

Цикл работ на соискание премии ОИЯИ за 2023 г. по категории научно-технические прикладные работы

Применение методов позитронной спектроскопии в актуальных областях материаловедения.

Список авторов:

Сидорин А. А., Орлов О. С., Хилинов В. И. ЛЯП

Мешков И. Н. ЛФВЭ

Лаптев Р. С. Томский политехнический университет Отделение экспериментальной физики

Есеев М. К., Кузив И. В. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова

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.

Для проведения измерений методами Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS) и Доплеровское Уширение Аннигиляционной Линии (ДУАЛ - Doppler Broadening Annihilation Line - DBAL) на пучке позитронов требуется установка, генерирующая монохроматический поток медленных позитронов.

Созданный в ОИЯИ Криогенный Источник Медленных Монохроматических Позитронов (КРИММП) является ключевым элементом инжектора позитронов низкой энергии. Высокоэнергичные позитроны, испускаемые при распаде изотопа ²²Na, попадают в твердотельный замедлитель, где теряют свою энергию на ионизационных потерях и замедляются до тепловых скоростей. В качестве замедлителя выбран твердый неон, напыляемый на металлическую (нержавеющая сталь) поверхность и непосредственно источник, охлаждённых до температуры 7 К. Это необходимо, т. к. позитроны, испускаемые изотопом ²²Na, имеют широкий энергетический спектр.

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.

Первым реализованным методом на установке PAS, использующим монохроматический поток медленных позитронов, является метод ДУАЛ. Метод основан на эффекте Доплера — изменение энергии аннигиляционного гамма-кванта. Этот метод используется для обнаружения вакансий, вакансионных кластеров, а также определения их концентрации.

Центральной проблемой современного материаловедения является разработка научной основы для передовых технологий производства конструкционных материалов, пригодных для эксплуатации в агрессивных условиях с высокой устойчивостью. Хорошо известно, что повреждения, вызванные радиацией и ионами, являются одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих срок службы большинства конструкционных материалов, работающих в чрезвычайно сложных условиях. Создание функционально дифференцированных материалов является одним из перспективных направлений разработки радиационно-устойчивых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами. Функционально дифференцированные материалы представляют собой однофазные или композиционные материалы, в которых состав или микроструктура изменяются равномерно или прерывисто для обеспечения различных локальных свойств по меньшей мере в одном направлении. В последние годы было проведено значительное количество теоретических и экспериментальных исследований наноразмерных многослойных покрытий, включая системы на основе Zr/Nb. Наноразмерные многослойные покрытия Zr/Nb обладают рядом преимуществ перед другими системами: Zr и Nb являются конструкционными материалами активной зоны ядерного реактора с достаточно высокой температурой плавления, коррозионной стойкостью и прочностью, а также низким поперечным сечением для тепловых нейтронов, что делает эти функционально дифференцированные материалы перспективными для создания композиционных материалов для ядерных применений. Целью работ является изучение влияния облучения на микроструктуру, дефекты и свойства наночастиц Zr/Nb с различной толщиной слоя для разработки научной основы для проектирования устойчивых к радиационным повреждениям функционально дифференцированных материалов. Метод ДУАЛ с переменной энергией позитронов позволяет с высокой точностью определять структуру, дефекты изучаемых материалов.

Алмаз является наиболее перспективным широкополосным полупроводником благодаря своей кубической кристаллической структуре и прочным ковалентным связям атомов углерода, а также рекордно высокой атомной плотности. Однако многие уникальные свойства и перспективы высокотехнологичного применения алмазов определяются наличием и концентрацией различных типов дефектов их кристаллической решетки. Наличие дефектов в алмазе кардинально влияет на его физические свойства, изменяются механические, теплофизические, электромагнитные и квантовые свойства алмаза. Одним из таких уникальных свойств алмазов является возможность манипулировать спинами отдельных атомов, связанных с примесными дефектами. Дефекты вакансионного типа являются наиболее интересными из всех дефектов кристаллической решетки. Одним из таких дефектов является азотно-вакантный центр (NV-центр). NV-центр — это тип точечного дефекта в алмазе, при котором один атом углерода в кристаллической решетке алмаза заменен атомом азота, а соседний узел решетки остается вакантным. После открытия одиночных отрицательно заряженных центров стало возможным продемонстрировать фотостабильную генерацию одиночных фотонов, что позволило использовать NV-центры при реализации квантово-оптических сетей, а также для считывания спина электрона, что определяет такой NV-центр как

возможный твердотельный спиновый куб, подходящий для квантовой обработки информации и приложений в квантовом зондировании.

Сегодня позитронно-аннигиляционная спектроскопия, наряду с оптическими методами, является актуальным методом изучения NV-центров. Этот метод исследования чрезвычайно чувствителен к обнаружению дефектов на уровне кристаллической решетки. Уникальные возможности неразрушающего контроля могут быть получены с помощью монохроматического позитронного пучка. Изменяя его энергию, можно сканировать образцы на наличие дефектов по глубине с чрезвычайно высокой точностью. Этот метод был успешно использован для анализа дефектов в пластинах из синтетического алмаза, легированных азотом, которые возникают при электронном облучении. Основная цель исследования была направлена на определение типа и концентрации дефектов. Позитронно-аннигиляционная спектроскопия использовалась для определения наличия дефектов до и после облучения. Подповерхностные дефекты в алмазных пластинах и их профиль глубины были исследованы с использованием метода ДУАЛ.

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. M. Eseev, E. Ahmanova, V. I. Hilinov, P. Horodek, A. G. Kobets, V. V. Kobets, I. N. Meshkov, O. S. Orlov, A. A. Sidorin, K. Semek, Measurement of Monochromatic Positron Lifetime in a Continuous Flux, Physics of Particles and Nuclei Letters, December 2018, 15(7):975-976.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477118070026>

4. 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>

5. 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>

6. 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>.

7. 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>
8. 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>
9. Meshkov, I.N., Eseev, M.K., Kuziv, I.V. *et al.* Vacancy Determination in Single-Crystal Diamond Plates Using Positron Annihilation Spectroscopy. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **20**, 757–762 (2023).
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477123040507>
10. 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>