометр может работать как с автономным источником ^{22}Na , так и с потоком монохроматических медленных позитронов. Он состоит из высоковольтного источника, HpGe детектора, предусилителя, многоканального анализатора и компьютера. Для регистрации гамма кванта, рождающегося при аннигиляции позитрона, используется HpGe детектор фирмы Ortec. Детектор имеет следующие параметры: относительная эффективность регистрации 1.33 МэВ γ -фотона (по стандарту IEC 60973) равна 30 %; разрешение по энергии (полная ширина на полувысоте на 511 кэВ) менее 1.25 кэВ; энергетический диапазон работы детектора лежит в диапазоне от 40 кэВ до 10 МэВ. Детектор питается от источника напряжения, выполненного в стандарте NIM той же компанией [5, 6].

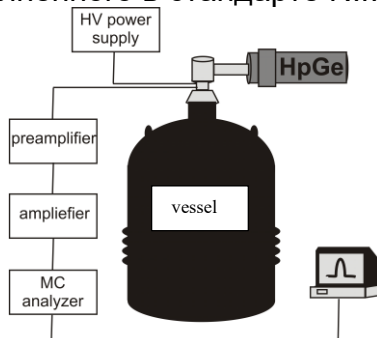


Рис. 2. Схема спектрометра ДУАЛ.

Криогенный источник медленных монохроматических позитронов (КРИММП) позволяет создавать пучок позитронов низкой энергии, удовлетворяющий по своим параметрам требованиям методов ПАС. Дополнительная возможность регулировки энергии позитронов появляется, когда образец «подвешивается» под отрицательный

потенциал, ускоряющий позитроны перед бомбардировкой образца, что позволяет внедрять в образец моноэнергичные позитроны заданной энергии, проникающие на определенную глубину. Замедление и монохроматизация потока позитронов открывает возможность проследить изменения структуры материала в тонких слоях.

В качестве источника позитронов используется изотоп ^{22}Na . Из радионуклидов, используемых в исследованиях в качестве источников позитронов (табл. 1), наиболее эффективным и удобным является этот изотоп. Период полураспада изотопа составляет 2,6 г., что делает его пригодным для проведения длительных экспериментов. Этот изотоп дает относительно высокий выход позитронов ~ 90,5%. Кроме того, хорошо отработана технология его изготовления, что, в конечном счете, отражается на цене изотопа [7].

Таблица 1. Характеристики позитронно-активных радионуклидов, используемых в исследованиях

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия позитронов, МэВ	Доля распадов, %
^{22}Na	2.603 года	0.545	90.50
^{44}Ti	47.3 года	1.467	98
^{48}V	15.974 сут	0.696	50.7
^{55}Co	17.54 ч	1.50	60
^{56}Co	78.76 сут	0.421	1.03
^{57}Ni	36 ч	0.85	50.0
^{58}Co	0.79 сут	0.475	15.05
^{64}Cu	12.703 ч	0.652	17.9
^{65}Zn	243.9 сут	0.329	1.45
^{68}Ge	288 сут	1.899	87.52
^{90}Nb	14.6 ч	1.50	54

Высокоэнергичные позитроны, испускаемые при распаде изотопа ^{22}Na , попадают в твердотельный замедлитель, где теряют свою энергию на ионизационных потерях и (ниже порога ионизации) через создание пары электрон-дырка и возбуждение экситонов и фононов замедляются до тепловых скоростей. В качестве замедлителя выбран твердый неон. В 2015-16 гг. нами был разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию новый криогенный источник. В качестве охладителя в нем используется криокулер фирмы Sumitomo. Данный источник позволяет получать поток медленных позитронов не менее $10^6\text{e}^+/\text{сек}$.

В 2018 – 19 гг. сооружен специализированный канал медленных позитронов (СКМП) (Рис.3). Магнитная система канала состоит из поворотного соленоида 1, катушек продольного магнитного поля 2, соленоида системы упорядочения позитронов 3, катушек поперечного поля для коррекции траектории позитронов (не показаны на рис. 3).

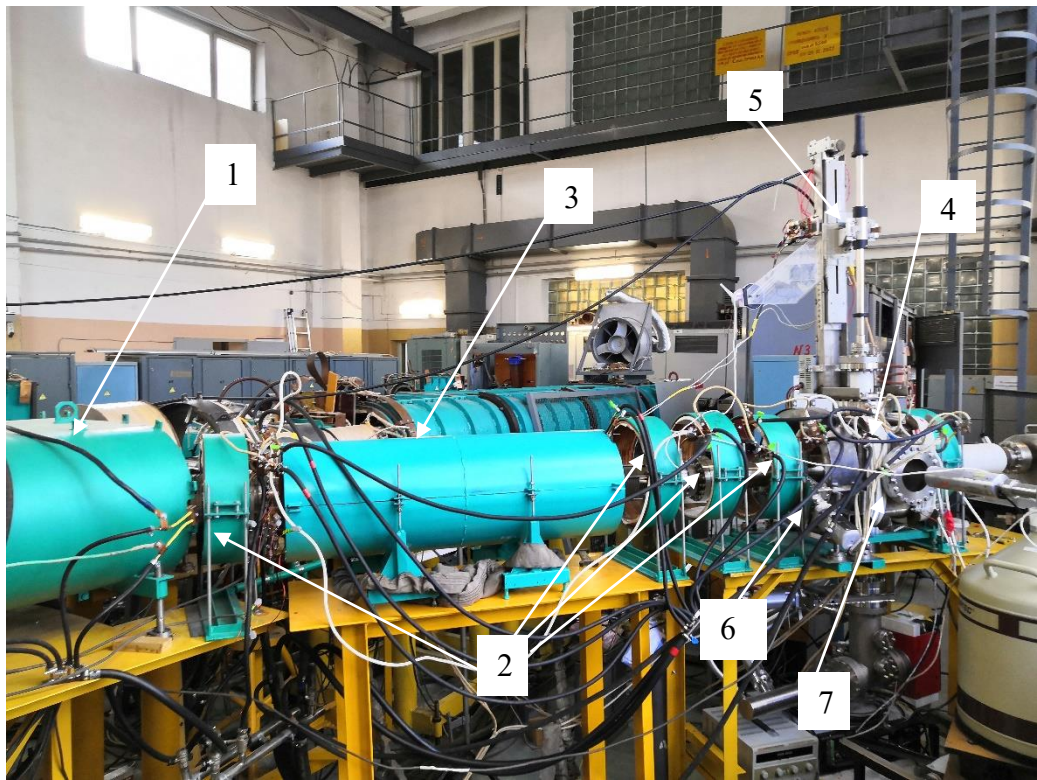


Рис. 3. Специализированный канал медленных позитронов (описание в тексте)

Внутри магнитной системы расположена вакуумная камера канала, которая заканчивается экспериментальной станцией 4. Держатель с исследуемыми образцами помещается внутрь экспериментальной станции через боковой фланец 7 и крепится к манипулятору 5. За одно вскрытие вакуумного объема может быть помещено до семи образцов. Перемещение манипулятора осуществляется с помощью электропривода дистанционно. Экспериментальная станция имеет собственную систему откачки и отделяется от основного вакуумного объема канала шибером 6.

Система упорядочения потока позитронов является частью создаваемого спектрометра измерения времени жизни позитрона в веществе (PALS) [1]. В период 2017-2018 гг. предложен оригинальный способ упорядочения позитронов и начата его реализация (Рис.4). Для упорядочения пучок монохроматических позитронов проходит участок U_{RF} , на котором подается высокочастотное (radio frequency - RF) напряжение специальной формы. Далее позитроны ускоряются в статическом электрическом поле на высоковольтном зазоре U_A и попадают на мишень U_{target} .

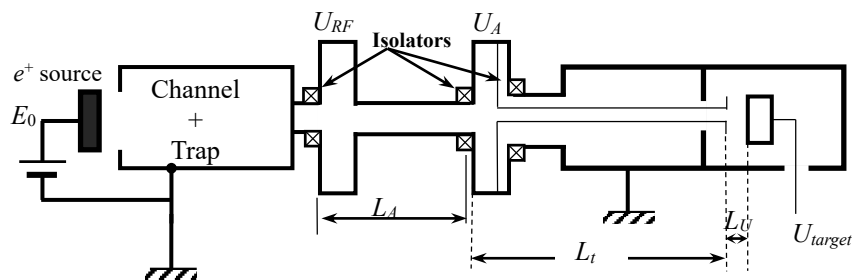


Рис. 4. Схема упорядочивания потока позитронов (пояснения в тексте).

Форму сигнала ВЧ находим по следующей схеме.

Считаем, что к ВЧ-резонатору (U_{RF}) позитроны подлетают в момент времени t_{inj} (инжекция) в среднем с интервалом $T_0 = (\dot{N}_{e^+})^{-1} \sim 2 \mu s$ и энергией $E_0 + \delta E, \delta E \sim \pm 1 eV$. Скорость позитрона на выходе ВЧ-резонатора:

$$v_{RF}(\delta E, t_{inj}) = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot (E_0 + \delta E + eU_{RF}(t_{inj}))}, 0 \leq t_{inj} \leq T_0. \quad (1)$$

Время пролета от ВЧ-резонатора до участка U_A есть $\Delta t_A = \frac{L_A}{v_{RF}}$.

Скорость позитрона после прохождения участка ускорения равна

$$\frac{mv_A^2}{2} = \frac{mv_{RF}^2}{2} + eU_A$$

$$v_A(\delta E, t_{inj}) = \sqrt{v_{RF}^2 + \frac{2}{m} eU_A}. \quad (2)$$

С этой скоростью позитрон пролетает участок канала длины L_t до входа в камеру, где находится исследуемый образец, помещенный под отрицательный потенциал U_{target} . Время пролета позитрона от входа в ВЧ-резонатор до входа в ускоряющий зазор камеры равно

$$t_{target} = t_{inj} + \Delta t_A + \frac{L_t}{v_A(E, t_{inj})} = t_{inj} + \frac{L_A}{v_{RF}} + \frac{L_t}{v_A}. \quad (3)$$

Функцию $U_{RF}(t)$ находим из условия равенства значений Δt_{target} для позитронов с энергией E_0 (т.е. $\delta E = 0$) при любом значении t_{inj} в интервале

$$0 \leq t_{inj} \leq T_0, \quad (4)$$

или

$$\Delta t_{target}(t_j = 0) = \Delta t_{target}(t_{inj} \leq T_0). \quad (5)$$

В этом случае все частицы, независимо от t_{inj} , приходят на мишень одновременно. Имеем

$$\frac{L_A}{v_{RF}(0,0)} + \frac{L_t}{v_A(0,0)} + t_{inj} + \frac{L_A}{v_{RF}(0,t_{inj})} + \frac{L_t}{v_A(0,t_{inj})}. \quad (6)$$

Это уравнение для функции $U_{RF}(t_{inj})$ решаем методом последовательных приближений. 1-е приближение:

$$\frac{L_A}{U_{RF}} \gg \frac{L_t}{U_A}. \quad (7)$$

Из (6) находим

$$\frac{L_A}{v_{RF}^{(1)}(0,0)} = t_{inj} + \frac{L_A}{v_{RF}^{(1)}(0,t_{inj})}. \quad (8)$$

Приняв $U_{RF}(0) = 0$, из (8) получим (при $\delta E = 0!$)

$$U_{RF}^{(1)}(t_{inj}) = \left[\frac{1}{(1 - \sqrt{\frac{2E_0 \cdot t_{inj}}{m \cdot L_A}}} - 1 \right] \cdot E_0, \quad (9)$$

$$v_A^{(1)}(0, t_{inj}) = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot (E_0 + eU_{RF}^{(1)}(t_{inj}) + eU_A)}. \quad (10)$$

2-е приближение:

Уравнение (6) представим в виде

$$\frac{L_A}{v_{RF}^{(2)}(0,0)} = t_{inj} + \frac{L_A}{v_{RF}^{(2)}(0,t_{inj})} + \delta t_2, \quad (11)$$

где

$$\delta t_2 = L_t \left(\frac{1}{v_A^{(1)}(0,t_{inj})} - \frac{1}{v_A^{(1)}(0,0)} \right), \quad (12)$$

Отсюда

$$U_{RF}^{(2)}(t_{inj}) = \left[\frac{1}{(1 - \sqrt{\frac{2E_0 \cdot t_{inj} + \delta t_2}{m \cdot L_A}}} - 1 \right] \cdot \frac{E_0}{e}. \quad (13)$$

$$v_{RF}^{(2)} = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot (E_0 + \delta E + eU_{RF}^{(2)})},$$

$$v_A^{(2)} = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot (E_0 + \delta E + eU_{RF}^{(2)}(t_{inj}) + eU_A)},$$

Время пролета частицы с энергией $E_0 + \delta E$

$$t_{target}(\delta E, t_{inj}) = t_{inj} + \frac{L_t}{v_A^{(2)}(\delta E, t_{inj})} + \frac{L_A}{v_{RF}^{(2)}(\delta E, t_{inj})}. \quad (14)$$

Нас интересует разность времени прихода на мишень позитронов с $\delta E \neq 0$ и $\delta E = 0$

$$\delta t_{target}(\delta E, t_{inj}) = t_{target}(\delta E, t_{inj}) - t_{target}(0, t_{inj}). \quad (15)$$

Формирование U_{RF} осуществляется с помощью набора трех-четырех Фурье - гармоник периодического напряжения $U_{RF}(t)$ (13). Предварительный анализ показал, что достаточно трех гармонических сигналов. Упорядочение потока позитронов происходит в результате прохождения частицами ускорительного зазора, к которому прикладывается ВЧ-напряжение трёх гармоник, сумма которых и создает напряжение специальной формы (13). Привязываясь к фазе ВЧ-напряжения, можно точно знать момент попадания позитрона в образец.

Для формирования напряжения специальной формы используются три гармонических сигнала (100, 200, 300 МГц) с определенной амплитудой и фазой, которые прикладываются к двум ускорительным зазорам. С этой целью был разработан и изготовлен ВЧ-резонатор (Рис.5,б).

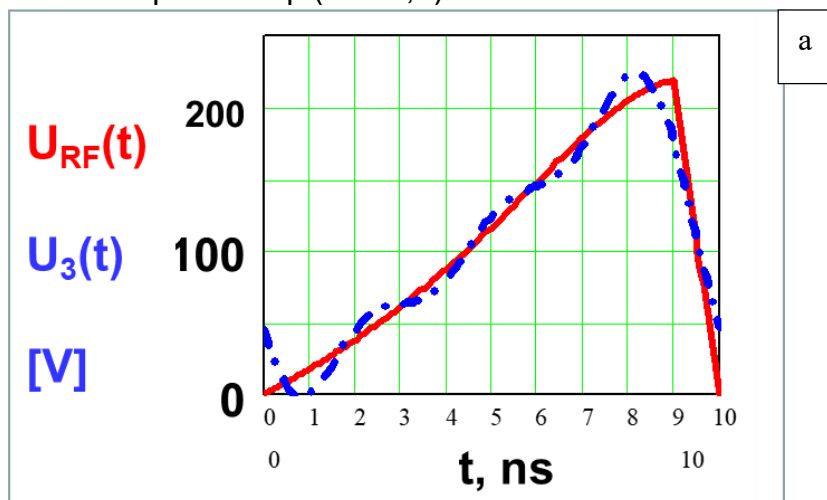


Рис. 5. а. Функция $U_{RF}(t)$ и функция $U_3(t)$, восстановленная по 3 гармоникам, б. Резонатор системы упорядочения потока монохроматических позитронов.

Резонатор собран, настроен на три гармоники и подготовлен для установки внутрь вакуумной камеры.

Для реализации возможности исследовать тонкопленочные образцы была разработана система реактивного ионного травления. Ее основу составляет приобретенный ионный источник фирмы PREVAC. Система расположена под экспериментальной станции (Рис.6).

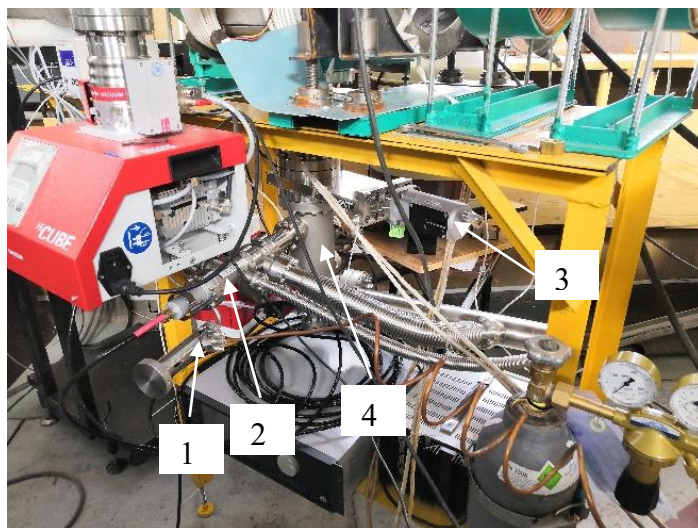


Рис. 6. Система реактивного ионного травления.

Для травления используются ионы аргона, который напускается через натекатель 1 в ионизационную камеру источника ионов 2. Травление происходит в камере 4 при опускании держателя с образцами после открытия шиберов 3, расположенных под экспериментальной станцией. В режиме ожидания вакуум в травильной камере поддерживается с помощью магниторазрядного насоса. При работе ионного источника при открытом шибере 3 для откачки используется турбомолекулярная станция экспериментального объема. Данная система позволит исследовать многослойные покрытия с толщинами слоев от единиц до десятков нанометров. Исследования такого вида ведутся с помощью потока позитронов с фиксированной энергией, а сканирование образца по глубине осуществляется путем удаления атомных слоев ионным травлением.

Цели и задачи проекта на 2021-2023гг.

Основными целями проекта являются:

- 1) исследование образования дефектов в материалах в результате различных физических воздействий;
- 2) расширение существующей экспериментальной базы.

Исследования методами ПАС могут быть продолжены с существующим измерительным оборудованием. Приоритетным направлением исследований на данный период является изучение дефектообразования в материалах, которые используются в атомной энергетике. К этим материалам относятся различные виды керамики и тугоплавкие металлы. При подготовке образцов для исследования требуется проводить процедуру "обнуления" дефектов в образцах, возникающих в результате механической обработки. Суть процедуры заключается в нагреве подготовленного образца до температуры, равной примерно 2/3 от температуры плавления материала. Нагрев производится в вакууме. Возникает задача высокотемпературного вакуумного нагрева, которая может быть решена путем нагрева образцов электронным пучком. Имеющиеся технические возможности позволяют реализовать этот способ нагрева. Начаты первые попытки высокотемпературного отжига на стенде "Рекуператор" (СЭО ЛЯП).

Расширение экспериментальной базы будет проводиться в нескольких направлениях:

- 1) Усовершенствование спектрометра ДУАП введением в схему измерения возможности регистрации совпадения двух аннигиляционных гамма квантов. В стандартной схеме измерения (один детектор) отношение пика к фону обычно составляет ≈ 30 к 1. Отношение пика к фону может быть улучшено более чем на два

порядка с помощью метода регистрации совпадения двух гамма квантов (рис.7). С помощью этой методики можно измерить вклад ядра и импульса валентного электрона в спектр доплеровского уширения. Измеряя распределение импульсов электронов ядра, характерное для каждого элемента, можно идентифицировать химические элементы вокруг мест аннигиляции позитронов и дать по крайней мере качественное представление о структуре и микроскопическом расположении атомов, окружающих вакансии. Этот метод широко используется для изучения полимеров, полупроводников, присадок в сплавах и т.д.

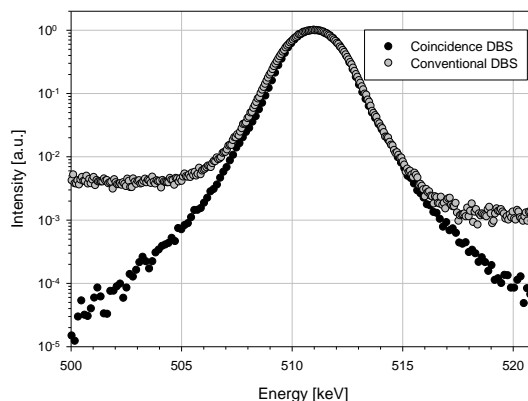


Рис.7. Сравнение спектров, полученных в традиционном варианте ДУАЛ ПАС и с использованием метода совпадений для одного и того же образца алюминиевого сплава Al88.8 Pb11.2%.

2) Завершение создания системы упорядочения позитронов и введение в эксплуатацию спектрометра PALS на монохроматическом пучке позитронов.

PALS спектроскопия служит уникальным инструментом для характеристики структурных дефектов и пустот в материалах. Время жизни позитрона связано с размером пустоты, в которую захвачен позитрон, и слабо зависит от материала, окружающего пустоту. Тем не менее количественное определение времени жизни позитрона затруднено при рассмотрении тонких пленок или слоистых структур с толщиной субмикронного слоя, имеющих высокую технологическую значимость. Изотропное излучение и высокая энергия обычных позитронных излучателей дает глубину проникновения миллиметрового масштаба. Разработанные в настоящее время аппараты преодолевают это ограничение, используя моноэнергетические позитронные пучки, что позволяет проводить исследования тонких пленок в зависимости от глубины в масштабе от нанометров до микрометров. В мире существует лишь несколько подобных установок.

3) Отработка методики ионного травления на созданной системе травления и применение ее для изучения тонкопленочных многослойных материалов. Установленный источник ионов позволяет облучать образцы ионами аргона с энергией до 5 кэВ и изучать распределение дефектов с лучшим разрешением по глубине. В настоящее время эксплуатируемый позитронный пучок позволяет использовать позитроны с энергиями до 40 кэВ. После имплантации в материал распределение позитронов можно описать профилем Махова. Примерный профиль имплантации позитрона с энергиями 5, 15 и 25 кэВ показан на рис. 8. Увеличение энергии дает более высокий разброс позитронов. Поэтому стандартный метод измерения на пучке позволяет исследовать тонкие пленки, расположенные на поверхности образца.

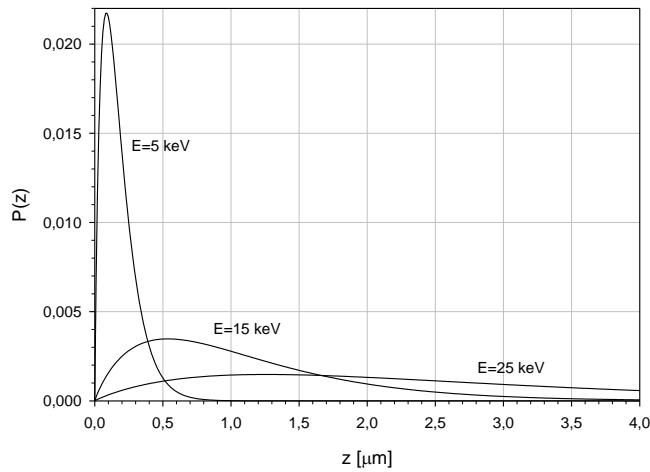


Рис.8. Профиль имплантации позитронов с энергиями 5, 15 и 25 кэВ.

Если поверхность образца состоит из нескольких пленок общей толщиной свыше нескольких сотен нанометров, то изучена может быть только самая верхняя из них. Использование ионного источника дает возможность распылять мишень методом ионного травления и сохранять малые константы энергий позитронов. Исследования показали, что при ступенчатом удалении поверхностных атомов образца ионами аргона дефектная структура исследуемой области образца не изменяется, если энергия позитрона выбрана достаточно высокой, что позволяет исключить обратную диффузию к поврежденной поверхности. На рис.9 приведены результаты измерений стандартным методом и с использованием ионного травления для образцов солнечных элементов CIGSe.

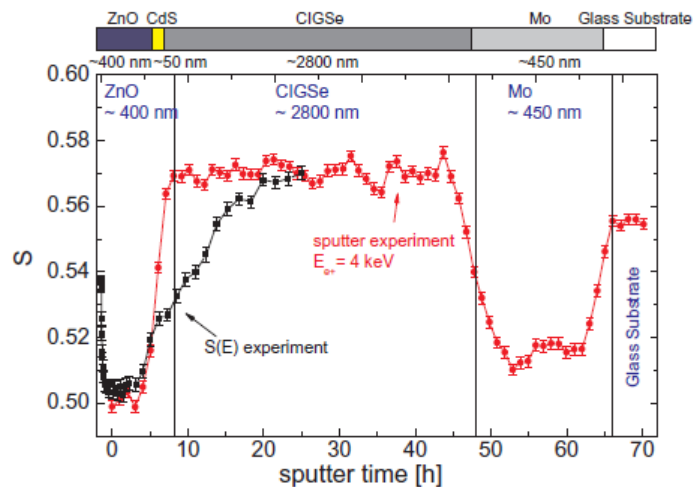


Рис.9. Профили дефектов, полученные стандартным методом(черный) и с помощью ионного травления (красный).

Краткий ССВУ- анализ.

Сильные стороны проекта.

Экспериментальные возможности группы позволяют уже сегодня конкурировать со многими центрами и лабораториями, которые занимаются исследованиями с помощью ПАС. Благодаря коллаборации внутри ОИЯИ группе доступны различные ускорительные комплексы для подготовки образцов, а также различное исследовательское оборудование для дополнительного анализа.

Слабые стороны проекта.

В коллективе и в сотрудничающих группах нет сильного теоретика в области физики твердого тела, который мог бы ставить задачи для исследований, а также

объяснять различные получаемые эффекты, например, эффект дальнего действия.

Возможности.

Возможен доступ к исследовательскому оборудованию СЭО ЛЯП для научных групп из государств-членов ОИЯИ.

Оборудование может использоваться для подготовки кадров в области позитронной спектроскопии, вакуумной и ускорительной техники, включая обучение студентов и повышение квалификации инженеров и научных сотрудников.

Угрозы.

В исследованиях используется дорогостоящее измерительное, вакуумное, криогенное оборудование. Стоимость отдельных компонентов соизмеримо с годовым бюджетом проекта. Существуют риски длительного перерыва в работе отдельных спектрометров при выходе оборудования из строя.

Финансирование не в полном объеме.

Оценка кадровых ресурсов.

Таблица 1. Сотрудники ЛЯП занятые в проекте.

№	Ф.И.О.		FTE
1	Мешков И. Н.	Теория, постановка и проведение эксперимента, анализ результатов	0,25
2	Кобец А. Г.	Постановка, подготовка, проведение эксперимента, анализ результатов	0,85
4	Сидорин А. А.	Проведение эксперимента, обработка результатов	0,85
5	Семек К.	Постановка, подготовка, проведение эксперимента, анализ результатов	1,0
6	Ахманова Е. В	Численное моделирование динамики позитронов	0,7
7	Яковенко С. Л.	Постановка эксперимента, обсуждение результатов	0,1
8	Орлов О. Ю.	Проведение эксперимента, обработка результатов	0,85
9	Хилинов В. И.	Проектирование, изготовление, монтаж установки ПАС	0,85
10	Соболева Л. В.	Документация, подготовка и оформление отчетов	0,85

Заключение

Выполнение программы, представленной в данном проекте, выведет комплекс на качественно новый уровень, создаст новые возможности экспериментальных исследований на направленных потоках монохроматических позитронов.

Литература

[1].	M.Eseev, P.Horodek, V.Khilinov, A.Kobets, V.Kobets, I.Meshkov, O.Orlov, K.Siemek, A.A.Sidorin, Development of Positron Annihilation Spectroscopy at Joint Institute for Nuclear Research, Acta Physica Polonica A 136 (2019) 315.
[2].	V. Slugen, H. Hein, S. Sojak, J. Veternikova, Irradiation induced damage of the reactor pressure vessel steels studied by positron annihilation lifetime techniques.
[3].	Lijuan Zhang, Tao Wang, Ji Li, Yingping Hao, Jindang Liu, Peng Zhang, Bin Cheng, Zhongwei Zhang, Baoyi Wang, Bangjiao Ye, Thin Solid Films, 525 (2012), p. 68-72
[4].	M. F. Ferreira Marques, C. Lopes Gil, P. M. Gordo, Zs. Kajcsos, A. P. de Lima, D. P. Queiroz, M. N. de Pinho, Radiation Physics and Chemistry, 68, 2003, p. 573 – 576
[5].	Horodek, P., Kobets, A.G., Meshkov, I.N., Sidorin, A.A., Orlov, O.S.: Slow positron beam at the JINR, Dubna, Nukleonika 60(4), 725–728 (2015).
[6].	P. Horodek, M. Bugdol, A.G. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, A. Yu. Rudakov, A.A. Sidorin, S.L. Yakovenko, Development of positron annihilation spectroscopy at LEPTA facility / Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 5(189). С. 1092-1098.
[7].	Meshkov, I. N., Pavlov, V. N., Sidorin, A. O., & Yakovenko, S. L. (2007). A cryogenic source of slow monochromatic positrons. Instruments and Experimental Techniques, 50(5), 639–645.

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
проекта__"РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИКЛАДНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКАХ ПОЗИТРОНОВ" _**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.). Потреб- ности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов			
			1 год	2 год	3 год	
Затраты	1. Измерительное оборудование	70	20	25	25	
	2. ВЧ-компоненты	17	7	5	5	
	3. Вакуумное оборудование	18	8	5	5	
	4. Материалы	15	5	5	5	
Источники финансирования	Бюджетные средства	Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	120	40	40	40

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА

А.Г. Кобец

К. Семек

Смета затрат по проекту _"РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКАХ ПОЗИТРОНОВ" _

NN пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год	2 год	3 год и далее
	Прямые расходы на Проект				
1.	Материалы	15 тыс. долл.	5	5	5
2.	Оборудование	105 тыс. долл.	35	35	35
3.	Командировочные расходы, в т.ч.	30 тыс. долл.			
	а) в страны нерублевой зоны		8	8	8
	б) в города стран рублевой зоны		2	2	2
	Итого по прямым расходам:	150	50	50	50

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА

А.Г. Кобец

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

К. Семек

В.А. Бедняков

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ

Г.А. Усова