

**Тема 1126, проект "Развитие техники эксперимента и прикладные исследования на монохроматических пучках позитронов".**

**1. Развитие экспериментальной базы.**

*Специализированный канал медленных позитронов.*

Завершено сооружение Специализированного канала медленных позитронов (СКМП) (Рис.1). 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. 1).

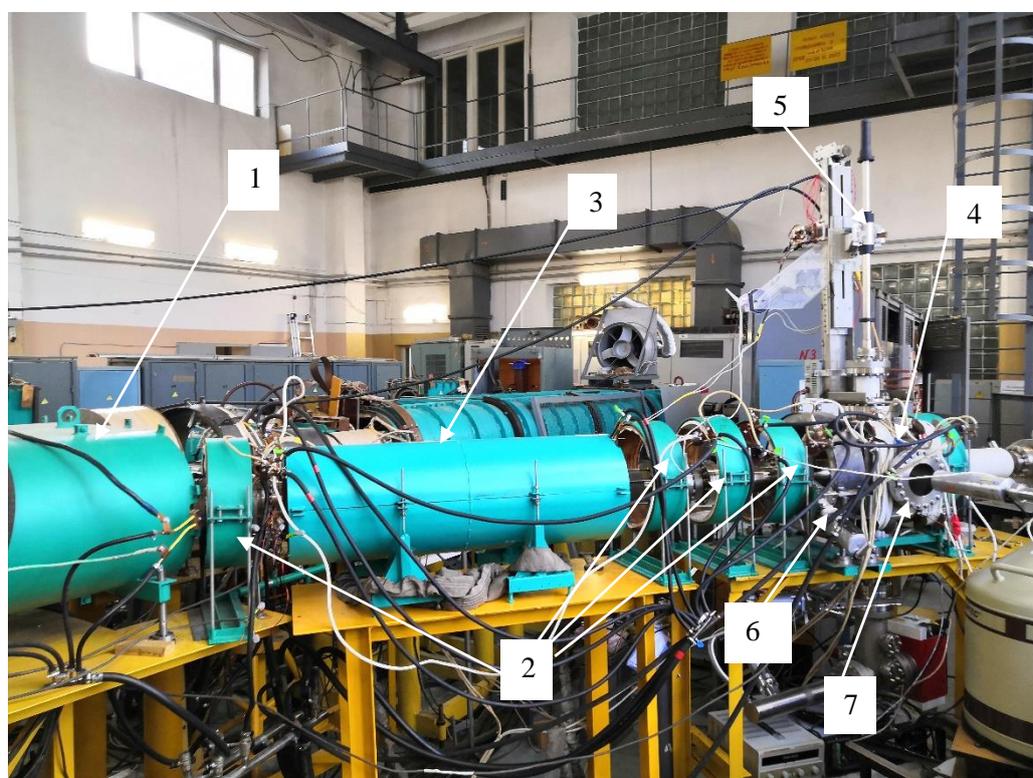


Рисунок 1. Специализированный канал медленных позитронов.

Внутри магнитной системы расположена вакуумная камера канала, которая оканчивается 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. Экспериментальный объем имеет собственную вакуумную станцию и отделяется от основного вакуумного объема канала шибером 6.

### *Система упорядочения потока позитронов.*

Система упорядочения потока позитронов является частью создаваемого спектрометра измерения времени жизни позитрона в веществе (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy – PALS). Упорядочение потока позитронов происходит в результате прохождения частицами ускорительного зазора, к которому прикладывается ВЧ-напряжение специальной формы. 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.2).



Рисунок 2. Резонатор системы упорядочения позитронов.

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

Приобретен задающий высокостабильный генератор, устройства умножения частоты, ведутся работы по созданию системы привязки в фазе ВЧ-напряжения.

### *Система реактивного ионного травления.*

Для реализации возможности исследовать тонкопленочные образцы была разработана система реактивного ионного травления. Ее основу составляет приобретенный ионный источник фирмы PREVAC. Система расположена под экспериментальным объемом (Рис.3).

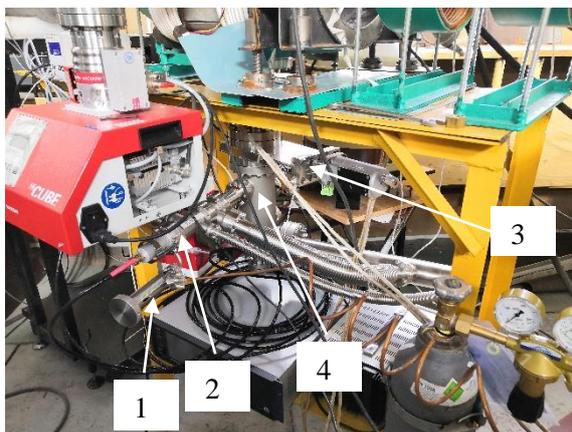


Рисунок 3. Система реактивного ионного травления.

Для травления используются ионы аргона, которые образуются в ионизационной камере источника ионов 2 в результате напуска аргона через натекатель 1. Травление происходит в камере 4 при опускании держателя с образцами после открытия шиберов 3, расположенного под экспериментальным объемом. 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.

## 2. Экспериментальные исследования методами ПАС.

Экспериментальные исследования велись по нескольким направлениям.

*Исследования модификации материалов после ионной имплантации.*

Ионная имплантация обычно используется для подповерхностных модификаций, особенно полезных для легирования полупроводников в планарной технологии. Простым способом можно локализовать различные ионы на разных глубинах от входной поверхности и изменить, например, электронные свойства в имплантированном слое. Однако при этом генерируется множество повреждений, начиная от точечных дефектов и заканчивая фазовыми переходами. Проведенные исследования характеризуют дефекты, создаваемые низкоэнергичными ионами в структуре полупроводников таких как Si, GaAs, TiO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, и оксидов металлов.

*Исследования радиационных повреждений и связанных с ними явлений, в т.ч. для ядерных материалов и чистых металлов.*

Ядерные материалы должны работать в условиях повышенного облучения. Наши исследования ядерных материалов начаты в 2019 г. и посвящены материалам для реакторов IV поколения, таких как SiC и вольфрам. Изучено влияние границ зерен, включений и других дефектов на стойкость к облучению, в частности в нанокристаллическом Ti, тонкослойной

структуре Zr/Nb. Вторая часть исследований была сосредоточена на изучении эффекта дальнего действия (Long Range Effect - LRE), возникающего при облучении. Он был изучен для нескольких чистых металлов Ti, Fe, Ag, Au, Nb, Pd, Bi. Для некоторых из них, таких, как Fe и Bi, были обнаружены дефекты структуры не только на глубине проникновения ионов, но и гораздо глубже. Этот эффект до сих пор не получил убедительного объяснения.

*Исследование повреждений, возникающих в результате механических воздействий.*

Дефекты играют не только отрицательную роль в материалах. Правильное механическое воздействие может быть использовано для получения материалов с высокой прочностью и долговечностью. Методы измельчения зерна - хорошо известный процесс, который позволяет уменьшить размер зерна и повысить его механические свойства. Последние исследования включают в себя исследование дефектов, вызванных гидростатической экструзией, поверхностной модификацией при истирании и пескоструйной обработкой. Были исследованы бронза, стали, стоматологические сплавы и чистая медь. Подробно изучены характеристики дефектов, возникающих под поверхностью, включая их тип и концентрацию, а также роль различных технологических параметров в формировании дефектов. Например, процесс пескоструйной обработки осуществлялся в течение различных периодов времени; обработка велась при различных направлениях оси сопла относительно поверхности образца; изменялись размеры, форма и материал абразивных частиц; применялась деформация сжатием.

*Исследование разрушения материалов в результате процесса кавитации.*

Износ материалов происходит в результате эксплуатации, например, в результате трения или кавитационной эрозии в жидкостно-струйных машинах. В ходе этих процессов образуются различные по профилю и видам дефекты, которые изменяются со временем и в конечном итоге вызывают усталость и разрушение деталей конструкций. Понимание этого процесса может позволить найти способ снижения износа материала и снижения вероятности ошибок при проектировании. Первые группа исследований включает эволюцию кавитационных повреждений во времени для сталей и бронз. Хорошо известно, что в этом процессе можно выделить четыре периода: инкубационный, ускорение, область максимальной скорости эрозии и стадия затухания. В течение каждого периода образуются различные дефекты, которые могут быть определены методами PAS. Ко второй группе исследований относится изучение дефектов, возникающих при трении.

Исследовались зависимости от различных факторов, таких как нагрузка, скорость трения и время. Изучена роль этих параметров на дефектах подповерхностной зоны в чистых металлах -- ниобии и цирконии.

### **3. Планы на 2021-2023гг.**

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

2. Усовершенствование спектрометра ДУАЛ: введение в схему измерения возможности регистрации совпадения двух аннигиляционных гамма квантов.

3. Исследование материалов доступными методами PAS.

### **Публикации:**

1. K.Siemek, J.Dryzek, M.Mitura-Nowak, A.Lomygin, M.Schabikowski, *Positron annihilation studies of long range effect in Ar, N and C-implanted silicon*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 465 (2020) 73.

2. P.Horodek, K.Siemek, J.Dryzek, M. Wróbel, *Impact of abradant size on damaged zone of 304 AISI steel characterized by positron spectroscopy*, Metallurgical and Materials Transactions A 50 (2019) 1502.

3. J.Dryzek, K.Siemek, *Positron Annihilation Studies of Subsurface Zone Created during Friction in Pure Silver*, Tribology Transactions 62 (2019) 658.

4. J.Dryzek, K.Siemek, *Defects and their range in pure bismuth irradiated with swift Xe ions studied by positron annihilation techniques*, Applied Physics A 125 (2019) 85.

5. K.Siemek, M. Kulik, M. K. Eseev, A. G. Kobets, M. Wróbel, O. S. Orlov, A. A. Sidorin, *Surface and subsurface defects studies of dental alloys exposed to sandblasting*, Acta Metallurgica Sinica (English Letters) 32 (2019) 1181.

6. P. Horodek, *Application of positron annihilation spectroscopy techniques for the long range effect detection*, Acta Physica Polonica A, 136(2) (2019) 361.

7. P. Horodek, *Positron annihilation studies of irradiation-induced defects with swift heavy ions in gold* Vacuum, 164 (2019) 421.

8. P. Horodek, M. Kulik, *Application of positron beam for the long range effect studies in proton implanted iron* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 443 (2019) 84.

9. 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.

10. P.Horodek, A.Kobets, K.Siemek, V.Skuratov, *Defects and their range in pure bismuth irradiated with swift Xe ions studied by positron annihilation techniques*, Acta Physica Polonica A 136 (2019) 318.

11. P.Horodek, L.H.Khiem, K.Siemek, L.A.Tuyen, A.G.Kobets, *Positron Annihilation Spectroscopy in Material Studies*, Communications in Physics 29 (2019) 501.

12. K.Skowron, K.Siemek, *Positron annihilation spectroscopy studies of sandblasted copper*, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, 11 (2018) 4.

13. E.Romanowka, E.Dryzek, J.Morgiel, K.Siemek, Ł.Końek, M. Zagula-Yavorska „*Microstructure and positron lifetimes of zirconium modified aluminide coatings*” Archives of Civil and Mechanical Engineering 18 (2018) 1150.
14. P. Horodek, J. Dryzek, *Positron lifetime studies of defects distribution in Xe<sup>26+</sup> irradiated pure titanium* Surface and Coatings Technology 355 (2018) 247.
15. E.V.Ahmanova, M.K. Eseev, V.I. Hilinov, P. Horodek, A.G. Kobets, V.V. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, K. Siemek, A.A. Sidorin, *Measurement of Monochromatic Positron Lifetime in a Continuous Flux* Physics of Particles and Nuclei Letters 15 (2018) 975.
16. J. Dryzek, P. Horodek, M. Dryzek, *Damage range in swift Xe<sup>26+</sup> ion-irradiated polycrystalline iron and silver studied by positron annihilation technique, long-range effect* Applied Physics A: Materials Science and Processing, 124 (2018) art. no. 45.
17. A.Szpakiewicz-Szatan, D. Dabrowski, P. Horodek, M. Peryt, K. Roslon, *Slow control of positron polarisation system's power supply* Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement, 11 (2018) 825.
18. P. Horodek, K. Siemek, J. Dryzek, M. Wróbel, *Positron Annihilation and Complementary Studies of Copper Sandblasted with Alumina Particles at Different Pressures* Materials 10 (2017) 1343
19. J. Dryzek, P. Horodek, *Positron Annihilation Studies of the Near-Surface Regions of Niobium before and after Wear Treatment* Tribology Letters, 65 (2017) art. no. 117.
20. J.Dryzek, P. Horodek, V.A. Skuratov, *Defect range and evolution in swift Xe-Ion irradiated pure silver studied by positron annihilation technique* Acta Physica Polonica A, 132 (2017) 1585.
21. M. Sarnek, E. Dryzek, P. Horodek, W. Pachla, *Estimate of the crystallite size for nanocrystalline AISI 316L stainless steel and armco iron processed by hydrostatic extrusion using variable energy positron beam* Acta Physica Polonica A, 132 (2017) 1598.
22. P. Horodek, J. Dryzek, V.A. Skuratov, *Positron annihilation study of defects in copper irradiated with swift Xe<sup>26+</sup> ions* Vacuum, 138 (2017) 15-21.
23. J. Dryzek, P. Horodek, *Slow positron beam studies of zirconium exposed to dry sliding* Journal of Physics: Conference Series, 791 (2017) art. no. 012020 .
24. E.V. Ahmanova, M.K. Eseev, A.G. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, K. Siemek, P. Horodek, *Positron annihilation spectroscopy on a beam of positrons the LEPTA facility* EPJ Web of Conferences, 132 (2017) art. no. 03014.
25. P. Horodek, K. Siemek, J. Dryzek, A.G. Kobets, M. Wróbel, “*Positron annihilation and complementary studies of stainless steel exposed to sandblasting at different angles*” Tribol. Lett. 64 (2017) 30-37
26. S Kurdyumov, K Siemek, P. Horodek, *Positron annihilation spectroscopy studies of bronze exposed to sandblasting at different pressure* J. Phys.: Conf. Ser. 929 (2017) 012029
27. K. Siemek, E.V. Ahmanova, M.K. Eseev, V.I. Hilinov, P. Horodek, A.G. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, *Realization of positron annihilation spectroscopy at LEPTA facility* 25<sup>th</sup> Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC (2016) 496.
28. J. Dryzek, K. Siemek, *Formation of subsurface zone induced by sliding wear in zirconium studied by positron lifetime spectroscopy* Tribol. Lett. 64 (2016) 15-25
29. C.S. Osokin, M.K. Eseev, A.A. Goshev, P. Horodek, S.N. Kapustin, A.G. Kobets, A.S. Volkov, *Investigation of the dielectric properties and defectoscopy of nanocomposites based on silica and polymers reinforced with carbon nanotubes* Journal of Physics: Conference Series, 769 (2016) art. no. 012033 .
30. P. Horodek, V.A Skuratov, *Variable energy positron beam studies of defects in heavy ion implanted palladium* Surface and Coatings Technology, 296 (2016) 65.

31. P. Horodek, J. Dryzek, V.A Skuratov, *Studies of iron exposed to heavy ion implantation using positron annihilation spectroscopy* Radiation Physics and Chemistry, 122 (2016) 60.
32. P. Horodek, J. Dryzek, *Application of encapsulated  $^{22}\text{Na}$  isotope to Doppler spectroscopy based on positrons emitted directly from the source* Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement, 9 (2016) 231.
33. I.N. Meshkov, E.V. Ahmanova, V.I. Hilinov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, M.K. Eseev, P. Horodek, K. Siemek, A.G. Kobets, *Development of positron annihilation spectroscopy at the LEPTA facility* 25<sup>th</sup> Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC (2016) 499.