

## **«Изучение нанослойных материалов и искусственных алмазов методами позитронной спектроскопии на уникальном в России инжекторе медленных монохроматических позитронов»**

### **Авторский коллектив:**

А. А. Сидорин<sup>1</sup>, О. С. Орлов<sup>1</sup>, В. И. Хилинов<sup>1</sup>, И. Н. Мешков<sup>2</sup>, Е. В. Ахманова<sup>1</sup>,  
М. К. Есеев<sup>3</sup>, И. В. Кузив<sup>3</sup>, Р. С. Лаптев<sup>4</sup>, Хородек<sup>5</sup>, К. Семек<sup>5</sup>

<sup>1</sup> – Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ;

<sup>2</sup> - Лаборатория физики высоких энергий ОИЯИ;

<sup>3</sup> – Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова;

<sup>4</sup> – Томский политехнический университет;

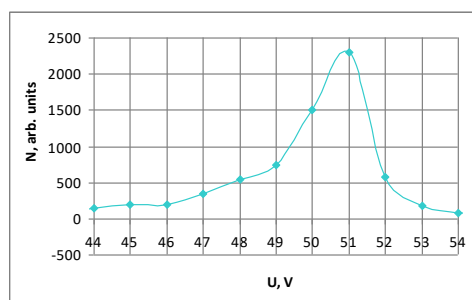
<sup>5</sup> – Институт ядерной физики Польской академии наук

Цикл работ состоит из восьми публикаций.

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

Для проведения измерений методами Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS) и доплеровское уширение аннигиляционной линии (ДУАЛ – Doppler Broadening Annihilation Line – DBAL) требуется установка, позволяющая генерировать монохроматический поток медленных позитронов. Она имеет принципиальное преимущество по сравнению с широко распространенными изотопными источниками, имеющими широкий энергетический спектр позитронов. Изменяя энергию позитронов, можно сканировать образцы на наличие дефектов по глубине с чрезвычайно высокой точностью, избегая принятого метода механического снятия слоев исследуемого материала.

Установка, созданная в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ, имеет Криогенный источник медленных монохроматических позитронов (КРИММП). Позитроны, испускаемые при распаде изотопа <sup>22</sup>Na, характеризуются широким энергетическим спектром. Попадая в твердотельный замедлитель, они теряют свою энергию на ионизационных потерях вплоть до тепловых скоростей. В качестве замедлителя выбран твердый неон, напыляемый на металлическую (нержавеющая сталь) поверхность и непосредственно на «таблетку» изотопа <sup>22</sup>Na, охлаждаемого до температуры 7 К.



Типичный спектр медленных позитронов источника КРИММП. Полная ширина на полувысоте 2 эВ, выход позитронов  $3.3 \times 10^6$  позитронов в секунду

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, что позволяет внедрять в образец моноэнергичные позитроны заданной энергии, проникающие на определенную глубину.



Установка Инжектор позитронов ЛЯП ОИЯИ

Первым реализованным методом на инжекторе, использующим монохроматический поток медленных позитронов, является метод спектроскопии по измерению доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ) аннигиляционного гамма-кванта. Этот метод используется для обнаружения вакансий, вакансионных кластеров, а также определения их концентрации.

На установке Инжектор позитронов ЛЯП ОИЯИ проводятся дефектоскопические исследования различных материалов из научных институтов и лабораторий как России, так и стран-участниц ОИЯИ. В данном цикле работ представлены результаты исследований радиационно-устойчивых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами (Томский политехнический университет) и структуры синтетического алмаза (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова). В работах ТПУ изучаются наноразмерные многослойные покрытия Zr/Nb, являющиеся конструкционными материалами активной зоны ядерного реактора. Такие покрытия существенно увеличивают срок службы реакторов. Исследования САФУ посвящены анализу дефектов, возникающих

при электронном облучении пластин синтетического алмаза, легированных азотом. Такие материалы используются при разработке квантово-оптических сетей. Рассматриваются также возможности использовать эти материалы для создания твердотельных спиновых кубитов.

Уникальные возможности неразрушающего контроля, чрезвычайная чувствительность к обнаружению дефектов, возможность сканировать образцы на наличие дефектов по глубине с чрезвычайно высокой точностью делают сегодня позитронно-аннигиляционную спектроскопию одним из самых актуальных и быстро набирающих популярность в России и мире методов изучения материалов.

В цикле работ представлено развитие установки Инжектор позитронов и наиболее перспективные исследования современного материаловедения в России.

### Список работ:

1. P. Horodek, A. G. Kobets, I. N. Meshkov, O. Orlov, and A. A. Sidorin, "Positron Annihilation Spectroscopy at the LEPTA Facility", in Proc. IPAC'14, Dresden, Germany, Jun. 2014, pp. 2215-2217. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-WEPRO107.  
<https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/papers/wepro107.pdf>
2. P. Horodek, J. Dryzek, A.G. Kobets, M. Kulik, V.I. Lokhmatov, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, V. Pavlov, A. Yu. Rudakov, A.A. Sidorin, K. Siemek, S. L. Yakovenko, Slow Positron Beam Studies of the Stainless-Steel Surface Exposed to Sandblasting. Acta Physica Polonica Series a, March 2014, 125(3):714-717.  
<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/125/a125z3p09.pdf>
3. A. A. Sidorin et al., "A Method for Measuring the Positron Lifetime in Solid Matter with a Continuous Positron Beam", in Proc. RuPAC'18, Protvino, Russia, Oct. 2018, pp. 267-269. doi:10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA58.  
<https://accelconf.web.cern.ch/rupac2018/papers/tupsa58.pdf>
4. M. Eseev, V. I. Hilinov, P. Horodek, A. G. Kobets, V. V. Kobets, I. N. Meshkov, O. S. Orlov, A. A. Sidorin, K. Semek, Development of Positron Annihilation Spectroscopy at Joint Institute for Nuclear Research, Acta Physica Polonica Series a, August 2019, 136(2):314-317, DOI:10.12693/APhysPolA.136.314.  
<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/136/app136z2p18.pdf>
5. Eseev, M.; Kuziv, I.; Kostin, A.; Meshkov, I.; Sidorin, A.; Orlov, O. Investigation of Nitrogen and Vacancy Defects in Synthetic Diamond Plates by Positron Annihilation Spectroscopy. Materials 2023,16, 203. <https://doi.org/10.3390/ma16010203>
6. Laptev, R.; Stepanova, E.; Pushilina, N.; Kashkarov, E.; Krotkevich, D.; Lomygin, A.; Sidorin, A.; Orlov, O.; Uglov, V. The Microstructure of Zr/Nb Nanoscale Multilayer Coatings Irradiated with Helium Ions. Coatings 2023, 13, 193.  
<https://doi.org/10.3390/coatings13010193>
7. Laptev, R.; Krotkevich, D.; Lomygin, A.; Stepanova, E.; Pushilina, N.; Kashkarov, E.; Doroshkevich, A.; Sidorin, A.; Orlov, O.; Uglov, V. Effect of Proton Irradiation on Zr/Nb

Nanoscale Multilayer Structure and Properties. *Metals* 2023, 13, 903.

<https://doi.org/10.3390/met13050903>

8. 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, Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp. 496-498, WEPSB059. <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/papers/wepsb059.pdf>