

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

Кобець Андрій Геннадійович

УДК 621.9.048.7

**РОЗРОБКА ТА СТВОРЕННЯ ДЖЕРЕЛА НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ
ПОЗИТРОНІВ І ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТОЧКОВИХ
ДЕФЕКТІВ В КОНДЕНСОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить
результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів
інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

Науковий керівник:

Член-кореспондент НАН України,
доктор фіз.-мат. наук,
професор

Клепиков Вячеслав Федорович

А.Г. КОБЕЦЬ
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Кобець А.Г. Розробка та створення джерела низькоенергетичних позитронів і електронів для діагностики точкових дефектів в конденсованих середовищах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена розробці та виготовленню джерела позитронів низької енергії. На сьогоднішній день ряд прикладних завдань фізики твердого тіла вимагає використання чутливих інструментів дослідження, здатних виявляти відсутність атомів в кристалічній решітці матеріалу. Таким інструментом є позитронна анігіляційна спектроскопія (ПАС). Розроблене джерело повільних позитронів із сповільнювачем на основі твердого неону дає можливість одержувати потоки повільних позитронів з інтенсивностями до $5 \cdot 10^6$ e⁺/сек. Розроблений канал позитронної спектроскопії дозволив реалізувати метод доплерівського розширення анігіляційної лінії. Досліджено концентрації дефектів типу "вакансія", що виникають в нержавіючій сталі після піскоструминної обробки, а також в алюмінії після впливу сильнотривового електронного пучка. Оцінено вплив радіаційно-термічної обробки сплаву на основі заліза на коефіцієнт вторинної емісії. Досліджено процес накопичення та збільшено час життя позитронів у пастці. Також досліджено механізми, що впливають на час життя циркулюючого пучка в накопичувачі LEPTA. Запропоновані доопрацювання вакуумної та магнітної систем накопичувача дозволили збільшити час життя циркулюючого пучка на порядок. Проведені доопрацювання дозволять надалі отримати потік атомів позитронію, який може бути використаний для уточнення базових фізичних принципів, наприклад, зарядів позитрона і електрона.

Внаслідок проведення дослідження за темою дисертаційної роботи одержані такі наукові результати:

1. Із застосуванням низькотемпературного конденсату неону нанесеного на титанову фольгу, що оточує ізотоп ^{22}Na , створено джерело позитронів з керованою енергією, яке дозволяє здійснювати зондування початкових фаз утворення дефектів типу вакансії та міжвузловинні атоми в металах і сплавах, що утворюються під дією опромінення та механічних впливів. Розроблено та створено систему одержання позитронію як об'єкту для перевірки базових фізичних постулатів фізики конденсованого стану, а саме, теореми про порушення зарядової парності, принципу калібрувальної інваріантності.

2. Вивчено особливості внеску різноманітних процесів на поглинання частинок оточуючим середовищем та фізичними полями, а саме, атомами залишкового газу в прискорювальній камері та розсіюванням на неоднорідностях магнітного поля.

3. Розроблено конструкцію шин зворотного струму для соленоїдів, розроблено систему корегуючих котушок повздожнього магнітного поля, а також конструкцію водо охолоджувального спірального квадруполя, що дозволило зменшити неоднорідності магнітного поля на стиках соленоїдів та поліпшити вакуумні умови в секції охолодження.

4. Оцінено вплив радіаційно-термічної обробки сталей на значення коефіцієнта вторинної електронної емісії.

4.3 метою збільшення часу життя позитронів та з'ясування ролі органічних домішок в поглинання позитронів розроблено конструкцію криогенного екрану, який виконує функцію температурного конденсатора домішок. Це дало можливість покращити показники вакууму та збільшити кількість накопичуваних позитронів та побудувати 3D-модель, що описує накопичення частинок в пастці.

5. Розроблено канал позитронної анігіляційної спектроскопії на основі методу доплерівського уширення анігіляційних ліній. Доведено чутливість методу до ідентифікації дефектів, що утворюються в алюмінієвому сплаві

внаслідок ударно-хвильової дії сильнострумowego релятивістського електронного пучка. Доведена здатність каналу спектроскопії виявляти заглиблені точкові дефекти в нержавіючій сталі, що була піддана впливу під певним кутами піскоструминною обробкою.

Практичне значення роботи полягає у розробці та створенні джерела позитронів а також створений канал позитронної анігіляційної спектроскопії дозволять одержувати нові важливі знання про фізичні механізми еволюцій накопичення радіаційних дефектів в матеріалах корпусів ядерних реакторів. Завдяки високій точності ідентифікації дефектів типу вакансій та міжвузловинних атомів розроблені методи дадуть можливість зрозуміти механізми таких явищ в оболонках тепловидільних елементів АЕС, як радіаційний ріст та розпухання, таким чином даючи можливість обґрунтування більш високого відсотку вигорання ядерного палива.

За темою дисертації здобувачем у співавторстві опубліковано 10 статей у провідних зарубіжних фахових наукових журналах, що входять до науково метричної бази Scopus, та 9 матеріалів та тез доповідей вітчизняних і міжнародних конференцій.

Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 138 найменувань та двох додатків. Зміст досліджень викладено на 160 сторінках, включаючи 65 рисунка та 11 таблиць.

Ключові слова: пучок, позитронна спектроскопія, позитрон, кристалічна решітка, алюміній, електронна гармата, вакуумна камера, соленоїд.

ABSTRACT

Kobets A.G. Development and creation of a source of low-energy positrons and electrons for diagnostics of point defects in condensed matter. – Manuscript.

Thesis for a Candidate's degree in technical sciences by specialty 01.04.07 – Solid State Physics. – Institute of Electrophysics and Radiation Technologies of NAS of Ukraine. – Kharkiv. – 2020.

The thesis is devoted to the development and manufacture of low-energy positron source. Today, a number of applied problems in solid state physics require the use of sensitive research tools that can detect the absence of an atom in the crystal lattice of material. Such a tool is Positron annihilation spectroscopy (PAS). Positron annihilation spectroscopy allows detecting structural defects with size ranging from single vacancy up to pores and concentration over 1 ppm. Nowadays, this technique is of a great interest due to the practical character of obtained results. It is successively applied to the field of solid state and applied physics, chemistry, material science and surface engineering. Developed source of slow positrons with a moderator based on solid neon. The neon gas condenses on the work surface, which is cooled to a temperature of 5.5 K. The developed positron source design is cooled using a cryocooler. In contrast to the design with liquid helium cooling, this system requires significantly less time to cool the source to operating temperature. The maximum flux of slow positrons reaches $5 \cdot 10^6$ e⁺/s. Measurement of the defect concentration distribution for the test sample requires 1 hour. The developed positron spectroscopy channel made it possible to implement the Doppler broadening method of the annihilation line. In contrast to the standard PAS method using a positron source, this spectrometer allows us to study thin films. The energy of positrons is regulated in the range from 50 eV up to 30 keV. This makes it possible to adjust the depth of penetration of positrons in the sample from tens of nanometers to units of microns. The concentrations of "vacancy" type defects that occur in stainless steel

after sandblasting, as well as in aluminum after exposure to a high-current electron beam are studied. It was found that sandblasting creates vacancy-type defects in the subsurface layer, but does not introduce defects into the material surface itself. In modern accelerators, there is the problem of the accumulation of electron clouds. The electron clouds that are present in accelerators and colliders with a high-intensity beam form a positive feedback, which excites the instability of the beams. The main cause of the occurrence of electron clouds is the secondary electron emission from the walls of the vacuum chambers of accelerators. To reduce the secondary emission coefficient, the walls of the vacuum chambers are subjected to various treatments. The effect of radiation-heat treatment of an iron-based alloy on the secondary emission coefficient is estimated. The process of particle accumulation using a rotating electric field was investigated, which allowed us to make an assumption about the principle of the mechanism of compression of the accumulated bunch, and also increased the lifetime of the accumulated positrons in the trap. The mechanisms that influence the lifetime of the circulating beam in the LEPTA storage ring are also investigated. It was found that the main factors that reduce the lifetime are the scattering of particles on the residual gas molecules and on the inhomogeneities of the magnetic field. Magnetic fields were measured at the joints of the solenoids and significant inhomogeneities were found. To eliminate these inhomogeneities, the reverse current bus design was developed, which allowed the currents to be evenly distributed and controlled. A system of longitudinal magnetic field correction coils has also been developed. To improve the vacuum conditions in the cooling section, a water-cooled spiral quadrupole design has been developed. The proposed improvements to the vacuum and magnetic systems allowed increasing the lifetime of the circulating electron beam up to 170 microseconds. These improvements will allow us to obtain a flow of positronium atoms in the future, which can be used to refine the basic physical principles, for example, the charges of a positron and an electron. Vacuum conditions in the positron trap were studied, and the composition of the residual gas was measured. The presence of organic molecules that can reduce the lifetime of positrons in the trap has been detected. To further study the effect of

vacuum conditions on the lifetime of positrons in the trap, a special cryogenic screen was developed. It is a surface that is located in the accumulation area and can be cooled to a temperature of 77K. It was found that cooling the screen to the operating temperature significantly improves the vacuum conditions in the accumulation area and increases the lifetime of positrons. The use of a cryogenic pump with a working surface temperature of 10 K did not give an additional increase in life time, but allowed to operate at a higher buffer gas pressure. The buffer gas is nitrogen. It is necessary for the process of accumulation of positrons. Positrons lose energy in inelastic collisions with buffer gas molecules and are unable to overcome the potential barrier and leave the trap. As the buffer gas pressure increases, the positron capture coefficient also increases. This allowed us to start a detailed study of the process of positron accumulation and the influence of the RW field on this process. The method of torque RW-the field is widely used in traps such as Penning-Malmberg-Surko. The mechanism of action of the RW-field on the accumulated cloud was not previously described. A 3D model was proposed that explains the mechanism of beam compression by a rotating RW-field.

As a result of the research on the topic of the dissertation, the following scientific results were obtained:

1. Using a low-temperature neon condensate deposited on a titanium foil that surrounds the ^{22}Na isotope, a source of positrons with controlled energy was created, which allows probing the initial phases of formation of defects such as vacancies and interstitial atoms in metals and alloys formed under the influence of irradiation and mechanical influences. A system for obtaining positrons as an object for testing the basic physical postulates of condensed matter physics, namely, the charge parity violation theorem and the calibration invariance principle, has been developed and created.

2. The features of the contribution of various processes to the absorption of particles by the environment and physical fields, namely, the residual gas atoms in the near-universal chamber and scattering on the inhomogeneities of the magnetic field, are studied.

3. Developed tire designs reverse current for solenoids, developed a system of correction coils a longitudinal magnetic field and the design water refrigeration helical quadrupole, thus reducing the magnetic field inhomogeneity at the junctions of solenoids and to improve the vacuum conditions in the cooling section.

4. The influence of radiation-heat treatment of steels on the value of the secondary electronic emission coefficient is estimated.

4. In order to increase the lifetime of positrons and find out the role of organic impurities in the absorption of positrons, a cryogenic screen has been developed that serves as a temperature capacitor for impurities. This made it possible to improve the vacuum parameters and increase the number of accumulated positrons and create a 3D model describing the accumulation of particles in the trap.

5. A positron annihilation spectroscopy channel was developed based on the Doppler broadening of annihilation lines. The sensitivity of the method to the identification of defects formed in an aluminum alloy due to the shock-wave action of a high-current relativistic electron beam is proved. Proven ability of the spectroscopy channel to detect buried point defects in stainless steel exposed at certain angles by sandblasting.

The practical importance of work consists in development and establishing sources of positrons, and created channel for positron spectroscopy will allow us to obtain new important knowledge of the physical mechanisms of the evolution of accumulation of radiation defects in materials of nuclear reactor vessels. Due to the high accuracy of identification of defects such as vacancies and small-node atoms, the methods developed will make it possible to understand the mechanisms of such phenomena in the shells of nuclear power plant fuel elements as radiation growth and swelling, thus making it possible to justify a higher percentage of nuclear fuel burnout.

On the topic of the dissertation, the applicant co-authored 10 articles in leading foreign scientific journals included in the scientific and metric database of Scopus, and 9 materials and abstracts of reports of domestic and international conferences.

The thesis consists of an introduction, 5 sections, conclusions, a list of used sources including 138 items and 2 supplements. The content of the research is presented on 160 pages, including 65 figures and 11 tables.

Keywords: beam, positron spectroscopy, positron, crystal lattice, aluminum, electron gun, vacuum chamber, solenoid.

Список публікацій здобувача:

1. V. K. Antropov, E. B. Boltushkin, A. V. Ivanov, S. A. Ivashkevich, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, V. I. Lokhmatov, I. N. Meshkov, V. N. Pavlov, R. V. Pivin, I. A. Seleznev, A. O. Sidorin, A. V. Smirnov, E. M. Syresin, G. V. Trubnikov, S. L. Yakovekno, Project LEPTA: First Experiments with an Electron Beam. *Particles and Nuclei, Letters*. 2005. V. 3, № 3(126). pp. 19-23.
2. V. F. Bykovsky, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, V. N. Malakhov, I. N. Meshkov, V. N. Pavlov, I. A. Seleznev, A. O. Sidorin, V. G. Shmarovoz, S. L. Yakovenko, Positron Injector for Accumulator LEPTA. *Particles and Nuclei, Letters*. 2006. V. 3, №7(136), pp. 65-69.
3. E. V. Akhmanova, V. F. Bykovsky, M. K. Eseev, A. G. Kobets, V. I. Lokhmatov, I. N. Meshkov, V. N. Pavlov, R. V. Pivin, A. Yu. Rudakov, A. A. Sidorin, S. L. Yakovenko, Progress in LEPTA Project. *Particles and Nuclei, Letters*. 2010. V. 7, № 7(163). pp. 814-820.
4. Ahmanova E.V., Eseev M.K., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Yu., Sidorin A.A., Yakovenko S.L., LEPTA Project: Forming and Injection of Positron Beam. *Particles and Nuclei, Letters*. 2012. V. 9, №4-5(174-175). pp. 618-623.
5. Eseev M. K., Kobets A. G., Meshkov I. N., Rudakov A. Y., & Yakovenko S. L., Study of nonneutral plasma storage in a magnetic trap with a rotating electric field at the lepta facility. *Plasma Physics Reports*, (2013). 39(10), pp. 787–794. doi:10.1134/s1063780x13100036.
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. *Particles and Nuclei, Letters*. 2014. V. 11, № 5(189). pp. 1092-1098.
7. Eseev M.K., Kobets A.G., Meshkov I.N., Sidorin A.A., Orlov O.S., Mechanism of accumulation of charged particles in a penning-Malmberg-Surko trap with a rotating electric field. *JETP Letters*, 102 (5), pp.291–296 (2015).

8. A.G.Kobets, P.R. Horodek, Yu. F.Lonin, V.V. Lytvynenko, A. G.Ponomarev, O.A. Startsev, V.T. Uvarov, Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 51.- № 5.-2015.- pp. 478-482.
9. 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).
10. Horodek P., Siemek K., Dryzek J., Kobets A. G., Wróbel M., Positron Annihilation and Complementary Studies of Stainless Steel Exposed to Sandblasting at Different Angles. *Tribology Letters*, (2017), 65(1) doi:10.1007/s11249-017-0813-0.
11. Bykovsky V. Ahmanova E., Kaplin V.I., Karpinsky V.N., Kobets A., Lokhmatov V., Malakhov V., Meshkov I., Pivin R., Rudakov A., Trubnikov G., Yakovenko S., Status of the LEPTA project. *Proc. of RuPAC 2008, (CERN: JACoW)* pp. 101-103.
12. Eseev M.K., Ahmanova E.V., Vititnev A.N., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Yu. , Sidorin A.A., Yakovenko S.L., Compression and Confinement of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility. *Proc. of RUPAC2012, (CERN: JACoW)* pp. 319–321.
13. Ahmanova E., Kaplin V., Karpinsky V., Lokhmatov V., Meshkov I., Pavlov V., Rudakov A., Sidorin A.A., Yakovenko S., Kobets A., Eseev M., LEPTA project: Towards positronium. *Proc. of RuPAC2012, (CERN: JACoW)* pp. 316-318.
14. E. Ahmanova, M. Eseev, A. Kobets, V. Lokhmatov, I. Meshkov, O. Orlov, V. Pavlov, A. Rudakov, A.A. Sidorin, S. Yakovenko., LEPTA project: towards positronium. *Proc. of COOL2013, Murren, Switzerland, 2013, (CERN: JACoW)* pp. 119–120.
15. P. Horodek, A.G. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, Positron Annihilation Spectroscopy at the LEPTA Facility. *Proc. of 5th International Particle Accelerator Conference IPAC2014, Dresden, Germany, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-WEPRO107.*

16. Eseev M.K., Ahmanova E., Kobets A., Meshkov I., Orlov O., Sidorin A., Yakovenko S., Mechanism of Compression of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility. Proc. of RUPAC-2014, (CERN: JACoW) pp.20–22.
17. A.G.Kobets, P.R. Horodek, V.V. Lytvynenko, U.F. Lonin, A.G. Ponomarev, O. A. Startsev, V.T. Uvarov, Modification of aluminum alloy 1933 by the high-current electron beam irradiation. Proc. of the Int. Conf. Nanomaterials: application and properties.-Lviv.-2014.-vol.3.-No 1.-2014.- 01001 (3pp)
18. Ahmanova E., Drobin V., Horodek P., Meshkov I., Orlov O., Rudakov A., Seleznev V., Sidorin A.A., Yakovenko S., Kobets A., Eseev M., Lepta - The facility for fundamental and applied research. Proc. of RuPAC 2014, (CERN: JACoW) pp. 83-84.
19. O. S. Orlov, A. G. Kobets, I. N. Meshkov, A. A. Sidorin, V. I. Hilinov, SETUP FOR SECONDARY ELECTRON-ELECTRON EMISSION COEFFICIENT STUDY. Proc. of RuPAC RuPAC 2018, pp. 270-271.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	15
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ПОЗИТРОНІВ ТА ЕЛЕКТРОНІВ В ФІЗИЦІ ТВЕРДОГО ТІЛА ТА ПРИКЛАДНІЙ ФІЗИЦІ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	25
1.1. Накопичувачі заряджених частинок з поздовжнім магнітним полем	28
1.2. Електронне охолодження пучків заряджених частинок	31
1.3. Позитронна анігіляційна спектроскопія.....	35
1.4. Висновки до розділу 1. Постановка задачі:.....	51
РОЗДІЛ 2. ПРИСКОРЮВАЛЬНО-НАКОПИЧУВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ЛЕРТА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПОЗИТРОНІЯ.	53
2.1. Накопичувальне кільце комплексу ЛЕРТА.....	55
2.2. Система електронного охолодження комплексу ЛЕРТА	60
2.3. Тестування структури накопичувального кільця комплексу ЛЕРТА	64
2.4. Інжектор позитронів комплексу ЛЕРТА	69
2.5. Висновки до розділу:	74
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ТА ТВЕРДОТІЛЬНИХ ЕФЕКТІВ НА ПРОЦЕСИ НАКОПИЧЕННЯ ТА ФОКУСУВАННЯ ЧАСТИНОК.	75
3.1. Формування магнітного поля накопичувача.....	75
3.2. Вакуумні умови в Накопичувачі ЛЕРТА.....	82
3.3. Тестування системи інжекція.	85
3.4. Стенд для дослідження матеріалів методом вторинної електрон-електронної емісії.....	88

	14
3.5. Висновки до розділу:	93
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ НАКОПИЧЕННЯ І	
УТРИМАННЯ ПОЗИТРОНІВ В ІНЖЕКТОРІ	94
4.1. Поліпшення вакуумних умов у вакуумній камері.....	94
4.2. Дослідження динаміки в пастці.....	97
4.3. Висновки до розділу:	105
РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ КАНАЛУ ПАС ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ	
РАДІАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В СПЛАВАХ.....	107
5.1. Канал ПАС спектроскопії	107
5.2. Спектрометр ДУАЛ	110
5.2. Криогенне джерело повільних позитронів.....	111
5.3. Спеціалізований канал повільних позитронів (СКПП)	118
5.4. Застосування джерела позитронів для визначення концентрації дефектів в зоні термопружного впливу електронного пучка на алюмінієвий сплав.	123
5.5. Використання джерела повільних позитронів для дослідження дефектів в нержавіючій сталі 304 AISI після піскоструминної обробки.....	132
5.6. Висновки до розділу:	136
ВИСНОВКИ	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
ДОДАТОК А.....	155
Список публікацій здобувача за темою дисертації	155
Апробація результатів дисертації	157
ДОДАТОК Б.....	159
Документи, що підтверджують використання результатів	159

Перелік умовних позначень і скорочень

ПАС – позитронна анігіляційна спектроскопія

КрДПП – криогенне джерело повільних позитронів

СКПП – спеціалізований канал повільних позитронів

PALS – Positron annihilation lifetime spectroscopy

СВ – синхротронне випромінювання

СРЕП – сильнотрумовий релятивістський електронний пучок

LEPTA -- Low Energy Particle Toroidal Accumulator

СЕО – система електронного охолодження

ШЗС – шини зворотного струму

ОІЯД – Об'єднаний інститут ядерних досліджень

ВЕЕ – вторинна електронна емісія

ДУАЛ – доплерівське розширення анігіляційної лінії

РЕМ – растровий електронний мікроскоп

β^+ - розпад з випусканням позитрону

Ps – позитроній

B_0 – напруженість поздовжнього магнітного поля

E – напруженість електричного поля

$I_{кол}$ – струм колектора

f_{rev} – частота обертів пучка у накопичувачі

f_{bet} – частота бетатронних коливань

$\Delta B/B$ – неоднорідність магнітного поля

q – заряд

σ – коефіцієнт вторинної електронної емісії

RW – обертаюче електричне поле

τ – час життя

ε – коефіцієнт захвату частинок

N_{bunch} – кількість частинок у згустку

S – параметр, що визначає пропорцію анігіляцій позитронів з низькими імпульсами

W – параметр, що відображає анігіляцію позитронів з високоімпульсними електронами

Вступ

Актуальність дослідження. На теперішній час вирішення низки прикладних задач фізики твердого тіла, зокрема, модифікації поверхні, синтезу функціональних матеріалів, прогнозування поведінки ядерних матеріалів потребує застосування тонких інструментів та методів вивчення еволюції дефектів. Ця задача успішно вирішується методами позитронної анігіляційної спектроскопії (ПАС). Цей вид спектроскопії дозволяє визначати природу і концентрації точкових і протяжних дефектів кристалічної решітки, вивчати порушення поверхневих шарів і поверхневих станів в металах, сплавах, напівпровідниках і інших речовинах.

ПАС включає спектроскопічні методи, призначені для спостереження позитрон-електрон анігіляції. На початку дослідження позитронів (1930-ті, 1940-ті роки) ці методи служили для вивчення самого процесу анігіляції. Пізніше було усвідомлено, що за допомогою позитронів можна також досліджувати середовище, в якому відбувається анігіляція. Звичайні джерела позитронів забезпечують позитрони з кінетичною енергіями близько від 10 еВ до 0,54 МеВ, тобто набагато вище теплових енергій при звичайних температурах.

В даний час існує два методи отримання позитронів. Перший полягає у використанні β^+ - активних ізотопів, наприклад, ^{22}Na . Цей метод добре підходить для невеликих лабораторій, де обмежений простір і немає необхідності отримання великих інтенсивностей позитронів. Другий метод заснований на утворенні позитрон-електронних пар високоенергетичним γ - випромінюванням. Для такого способу необхідні установки великого розміру, такі, як лінійні прискорювачі або ядерні реактори. Однак, незалежно від способу отримання позитронів, їх енергетичний спектр дуже широкий і може досягати декількох МеВ. Тому отримані позитрони повинні бути уповільнені (охолоджені) перш ніж можуть бути використані для ПАС. В експериментальних установках використовують спеціальні матеріали, які

називають сповільнювачами або модераторами. Їх встановлюють близько до джерела позитронів щоб отримати пучок з малим розміром і максимальною інтенсивністю. Для цих цілей підходять метали з негативною роботою виходу позитрона, наприклад, вольфрам або тверді рідкісні гази (головним чином Ne). Таким чином, для отримання високих інтенсивностей повільних позитронів необхідна наявність інтенсивного позитронного джерела, ефективного модератора, а також оптимізована геометрія самого пристрою вилучення позитронів після уповільнення.

Наступним кроком є одержання позитронію, як модельного об'єкту для вивчення фундаментальних фізичних принципів. Оскільки для вирівнювання енергії потоку позитронів застосовується ефект електронного охолодження, цілком доречним є розвиток суміжного напрямку. Таким чином ми виходимо на певну єдність природничо-наукового опису Природи, що наочно проявляється в тісному взаємозв'язку різних напрямків фізики. Про це свідчить і універсальність польового підходу в фізичних науках: від фізики твердого тіла до фізики елементарних частинок і високих енергій. Ця універсальність ґрунтується на симетричних методах, зокрема, калібрувальному принципі, який є головним відкриттям в фізиці останніх десятиріч. Калібрувальна інваріантність в фізиці конденсованого стану, електрофізиці та фізиці пучків заряджених частинок стає, таким чином, основною проблемою фізики. Реалізація вказаних задач стикається також з проблемою вторинної електронної емісії (ВЕЕ) зі стінок камер прискорювальних секцій. Коефіцієнт ВЕЕ визначається внутрішньою будовою та елементним складом сплавів, з яких виготовлені секції. Для вибору матеріалу секції необхідно провести вивчення коефіцієнту ВЕЕ. Отже створення джерела низькоенергетичних позитронів та електронів є науково-технічною задачею, вирішення якої пов'язано з низкою рішень, важливих для прикладної фізики, фізики конденсованого стану, радіаційної фізики.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами темами.

Дослідження, які склали зміст дисертаційної роботи були виконані в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України в рамках таких держбюджетних науково-дослідницьких тем: «Критичні явища в сильновзаємодіючих анізотропних системах» (2012-2013), № держреєстрації 0112U007382; «Дослідження критичних явищ в ядерних системах і матеріалах на установках ОІЯД (LEPТА, NICA, ИЦ-100, ИБР-2М) і ЦЕРН (Експеримент ATLAS)» (2014-2015), № держреєстрації 0114U004168. «Розсіяння ядер на ядрах та дослідження матеріалів за допомогою пучків частинок змінної енергії» (2018-2020) № держреєстрації 0118U002166; «Розвиток комплексу спектроскопічних методів діагностики радіаційно-стимульованих структурно-фазових перетворень в конструкційних матеріалах ядерної енергетики та удосконалення теоретичних моделей» (2017-2021) № держреєстрації 0117 U002138. В усіх науково-дослідних роботах здобувач брав участь як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи – створення джерела низькоенергетичних позитронів та електронів для встановлення особливостей дефектної структури матеріалів, модифікованих дією радіаційних, термічних та механічних чинників.

Для виконання поставленої мети необхідно було виконати низку робіт з електрофізики та модифікування властивостей досліджуваних твердих тіл.

1. Здійснити аналіз застосування твердих тіл з різними значеннями гальмівної здатності для керування величиною енергії радіоактивних ізотопів, що генерують при розпаді спектр позитронів. Запропонувати методику одержання низькотемпературного конденсату інертного газу на поверхні радіоізотопного джерела. Виміряти спектр уповільнених позитронів. Обґрунтувати галузі застосування методу позитронної анігіляційної спектроскопії на основі створеного джерела позитронів.

2. Розробити систему інжекції позитронного згустку, одержуваного з криогенного джерела, в накопичувальне кільце з метою подальшого електронного охолодження і одержання позитронію. Розробити джерело

електронів на базі електронної гармати з заданими параметрами електронного пучка. Розробити електрофізичну систему утримання згустків позитронів.

3. Здійснити оцінку втрат частинок в результаті розсіювання на молекулах залишкових газів та на неоднорідностях магнітного поля. Розробити конструкцію шин зворотного струму соленоїдів накопичувача та конструкцію корегуючих котушок повздожнього магнітного поля з метою мінімізації втрат частинок.

4. Оцінити вплив радіаційно-термічної обробки сталей на значення коефіцієнта вторинної електронної емісії.

5. Розробити конструкцію та обґрунтувати вибір матеріалу для створення криогенного екрану, який виконує функцію адсорберу органічних молекул в вакуумній камері, де відбувається накопичення позитронів. Встановити вплив вакуумного екрану на час життя позитронів.

6. Розробити та створити канал для реалізації методу позитронної анігіляційної спектроскопії на основі доплерівського розширення анігіляційних ліній. Одержати результати з вимірювання дефектів на зразках сплавів, що були оброблені різноманітними фізичними впливами.

Об'єкт досліджень – процеси взаємодії позитронів з гальмівним екраном, магнітним полем та розрідженими газами. Анігіляція позитронів на технологічних дефектах в твердих тілах.

Предмет досліджень – конденсовані середовища, що служать уповільнювачами потоку позитронів, матеріалу систем, що утворюють електромагнітні поля для керування потоками частинок, дефекти в сплавах, утворені внаслідок радіаційної, термічної та механічної обробки.

Методи дослідження. Дослідження опромінених мішеней проводили на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM 840, опромінення проводили сильнострумним електронним релятивістським пучком електронів на прискорювачі ТЕМП – ННЦ Харківський фізико-технічний інститут; дослідження зразків, що були оброблені піскоструминним способом растровому електронному мікроскопі (PEM) Hitachi s-3500N і оптичному

профілометрі WYKO NT9300 (Veeco); позитронно-електронна анігіляційна спектроскопія здійснювалась за методом доплерівського розширення анігіляційних ліній.

Наукова новизна здобутих результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що в ній:

1. Вперше створено універсальне джерело низькоенергетичних позитронів на якому реалізована можливість проведення дослідження концентрації дефектів в твердих тілах типу міжвузловинних атомів та вакансій з можливістю варіювання глибини вимірювання, а також одержання позитронію як об'єкта верифікації базових фізичних принципів, зокрема, порушення зарядової парності.

2. Отримали подальший розвиток підходи зі створення джерела позитронів на основі застосування твердотільних модераторів енергії, β^+ - активного ізотопу ^{22}Na . Позитрони, що вилітають з енергією в широкому діапазоні до 0,54 MeV, сповільнюються, проходячи крізь тонку плівку твердого неону, замороженого на тонку титанову фольгу. Інтенсивність потоку уповільнених позитронів для цього джерела становить 1% від повного потоку, що при активності джерела 25 мКю забезпечує безперервний потік до $5 \cdot 10^6$ повільних позитронів в секунду у вузькому енергетичному діапазоні.

3. Удосконалено уявлення про комплекс твердотільних та електрофізичних чинників, які впливають на процес накопичення частинок в накопичувачі. З'ясована роль ефекту розсіювання на атомах залишкових газів через недосконалість вакууму. Встановлено вплив неоднорідностей магнітного поля, зумовлених конструкцією комутаційних секцій, та запропоновані підходи щодо їх усунення.

4. Оцінено вплив радіаційно-термічної обробки сталей на значення коефіцієнта вторинної електронної емісії.

5. Розроблено схему каналу позитронної спектроскопії на основі методу доплерівського розширення анігіляційних ліній. З застосуванням створеного каналу ідентифіковано режими піскоструминної обробки, що спричиняє

найбільше утворення дефектів вакансійного типу в підповерхневій зоні нержавіючої сталі, а також встановлена відмінність у концентрації дефектів, спричинених термопружним ефектом, від дії сильнострумового електронного пучка на алюмінієвий сплав.

Практичне значення роботи. Розроблені та створені джерела позитронів а також створений канал позитронної анігіляційної спектроскопії дозволять одержувати нові важливі знання про фізичні механізми еволюції накопичення радіаційних дефектів в матеріалах корпусів ядерних реакторів. Завдяки високій точності ідентифікації дефектів типу вакансій та міжвузловинних атомів розроблені методи дадуть можливість зрозуміти механізми таких явищ в оболонках тепловидільних елементів АЕС, як радіаційний ріст та розпухання, таким чином даючи можливість обґрунтування більш високого відсотку вигорання ядерного палива.

Особистий внесок здобувача. Здобувач особисто брав участь у складанні системи електронного охолодження і в первинному налаштуванні орбіти охолоджуючого електронного пучка. При його безпосередній участі були доопрацьовані елементи магнітної системи, поліпшені вакуумні умови в накопичувачі, а також розроблені і виготовлені елементи системи діагностики циркулюючого пучка. Здобувач брав участь у всіх експериментах з вимірювання часу життя циркулюючого пучка, а також здійснював першу інжекцію накопичених в пастці позитронів в кільце. Їм була запропонована і реалізована схема слабкострумового режиму роботи електронної гармати для імітації позитронного струму при вивченні процесу накопичення в пастці. Їм запропоновані і здійснені дії щодо поліпшення вакуумних умов в пастці позитронів, що дозволило збільшити час життя накопиченого згустку позитронів. За його участю і під його керівництвом було розроблено, виготовлено і введено в експлуатацію нове кріогенне джерело позитронів. А також розроблений, виготовлений і введений в експлуатацію канал повільних позитронів для ПАС. Здобувач бере участь у всіх експериментах з

використанням пучка позитронів як на етапі підготовки установки, так і під час збору даних при дослідження методом ПАС.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи пройшли апробацію на таких конференціях та семінарах: IX European Particle Accelerator Conference, EPAC'04, Switzerland; XIX Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2004, Russia; XX Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2006, Russia; XXI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2008, Russia; XXII Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2010, Russia; XXIII Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2012, Russia; Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'07, Germany; Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'09, China; Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'11, Ukraine; Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'13, Switzerland; Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'15, USA; The 10-th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry, Slovakia; VI Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, Ukraine; VII Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, Ukraine; VIII Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, Ukraine; IX Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, Ukraine; 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications, SLOPOS'15, Czech Republic; XV Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів, Харків, Україна; XXV Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок, Харків, Україна; XII-th International Conference on Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons, ION'2018, Poland; International Conference Nanomaterials: application and properties, Lviv, 2014; International Conference Nanomaterials: application and properties, Odesa, 2019; 20-th International Conference on Radiation Effects in Insulators, Kazakhstan, 2019.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 19 наукових працях. З них: 10 статей у закордонних наукових фахових виданнях, що входять до міжнародної бази Scopus; 9 тез та матеріалів фахових конференцій і семінарів.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Роботу викладено на 160 сторінках, з яких 114 сторінок основного тексту.

РОЗДІЛ 1.

ЗАСТОСУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ПОЗИТРОНІВ ТА ЕЛЕКТРОНІВ В ФІЗИЦІ ТВЕРДОГО ТІЛА ТА ПРИКЛАДНІЙ ФІЗИЦІ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

Єдність природничо-наукового опису Природи наочно проявляється в тісному взаємозв'язку різних напрямків фізики. Про це свідчить і універсальність польового підходу в фізичних науках: від фізики твердого тіла до фізики елементарних частинок і високих енергій. Ця універсальність ґрунтується на сіметрійних методах, зокрема калібрувальному принципі, який є головним відкриттям в фізиці останніх десятиріч. Калібрувальна інваріантність в електрофізиці та фізиці пучків заряджених частинок стає, таким чином, основною проблемою фізики [1, 2].

Прискорювачі заряджених частинок стали невід'ємним інструментом сучасної фізики. За визначенням прискорювач заряджених частинок - це пристрій для отримання заряджених часток високих енергій. Прискорення в таких пристроях отримують за допомогою електричного поля, а магнітне поле використовують для утримання заряджених частинок на заданій траєкторії. Сучасна прискорювальна техніка дуже різноманітна. Але незалежно від того який вид прискорення застосований в даному випадку (високовольтне, індукційне або високочастотне), або який тип прискорювача (циклічний або лінійний), всі ці пристрої об'єднує одне - на виході є пучок заряджених частинок із заданими параметрами (струмом, енергією, поперечним розміром). Нові завдання сучасної експериментальної фізики вимагають пучків заряджених частинок з високими і надвисокими енергіями. Це призводить до того, що розміри прискорювачів ростуть геометрично. Під певні завдання будують цілі прискорювальні комплекси. Наприклад, проект FAIR (Facility for

Antiproton and Ion Research) об'єднує в собі відразу кілька лінійних і циклічних прискорювачів [3]. Будівництво таких масштабних проектів сьогодні вже не під силу жодній країні ні фінансово, ні фізично. Потрібна широка колаборація країн із залученням фахівців і засобів. Найяскравішим прикладом такого міжнародного співробітництва служить Великий Адроний Колайдер в ЦЕРНі [4]. У його створенні брали участь велика кількість вчених і інженерів з більш ніж 100 країн, а головним фізичним результатом роботи стало відкриття бозона Хіггса в 2012р. [5]

Крім прискорювачів на високі і надвисокі енергії, призначені для фундаментальних наукових досліджень, не менше затребувані прискорювачі на середні і низькі енергії. Такі прискорювачі широко застосовуються для прикладних цілей. Останнім часом набули розвитку радіаційні технології. Прискорювачі застосовуються в медицині для променевої терапії, стерилізації, виробництва трекових мембран, напрацювання радіоізотопів. У промисловості отримала розвиток радіаційно-хімічна технологія. З її допомогою отримують різні радіаційно-модифіковані матеріали, проводять радіаційну полімеризацію і т. ін. Пучкові технології застосовують для очищення стічних вод, для неруйнівного контролю в доглядових митному обладнанні, для дефектоскопії матеріалів [6]. У Таблиці 1.1 наведені основні області застосування електронних прискорювачів [7].

Одним з методів неруйнівного контролю є метод позитронної анігіляційної спектроскопії (ПАС). Цей вид спектроскопії дозволяє визначати природу і концентрації точкових і протяжних дефектів кристалічної решітки, вивчати порушення поверхневих шарів і поверхневих станів в металах, сплавах, напівпровідниках і інших речовинах [8].

Таблиця 1.1

Практичні застосування електронних прискорювачів

Модифікування матеріалів	<ul style="list-style-type: none"> - Виробництво кабелів і проводів з радіаційно-зшитою ізоляцією; - Виготовлення зміцнених і термоусадних виробів; - Вулканізація еластомерів і виробів з них.
Полімеризація	<ul style="list-style-type: none"> - Отвердіння покриттів; - Виробництво модифікованих пористих матеріалів.
Радіаційна деструкція	<ul style="list-style-type: none"> - Отримання кормів і кормових добавок з целюлозо містких відходів; - Регулювання молекулярної маси полімерів; - Деструкція тефлону і гум.
Стерилізація медичних виробів	<ul style="list-style-type: none"> - Стерилізація медичних виробів одноразового користування; - Стерилізація фармацевтичних препаратів; - Стерилізація органів і тканин, які використовуються в імплантаційній хірургії.
Охорона навколишнього середовища	<ul style="list-style-type: none"> - Очищення питної води; - Очищення стічних вод і осадів стічних вод; - Очищення викидних газів; - Обробка твердих відходів.
Радіаційна обробка харчових продуктів	<ul style="list-style-type: none"> - Уповільнення проростання овочів при зберіганні; - Дезінсекції зерна і фруктів; - Стерилізація м'ясних продуктів.
Радіаційно-фізична технологія	<ul style="list-style-type: none"> - Легування напівпровідників; - Обробка виробів електронної техніки; - Зміна кольору кристалічних і скляних виробів; - Напрацювання радіоактивних ізотопів, віддалених від смуги β-стабільності.
Променева терапія злоякісних новоутворень	<ul style="list-style-type: none"> - Радикальна променева терапія; - Паліативна променева терапія; - Симптоматична променева терапія.
Променева терапія непухлинних захворювань	<ul style="list-style-type: none"> - Захворювання запального характеру; - Дегенеративна-дистрофічні процеси опорно-рухового апарату; - Невралгії, неврити, фантомні болі, хвороби шкіри та ін.
Інтраопераційна променева терапія	<ul style="list-style-type: none"> - Рак молочної залози; - Рак шлунку, ободової і прямої кишок; - Рак яєчників і тіла матки; - Стегенна саркома.
Неруйнівний контроль	<ul style="list-style-type: none"> - Інтроскопія легкових автотранспортних засобів вагою до 3-х тон; - Інтроскопія великогабаритних об'єктів (контейнерів, трейлерів, вагонів).
	<ul style="list-style-type: none"> - Неруйнівний контроль великогабаритних виробів в атомній, хімічній, нафтогазовій, суднобудівній промисловості (товщини контрольованих виробів в сталевому еквіваленті до 600 мм).

1.1. Накопичувачі заряджених частинок з поздовжнім магнітним полем

Ідея використовувати фокусуєче поздовжнє магнітне поле в циклічному прискорювачі з'явилася, як розвиток методу фокусування в звичайному бетатроні. Бетатрон є індукційним циклічним нерезонансним прискорювачем електронів, в якому енергія електронів збільшується за рахунок вихрового електричного поля, що створюється змінним магнітним потоком, спрямованим перпендикулярно до площини орбіти частинок. У звичайному бетатроні величина граничного значення струму інжекції обмежувалася ефектами власного поля пучка і малим значенням магнітного поля, що фокусує в момент інжекції. Введення додаткової поздовжньої компоненти магнітного поля дозволяє ефективно фокусувати інтенсивні пучки заряджених частинок з малою енергією. Циклічний прискорювач з такою фокусуванням отримав назву "модифікований бетатрон".

Експерименти по прискоренню електронів в бетатроні з додатковим тороїдальним полем вперше були здійснені в Великобританії після Другої Світової війни. Модифікований бетатрон є попередником термоядерних установок - токамаків і стелараторів, в яких також використовується фокусування поздовжнім магнітним полем. Однак сталої роботи першого бетатрону домогтися не вдалося, оскільки потік електронів після декількох оборотів потрапляв в стінку камери поблизу точки інжекції. Згадки про цю роботу можна знайти в [9].

У модифікованому бетатроні є проблема, яка полягає в зміні характеру стійкості руху частинок при переході від діапазону низьких енергій, де фокусування здійснюється в основному поздовжнім магнітним полем, до високих енергій, де фокусування забезпечено градієнтним, спадаючим по

радіусу поворотним полем. Для усунення цього недоліку може бути введено додаткове спіральне мультипольне поле. Такі прискорювачі були запропоновані в [10] і отримали назву "стелатрон".

В середині 80-х років ХХ століття в США велися роботи по створенню модифікованих бетатронів. До них відносяться - модифікований бетатрон університету Каліфорнії (UCI) [11], згодом переобладнаний в стелатрон; "Подовжений модифікований бетатрон" МЕВА [12]; модифікований бетатрон лабораторії військово-морського флоту [13], в якому також використовувалися додаткові стелараторні обмотки; розрізний модифікований бетатрон університету штату Нью-Мексико, в якому фокусування пучка здійснювалася системою соленоїдів з протилежним напрямком поля - CATE (Casp Array Transport Experiment) [14]. Роботи зі створення цих установок були припинені в середині 90-х років. На жодній з них не були отримані проектні параметри через складність схеми інжекції пучка в поздовжнє поле і резонанси, пов'язані з ларморовським обертанням електронів, які приводили до загибелі пучка на високих енергіях.

Схема накопичувача з поздовжнім магнітним полем була запропонована в 80-х роках минулого століття Інститутом Ядерної Фізики ім. Г.І. Будкера (Новосибірськ). Пропозиція з'явилася в зв'язку з розвитком ідеї генерації антиводню "на льоту". Схема такої установки [15] передбачала використання двох накопичувачів - антипротонів і позитронів, що мають загальну прямолінійну секцію, в якій обидва пучка поєднуються. При рекомбінації позитронів і антипротонів утворюються атоми антиводню. У цій схемі передбачалося використання для позитронів звичайного жорстко фокусуємого накопичувача. Але для постановки експериментів на потоках атомів антиводню оптимальна енергія атомів лежить в діапазоні десятків МеВ, що вимагає енергії позитронів всього в кілька кеВ. Забезпечення сталого руху частинок з такою низькою енергією в звичайному жорстко фокусуємому накопичувачі є скрутним. Для подолання цих труднощів в [16] було запропоновано використовувати для фокусування позитронів поздовжнє магнітне поле. Однак

авторам цієї роботи не вдалося знайти рішення проблеми інжекції позитронів в поздовжнє магнітне поле без значного збільшення їх поперечних швидкостей і суміщення циркулюючого позитронного пучка з охолоджуючим однопротітним електронним. Остання трудність виявилася принциповою, тому що для ефективної антипротон-позитронної рекомбінації необхідна низька температура частинок, що рекомбінують, що в області малих енергій може бути забезпечено тільки електронним охолодженням. При цьому електронне охолодження позитронів також супроводжується процесом рекомбінації електронів і позитронів, з утворенням спрямованого потоку позитронію, що дає додаткову можливість проведення експериментів з фізики позитронію в новій постановці.

Рішення було знайдено авторами робіт [17, 18], в яких була запропонована схема інжекції та суміщення замагніченого позитронного і електронного пучків (тобто таких, джерела яких занурені в поздовжнє магнітне поле).

Для забезпечення довготривалої стійкості руху було запропоновано використовувати спіральне квадрупольному полю. Запропонована схема накопичувача дозволяє здійснити стійкий рух пучка в діапазоні енергій до декількох МеВ. Тому на базі цієї схеми була запропонована також система електронного охолодження іонів циркулюючим електронним пучком для області високих, порядку декількох ГеВ, енергій [19].

З метою вивчення можливостей застосування модифікованого бетатрон для генерації позитронію і антиводню, а також для електронного охолодження циркулюючого пучка, в ОІЯД був створений накопичувач LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) [19], фізичний пуск якого з циркулюючим електронним пучком був здійснений у вересні 2004 р.

1.2. Електронне охолодження пучків заряджених частинок

В експериментальних дослідженнях, де використовуються пучки прискорених заряджених частинок, майже завжди важливо щоб ці пучки були монохроматичні. Частинки в пучку повинні мати малі швидкості відносно один одного, іншими словами, пучок повинен мати низьку температуру.

Охолодження пучків заряджених частинок дозволяє не тільки стискати і монохроматизувати їх, але і здійснювати накопичення частинок, додаючи нові в ті місця, що звільнилися у фазовому просторі. Особливо важливо отримувати інтенсивні пучки для проведення експериментів на зустрічних пучках.

Також охолодження дозволяє пригнічувати такі дифузійні процеси як розсіювання на залишковому газі. Домогтися підвищення фазової щільності пучка можна застосуванням різних заданих комбінацій зовнішніх електромагнітних полів. Фазова щільність частинок пучка є постійна, що визначається початковими умовами. За допомогою фокусувань і прискорення можна лише змінити форму фазового обсягу пучка. Для збільшення щільності обов'язково потрібно вводити якісь додаткові процеси дисипативного характеру. [20]

В даний час найбільш часто використовують чотири методи охолодження.

Радіаційне охолодження засноване на випромінюванні частинками, що рухаються в магнітному полі, синхротронного випромінювання [21]. Пропускання пучка через магнітне поле викликає його охолодження за рахунок втрати енергії на випромінювання. Для рівноважних частинок ці втрати компенсуються прискорювальною системою. Частинки з більшою енергією втрачають більше енергії, ніж отримують, і сповільнюються до рівноважних, а повільніші частки отримують більше енергії, ніж втрачають, і відповідно, прискорюються. Цей метод широко застосовується в установках на зустрічних

пучках електронів і позитронів для отримання пучків з високою інтенсивністю і з малими поперечними розмірами.

Лазерне охолодження засноване на взаємодії монохроматичного випромінювання з електронною оболонкою іона. Лазерне охолодження дозволяє отримувати розбіг енергії, відповідний температурі до тисячних часток Кельвіна в пучках або атомних пастках (іони у спокої). Ідея лазерного охолодження була реалізована в експериментах [22, 23] з охолодження іонів Mg_2 і Ba_2 до температур $\sim 10^{-2}K$ [24].

Метод *стохастичного охолодження*, запропонований С. Ван дер Меєром [25, 26], полягає в використанні широкосмугових радіотехнічних систем зворотних зв'язків, що дозволяє пригнічувати коливання кожної з частинок пучка. Інформація про відхилення окремих частинок від рівноважної орбіти отримується від їх електро-магнітного поля за допомогою пікап-електродів. Цей сигнал посилюється і подається в протифазі на спеціальний кікер-електрод і компенсує відхилення, що породило цей сигнал. Час обробки сигналу в радіотехнічному тракті має дорівнюватися часу прольоту частинки від пікапа до кікера.

При *іонізаційному охолодженні* використовуються втрати енергії часткою при її русі в речовині мішені за рахунок зіткнення з електронами. Іонізаційне охолодження обумовлено передачею енергії загального руху частинок пучка електронам, що містяться в мішені. Для електронів і позитронів такий вид охолодження свідомо не застосовується. При низьких енергіях багаторазове розсіювання йде швидше іонізаційного гальмування, а при високих енергіях основні енергетичні втрати радіаційні, які йдуть великими порціями. При охолодженні протонів і антипротонів основним фактором, що заважає при не надто малих енергіях є сильне ядерне взаємодія з ядрами мішені. Найцікавішим і перспективним є застосування іонізаційного охолодження до пучків мюонів. Для них практично відсутні радіаційні втрати і ядерна взаємодія.

Якщо замість електронів мішені використовувати електронний пучок, що рухається з середньою швидкістю охолоджуваних частинок, то ефективність

передачі електронам енергії, пов'язаної з відхиленнями від рівноважного руху, різко зростає, і не дивлячись на те, що щільність електронних пучків багато нижче щільності звичайних мішеней, час такого електронного охолодження може бути дуже малим. Метод електронного охолодження, широко застосовуваний в усьому світі для фокусування іонних пучків в прискорювачах елементарних частинок, був запропонований видатним фізиком Г.І. Будкером ще в 1966 р [27]. Суть пропонованого Г.І. Будкером методу охолодження полягала в тому, що пучок протонів і пучок електронів, рухаючись поряд з майже однаковими швидкостями, починають ефективно взаємодіяти за допомогою електромагнітних сил. Така взаємодія призводить до вирівнювання їх температур, тобто перетікання енергії теплового руху від протонного пучка до більш холодного електронного. При цьому, оскільки маса протона майже в дві тисячі разів більше маси електрона, швидкість його теплового руху і, відповідно, кутовий розкид пучка в десятки разів менше, ніж у пучка електронів [28].

Для перевірки методу було вирішено побудувати в ІЯФ (Новосибірськ) повномасштабну модель накопичувача антипротонів (з периметром кільця 47 метрів) і на ній провести експерименти з електронного охолодження. У 1971 р почалася практична реалізація ідеї. Проект отримав назву НАП-М - накопичувач антипротонів, модель. Загальна схема накопичувача приведена на рис.1.1 [29]. Охолоджувальні частки, що циркулюють в накопичувачі, проходять ділянку охолодження багаторазово, взаємодіючи кожен раз зі свіжою порцією електронів. Електронний пучок грає роль своєрідного "теплоносія", який відбирає тепло нагрітого тіла - пучка заряджених частинок - і переносе в радіатор - колектор електронів.

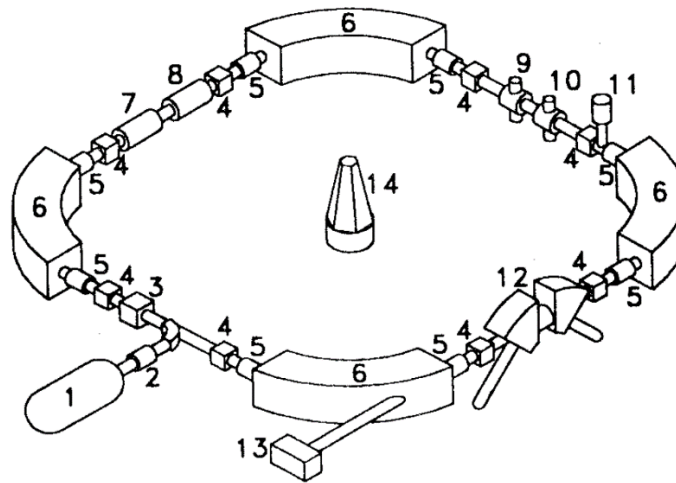


Рис.1.1. Схема накопичувача НАП-М: 1 - інжектор, 2 - канал інжекції, 3 - інфлектор, 4 - пікап-станція, 5 - квадрупольна лінза, 6 - поворотний магніт, 7 - прискорюючий резонатор, 8 - дефлектор збудження бетатрон коливань, 9 - кварцова нитка, яка перетинає пучок, 10 - паромагнієвий струмінь, 11 - сцинтиляційний лічильник реєстрації розсіяних ниткою протонів, 12 - установка електронного охолодження, 13 - детектор нейтральних атомів водню, 14 - геодезичний знак [29].

Установка має три прямолінійних ділянки, в двох з яких розташована гармата і колектор, третя ділянка є ділянкою охолодження, на якому протони рухаються разом з електронним пучком. Для формування і транспортування електронного пучка використовується поздовжнє магнітне поле, в якому знаходиться електронна гармата. Переходи між прямолінійними ділянками виконані у вигляді тороїдальних магнітів. Відцентровий дрейф в торах компенсується накладенням поперечного магнітного поля.

В установці застосовується рекуперация енергії електронів, тому споживана потужність високовольтного джерела живлення електронної гармати невелика [30].

Вперше електронне охолодження було здійснено в 1974 р [31]. Сьогодні метод електронного охолодження не втратив своєї цінності як метод формування пучків заряджених частинок. Навпаки, значимість методу збільшується і для формування і накопичення інтенсивних пучків з невеликим

емітансом метод електронного охолодження є єдиним способом. У таблиці 1.2 наведені параметри деяких діючих в світі систем електронного охолодження.

Таблиця 1.2

Параметри систем охолодження.

Науковий центр	Енергія електронів, кеВ	Струм охолоджуючого пучка, А	Магнітне поле в секції охолодження, кГс	Довжина секції охолодження, м
COSY, м.Юліх, Німеччина,[32]	25 - 2500	1 - 3	0,5 - 2	2,69
COSY, м.Юліх, Німеччина, [33]	20 - 30	1,5 – 2,7	0,84	2
Ланчжоу, Китай, [34]	4 - 35	3	1,5	4
Ланчжоу, Китай, [34]	10 -300	3	1,5	4
SIS18, GSI, Німеччина, [35]	≤ 7	0 – 1,5	1,5	3,4
ESR, GSI, Німеччина,[35]	2 - 220	0 – 1	1,5	2,5
CRYRING, GSI, Німеччина, [35]	≤ 8	0 – 0,15	3	1,1
ELENA, CERN, Швейцарія, [36]	0,355	0,005	-	1,93

1.3. Позитронна анігіляційна спектроскопія

В даний час ПАС добре відома як потужний інструмент мікроструктурних досліджень конденсованої речовини.

ПАС включає спектроскопічні методи, призначені для спостереження позитрон-електрон анігіляції. На початку дослідження позитронів (1930-ті, 1940-ті роки) ці методи служили для вивчення самого процесу анігіляції. Пізніше було усвідомлено, що за допомогою позитронів можна також досліджувати середовище, в якому відбувається анігіляція. Звичайні джерела

позитронів забезпечують позитрони з кінетичної енергіями від близько 10 еВ до 1 МеВ, тобто набагато вище теплових енергій при звичайних температурах.

Перед анігіляцією, позитрон, що проникає в матеріал зазнає різноманітних процесів, що впливають на стан з якого позитрон анігілює з електроном навколишнього середовища. При цьому високоенергетичні позитрони ($E_{\text{кінетич}} = 0,1 - 1 \text{ МеВ}$), що імплантуються в тверде середовище, швидко втрачають енергію. При високих енергіях позитронів механізм втрат енергії відбувається через іонізацію, тобто позитрон збуджує електрони ядерних оболонок в зіткненнях з вузловими атомами кристалічної решітки. Для більш низьких енергій позитронів переважає механізм електронно-діркового збудження. Коли енергія позитрона зменшується до значень порядку еВ, домінує розсіювання фононів. В кінцевому рахунку, позитрони досягають теплової рівноваги з середовищем, підтримуваної за рахунок фононного випромінювання і поглинання. В процесі термалізації, початкова кінетична енергія позитронів падає нижче 0,1 еВ, тобто майже на шість порядків [37]. Незважаючи на таку колосальну зміну енергії, час термалізації позитронів, як правило, коротше декількох піко секунд [38], тобто набагато менше в порівнянні з розрахунковим часом життя позитрона.

Після досягнення теплової рівноваги з атомами, позитронний стан розвивається як дифузний процес. В металах при кімнатній температурі середня довжина вільного пробігу позитрона зазвичай становить близько 10 нм, тоді як повна дифузійна довжина перед анігіляцією близько 100 нм [39].

Під час дифузії позитрон взаємодіє зі своїм оточенням і випадково анігілює з електроном середовища. В однорідному і вільному від дефектів матеріалі все позитрони анігілюють з постійним часом, яке є характеристикою даного матеріалу.

Через кулонівське відштовхування позитивними ядрами, позитрон в конденсованому середовищі живе в міжатомному просторі. При дефектах обсягу (моновакансія, великі кластери вакансій, дислокації і т. п.), потенціал, що сприймається позитроном, зменшується за рахунок зменшення

кулонівського відштовхування. В результаті, енергія позитрона локалізованого в дефекті може бути нижче, ніж у позитрона поза дефекту. Перехід від делокалізованого стану до локалізованого називається захопленням позитрона. Енергія захоплення позитрона таким дефектом, як моновакансія зазвичай становить кілька еВ [40].

В результаті такого захоплення позитрона в вимірюваному діапазоні часу життя з'являється додаткова експоненціальна компонента. Її поява може бути пояснена за допомогою моделей захоплень, з яких отримують рівняння швидкості анігіляції позитронів для локалізованого і нелокалізованого стану [41].

Таким чином, з усього вищесказаного можна сформулювати основні принципи на яких ґрунтуються дослідження ПАС. Коли позитрони потрапляють в матеріал, вони швидко досягають теплової рівноваги з навколишніми атомами. Перебуваючи в стані термалізації, позитрони випадково анігілюють з електронами речовини. Вимірювані параметри анігіляції відображають характеристики середовища, в якій сталася анігіляція. Вимірювані характеристики ПАС залежать від двох параметрів:

1) від стану електрона, що брав участь у реакції анігіляції. Це відображає стан електронної структури вузла кристалічної решітки;

2) від стану самого позитрона в момент анігіляції: вільний позитрон, позитрон захоплений дефектом або атом орто-позитронію.

У фізиці твердого тіла і матеріалознавстві ПАС стала нерушівною методикою дефектоскопії матеріалів, оскільки дефекти решітки, такі як вакансії, дислокації або присадки, в значній мірі визначають механічні, оптичні і електронні властивості матеріалів. Найбільш поширеними методами є позитронна анігіляційна спектроскопія на основі вимірювання часу життя позитронів в речовині (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy - PALS) і спектроскопія вимірювання доплерівського розширення анігіляційної лінії (Doppler Broadening Spectroscopy - DBS), яка має високу чутливість до дефектів кристалічної решітки. Оскільки позитрон зазвичай дифундує на сотні вузлів

кристалічної решітки до анігіляції, то його можна розглядати як надзвичайно чутливий нанозонд для виявлення, наприклад, концентрації одиночних вакансій до 10^{-7} вакансій на атом.

З появою моноенергетичних пучків позитронів з'явилася можливість досліджувати приповерхневий шар. Шляхом зміни енергії позитронів до 100 кеВ середня глибина імплантації позитронів може бути обрана між декількома нанометрами і декількома мікронами. Отже, відповідний досліджуваний об'єм визначається профілем імплантації позитронів, розмитим дифузійним рухом позитронів, який складає близько 100 нм для кристалів без дефектів, а також діаметром пучка позитронів, який зазвичай знаходиться в межах від 10 мкм до декількох мм. Таким чином, стало можливим дослідження типу і концентрації дефектів в залежності від глибини імплантації позитронів і за умови досягнення достатнього малого діаметра пучка. Тому за багато років були проведені численні експерименти з пучками позитронів, присвячені широкому спектру наукових проблем при вивченні структури дефектів приповерхневої області, в тонких плівках та багатошарових матеріалах [42-45].

1.3.1. Техніка експерименту ПАС.

В даний час існує два методи отримання позитронів. Перший полягає у використанні β^+ - активних ізотопів, наприклад, ^{22}Na . Цей метод добре підходить для невеликих лабораторій, де обмежений простір і немає необхідності отримання великих інтенсивностей позитронів. Другий метод заснований на утворенні позитрон-електронних пар високоенергетичним γ - випромінюванням. Для такого способу необхідні установки великого розміру, такі, як лінійні прискорювачі або ядерні реактори. Однак, незалежно від способу отримання позитронів, їх енергетичний спектр дуже широкий і може досягати декількох МеВ. Тому отримані позитрони повинні бути уповільнені (охолоджені) перш ніж можуть бути використані для ПАС. В експериментальних установках використовують спеціальні матеріали, які

називають сповільнювачами або модераторами. Їх встановлюють близько до джерела позитронів щоб отримати пучок з малим розміром і максимальною інтенсивністю. Для цих цілей підходять метали з негативною роботою виходу позитрона [46, 47], наприклад, вольфрам або тверді рідкісні гази (головним чином Ne). Таким чином, для отримання високих інтенсивностей повільних позитронів необхідна наявність інтенсивного позитронного джерела, ефективного модератора, а також оптимізована геометрія самого пристрою вилучення позитронів після уповільнення.

1.3.1.1. β^+ емітери.

Вибір відповідного джерела позитронів визначається різними граничними умовами, такими як період напіврозпаду, кінцева енергія і максимально доступна або практично можлива активність емітера β^+ . Існує велика кількість β^+ випромінюючих радіонуклідів з періодом напіврозпаду від багатьох років до часток секунди і спектрами енергій позитронів E_{\max} іж декількома 100 кеВ і декількома МеВ. У таблиці 1.3 наведені ізотопи, що застосовуються в дослідженнях [48].

Найбільш відомим джерелом позитронів є ^{22}Na , який має кілька переваг у порівнянні з усіма іншими радіонуклідами, таких як дуже високий вихід позитронів 90% і тривалий період напіврозпаду 2,6 року. У дослідах з позитронами особливо корисно для використання випромінювання швидкого високоенергетичного кванта β^+ , які використовують безпосередньо, як сигнал запуску для PALS. ^{22}Na виробляється на циклотронах або на прискорювачах в результаті реакції частинок мішеней Al або Mg при бомбардуванні протонами, дейтронами або α -частинками. Максимальна активність джерела обмежена часом опромінення і охолодженням мішені, а також доступним іонним струмом прискорювача.

Таблиця 1.3

Характеристики ізотопів

Ізотоп	Період напіврозпаду	Максимальна енергія позитронів, МеВ	Частка розпадів, %
^{22}Na	2.603 року	0.545	90.50
^{44}Ti	47.3 року	1.467	98
^{48}V	15.974 дн.	0.696	50.7
^{55}Co	17.54 ч	1.50	60
^{56}Co	78.76 дн.	0.421	1.03
^{57}Ni	36 ч	0.85	50.0
^{58}Co	0.79 дн.	0.475	15.05
^{64}Cu	12.703 ч	0.652	17.9
^{65}Zn	243.9 дн.	0.329	1.45
^{68}Ge	288 дн.	1.899	87.52
^{90}Nb	14.6 ч	1.50	54

1.3.1.2. Джерело позитронів на основі лінійного прискорювача.

На електронних лінійних прискорювачах гальмівне випромінювання з високою енергією вивільняється уповільненням електронів в пучку. Важкі мішені з танталу або вольфраму, які застосовуються для перетворення випромінювання в пари позитрон-електрон, повинні ефективно охолоджуватися для розсіювання тепла. Оскільки пучок електронів має розкид по енергії, то створений позитронний пучок також показує імпульсну структуру. В даний час існує декілька повільних пучків позитронів з використанням гальмівного випромінювання з релятивістських електронних пучків в діапазоні енергій від 10 МеВ до декількох ГеВ (Таблиця 1.4).

Наукові центри, що виробляють повільні позитрони на базі лінійних прискорювачів.

Науковий центр	Енергія електронного пучка, MeV	Середній струм електронного пучка I, мкА	Вихід повільних позитронів e^+/c
Giessen (Німеччина), [49]	65	100	10^6
Livermoore (США), [50]	100	600	10^{10}
Oak Ridge (США), [51]	150	400	10^8
Rosendorf (Німеччина), [52]	40	100	$3 \cdot 10^9$
КЕК (Японія), [53]	2500	2,5	$2 \cdot 10^9$

Генерація яскравих пучків повільних позитронів за допомогою *синхротронного випромінювання* (СВ) стала можливою з розвитком потужних джерел СВ, здатних генерувати інтенсивні потоки фотонів з енергією вище 1 МеВ. Спроба створення такого джерела здійснена на накопичувачі SPring-8 (Японія) [54], з енергією електронів 8 ГеВ, який є рекордним за характеристиками СВ. Джерело повільних позитронів також складається з мішені і сповільнювача у вигляді вольфрамових пластин. Як потужне джерело СВ використовувався унікальний надпровідний вігглер з полем 8-10 Тесла, виготовлений в ІЯФ ім. Г.І. Будкера [55]. Роботи довелося припинити через неприпустимо високий рівень СВ. Унікальність цього джерела повільних позитронів полягала в тому, що в ньому вперше передбачалося здійснити пряму конверсію жорсткої частини синхротронного випромінювання в позитрони. Очікувалася інтенсивність такого джерела порядку $10^{12} e^+/c$.

1.3.1.3. Матеріали, що використовуються як сповільнювач.

Широке використання β^+ -активних ізотопів почалося в кінці 70-х рр. минулого століття з розвитком технології ефективного формування монохроматичного потоку повільних позитронів з широкого β^+ -спектра ізотопу. Можливість уповільнення позитронів вперше була запропонована

Маданські і Разетті ще в 1950 р [56], але перший вдалий результат отриманий Черрі в 1958 р [57]. Він спостерігав позитрони з енергією менше 10 еВ, що емітуються з джерела ^{22}Na через слюду, покриту тонким шаром хрому. Ефективність перетворення спектра ε — відношення числа повільних позитронів з сповільнювача до повного числа швидких до уповільнення, була дуже низькою, $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-8}$. У 1972 р Костелло та ін. [58] експериментально підтвердили можливість термалізації позитронів в твердому тілі, спостерігаючи емісію позитронів з енергетичним піком між 0,75 і 2,90 еВ з сповільнювача, покритого золотом товщиною 0,02 мкм. Перший ефективний сповільнювач був розроблений в 1979 р Миллсом і Пфайфером [59]. Як сповільнювач використовувався кристал міді (111), поміщений разом з радіоактивним ізотопом в камеру з надвисоким вакуумом. Ефективність уповільнення склала $1 \cdot 10^{-3}$. В даний час ефективність вдалося збільшити майже на порядок, і зараз в сучасних джерелах вона досягає рівня $\varepsilon \sim 1 \cdot 10^{-2}$ [60].

«Тепловий» позитрон може дифундувати на поверхню сповільнювача, і покинути речовину або «застрягти» в речовині і анігілювати з одним з електронів безпосередньо або з утворенням позитронію (переважно в пара-стані - p-Ps) (рис. 1.2). Тверде тіло характеризується «робочою функцією» виходу позитрона з поверхні ϕ^+ , що дорівнює різниці значень потенційної енергії частинки всередині твердого тіла ($\sim 1 \text{ \AA}$ від поверхні) і на нескінченній відстані від нього. Абсолютна величина робочої функції складає близько одного електрон-вольта, і при $\phi^+ > 0$ на переході поверхня-вакуум утворюється потенційний бар'єр, що перешкоджає виходу теплових позитронів. Наявність широкої забороненої зони призводить до того, що багато позитронів не до кінця термалізуються всередині матеріалу і тому мають велику довжину пробігу. В результаті вони мають достатній запас енергії, щоб подолати потенційний бар'єр «речовина-вакуум» і мають більш широкий енергетичний спектр.

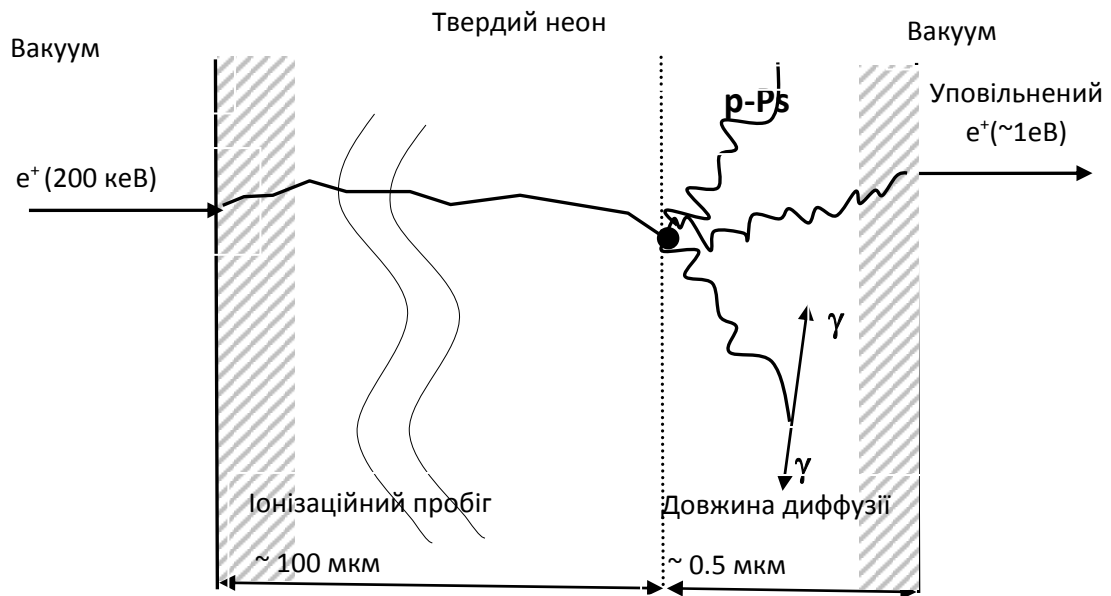


Рис.1.2. Процес уповільнення позитрона [48].

У Таблиці 1.5 наведені матеріали, що використовуються як сповільнювачі.

Таблиця 1.5

Ефективність різних уповільнюючих матеріалів [48]

Матеріал	Стан	Ефективність
MgO	Полікристалічний порошок	$3 \cdot 10^{-5}$
Cu(111)	Монокристал	$1 \cdot 10^{-3}$
B	Полікристал, покритий вуглецем	$\approx 10^{-7}$
W	Монокристал	$3 \cdot 10^{-3}$
Ne	Твердий неон при 5К	$7 \cdot 10^{-3}$

З наведених матеріалів широке застосування знайшли вольфрам і неон. Головним достоїнством вольфраму є простота використання, але наведене значення ефективності можна досягти тільки в найкращих джерелах з оптимізованої геометрією. На практиці найчастіше ефективність виявляється нижче і не перевищує $1 \cdot 10^{-3}$. Застосування вольфраму виправдано там, де немає необхідності в інтенсивному пучку повільних позитронів або є інтенсивний пучок швидких позитронів. Для отримання максимального виходу повільних позитронів при обмеженій кількості швидких незаперечно застосування неону

як сповільнювача. Однак, твердий неон можливо отримати лише при температурах рівня 5К, а це тягне за собою застосування криогенної техніки і ускладнює конструкцію джерела в цілому.

1.3.2. Об'єкти досліджень ПАС.

Існує кілька класів матеріалів які найбільш часто вивчаються за допомогою ПАС. Історично найпершими досліджувалися метали і сплави. Потім дослідження ПАС були поширені на напівпровідники. В обох цих областях позитрон відіграє роль основного зонда, а утворення позитронію (Ps) зазвичай має менше значення. Третя область застосування ПАС, яка в даний час швидко розвивається як в експериментальному, так і в теоретичному напрямках, пов'язана з дослідженнями полімерів та інших макромолекулярних речовин, що містять велику частину незайнятого простору. Нижче наведені деякі приклади застосування ПАС для досліджень матеріалів.

1.3.2.1. Метали і сплави

Крихкість стінок камер високого тиску в реакторах.

Камери високого тиску ядерних реакторів є ключовим компонентом безпеки АЕС. Необхідно забезпечити цілісність камери високого тиску в реакторі при нормальних і ненормальних умовах експлуатації. Здатність стінок камер протистояти руйнуванню має важливе значення, особливо в умовах втрати холодоагенту при аварії. Деградація сталі камер являє собою складний процес, який залежить від багатьох факторів (термічний і радіаційний вплив, хімічний склад, умови виробництва, старіння, мікроструктура матеріалу, історія експлуатації і т. ін.). Безсумнівно, крихкість сталей від нейтронного опромінення стало серйозною проблемою в типах ядерних реакторів ВВЕР-440, і їх першому поколінні В-230 [61]. Це було викликано головним чином через більш вузький зазор між зовнішньою поверхнею стрижневого стовбура і внутрішньою поверхнею камери в порівнянні із західними. Відносно невеликий діаметр полегшував транспортування і установку такої камери, але, з іншого

боку, потоки нейтронів і, отже, нейтронний вплив на стінку камери, як правило, в кілька разів вище, ніж в інших еквівалентних типах в Західній Європі. Такий вплив потоку нейтронів (навіть нейтронів з енергією більше 0,5 MeV) на крихкість набагато істотніше, ніж внесок від температури холодоагенту або робочого тиску в первинному контурі. Згідно з попередніми роботами, загально визнано, що (навіть в тих західних типах сталей, що містять понад 0,1% Cu), збагачення міддю грає домінуючу роль в крихкості викликану випромінюванням. У разі сталей камер реакторів типу ВВЕР в декількох дослідженнях було показано, що утворення карбїду є важливим додатковим мікроструктурним механізмом [62-64]. Через тривале старіння і зовнішні навантаження, включаючи опромінення, відбувається розвиток дрібномасштабних дефектів, які перешкоджають руху дислокацій при додаванні напруження. Цей процес є рушійною силою крихкості викликану випромінюванням. Це призводить до деградації механічних властивостей, що може привести до часткової втрати пластичності і збільшення ймовірності крихкого руйнування. Дефекти формуються з вакансій і міжвузліїв. Ці точкові дефекти утворюють кластери, вільно мігрують через кристалічну решітку; взаємодіють один з одним і з розчиненими атомами в кристалічній решітці, а також з дислокаційною структурою і випадають в осад. Ці процеси дифузії, індуковані опроміненням, призводять до утворення кластерів точкових дефектів; дислокаційних петель і осадів. Під впливом температури початковий стан пошкодження змінюється в результаті термічно активованої міграції точкових дефектів, що супроводжується їх взаємної рекомбінацією, анігіляцією на стоках і утворенням або дисоціацією скупчень. Ці зміни в мікроструктурі можуть бути в основному вивчені з використанням декількох методів. Матеріальні властивості сталей і вплив термічної і нейтронної обробки на ці властивості регулярно вивчаються за допомогою макроскопічних методів, таких як V-подібний надріз по Шарпі і випробування на розтягнення. Встановлено ряд напівемпіричних законів, заснованих на макроскопічних даних, але, на жаль, ці закони не повністю узгоджуються з усіма вимірами

даними і не забезпечують необхідної точності [65]. Тому в цьому випадку використовуються додаткові методи випробувань, такі як позитронна анігільаційна спектроскопія.

Втома крила літака.

Під час служби панелі крила літака повинні витримувати широкий спектр механічних і температурних навантажень. Зі збільшенням середнього терміну служби повітряних суден існує явна необхідність у поглибленні розуміння шляхів утворення ушкоджень в результаті втоми. Алюмінієві авіаційні сплави, такі як AA2024, мають чудові механічні властивості завдяки наявності нанорозмірних присадок з добре продуманим складом і розміром. Саме взаємодія дислокацій з цими присадками відповідає за високе значення міцності і межі міцності на розтяг. Взаємодія присадка-дислокація також є ключовим металургійним параметром для втомної міцності. У той час як розвитку дислокаційних ланцюжків в алюмінієвих сплавах і послідовному зростання в мікротріщинах при циклічному навантаженні (накопичення втомного пошкодження) приділено велику увагу в літературі, дослідження з пошкодження втоми самих присадок не проводилися. Ґрунтуючись на існуючих дислокаційно-присадних теоріях, можна припустити, що можуть виникати щонайменше два потенційних механізму втоми присадок: розчинення присадки і втрата міжфазної когерентності. Розчинення є реальним варіантом для невеликих присадок через послідовний зсув. Механізм призведе до збільшення концентрації розчиненої речовини і дуже локальної втрати сили пінінга дислокацій і втрати міцності на рівні нанометрового масштабу. З іншого боку, повторна взаємодія дислокацій з великими розмірами присадок може привести до атомної перебудови напівкогерентної границі присадка - кристалічна решітка. Навіть високоточна трансмісійна електронна мікроскопія, як найпоширеніший метод виявлення дрібних деталей присадок і їх структури, не дуже підходить, оскільки мінімальна кількість досліджуваного матеріалу не дає потрібної інформації. Така інформація може бути отримана за допомогою ПАС.

[66]

Корозія.

Корозія як руйнівний процес, зумовлений хімічними або електрохімічними реакціями металу з навколишнім середовищем, що викликає утворення оксидів в матеріалі, а також погіршення матеріальної когерентності. є предметом уваги дослідників багатьох царин знань. Оскільки при цьому зв'язок атомів в кристалічній решітці може бути зруйнований, може спричинити також і зменшення міцності внаслідок утворення нових структурних дефектів. Вплив деградації на решітку було досліджено і було продемонстроване зростання середнього часу життя позитронів зі збільшенням вмісту хлору в середовищі для дуплексної (Cr-Ni) аустенітної сталі. Крім того, вивчалися низьколеговані сталі в парах соляної кислоти при 140 °С. Сталі експонувалися протягом 100 годин в цій атмосфері, в результаті їх вакансійні дефекти були більші і їх концентрація збільшувалася. Ці експерименти можуть привести до припущення, що ПАС є корисним інструментом в дослідженнях деградації під впливом корозії. Сталі, що використовуються на ядерних установках, повинні мати підвищену стійкість до корозії, тому дослідження деградації матеріалу через корозію на рівні мікроструктурних змін може бути дуже [67].

1.3.2.2. Напівпровідники.

Атомні дефекти в напівпровідниках є електрично активними і відіграють значну роль в електричних і оптичних властивостях цих матеріалів. Дефекти індукують локалізовані рівні електронів, які діють як центри захоплення, рекомбінації і розсіювання для вільних носіїв. Локалізовані рівні можуть бути виявлені за допомогою різних спектроскопій. Однак ідентифікація атомної структури дефектів виявилася важкою. ПАС як метод дефектоскопії має три переваги. По-перше, вона має високу чутливість до дефектів типу вакансій, що робить легкою їх ідентифікацію. По-друге, позитронна спектроскопія добре описується теорією, оскільки теоретично можна обчислити експериментальний сигнал від анігіляції електрон-позитронів. По-третє, анігіляція позитронів може

бути застосована до будь-якого матеріалу, який не залежить від його легування і провідності.

CuInSe₂ - тонкі плівки сонячних елементів.

Халькопіритові напівпровідники є відповідними матеріалами для оптоелектронних пристроїв. До цих пір вони в основному використовувалися в якості поглинаючих матеріалів в полікристалічних тонкоплівкових сонячних елементах. Товщина необхідного шару часто становить менше 2 мкм, що сприяє можливості цієї технології виробляти дешеві фотоелектричні пристрої. CuInSe₂ (CIS) та його похідна Cu(In,Ga)Se₂ використовуються в якості поглиначів для високоефективних фотогальванічних пристроїв, що призводить до стабільної роботи пристрою. Ефективність перетворення лабораторних тонкоплівкових сонячних елементів на базі CIS перевищила 20%. CuInSe₂ має ширину прямої забороненої зони близько 1,05 eV, що близько до оптимальної ширини забороненої зони для сонячного елемента $E_{g, \text{opt}} = 1,35 \text{ eV}$, як це було розраховано Генрі [68] для наземних умов. У порівнянні з іншими відомими напівпровідниками CIS має найвищий коефіцієнт поглинання; він перевищує 10^5 cm^{-1} .

Електричні властивості полікристалічного тонкоплівкового сонячного елемента CIS сильно залежать від наявності дефектів. Ці дефекти включають природні точкові дефекти (вакансії, дівакансії і т. д.) і розширені дефекти (дислокації, границі зерен тощо), які є результатом відхилення від стехіометричного складу, викликаного процесом виготовлення. Відомо, що фізика дефектів CIS складна через велику кількість природних і складних дефектів. Розуміння ефективності CIS вимагає знань про дефекти, які визначатимуть його властивості. Така інформація може бути отримана за допомогою методів ПАС.[69]

ZnO – застосування в оптоелектроніці.

Протягом багатьох років полікристалічний оксид цинку (ZnO) має широке застосування. Він використовується для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів, варисторів, люмінофорів і прозорих провідних плівок.

Особливу привабливість має в якості широко зонного напівпровідника (3,37 eV при кімнатній температурі). Недавній успіх у виробництві великих монокристалів показав, що ZnO має потенціал застосування в синіх і ультрафіолетових світло випромінюючих пристроях з-за широкого зазору зони і великої енергії зв'язку екситонів (60 meV). Точний збіг з постійною кристалічної решітки GaN також дозволяє йому бути хорошим матеріалом підкладки для пристроїв на основі GaN. ZnO добре підходить для застосування в космосі, оскільки він досить стійкий до радіаційного пошкодження в порівнянні з іншими напівпровідниками. Ключовим фактором забезпечення високої продуктивності напівпровідникових пристроїв є кристали високої якості. Однак у напівпровідниках часто існують різні дефекти, які впливають на електричні та оптичні властивості. В ZnO, наприклад, нелеговані матеріали в основному виявляють провідність n-типу. Передбачається, що це пов'язано з наявністю природних точкових дефектів, таких як кисневі вакансії. Як і у багатьох інших широко зонних напівпровідників, існує так звана легована асиметрія, тобто легко отримати n-тип ZnO, але досить складно створити р-тип ZnO. Одним з можливих механізмів, що ведуть до утруднення легування, є самокомпенсація природними дефектами, що ускладнює виробництво пристроїв на основі ZnO, таких як УФ-випромінюючі діоди. Деякі дефекти також зменшують термін служби пристрою і знижують ефективність випромінювання світла. Наприклад, дислокації діють як безвипромінювальні центри рекомбінації і пригнічують УФ-випромінювання. Було доведено, що контроль дефектів для поліпшення якості матеріалів дуже важливий. Вивчення мікроструктури цих дефектів в ZnO необхідно для забезпечення контролю за цими дефектами.[70]

1.3.2.2. Полімери та пористі матеріали.

Нанопористі матеріали мають широкий спектр промислового застосування, що в значній мірі впливає з їх надзвичайно високою площею поверхні, що містить ділянки, які можуть бути використані (наприклад, в

каталізі) для захоплення і поділу молекул. Нанопористі тверді речовини широко використовуються як адсорбенти, каталізатори, газові сенсори, біомембрани і полімерні виборчі фільтри. Оскільки функціональне застосування нанопористих матеріалів визначається їх пористістю (в тому числі розміром і концентрацією пір), порова структура, спеціально підбирається (формується) в залежності від їх призначення, і численні технології, такі, як молекулярна абсорбція, (з використанням N_2CO_2 і інших молекул) і ртутна порометрія були розвинені в якості характеристичних засобів. Однак, більшість з цих підходів мають обмеження, оскільки матеріали мають взаємопов'язані пори в кількості, достатній, щоб дозволити проходити зондам-атомам або молекулам крізь матеріал. Методи візуалізації, такі як просвічуюча електронна мікроскопія, здатні виявляти інформацію про розподіл нанопор, але вони вимагають ретельної підготовки зразка, яка може змінити розподіл пір. Таким чином, доступні сьогодні методи визначення в наноінженерії, вимагають значного поліпшення, а такий метод, як ПАС здатний охарактеризувати нано-пористість, особливо коли пори закриті і, отже, недоступні для методів газової адсорбції. Метод позитронної анігіляційної спектроскопії по вимірюванню часу життя позитрона в речовині (PALS) ефективно використовується для вивчення пор субнанометрового розміру і для визначення їх розподілу за обсягом зразка. В полімерах або пористих матрицях термалізовані позитрони можуть утворювати позитроній (Ps), який може локалізуватися в вільних обсягах пір. Основний механізм анігіляції позитронію - довгоживучій тріплетний стан (орто-позитроній, o-Ps), а параметри анігіляції залежать від фізико-хімічних властивостей матеріалу. Вимірюючи час життя орто-позитронію в зразку можна отримати розмір і щільність розподілу пір.

Поліуретанові мембрани

Поліуретани широко використовуються в хімічній промисловості. Вони як правило, складаються з жорстких сегментів (уретан / карбамід груп і / або низькомолекулярні ланцюги екстендерів) і одного або більше м'яких сегментів (наприклад, поліестеру / поліестеру). Залежно від параметрів обробки, а також

від типу твердих і м'яких сегментів, поліуретани поділяють на повністю змішані або фазо роздільні різного ступеня. Така універсальність конструкції дозволяє виробляти матеріали з широким спектром властивостей. Одним з важливих застосувань уретан-карбамідних мембран є їх виборча проникність, що використовується в промислових поділах газу. Концепція вільного об'єму знайшла широке застосування в науці про полімери для пояснення властивостей на мікроскопічному структурному рівні і їх зв'язку з макроскопічними властивостями. Дослідження за допомогою ПАС дозволяють охарактеризувати нано-пористість для таких мембран. [71]

Цеоліти

Цеоліти випускаються серійно і широко використовуються як "молекулярні сита" для адсорбції газів і рідин в каталізі і поводженні з радіоактивними відходами, крекінгу нафти та виробництві кормових добавок. Цеоліти є алюмосилкатами з тривимірною структурою, що складається з окремих SiO_4 і AlO_4 -тетраедрів, з'єднаних загальними атомами кисню. Такі матеріали є набором каналів і порожнин, які дозволяють адсорбувати молекули менше розміру пір, при цьому не чіпати інші, більш великі розміри молекул. Насправді синтетичні цеоліти, відомі як «Молекулярні сита 3Å, 4Å, 5Å», досить поширені в науково-дослідних лабораторіях, особливо хімічних лабораторіях, де вони використовуються для сухих газових ліній. Цеоліти також використовуються в форвакуумних насосах для адсорбції парів масла. Методи ПАС в цьому випадку використовуються для визначення розмірів і концентрації пор, які відповідають за властивості цеолітів [72].

1.4. Висновки до розділу 1. Постановка задачі:

Таким чином маємо задачу отримання потоку позитронів, що має межі енергетичного діапазону та значення потокових характеристик, необхідні для реалізації низки методів ПАС спектроскопії. Реалізація цієї задачі полягає в виборі радіоізотопного матеріалу, поділ якого супроводжується випромінюванням позитрону. Наступним кроком є виготовлення модератора,

тобто твердотільного екрану, який виконує функцію уповільнювача гомогенізатора енергії позитронів. Зазвичай для цього використовуються комбіновану мішень системи метал- низькотемпературний конденсат інертного газу. Одержаний таким чином потік позитронів повинен накопичуватись до значень концентрації, яка може бути достатньою для проведення спектроскопічних методик. Це в свою чергу потребує узгодженого вирішення задач створення низки електрофізичних систем для утримання позитронів.

Також є необхідним провести апробації створеного джерела для ідентифікації дефектів в низці сплавів на основі заліза та алюмінію, в яких було утворено дефекти внаслідок дії тонких механізмів.

РОЗДІЛ 2. ПРИСКОРЮВАЛЬНО-НАКОПИЧУВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС LEPТА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПОЗИТРОНІЯ.

Позитрон, з моменту його відкриття в 1932 році американським фізиком Карлом Андерсоном, швидко став ефективним знаряддям у експериментальних дослідженнях, як фундаментальних, так і прикладних. Особливий інтерес представляють експерименти з генерацією атомів позитронія (електромагнітно-зв'язаний стан електрона і позитрона) і антиводню [73]. В обох випадках ключову роль відіграють джерела позитронів і їх пастки – пристрої для накопичення позитронів [74]. Подібні експерименти особливо активно ведуться в світі. Серед них слід відзначити прецизійні експерименти по спектроскопії атомів ASACUSA [75] та експерименти по генерації атомів антиводню з метою його спектроскопії ALPHA [76].

Позитронна анігіляційна спектроскопія (ПАС) [77] є сучасним методом вивчення структури речовини. Суть методу полягає у визначенні каналу анігіляції імплантованого в речовину позитрона. Знаючи анігіляційні характеристики позитрона можна судити про властивості середовища оточувала його.

Проблема отримання позитронія передбачає наявність двох джерел заряджених частинок-електронного і позитронного, з досить однорідними характеристиками. Одним з варіантів отримання позитронія є комплекс LEPТА.

В Об'єднаному інституті ядерних досліджень в 1998 р. була почата розробка і спорудження накопичувача позитронів низької енергії LEPТА (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) [78, 79]. Фізичним пуском накопичувача вважається 2004 р., коли був вперше отриманий циркулюючий електронний пучок [80, 81]. До теперішнього часу всі елементи магнітної і вакуумної систем установки виготовлені, введена в експлуатацію система електронного

охолодження (СЕО), отриманий циркулюючий пучок накопичених в пастці електронів, інжектированы і проведені по "кільцю" накопичені позитрони [82].

Основною метою установки LEPТА є генерація спрямованих потоків позитронія [78]. Експерименти на таких потоках дозволяють уникнути впливу середовища, неминуче при традиційних методах генерації позитронія в мішенях. Генерація паразитронія при цьому також можлива методом інтерференції орто - і пара-станів позитронія [83]. Крім класичних експериментів з позитронієм таких, як прецизійне вимірювання часу життя орто - і пара-станів, визначення ймовірностей розпадів з порушенням закону збереження моменту і зарядової інваріантності, прецизійне вимірювання тонкої структури і лембовського зсуву в спектрі ортопозитронія [73], можлива постановка експериментів принципово нового характеру з пошуку легкого аксіона в розпадах ортопозитронія і перевірки гіпотези Дзеркального Всесвіту [84].

Інжектор позитронів установки LEPТА дозволяє здійснити накопичення згустку позитронів і подальшу його інжекцію в накопичувальне кільце. Він складається з криогенного джерела повільних позитронів і позитронної пастки. Період повторення імпульсів інжекції визначається більшою з двох величин: часом життя циркулюючого пучка або часом накопичення позитронів в пастці.

Альтернативний варіант застосування інжектора – це проведення дефектоскопії методами ПАС. Дана методика може бути використана в якості неруйнівного методу контролю дефектності у важливих структурах. Це можуть бути напівпровідники, різні сплави та інші матеріали. За допомогою ПАС можна не тільки оцінити якість матеріалів, але й побачити, як впливають на утворення вакансій та дислокацій ті чи інші дії, вивчити первинні стадії дефектоутворення, зрозуміти яким чином введення у сплави легуючих домішок дозволяє гальмувати еволюцію дислокацій.

Інжектор позитронів дозволяє отримувати необхідні для ПАС пучки монохроматичних позитронів з регульованою енергією до 30 кеВ [85].

2.1. Накопичувальне кільце комплексу LEPTA

Комплекс LEPTA (рис. 2.1, 2.2) складається з:

- накопичувального кільця периметром 17,2 м, призначеного для накопичення позитронів (електронів) низької (до 10 кеВ) енергії;
- системи електронного охолодження,
- інжектора позитронів, що включає кріогенне джерело монохроматичних позитронів (КрДМП) оригінальної конструкції з радіоактивним ізотопом ^{22}Na в якості емітера позитронів, каналом транспортування повільних позитронів і позитронну пастку;
- каналу транспортування позитронів в кільце, що включає ділянку прискорення позитронів;
- станції позитронної анігіляційної спектроскопії (ПАС).

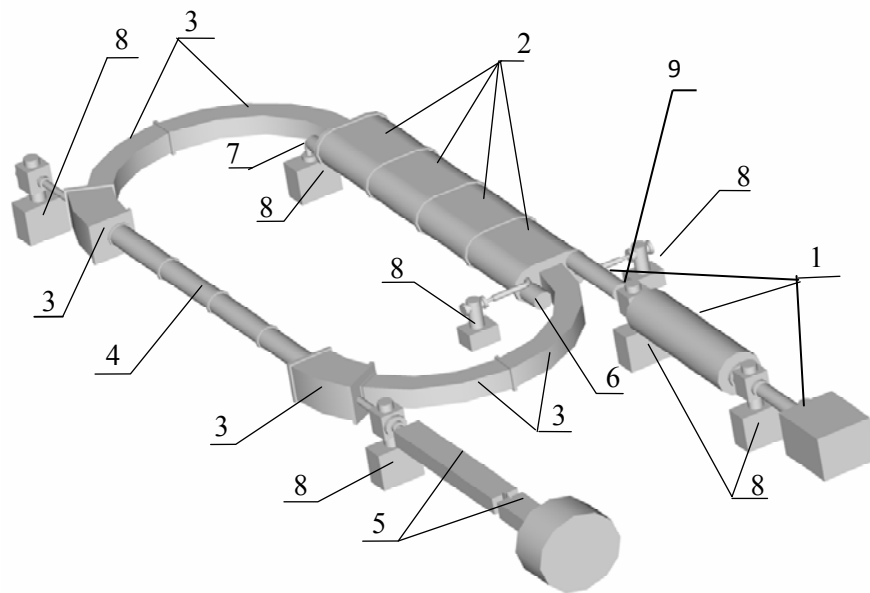


Рис.2.1. Схема установки LEPTA. 1 - інжектор позитронів, 2 – ділянка інжекції, 3 - торойдальні соленоїди, 4 - прямолінійна секція, 5 - експериментальний канал, 6 - електронна гармата системи електронного охолодження, 7 - колектор електронів СЕО, 8 - вакуумні насоси, 9 – пастка позитронів.

Характерною особливістю накопичувача є фокусування поздовжнім магнітним полем. Для довготривалого стійкого руху циркулюючого пучка використовується спіральна квадрупольна лінза, розташована в прямолінійній секції 4. Оригінальна система інжекції дозволяє здійснити введення-виведення охолоджуючого пучка електронів без обурення циркулюючого позитронного пучка [86].

Кільце розраховане на інжекцію позитронів з енергією $1 \div 10$ кеВ. У накопичувачі використовується однооберткова інжекція, тривалість імпульсу інжекції на максимальній енергії не перевищує 300 нс.

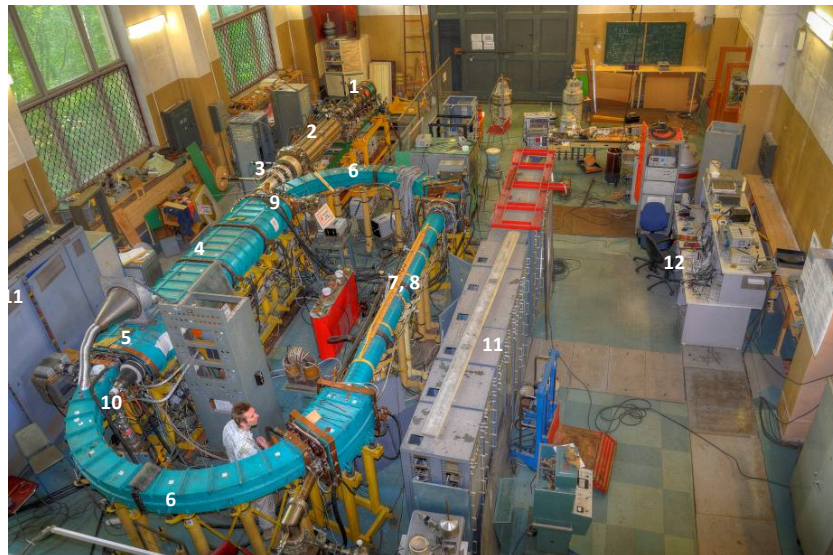


Рис.2.2. Загальний вигляд установки LEPTA. 1 – джерело позитронів, 2 – позитронна пастка, 3 – канал транспортування позитронів, 4 – септумні соленоїди, 5 – кікер (всередині септумного соленоїда), 6 – тороїдальні соленоїди, 7 – соленоїд і квадрупольна обмотка, 8 – секція електронного охолодження, прямолінійний соленоїд, 9 – електронна гармата, 10 – електронний колектор, 11 – джерела живлення магнітної системи, 12 – пульт управління.

Параметри комплексу (в тому числі досягнуті) наведені в Таблиці 2.1.

Накопичувальне кільце комплексу ЛЕРТА (рис.2.1) має форму "рейстрека". Складається з двох прямолінійних і двох тороїдальних соленоїдів, поміщених в магнітний екран. Вакуумна камера розташована всередині

Таблиця 2.1.

Параметри установки ЛЕРТА

Параметр	Значення	
Периметр, м	17.2	
Зовнішній радіус торів, м	1.45	
Поздовжнє магнітне поле, Гс	400	
Компенсуюче магнітне поле (при 10 кеВ), Гс	1.75	
Максимальний градієнт поля спірального квадруполя Гс/см	10.0	
Довжина секції охолодження, м	4.0	
Проектні та досягнуті параметри		
	Проектний	Досягнутий (2012)
Тиск залишкового газу, Тор	$1 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-9}$
Позитронний пучок		
Енергія позитронів, кеВ	2 ÷ 10.0	2 ÷ 8
Потік повільних позитронів, сек ⁻¹	10^6	$3 \cdot 10^6$
Число позитронів в імпульсі інжекції	$1 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^6$
Час життя позитронів в кільці, сек	100	—
Електронний пучок системи охолодження		
Енергія електронів, кеВ	2 ÷ 10.0	2 ÷ 8,7
Радіус пучка, см	1.0	1.0
Струм пучка, А	0,5	0,2

Ефективність рекуперації, $\Delta I/I$	$1 \cdot 10^{-4}$	$< 3 \cdot 10^{-3}$
Потік атомів позитронія		
Інтенсивність, сек^{-1}	$1 \cdot 10^4$	–

соленоїдів. Колектор електронів, електронна гармата і введення позитронів розміщені на торцях спеціальних каналів вакуумної камери. Для інжекції електронного і позитронного пучків використовується септумний соленоїд з двома септумними обмотками, розташованими симетрично вище і нижче рівноважної орбіти (рис. 2.3).

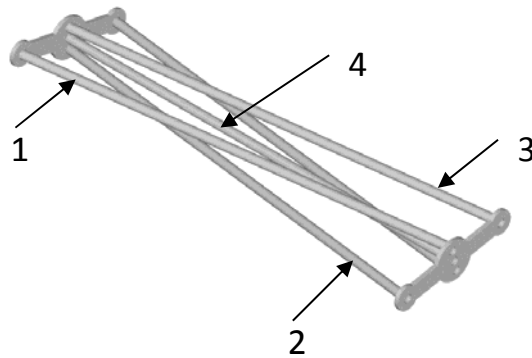


Рис.2.3. Схема вакуумних камер транспортувальних каналів всередині септума: 1 – канал виведення електронного пучка, 2 – канал введення електронного пучка, 3 – канал інжекції позитронного пучка, 4 – канал циркулюючого пучка.

Септумні обмотки формують поперечне магнітне поле, яке забезпечує транспортування інжектуючих пучків, їх зведення і розведення у горизонтальній площині. Напрямок поля для каналів 1 і 3 протилежний до поля для каналу 2, а для каналу 4 їх дія скомпенсована і не впливає на траєкторію пучка.

На виході септума розташований імпульсний електростатичний кікер (рис.2.4). Він являє собою дві вертикальні пластини завдовжки 900 мм, рознесені на відстань 120 мм. Вони формують горизонтальне електричне поле і зміщують позитронний пучок по вертикалі (дрейф в схрещених \vec{E} та \vec{B} полях).

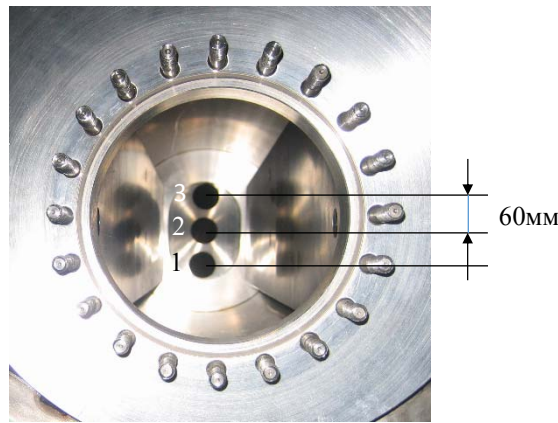


Рис.2.4. Вихід з електростатичного кікера, вид "проти пучка", видно отвори вакуумних камер – двох інжекційних (1, 3) і камери циркулюючого позитронного пучка (2).

Кікер включається тільки на час інжекції позитронного пучка: під час інжекції на пластини подається імпульсна напруга. У поздовжньому магнітному і поперечному електричному полях заряджені частинки зазнають електричний дрейф [87], що забезпечує зсув пучка як цілого по вертикалі. При цьому напрямок і величина зсуву пучка в кікер визначаються виразом

$$d_{shift} = \frac{[\vec{E} \times \vec{B}_0]}{B_0^2} \cdot \frac{\ell}{\beta}, \quad (2.1.)$$

де E – напруженість електричного поля в кікер, B_0 – напруженість поздовжнього магнітного поля кільця, ℓ – довжина пластин кікера, β – швидкість частинок в одиницях швидкості світла.

Після прольоту кікера частки продовжують рухатися уздовж силових ліній магнітного поля. Коли орбіта заповнюється, напруга з пластин знімається. Щоб мінімізувати втрати при інжекції, тривалість заднього зрізу імпульсу напруги на кікер становить менше 30 нс, що забезпечує заповнення орбіти не менше ніж на 90%.

Рух на криволінійних ділянках забезпечують тороїдальні соленоїди. Відцентровий дрейф в цих соленоїдах компенсується спеціальними обмотками вертикального поворотного поля. На проектній енергії інжекції 10 кеВ величина дрейфу електронів (позитронів) в кожному з соленоїдів становить 3 см, що відповідає половині відстані між віссю рівноважної орбіти позитронів і

осями каналів інжекції позитронного і електронного пучків в септумі. Відцентровий дрейф є невід'ємною складовою механізму зведення і розведення пучків. Його напрямок залежить від знаку заряду частинки. Електронний пучок інжектується зі зміщенням по вертикалі щодо рівноважної орбіти позитронного пучка і приходить на рівноважну орбіту як за рахунок відцентрового дрейфу (у протилежного напрямку до дрейфу позитронів), так і за рахунок дії поворотного поля. Напрямок останнього вибирається таким, що воно компенсує відцентровий дрейф позитронів і, відповідно, подвоює дрейф електронів на криволінійних ділянках (3 см + 3 см). Таким чином на вході в секцію охолодження осі обох пучків поєднуються. Після неї позитронний пучок утримується поворотним полем на рівноважній орбіті, а електронний виводиться по вертикалі у тороїді і вліво у септумі в колекторний канал (Рис. 2.3).

Для забезпечення довготривалої стабільності циркулюючого пучка в накопичувачі LEPTA встановлений спіральний квадруполь, який представляє собою дві пари спіральних провідників з протилежним напрямком струмів. В кожному перетині квадруполь повторює геометрію беззалізної "лінзи Панофського" [87]. Крок спіральності квадруполя становить 1 м, його довжина дорівнює двом крокам спіральності і становить 2 м. (рис 2.5.).



Рис.2.5. Спіральний квадруполь.

2.2. Система електронного охолодження комплексу LEPTA

Система електронного охолодження (СЕО) комплексу LEPTA складається з електронної гармати (рис.2.6), колектора електронів (рис.2.7),

транспортувального каналу, стабілізованих джерел живлення і пристроїв діагностики пучка.

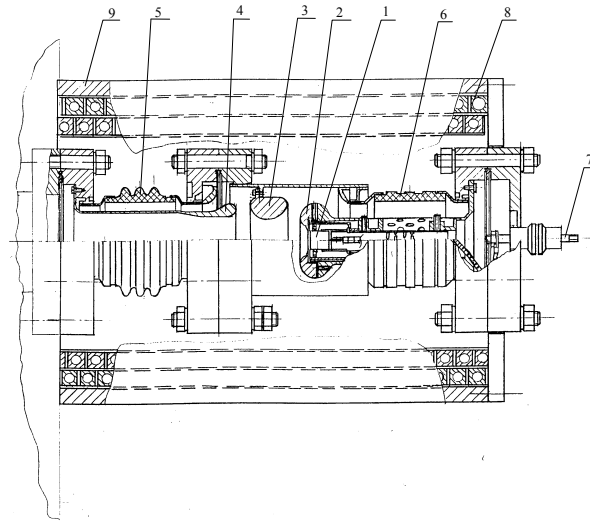


Рис.2.6. Електронна гармата системи охолодження: 1 - катод, 2 - електрод «пірса», 3 - керуючий електрод, 4 - анод, 5, 6 - ізолятори, 7 - електричний контакт для напруження катода, 8 - соленоїд, 9 - магнітний екран.

Для високоефективної роботи системи електронного охолодження необхідно формувати пучок з малим кутовим розкидом. Електронна гармата для накопичувача ЛЕРТА має спеціальну оптику і складається з трьох електродів: "пірса" прикатодний електрод, керуючий електрод і анод. Це дозволяє створити гармату з так званою адіабатичною оптикою і з варійованим струмом електронного пучка [88]. Оптика електронної гармати дозволяє формувати електронний пучок високої якості, з кутовим розкидом не більше 2 мрад, з струмом до 0,5 А і енергією електронів до 10 кеВ.

Гармата може працювати як в стаціонарному, так і в імпульсному режимах. При цьому потенціал катода і, відповідно, енергія електронів гармати залишаються постійними, а потенціал керуючого електрода має позитивний чи негативний потенціал щодо катода, в залежності від обраного режиму.

Канал транспортування електронного пучка поєднаний з каналом циркулюючого пучка позитронів по всьому шляху проходження електронів, за винятком ділянок в септумі. Обидва пучки утримуються магнітним полем, при

цьому діаметри соленоїдів, струми обмоток і магнітні екрани вибрані так, щоб забезпечити адіабатичні переходи частинок з соленоїда в соленоїд і тим самим зменшити набір поперечних швидкостей електронами охолоджуючого пучка.

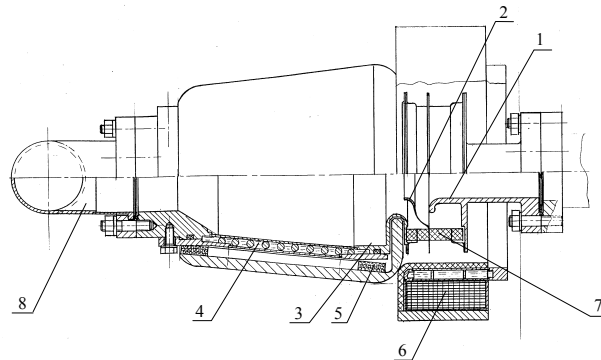


Рис.2.7. Колектор електронів: 1 — вакуумна камера, 2 — "репелер", 3 — циліндр Фарадея, 4 — водяна сорочка, 5 — магнітний екран, 6 — соленоїд поздовжнього поля, 7 — прохідний вакуумний ізолятор, 8 — труба вакуумного відкачування.

Колектор електронів призначений для прийому "відпрацьованих" електронів і забезпечення мінімального зворотного струму вторинних електронів. Він являє собою циліндр Фарадея у вигляді усіченого конуса, виготовлений з нержавіючої сталі, зовні охолоджуваний водою і оточений магнітним екраном. Приєднувальний фланець колектора, що знаходиться під потенціалом вакуумної камери ("землю"), ізолюваний керамічним ізолятором. В ізолятор вварений додатковий проміжний електрод - "репелер" (від англійського *repel* – відображати). У середині колектора потік магнітного поля котушки 6 аксіально-симетрично замикається на магнітний екран, що і забезпечує спад поля і, як результат, рівномірний розподіл електронів пучка по поверхні колектора.

Система електронного охолодження повинна забезпечувати струм електронів 0,5 А при енергії 10 кеВ в постійному режимі, що вимагає споживаної потужності, рівної 5 кВт. Ця потужність збільшується пропорційно енергії електронів СЕО. Тому в таких системах застосовують т. зв. схему "рекуперації" (рис.2.8), коли електрони перед потраплянням у колектор

попередньо гальмуються і потрапляють в колектор з постійною енергією, що не залежить від потенціалу гармати.

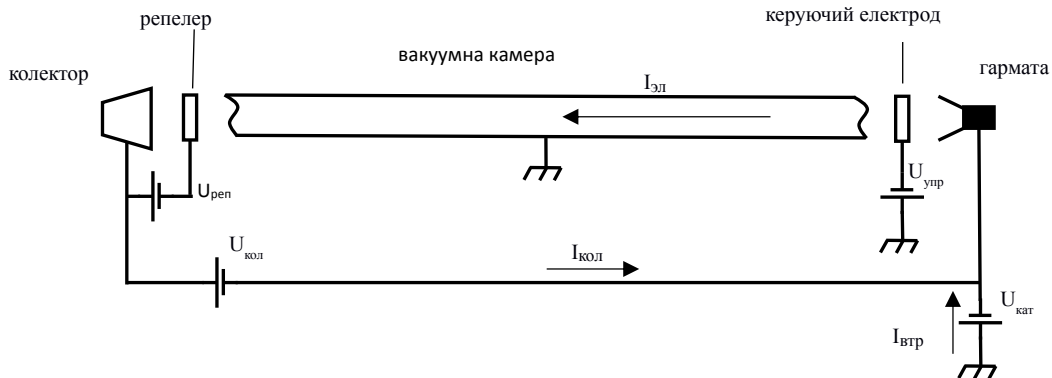


Рис.2.8. Принципова електрична схема СЕО. $U_{кат}$ -напруга катодного джерела живлення, $U_{кол}$ -напруга колекторного джерела живлення, $U_{реп}$ -напруга джерела живлення репелерного електрода.

З рисунку видно, що:

$$I_{эл} = I_{кол} + I_{втр}, \quad (2.2)$$

де $I_{кол}$ – струм колектора, а $I_{втр}$ – струм втрат.

$I_{втр}$ - це струм електронів, що потрапили на стінки вакуумної камери. Це можуть бути електрони охолоджуючого пучка і електрони, що вилетіли з колектора назад в канал транспортування. В режимі рекуперації потужність, споживана СЕО, дорівнює:

$$P = I_{кол} \cdot U_{кол} + I_{втр} \cdot U_{кат} \quad (2.3)$$

При правильних налаштуваннях СЕО $I_{втр} \ll I_{кол}$, $U_{кол} \ll U_{кат}$.

Таким чином, основна потужність відбирається у колекторного джерела живлення, напруга якого при струмі 0,5 А не більше 2 кВ. Енергія електронів задається за допомогою високостабільного слабкострумового джерела живлення.

Система електронного охолодження введена в експлуатацію, досягнуті параметри наведені в Таблиці 2.2. [82]

Параметри системи електронного охолодження.

Енергія електронів	Струм		
	$I_{эл}$, мА	$I_{втр}$, мкА	$I_{втр}/I_{эл}$
3	20	230	0,011
5	50	290	0,006
7	64	620	0,01
8,7	105	430	0,004

2.3. Тестування структури накопичувального кільця комплексу LEPTA

Тестування накопичувального кільця проводилося за допомогою електронного пучка системи електронного охолодження. Електронна гармата СЕО працювала в імпульсному режимі. Діагностика здійснювалася за допомогою двох пікап-станцій, розташованих на вході і виході секції охолодження, а також за допомогою апертурних діафрагм, розташованих на вході кікера і вході септума.

Пікап-станція складається з двох пар електродів. Пікап-електроди (рис. 2.9) широко застосовуються в прискорювальній техніці для вимірювання положення пучка заряджених частинок. Пара пікап-електродів являє собою циліндр, розрізаний на дві половинки вздовж твірної. Кожна половина циліндра ізолювана від камери вакуумним введенням. Для вимірювання горизонтальної координати напівциліндри розташовані горизонтально (тобто розрізи лежать у вертикальній площині). Для вимірювання вертикальної координати напівциліндри розташовані, відповідно, вертикально. Коли згусток заряджених частинок потрапляє пікап він індукує на цих електродах сигнали, амплітуда і тривалість яких залежить від струму пучка, його зміщення відносно центру

вакуумної камери і параметрів пікапа (рис.2.9). Знаючи напругу на пікап-електроді, можна розрахувати зміщення в осі аксіально-симетричного пучка щодо геометричного центру пікапа:

$$\Delta x = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} h, \quad (2.3)$$

де U_1, U_2 - напруги на пікап-електродах, h – відстань між ними.

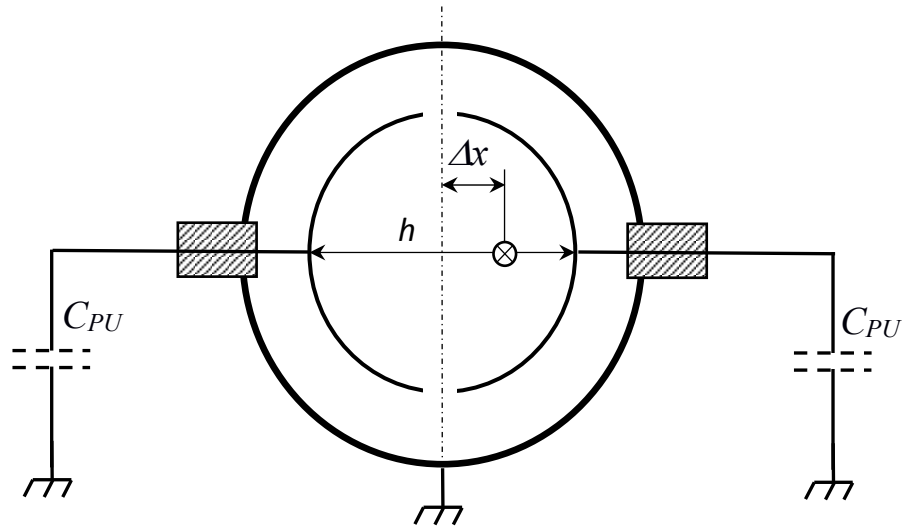


Рис.2.9. Пікап-станція для визначення горизонтального положення пучка.

Апертурні діафрагми (рис. 2.10) являють собою набір пластин (ламелі) і перетворюють імпульсний струм пучка $I(t)$ в напругу U між пластиною і стінкою камери ("землею").

$$U = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{\infty} I(t) dt, \quad (2.4)$$

де C – ємність ламелі на "землю".

Краї ламелей розташовані практично врівень зі стінками вакуумної камери і майже не зменшують апертуру.

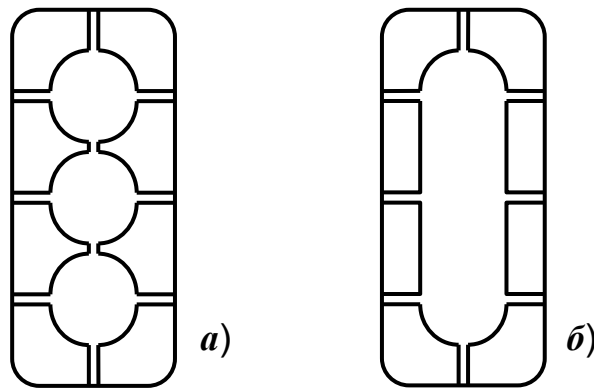


Рис.2.10. Апертурні діафрагми: а – на вході септума, б – на вході в кікер.

Кожна ламель діафрагми через вакуумне введення навантажена на свій резистор. За допомогою горизонтальних і вертикальних корекцій, розташованих по всьому кільцю накопичувача, можна пересувати пучок по всій поверхні діафрагм, налаштовуючи тим самим проходження пучка по центру вакуумної камери.

За допомогою описаних засобів діагностики вперше був отриманий циркулюючий пучок електронів (рис.2.11).

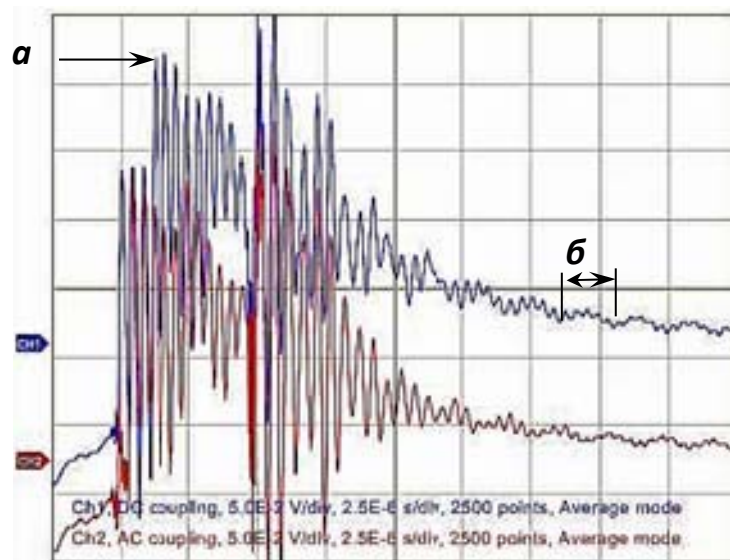


Рис.2.11. Осцилограма циркулюючого пучка електронів.

На рисунку добре видно сигналу з частотою обертів f_{rev} згрупованого пучка і поступова його розгруповання (рис.2.11, а), зі збереженням бетатронних коливань з частотою f_{bet} (рис.2.11, б). Амплітуда f_{rev} зменшується з часом. Групування пучка пов'язана з тим, що задній фронт імпульсу

електростатичного кікера має певну тривалість, тому орбіта заповнюється не повністю, оскільки частина пучка втрачається під час інжекції на задньому фронті кікера. Згодом пучок через різницю швидкостей електронів і через перемішування в квадруполі заповнює всю орбіту і амплітуда сигналу з частотою обертів зменшується до нуля, тому що середній заряд, що проходить через пікапи, постійний в часі. Амплітуда бетатронних коливань залежить від зміщення осі циркулюючого пучка щодо магнітної осі квадруполя і пов'язана з обертом циркулюючого пучка як цілого навколо осі квадруполя. Квадруполь повертає весь пучок на 360° за число обертів N , рівне:

$$N = \frac{f_{bet}}{f_{rev}}. \quad (2.5)$$

Бетатронні коливання присутні завжди, якщо вісь рівноважної орбіти не збігається з магнітною віссю квадруполя.

Для вимірювання часу життя циркулюючого пучка була зроблена спроба застосувати метод вимірювання Шотткі шуму [89]. На жаль, за допомогою цього методу не вдалося провести вимірювання через короткий час життя циркулюючого пучка. Тому був використаний спосіб скидання пучка, коли на одну з пластин кікера подається імпульс високовольтної напруги з регульованою затримкою в часі ("метод кілера"). Пучок скидається на стінку камери, при цьому заряд, індукований на пікап-електроді циркулюючим пучком, звільняється і створює імпульс напруги:

$$U_{PU} \sim \frac{Ne}{C_{PU}C} l_{PU}, \quad (1.6)$$

де N – число електронів, що циркулюють в момент скидання, e – заряд електрона, l_{PU} – довжина пластини пікап-електрода, C_{PU} – ємність пікап-електрода на землю, C – периметр орбіти циркулюючого пучка. Вимірюючи напругу на пікап-електродах при різних затримках τ імпульсу "кілера", отримуємо графіки залежності $U_{PU}(t)$, за якими визначаємо час життя τ_{life} інтенсивності циркулюючих електронів (рис.2.12). Дана залежність будувалася в MS Excel, який дозволяє накласти лінію тренду на отримані результати.

Коефіцієнт, що стоїть при x це величина зворотня часу життя τ . Залежність τ_{life} від енергії (рис.2.13) має характерний вигляд.

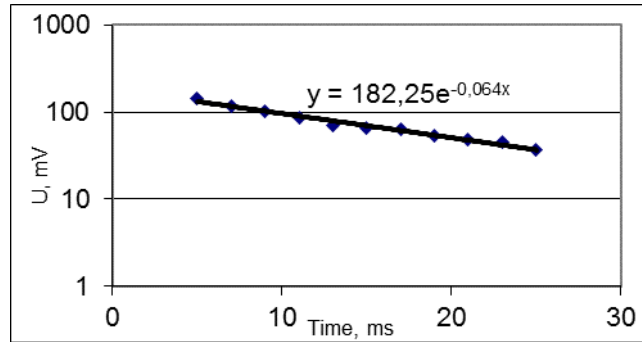


Рис.2.12. Залежність інтенсивності циркулюючого пучка електронів від часу.

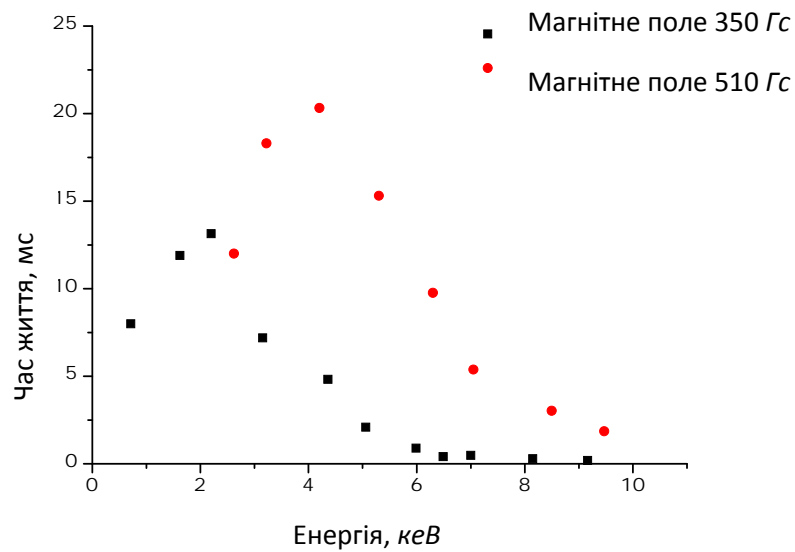


Рис.2.13. Залежність часу життя циркулюючого пучка електронів від їх енергії.

Правий і лівий схили графіків є результатом зменшення часу життя частинок через розсіяння на неоднорідностях магнітного поля і молекулах залишкового газу відповідно. Розсіяння на молекулах залишкового газу переважає на низьких енергіях і з ростом енергії зменшується. Розсіяння на неоднорідностях магнітного поля зростає зі збільшенням енергії. Мінімальна загальна дія цих двох ефектів лежить в області енергій 4-5 кеВ.

2.4. Інжектор позитронів комплексу LEPTA

Інжектор позитронів (рис. 2.14) складається з криогенного джерела повільних позитронів (КрДПП), каналу транспортування повільних позитронів в пастку, пастки позитронів і каналу транспортування накопичених позитронів в кільце.

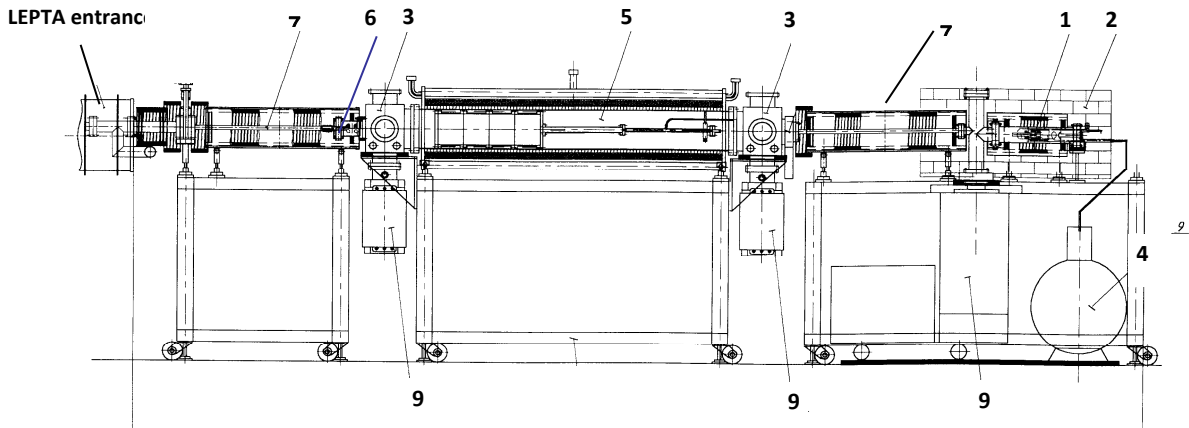
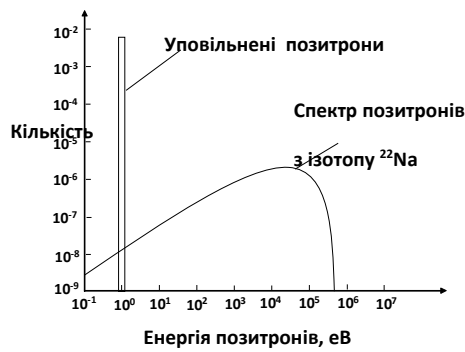


Рис.2.14. Інжектор позитронів: 1 – джерело позитронів ^{22}Na , 2 – радіаційний захист; 3 – вакуумний пост, 4 – дьюар з рідким гелієм, 5 – пастка позитронів, 6 – прохідний вакуумний ізолятор, 7 – канал транспортування частинок в кільце, 8 – канал повільних позитронів, 9 – вакуумний насос.

Джерелом позитронів служить β^+ - активний ізотоп ^{22}Na . Позитрони, що вилітають з енергією в широкому діапазоні до 0,54 MeV (рис. 2.15, а) [48], сповільнюються, проходячи крізь тонку плівку твердого неону, замороженого на тонку титанову фольгу [90]. Інтенсивність потоку уповільнених позитронів для цього джерела становить 1% від повного потоку, що при активності джерела 25 мКю забезпечує безперервний потік до $5 \cdot 10^6$ повільних позитронів в секунду у вузькому енергетичному діапазоні (рис.2.15, б).



а)



б)

Рис.2.15. Спектр позитронів ізотопного джерела ^{22}Na (а) і повільних позитронів з КрДПП (б).

Загальний вигляд джерела позитронів наведено на рис.2.16. Перед конденсацією плівки неону капсула з розташованим в ній радіоактивним ізоотопом охолоджується до температури $\sim 6\text{K}$ рідким гелієм.

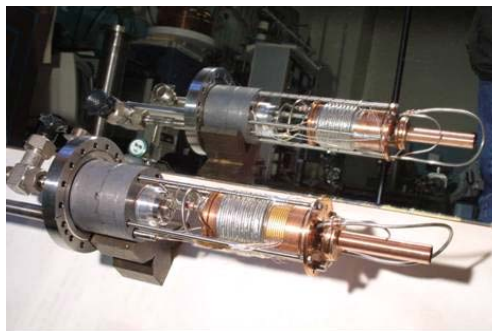


Рис.2.16. Загальний вигляд криогенного джерела повільних позитронів.

Конструкція джерела виконана таким чином, що газоподібний гелій, що утворюється після охолодження підкладки охолоджує до $\sim 30\text{K}$ тепловий екран з навитою трубкою подачі неону. Попередньо охолоджений неон через спеціальні сопла, спрямовані на підкладку, конденсується на ній у вигляді тонкої плівки. Завдяки такій конструкції, а також можливості регулювати швидкість подачі неону, вдається домогтися майже 100% конденсації неону у вигляді рівномірної по товщині плівки.

Капсула з радіоактивним джерелом перебуває під потенціалом +50 В відносно вакуумної камери інжектора, яка, в свою чергу, може бути піднята під потенціал до +10 кВ. Камера інжектора відокремлена від камери накопичувача прохідним вакуумним ізолятором. Більш докладно принцип роботи КрДПП і його тестування будуть описані у Розділі 5.

Після уповільнення моноенергічні позитрони потрапляють в канал транспортування. Одна з ділянок каналу звужена по апертурі, що перешкоджає проникненню "буферного газу" (азоту), який бере участь у механізмі накопичення позитронів, в камеру джерела, а та в свою чергу має свій вакуумний насос. Джерело і канал транспортування поміщені в поздовжнє магнітне поле, а осі їх вакуумних камер зміщені по вертикалі. За допомогою додаткового вертикального поперечного магнітного поля вдається відокремлювати повільні позитрони від тих, які з якихось причин не сповільнилися і мають більш високі енергії. Потрібні нам повільні позитрони проходять ділянку такого своєрідного "слалому" і потрапляють в пастку, а швидко не утримуються магнітним полем і потрапляють на стінку вакуумної камери, де анігілюють.

Для накопичення позитронів використовується пастка, вперше запропонована К. Сурко [91, 92]. Це пастка Пеннінга-Малмберга [93], в якій процес накопичення частинок відбувається в присутності "буферного газу" азоту.

Пастка "Сурко" комплексу ЛЕРТА (рис.2.17) складається з збірки електродів, поміщених всередину вакуумної камери. На вході і виході пастки розташовані пости вакуумного відкачування. Вакуумна камера поміщена в поздовжнє магнітне поле соленоїда і оснащена поперечними котушками корекції траєкторії частинок.

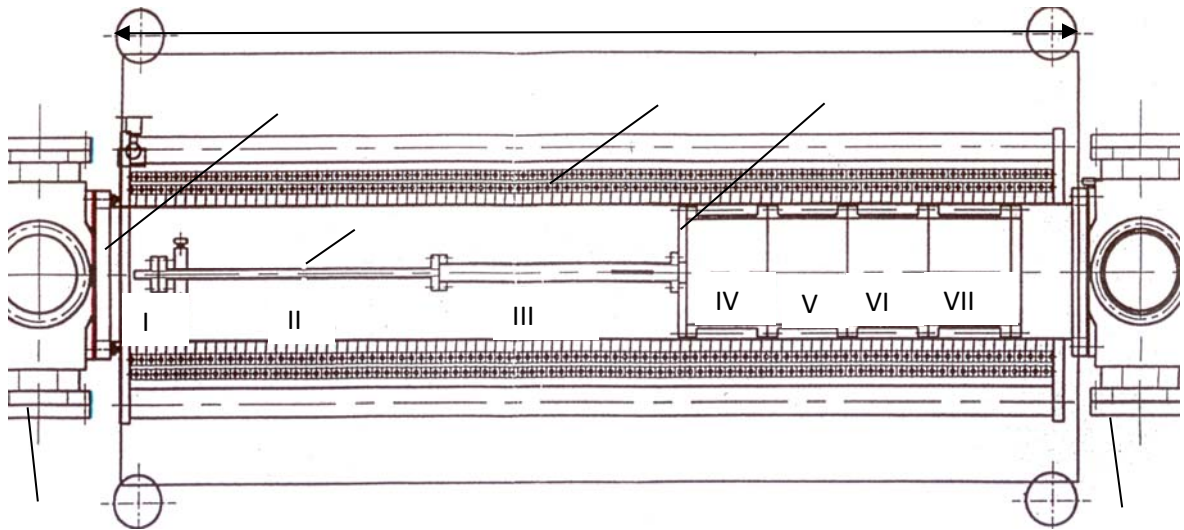


Рис.2.17. Схема пастки "Сурко" комплексу LEPTA: 1 – вакуумна камера, 2 – соленоїд, 3 – збірка електродів, 4 – отвір підключення азотної лінії, 5 – вакуумний пост, I ÷ VII – електроди.

Збірка електродів (рис.2.17, поз.3, рис.2.18) складається з порожніх циліндричних і ізольованих один від одного алюмінієвих електродів різного діаметра. Ізоляція між електродами необхідна для створення оптимального розподілу потенціалу вздовж осі пастки (рис.2.18). Довжини і діаметри електродів підбрані так, щоб створювати заданий розподіл тиску буферного газу уздовж його осі (рис.2.18).

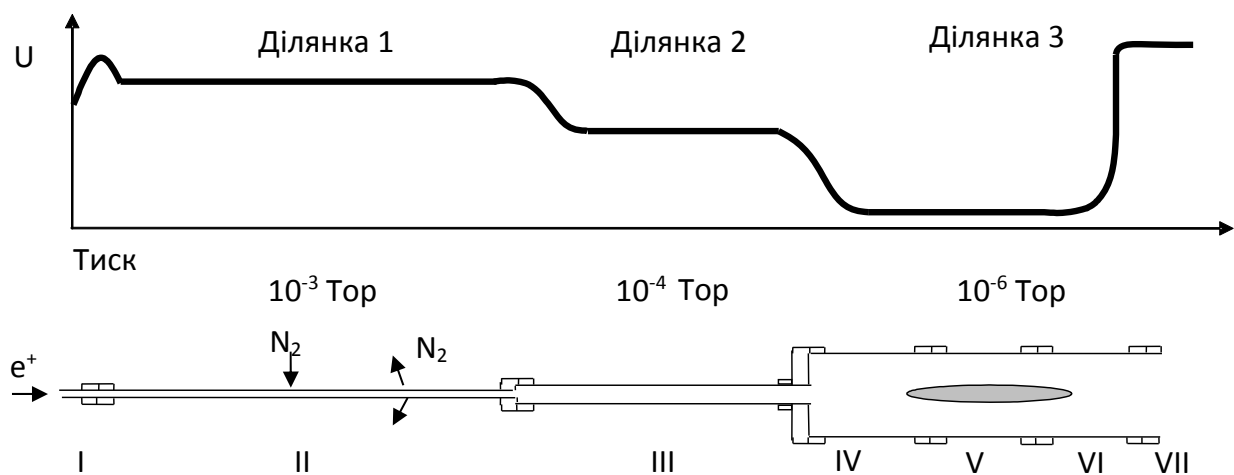


Рис.2.18. Схема електродів I-VII, розподіл потенціалів і тиску по довжині пастки.

Газ напускається в пастку через отвір в середині електрода II. Позитрони захоплюються і охолоджуються в пастці за рахунок непружних зіткнень з молекулами азоту. Тиск підбирається так, щоб потрапляючи в пастку позитрони відчували всередині електрода II в середньому одне непружне зіткнення. Втративши енергію, вони вже не можуть подолати потенціал електрода I і покинути пастку. Подальші непружні зіткнення призводять позитрони на дно потенційної ями на ділянці електродів IV-VI, де вони мають енергію порядку 1 еВ. Процес накопичення триває від 10 до 100 секунд. При оптимальному розподілі тиску буферного газу і електростатичного потенціалу вздовж пастки її ефективність (частка захоплених позитронів від повного потоку повільних позитронів) становить 30 % [94].

Для стиснення згустку і збільшення числа накопичених частинок використовується метод обертаючого електричного поля (RW-поле) [95]. Для його створення електрод IV виготовлений у вигляді циліндра, розрізаного уздовж на чотири рівні сектора. Кожен сектор ізолюваний один від одного, при цьому до кожного прикладається два види потенціалів: постійний і змінний. Постійний дорівнює потенціалу електродів V і VI, що відповідає глибині потенційної ями. Змінний потенціал має форму синусоїди, але фаза потенціалу на кожному секторі зсунуті на 90° щодо попереднього (рис.2.19).

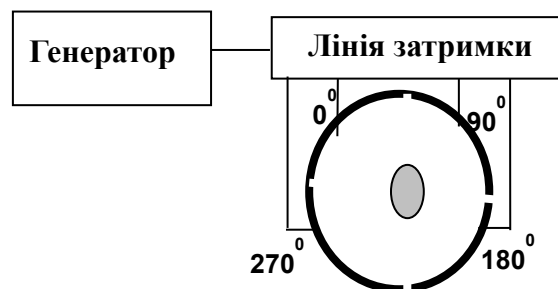


Рис.2.19. Схема формування RW-поля.

Для вимірювання параметрів накопиченого згустку використовувався всувний колектор. У ході експериментів проводилося дослідження накопичення електронів і позитронів при різних режимах роботи пастки [96 - 98].

Після завершення процесу накопичення згусток витягується з пастки при швидкому знятті напруги на електроді VII. Тривалість спаду напруги не перевищує 100 нс, що достатньо для забезпечення однообертової інжекції в кільце LEPТА. Досягнута тривалість імпульсу інжектуючих позитронів менше 500 нс. Частинки прискорюються до енергії інжекції електростатичною напругою на прискорюючому зазорі (рис.2.14, поз.6). У проекті LEPТА інжектор повинен забезпечувати до 10^8 позитронів - за імпульс. Тестування інжекції в кільце накопиченого згустку було проведено як на електронах, так і позитронах.

2.5. Висновки до розділу:

1. В даному розділі розглянуто состав прискорювально-накопичувального комплексу LEPТА.
2. Розроблено схему системи електронного охолодження. Постійний електронний пучок проведено у колектор, отримано параметри режиму роботи системи електронного охолодження для енергії 8,7 кеВ та струму 105 мА.
3. Обґрунтовано систему діагностики для отримання параметрів однопролітного та циркулюючого пучків електронів.
4. Отримано залежність часу життя циркулюючого пучка в залежності від енергії інжектіваних електронів.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ТА ТВЕРДОТІЛЬНИХ ЕФЕКТІВ НА ПРОЦЕСИ НАКОПИЧЕННЯ ТА ФОКУСУВАННЯ ЧАСТИНОК.

3.1. Формування магнітного поля накопичувача.

Зменшення числа частинок в циркулюючому пучку позитронів відбувається, головним чином, через їх поглинання на стінках вакуумної камери. Вплив анігіляції позитронів на електронах атомів залишкового газу при тиску 0,1 мкТорр і нижче можна знехтувати. Час життя позитронів по цьому процесу становить близько 100 секунд.

$$\tau = (\sigma n_0 v)^{-1}, \quad (3.1)$$

де $\sigma \leq 10^{-18}$ – перетин анігіляції, $n_0 = 3,53 \cdot 10^{16}$, $v \sim 5 \cdot 10^9$ см/сек.

Наведена у Розділі 2 функція залежності часу життя від енергії інжекції (рис.2.13) має максимум в області середніх енергій (у даному проекті), а зі зменшенням або збільшенням енергії відбувається різке зменшення τ . Таке скорочення часу життя відбувається в результаті пружного розсіяння електронів на молекулах залишкового газу і на неоднорідностях магнітного поля. Це призводить до дифузійного розширення циркулюючого пучка і, в кінцевому підсумку, до загибелі частинок на апертурі вакуумної камери. Швидкість такого розширення залежить від енергії частинок. Розсіювання на залишковому газі зменшується з ростом енергії, а розсіювання на неоднорідностях магнітного поля, навпаки, зростає. Проектна енергія інжекції 10 кеВ (Таблиця 2.1). Очевидно, що першоприоритетним став аналіз наявних проблемних місць магнітної системи, вимірювання значень неоднорідностей магнітного поля і їх компенсація в разі необхідності.

При оцінці ефекту розсіювання частинок на атомах залишкового газу необхідно враховувати одноразове пружне розсіяння - що в разі накопичувача ЛЕРТА дає значення часу життя на кілька порядків більше (від 10^2 до 10^4 разів),

ніж в звичайних жорстко-фокусуєчих накопичувачах через великого "апертурного кута" – до $\pi/2$ [99]. А також дифузний зсув частинок на апертуру через їх багаторазове розсіювання на залишковому газі. Час життя частинки в останньому випадку розсіювання пропорційний:

$$\tau_{vacuum} \propto \frac{\sqrt{E}b^2}{P} B_0^2, \quad (3.2)$$

де E - енергія, b – мінімальний радіус апертури, P – тиск залишкового газу, B_0 – магнітне поле.

Якщо за один оберт в накопичувачі частка проходить N_B збурень магнітного поля протяжністю $L_B^{(i)}$ з максимальним обуренням ΔB_i кожне з них, то час життя τ_B зростає з ростом поля і довжини обурення L_B і падає з ростом енергії частинок E як:

$$\tau_B \propto \exp\left\{\sqrt{\frac{2}{Emc^2}} \cdot eBL_B\right\} \frac{b^2}{L_B^2} \cdot \frac{T}{N_b} \cdot \sqrt{E} \cdot \left(\frac{\Delta B}{B_0}\right)^{-2}. \quad (3.3)$$

Тут T – період обертання частинки. Таким чином, залежність часу життя від енергії електронів має різко нелінійний характер: τ_B різко спадає, коли величина ларморівського радіусу порівнянна з довжиною обурення: $\rho_L(E) \rightarrow L_B$.

Залежність часу життя від дифузійних ефектів може бути оцінена наступним виразом:

$$\tau_{life} = \left(\frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_{vacuum}}\right)^{-1}. \quad (3.4)$$

На рис.3.1 побудовані відповідні розрахункові залежності для накопичувача з наступними параметрами: 6 оптичних елементів, тобто 6 «стиків», очікувана протяжність області обурення (стику) ~ 6 см, амплітуда неоднорідностей магнітного поля $\Delta B/B = 0,2$, енергія пучка 10 кеВ, апертура – 1,35 см.

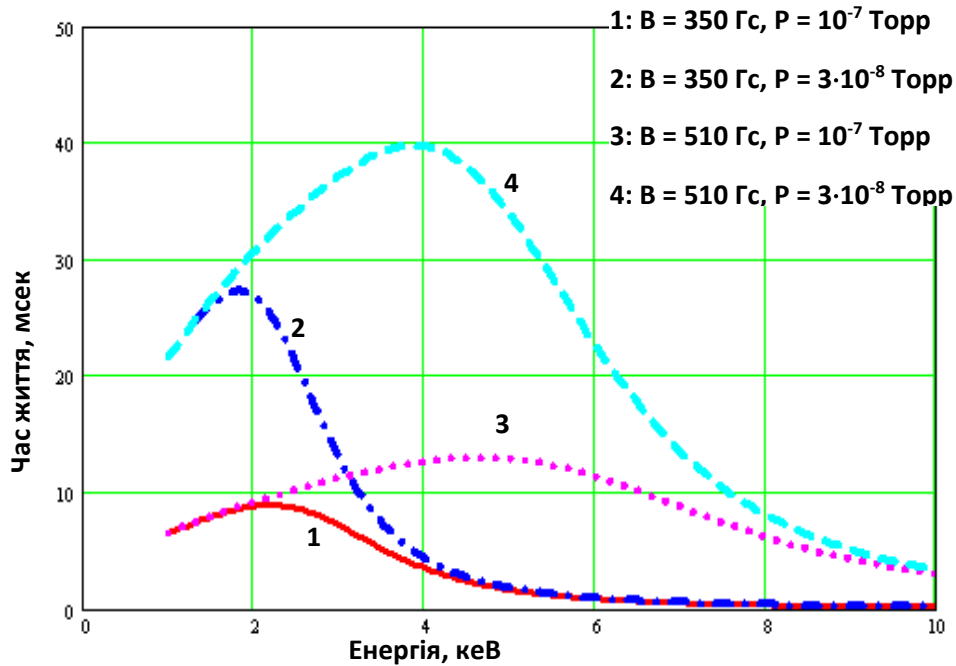


Рис.3.1. Розрахункові значення часу життя пучка при різних режимах [99].

Шини зворотного струму (ШЗС) соленоїдів накопичувача, були першим таким проблемним місцем. Конструкція всіх соленоїдів накопичувача однакова. Всі вони одношарові і охолоджуються водою, намотування виконано мідною шиною квадратного перетину зі стороною 18мм. Зовні обмотки мають магнітний екран. Струм, що пройшов по обмотці, повертається назад по ШЗС всередині магнітного екрану. ШЗС кожного соленоїда виконані з прямолінійних мідних стрижнів, які розміщені паралельно осі соленоїда рівномірно по його поперечному перерізі, та утворюють конструкцію у вигляді "білячого колеса" (рис.3.2). ШЗС мають по 6 провідників - все соленоїди, крім септумних, які мають 8 провідників. Магніти однакового перетину об'єднані в загальні секції. Так 4 соленоїда круглого перетину об'єднані в одну прямолінійну секцію, соленоїди квадратного перетину об'єднані по 2 в Тор 1 і Тор 2, а 4 соленоїда овального перетину утворюють секцію септума. У секції соленоїди збираються струбцинами-стяжками, при цьому забезпечується струмовий контакт ШЗС.

Передбачалося, що всі соленоїди магнітної системи будуть живитись послідовно, а струм буде повертатися по ШЗС. Комутація ШЗС між

соленоїдами мала будуватись мідними ізолюваними вставками в торцевих магнітних екранах на стиках елементів магнітної системи.

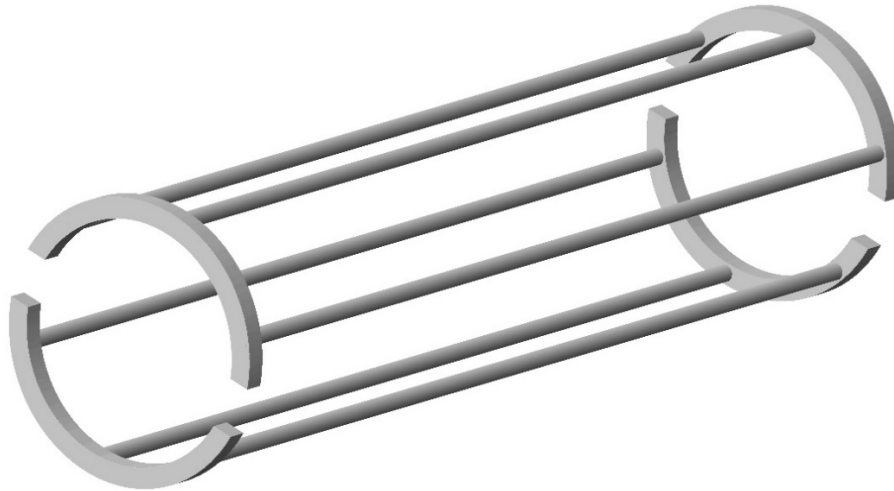


Рис.3.2. Конструкція шин зворотного струму.

Однак, така конструкція не дозволила отримати якісний контакт між сусідніми соленоїдами і ШЗС, що призводило до перегріву місць контактів. Тому спочатку від ШЗС відмовилися, і фізичний пуск накопичувача здійснювався без них. Пізніше, проаналізувавши роботу ШЗС прийшли до висновку, що існуюча комутація окремих провідників шин (рис.3.2), не дозволяє отримати рівномірний розподіл струмів по кожному провіднику окремо.

Для усунення описаних проблем, було вирішено ізолювати кожен провідник, а їх комутацію між собою виконати зовні магнітного екрану. Для цього кожна пластина, що з'єднує провідники по три, була розрізана на три сектори (рис.3.2) і в магнітних екранах соленоїдів пророблені глухі різьбові отвори для притискних гвинтів. За допомогою цих гвинтів через діелектричні прокладки було здійснено кріплення плоских мідних контактів кожного сектора. Зовні всі контакти були підключені до загального струмозбірника. Такий спосіб комутації дозволив застосувати додаткові резистори, що вирівнюють струми в кожному провіднику ШЗС. Такі резистори підбиралися експериментальним шляхом і являли собою шматки мідних провідників різного перетину і довжини (рис.3.3).

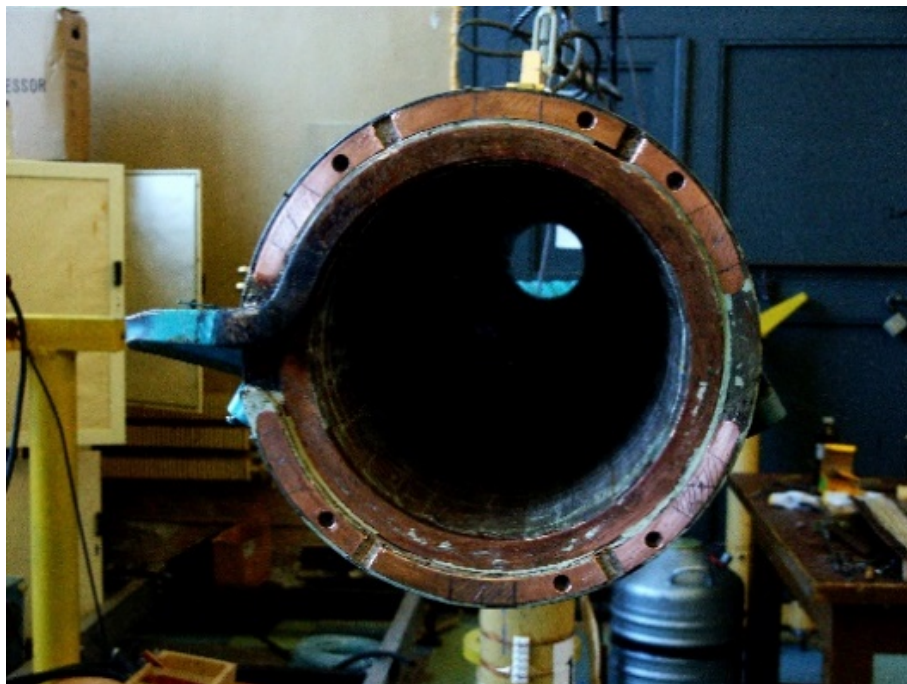


Рис.3.3. Торець соленоїда прямолінійною секції після доопрацювання.

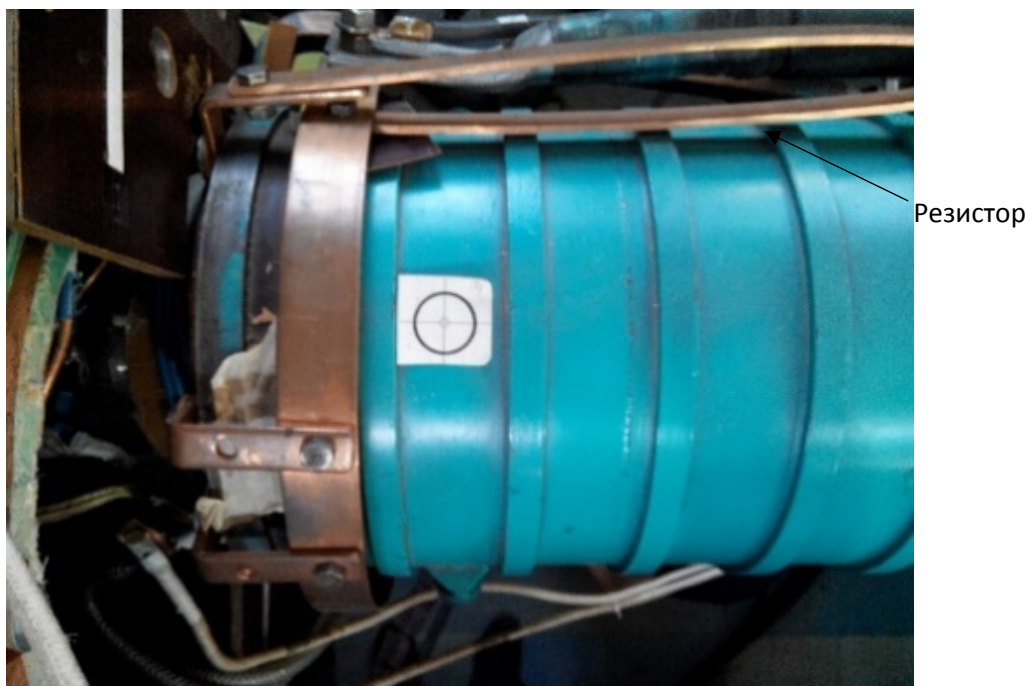


Рис.3.4. Струмозбірник прямолінійного соленоїда.

У місцях з'єднання однотипних соленоїдів одного з одним комутуюча пластина також розрізала на три сектори. Контакт забезпечується за рахунок додаткових вставок з відпаленого мідного дроту, яка розплющується при стягуванні соленоїдів один з одним (рис. 3.4).

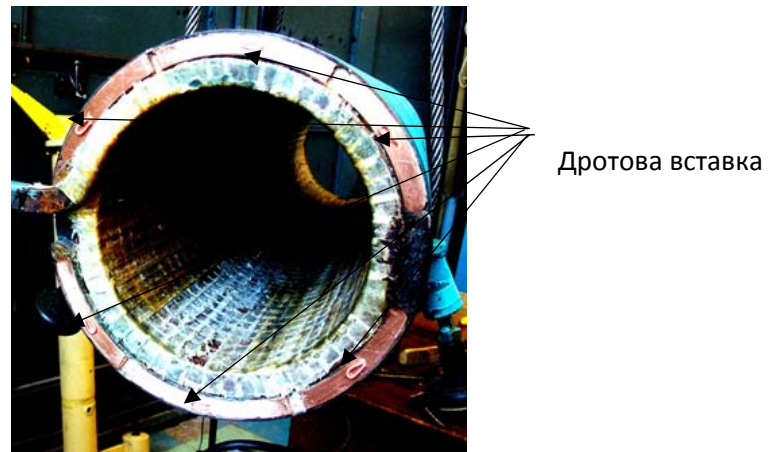


Рис.3.5. Торець соленоїда прямолінійної секції з мідними вставками.

Після приведення ШЗС в робочий стан були проведені вимірювання магнітного поля у всіх елементах магнітної системи накопичувача. Як і передбачалося, значні неоднорідності магнітного поля були на стиках соленоїдів різних розмірів (рис.3.5).

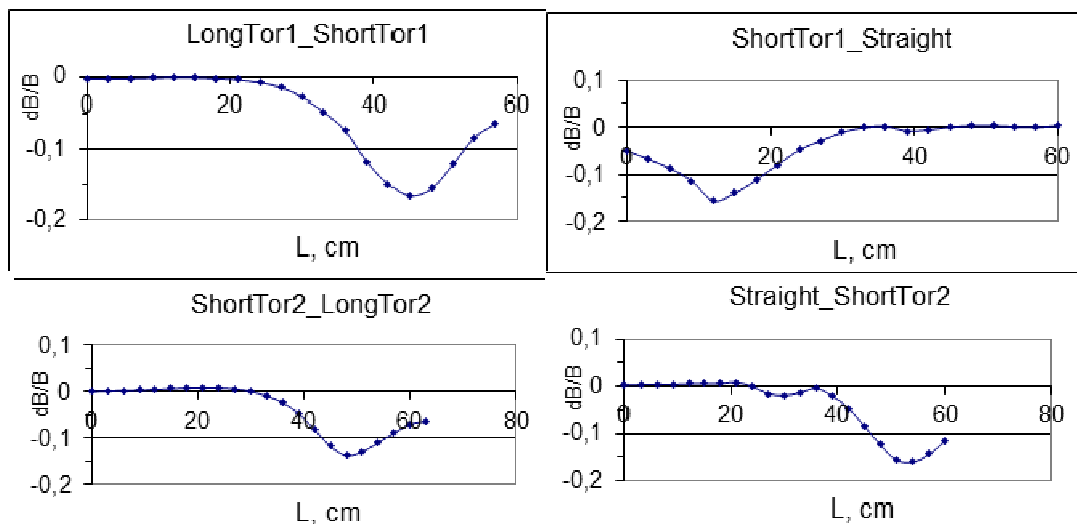


Рис.3.6. Результати вимірювань неоднорідностей магнітного поля на стиках соленоїдів.

Чисельне моделювання показало, що такі неоднорідності можна значно зменшити, якщо на кожен стик накласти по дві котушки корекції поздовжнього поля, співвісних з соленоїдами. Діаметри котушок повинні бути рівними внутрішнім діаметрам соленоїдів, а їх осьова довжина повинна бути порівнянна з кроком намотування соленоїдів (приблизно 20 мм). Кожна котушка повинна бути встановлена всередині і врівень з торцем свого соленоїда. Намотування

всіх котушок корекції здійснювалася мідною трубкою \varnothing 5 мм і товщиною стінки 0,5 мм, при цьому число витків підбиралось так, щоб всі котушки можна було живити послідовно (рис.3.7).



Рис.3.7. Стик довгого і короткого торів з встановленими котушками корекції.

Зміна комутації ШЗС унеможливила використання проектних магнітних екранів на стиках соленоїдів. Тому були виготовлені нові 4-х секційні екрани, що враховують нові конструктивні особливості шин зворотного струму (рис.3.8).



Рис.3.8. Стик короткого тора і прямолінійною секції з встановленими магнітними екранами.

Результати вимірювань неоднорідностей магнітного поля з включеними і вимкненими котушками корекції показали (рис. 3.9), що застосування корекцій дозволило знизити неоднорідності поздовжнього магнітного поля з 15-16% до 2% і краще.

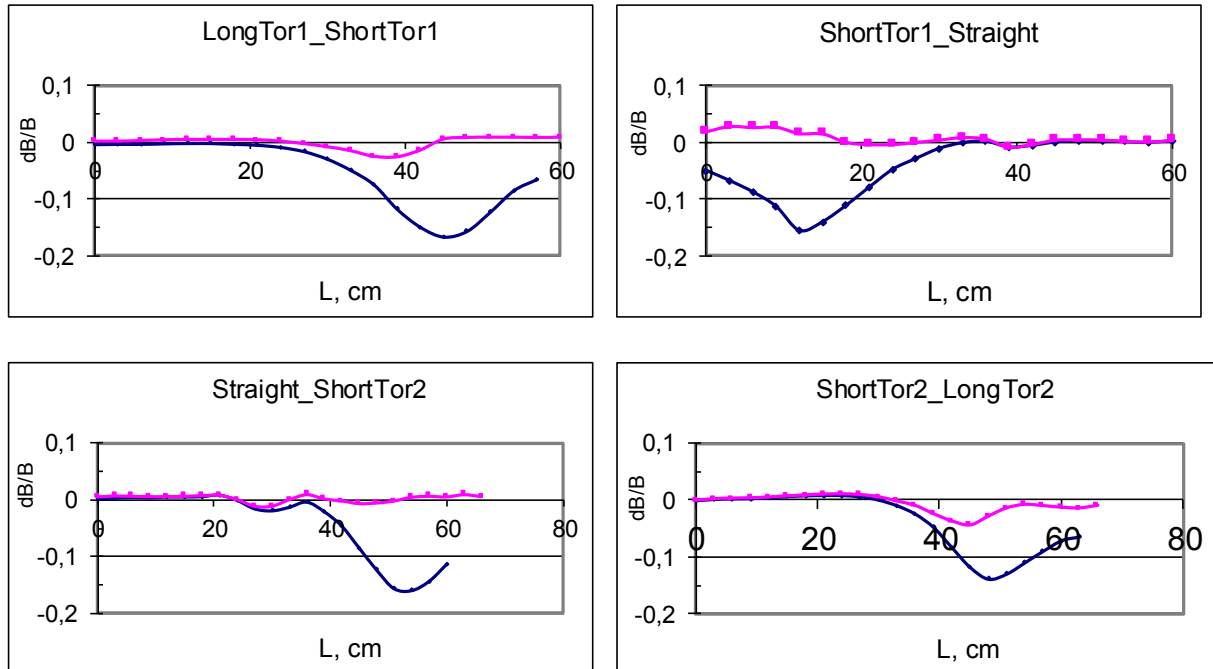


Рис.3.9. Результати вимірювань магнітного поля на стиках соленоїдів з включеними і вимкненими котушками корекції: -■- - котушки включені, -◆- - котушки вимкнені.

3.2. Вакуумні умови в Накопичувачі LEPTA

Вакуумна система накопичувача була спочатку не забезпечена системою прогріву. Причина цього – обмежене фінансування проекту. Проте, всі елементи вакуумної камери після виготовлення відпалювалися у вакуумній печі і заповнювалися на час зберігання (до монтажу) сухим азотом. Після складання вакуумної камери (поза магнітною системою) вона була прогріта під відкачуванням до 250 °С. Потім знову наповнена сухим азотом, розібрана і її елементи заглушені до моменту монтажу. Все це дозволило отримати вакуум в камері зібраного накопичувача на рівні 10-20 нТорр. Однак, при тривалій роботі з циркулюючим пучком було помічено, що вакуум погіршується після тривалої роботи накопичувача. Причиною такого погіршення виявився нагрів

вакуумних камер септумної і прямолінійної секцій, і як наслідок збільшення газіння їх стінок. Джерелом нагріву є соленоїди цих секцій, шини септума і квадруполь. Конструкція шин септума виконана таким чином, що струмоведучі частини лежать безпосередньо на камері і ізолювані електрично від неї тонким шаром склострічки. Септум розрахований так, що включається послідовно з соленоїдом септума і працює на тому ж струмі, що і основне поле. При цьому на шинах септума виділяється потужність 1,5 кВт. Єдиний механізм евакуації надлишкового тепла – природна конвекція всередині септумного соленоїда. Повна переробка септума, з метою зробити його водоохолоджуваним, зажадала б значних витрат і часу. Тому довелося обмежитися тільки примусовою вентиляцією септумного соленоїда.

Набагато важливіше була проблема нагріву камери прямолінійної секції. Весь нагрів відбувається під час роботи спірального квадруполя, при цьому виділяється потужність рівна 1,5 кВт. Квадруполь намотаний на спеціальний каркас, який надітий на вакуумну камеру. Вся ця збірка поміщена в прямолінійний соленоїд, діаметр якого трохи більше діаметра кола описаного навколо квадруполя. При такій конструкції виключено охолодження за рахунок конвекції і, на відміну від септума, де така ж потужність розподілена по масі близько 200 кг з розвиненою поверхнею, у квадруполі локальний нагрів. Тому був розроблений квадруполь, що охолоджується водою. Від старої конструкції залишився тільки каркас, що задає спіральність. Він був доопрацьований ізолюваними фіксаторами витків. Обмотки були намотані тією ж трубкою, що і котушки корекції поздовжнього магнітного поля. Через збільшення діаметра струмоведучого провідника зменшилося число провідників в кожній обмотці квадруполя (Рис.3.10). Однак, наявний запас по струму в джерелах живлення дозволив досягти необхідного градієнта поля.

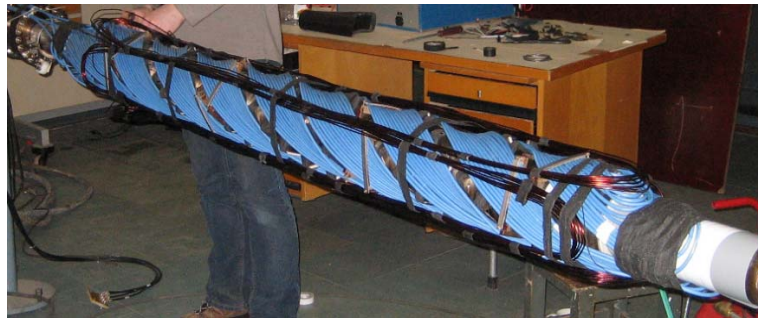


Рис.3.10. Спіральний квадруполь з водяним охолодженням.

Ще одним доопрацюванням, що несильно поліщило вакуумні умови, але значно збільшила апертуру, було виготовлення нової вакуумної камери кікера. У розділі 2 описаний електростатичний кікер нової конструкції. У попередній збірці відстань між пластинами, до яких прикладається висока напруга, становило 32 мм, що менше діаметра центрального каналу септума (50 мм). Новий корпус кікера дозволив рознести пластини на відстань 120 мм. При розробці нового корпусу була також передбачена додаткова лінія відкачування з вакуумної камери кікера.

Після описаних доробок були проведені повторні вимірювання часу життя, оптимізована орбіта циркулюючого пучка, знайдені оптимальні значення струмів корекцій поздовжнього магнітного поля, квадруполь та ін. Отримані результати наведені на рис.3.11 [100].

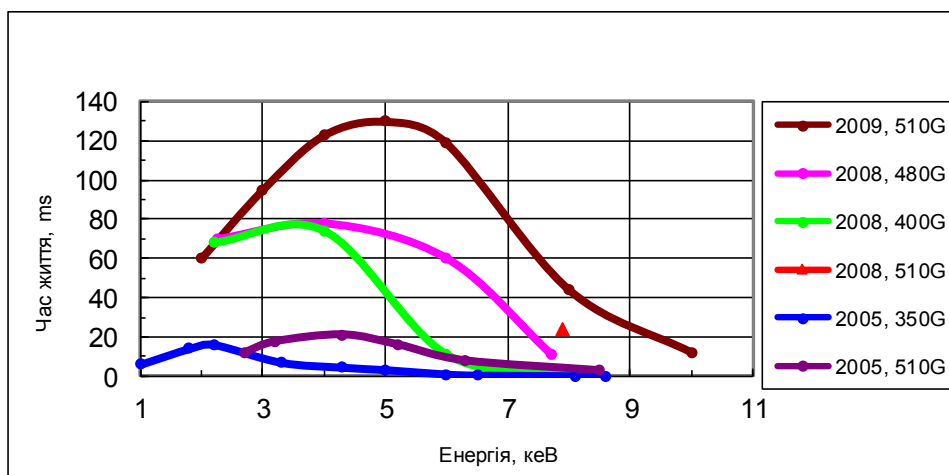


Рис.3.11. Залежність часу життя циркулюючого пучка електронів від енергії інжекції при різних полях у септумі.

Збільшення часу життя при збільшенні магнітного поля в септумном соленоїді пояснюється тим, що пучок, потрапляючи в більше поле, стискається і пролітає крізь септум з мінімальними втратами. Однак, ефект збільшення часу життя має місце до тих пір, поки на переходах з тороїдальних соленоїдів в септумний виконуються умови адиабатичності руху частинок на ділянці неоднорідності поля. Збільшення поля септумного соленоїда при цьому не порушує механізм зведення-розведення пучків, тому що поле в тороїдальних соленоїдах зберігається розрахунковим.

3.3. Тестування системи інжекція.

Для проводки пучка з інжектора в кільце служить канал транспортування. Можливість отримання циркулюючого пучка частинок, накопичених в пастці, з'явилася в серпні 2011 р., коли було закінчено виготовлення магнітної системи каналу транспортування і почалися експерименти з проведення тестового імпульсного пучка електронів з інжектора в кільце. Для цих цілей заздалегідь була виготовлена і встановлена в перший вакуумний пост пастки тестова електронна гармата (Рис.3.12). В якості катода В ній використовувалася нитка розжарювання. Спеціальний механізм дозволяє вводити її в апертуру позитронного пучка.

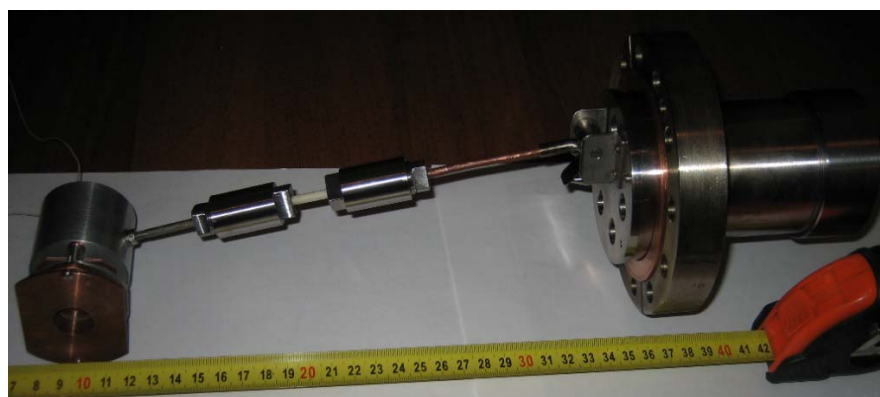


Рис.3.12. Тестова електронна гармата.

Ця гармата дозволяє також оптимізувати режим накопичення частинок в пастці. Для налаштування інжекції всередину кікера був поміщений екран з

люмінофором, а вихідний торець камери кікера заглушений фланцем з оглядовим вікном. В результаті електронний пучок був доведений до люмінофора, а потім за отриманими налаштуваннями інжектований позитронний пучок [101].

Після налаштування інжекції, кільце було зібрано і зроблені спроби отримання циркулюючого пучка позитронів. Однак виявилось, що чутливість існуючої на той час системи діагностики недостатня для детектування малих інтенсивностей (менш ніж 10^5 e^+ в згустку). Вдалося лише довести пучок позитронів до входу в септум, тобто замкнути перший оборот. При налаштуванні цього режиму з допомогою сцинтиляційного лічильника визначалося положення пучка при його попаданні на стінку вакуумної камери. Подальша робота проводилася з електронним пучком від тестової гармати. Спочатку був отриманий пучок циркулюючий в накопичувачі, коли гармата працювала в імпульсному режимі, а пастка "відкрита". Потім пастка перемикалася в режим накопичення і інжектувався згусток електронів, накопичений в пастці. Електронний струм гармати ніяк не обмежувався, і пастка в підсумку заповнювалася повністю, тобто інжектувався згусток електронів з числом 10^8 . Але як виявилось, навіть такий пучок система діагностики не може виміряти. Вдавалося побачити тільки невеликий сигнал з пікап-електродів при першому обороті пучка. Подальший розвиток проекту став неможливим без підвищення чутливості системи діагностики.

Основний недолік, що існувала на той момент системи діагностики, полягав у тому, що підсилювачі пікап-сигналів були винесені за межі соленоїда. Це було зроблено для полегшення доступу в разі ремонту. При такому способі підключення довелося використовувати довгі коаксіальні кабелі для виведення сигналу назовні від пікап-станцій до підсилювачів. Як відомо сигнал з пікап-електрода визначається виразом 3.5:

$$U = \frac{q}{C_{\text{септ}}}, \quad (3.5)$$

де $C_{\text{сум}}$ – сумарна ємність підвідного кабелю і пікап-електрода, q – заряд, що знаходиться всередині пікап-електродів.

Очевидно, що ємність пікап-електрода – величина постійна для заданої конструкції пікап-станції. Зменшити можна ємність підвідних кабелів.

З цією метою підсилювачі сигналів пікап-електродів були перероблені (зменшені їх розміри) і поміщені всередину соленоїда, безпосередньо на електроди пікап-станцій (рис.3.13). В результаті вдалося підняти чутливість системи діагностики в 10 разів. Чутливість першої пікап-станції склала 0,6 мВ/мкА на канал, другий – 1,1 мВ/мкА.

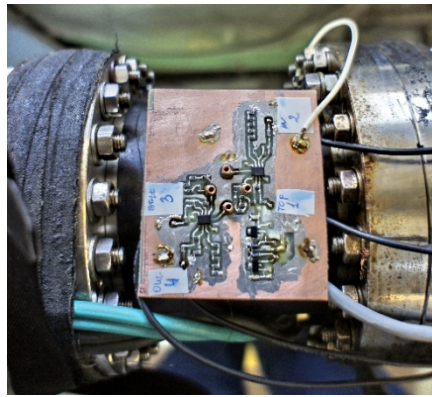


Рис.3.13. Підсилювач пікап-сигналів.

Після введення в експлуатацію нової системи діагностики вдалося отримати циркулюючий пучок електронів, інжекттованих з пастки (рис.3.14).

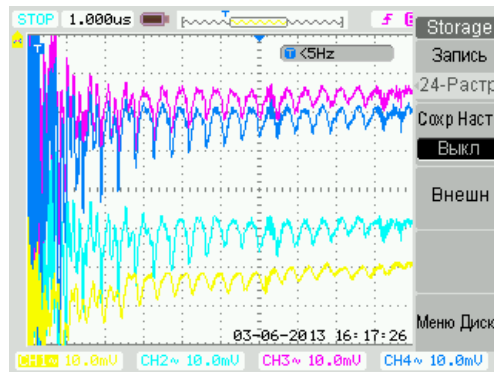


Рис.3.14. Осцилограма циркулюючого пучка електронів, інжекттованих з пастки.

3.4. Стенд для дослідження матеріалів методом вторинної електронно-електронної емісії

Однією з проблем реалізації прискорювальних комплексів є наявність в прискорювальних камерах супутніх електронів, що виникають внаслідок іонізацією атомів залишкових газів. Емісія електронів, що викликається бомбардуванням поверхонь матеріалів прискорювальних секцій, називається вторинною електронною емісією (ВЕЕ). Електрони, що бомбардують поверхню називаються первинними, а електрони, що емітуються поверхнею, - вторинними. В даний час експериментальне дослідження ВЕЕ є ефективним засобом вивчення фізичних процесів, що розігруються в твердих тілах при їх взаємодії з електронами. [103]

Основною характеристикою вторинно емісійних властивостей речовини є залежність коефіцієнта ВЕЕ σ від енергії E_p монокінетичного пучка первинних електронів. Коефіцієнт ВЕЕ визначається як відношення числа N_2 всіх електронів, що випускаються за час t поверхнею мішені, до числа N_1 первинних електронів, що потрапляють за цей час на мішень, або, що те ж саме, як відношення вторинного струму $I_2 = eN_2/t$, де e – заряд електрона, до первинного $I_1 = eN_1/t$: [103]

$$\sigma = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.6)$$

Відношення струмів σ є усереднена кількість вторинних електронів, створених одним первинним.

Прості міркування показують, що коефіцієнт вторинної емісії зростає з енергією первинних електронів E_p . Однак зростання коефіцієнта вторинної емісії відбувається тільки до деякого, для кожної речовини певного значення E_{max} , якому відповідає максимальне значення коефіцієнта вторинної емісії. [104]

Залежно від роду мішені максимальне значення коефіцієнта ВЕЕ σ_{max} може бути як менше, так і більше одиниці. Використання явища ВЕЕ в техніці засноване на застосуванні емітерів, для яких σ_{max} значно більше одиниці. З іншого боку, в багатьох приладах ВЕЕ - явище небажане, і в таких випадках

прагнуть використовувати матеріали з малими значеннями σ_{max} , зазвичай меншими одиниці. Взагалі величина σ_{max} залежить від багатьох факторів: матеріалу мішені, характеру її обробки, особливо від стану поверхні, температури мішені, кута падіння первинного пучка і т. ін.

Вторинні електрони, що випускаються мішенню при енергії первинних електронів E_p , мають швидкості, які відрізняються як за величиною, так і за напрямком. При бомбардуванні мішені монокінетичним пучком електронів з енергією E_p частина з них пружно відбивається від мішені, та розсіюється на кути, більші ніж 90° , без втрат енергії. Ця частина, складає основну частку вторинних електронів з енергіями E_p порядку декількох електрон-вольт, зі збільшенням E_p швидко зменшується і при енергіях $E_p \geq 0,1$ кеВ не перевищує декількох відсотків від числа первинних електронів. Інша частина первинних електронів розсіюється і гальмується в речовині. Одним із наслідків гальмування первинного електрона є утворення повільних, істинно вторинних електронів, або електронів речовини, які отримали від первинного частину його енергії, достатню для виходу з мішені. Таким чином, в потоці вторинних електронів є три групи: пружно відбиті електрони з енергіями $E = E_p$; повільні, істинно вторинні, з найбільш імовірною енергією в декілька електрон-вольт і непружно розсіяні (або відбиті) електрони, тобто первинні електрони, що втратили частину своєї енергії при взаємодії з речовиною мішені. Розподіл вторинних електронів по енергіях є важливою характеристикою явища ВЕЕ. [103]

У Секторі електронного охолодження ОІЯД створений стенд для вимірювання ВЕЕ. [105] Стенд створювався для дослідження ВЕЕ різних матеріалів, які можуть бути використані в якості покриттів вакуумної камери колайдера NICA. [106]

Електронні хмари представляють собою скупчення вдруге емітованих електронів, що генеруються в камері прискорювача за рахунок прискорення електронів, що з'явилися в результаті іонізації залишкового газу. Їх резонансне множення відбувається за рахунок вторинної емісії електронів зі стінок

вакуумної камери прискорювача. Густина електронних хмар залежить від коефіцієнта вторинної електронної емісії матеріалу вакуумної камери.

Електронні хмари, які присутні в прискорювачах і коллайдерах з пучком високої інтенсивності, формують позитивний зворотний зв'язок, який збуджує нестійкість пучків. Генерація електронних хмар також призводить до збільшення тиску у вакуумній камері, аж до повної втрати пучка, оскільки появлення електронних хмар супроводжується десорбцією молекул газу, спожитих в стінках камери. Крім того, збільшується теплове навантаження на криогенні поверхні вакуумної камери в разі надпровідного прискорювача. Збільшення тиску у вакуумній камері також викликає збільшення емітанса пучка через розсіювання частинок пучка на залишковому газі.

На рис.3.15 показана схема вимірювання коефіцієнта вторинної емісії, що реалізована в стенді.

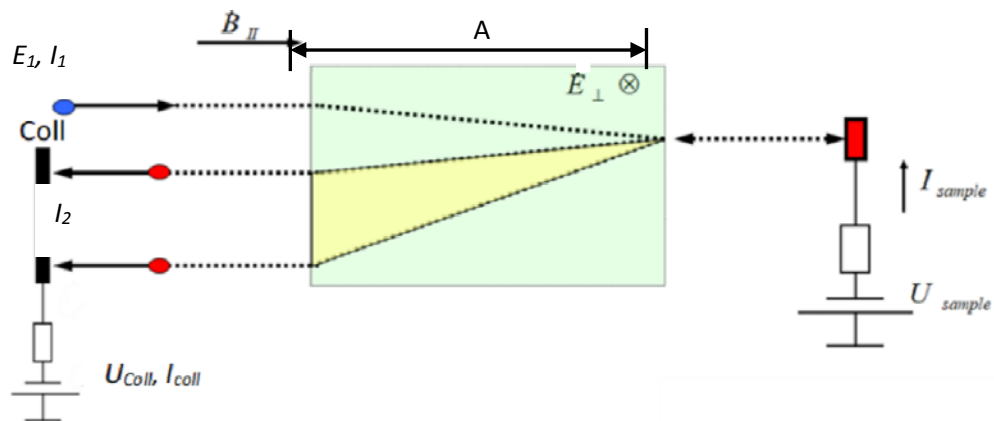


Рис.3.15. Схема вимірювання коефіцієнта ВЕЕ.

Вся схема вимірювання розташована у поздовжньому магнітному полі. На ділянці A докладено поперечне електричне поле. Таке поставлення експерименту перешкоджає прильоту вторинних електронів назад в електронну гармату. Первинний моноенергетичний електронний пучок з енергією E_1 і струмом I_1 , зміщується на ділянці A так, щоб потрапити в досліджуваний зразок. Вторинні електрони рухаються в зворотному напрямку по магнітних

силових ліній. На ділянці A вони зміщуються в тому ж напрямку, що і первинний пучок, тому що напрямок дрейфу залежить від напрямку векторів магнітного та електричного полів і не залежить від напрямку руху зарядженої частинки. Вимірюючи струм первинного електронного пучка I_1 , а також струм зразка I_{sample} , можна порахувати коефіцієнт ВЕЕ:

$$\eta = \frac{I_2 - I_{sample}}{I_1}, \quad (3.7)$$

Струм колектора I_2 вимірюється для перевірки правильного налаштування всієї схеми вимірювання, при цьому струм колектора має дорівнюватися алгебраїчній сумі струмів гармати і зразка.

Через різницю по енергіях вторинні електрони по-різному дрейфують в електричному полі (рис.3.15, жовтий сектор). Подаючи різні напруги на колектор, можна вимірювати спектр вторинних електронів.

На рис. 3.16 показаний стенд для вимірювання коефіцієнта ВЕЕ.



Рис.3.16. Стенд для вимірювання коефіцієнта ВЕЕ.

З метою вивчення впливу радіаційного опромінення в процесі експлуатації прискорювальних секції на значення вторинної електронної емісії нами було опромінено зразки сталі 9Гп електронним пучком зі значеннями енергії 5 МеВ та струмом пучка 1 мА, протягом 30 сек та 50 сек. Дослідження проводились на стенді для вимірювання вторинної електронної емісії. Зразки

піддавались впливу зондуєчого електронного пучка з енергією 100 еВ, що спричиняло вибивання вторинних електронів з поверхні досліджуваних зразків. Коефіцієнт вторинної емісії вимірювався при різних значеннях магнітного поля (рис.3.17), в якому були розміщені зразки (Таблиця 3.1).

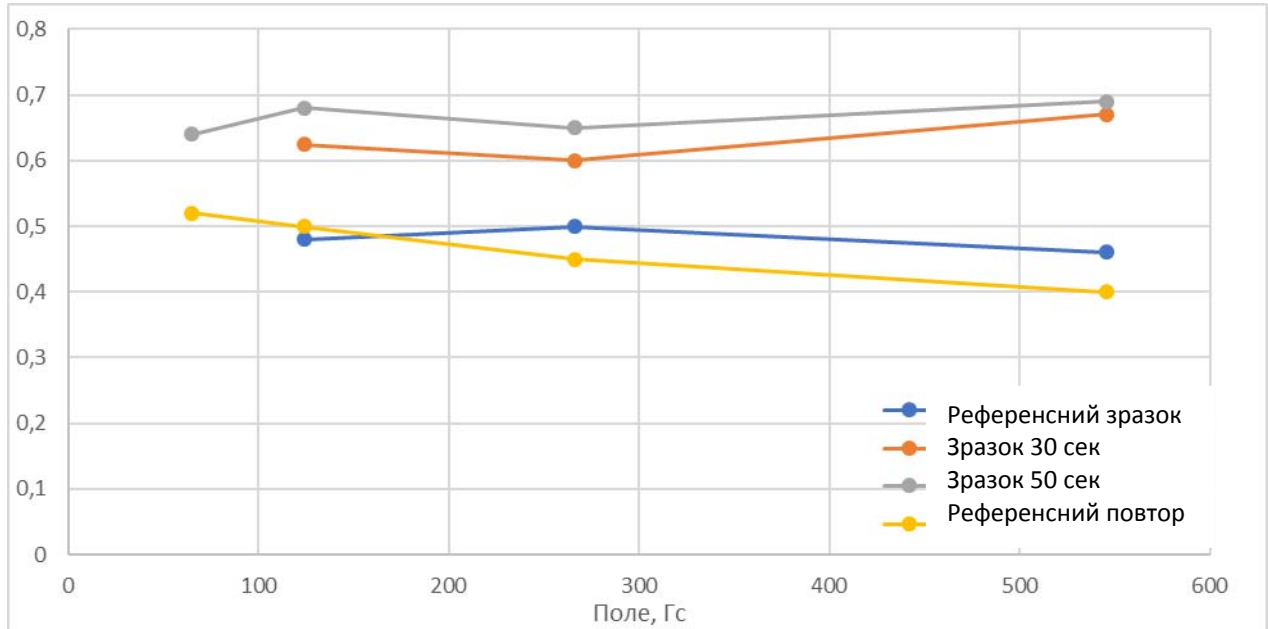


Рис.3.17. Залежності коефіцієнта ВЕЕ від поля для різних зразків.

Таблиця 3.1

Залежність коефіцієнту вторинної електрон-електронної емісії від магнітного поля для різних зразків.

Поле, Гс	Коефіцієнт вторинної електрон-електронної емісії			
	Референсний зразок	Референсний повтор	Зразок обробка 30 сек	Зразок обробка 50 сек
65,1		0,52		0,64
123,9	0,48	0,5	0,625	0,68
266	0,5	0,45	0,6	0,65
546	0,46	0,4	0,67	0,69

Як бачимо на прикладі сталі 9Гс, радіаційно-термічний вплив сприяє збільшенню значення ВЕЕ. , що може пояснюватись явищем дифузії домішок до поверхні, тобто, важливою вимогою до матеріалу камер прискорювальних секції є радіаційно-термічна стабільність сполук сталей, з яких вони виготовляються.

3.5. Висновки до розділу:

1. В даному розділі були досліджені неоднорідності повздовжнього магнітного поля, а також запропоновані технічні методи для їх зменшення. Виявлено недосконалість існуючої конструкції магнітної системи, яка не дозволяла виконати якісно електричні з'єднання.

2. Встановлено, що на вакуумні умови в секції охолодження впливає нагрів спірального квадруполя. Це сталося в результаті того, що експериментально одержані режими роботи відрізняються від теоретичних в сторону збільшення робочого струму.

3. Розроблено систему для тестування режиму інжекції з пастці позитронів у накопичувальне кільце.

4. Розроблено підсилювач сигналів з пікап-електродів. Це збільшило чутливість системи діагностики та дозволило вперше отримати циркулюючий пучок електронів накопичених у пастці.

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ НАКОПИЧЕННЯ І УТРИМАННЯ ПОЗИТРОНІВ В ІНЖЕКТОРІ.

4.1. Поліпшення вакуумних умов у вакуумній камері

Основне завдання інжектора позитронів - накопичення необхідного для інжекції в кільце згустку позитронів. В результаті багаторазових експериментів по накопиченню позитронів не вдалося досягти проектних параметрів накопичення - 10^8 позитронів. Основним обмеженням цього було короткий час життя накопичених позитронів. Воно становило всього кілька секунд. Хоча моделювання цього процесу за допомогою електронів давало значно більші часи - 100 секунд і більше. Найбільш імовірною причиною обмеження часу життя позитронів була загибель в зіткненнях з молекулами залишкового газу. Вирішальну роль для анігіляції в таких зіткненнях грають великі молекули органічних речовин. Навіть невелика кількість таких молекул дуже сильно позначається на величині часу життя через те, що позитрони рухаються постійно уздовж осі пастки і за час накопичення здійснюють мільйони коливань.

Слід зазначити, що в той час вакуумну відкачку пастки забезпечували два іонних насоса зі швидкістю відкачування 400 л/сек. При цьому базовий тиск був на рівні $2 \cdot 10^{-8}$ Торр. Для перевірки версії про наявність органічних молекул в залишковому газі було вирішено встановити в вакуумний обсяг криогенний екран. Його завдання полягало в осадженні на себе молекул всіх речовин з температурою замерзання вище 77 К. Криогенний екран являє собою циліндр з міді, який може бути охолоджений до температури рідкого азоту (рис.4.1).



Рис.4.1. Криогенний екран: а) екран в зборі; б) встановлений всередині пастки.

Охолоджується екран за рахунок рідкого азоту, який прокачується по змійовику. Місцем установки послужив другий вакуумний пост пастки, тобто місце безпосередньо біля області накопичення. Такий екран працює подібно криогенному насосу, відкачуючи воду, вуглекислий газ і органіку. Основний його недолік в тому, що він не збільшує швидкість відкачування по азоту, який в достатку присутній в режимі накопичення. Тестування проходило в такий спосіб: спершу включався режим накопичення позитронів і вимірювався час життя накопиченого згустку, потім включали охолодження екрану і через деякий час (необхідне для охолодження) вимірювання повторювалися. Виявилось, що з включеним екраном час життя накопичених позитронів збільшився приблизно в 3 рази (з 2-3 секунд до 7-9 секунд). Постійне використання криогенного екрану при роботі з позитронами було важко через велику витрату рідкого азоту. Тому був придбаний криогенний вакуумний насос зі швидкістю відкачування 1200 л/с і встановлений замість іонного. Експерименти з накопичення з таким насосом показали, що додаткове збільшення часу життя не відбулося, але значно покращилися вакуумні умови в області накопичення. З'явилася можливість працювати при високому тиску буферного газу і, як наслідок, більшій кількості накопичених позитронів.

Спектрометричні вимірювання складу залишкового газу, проведені пізніше, також підтвердили наявність в його складі органічних сполук (рис.4.2).

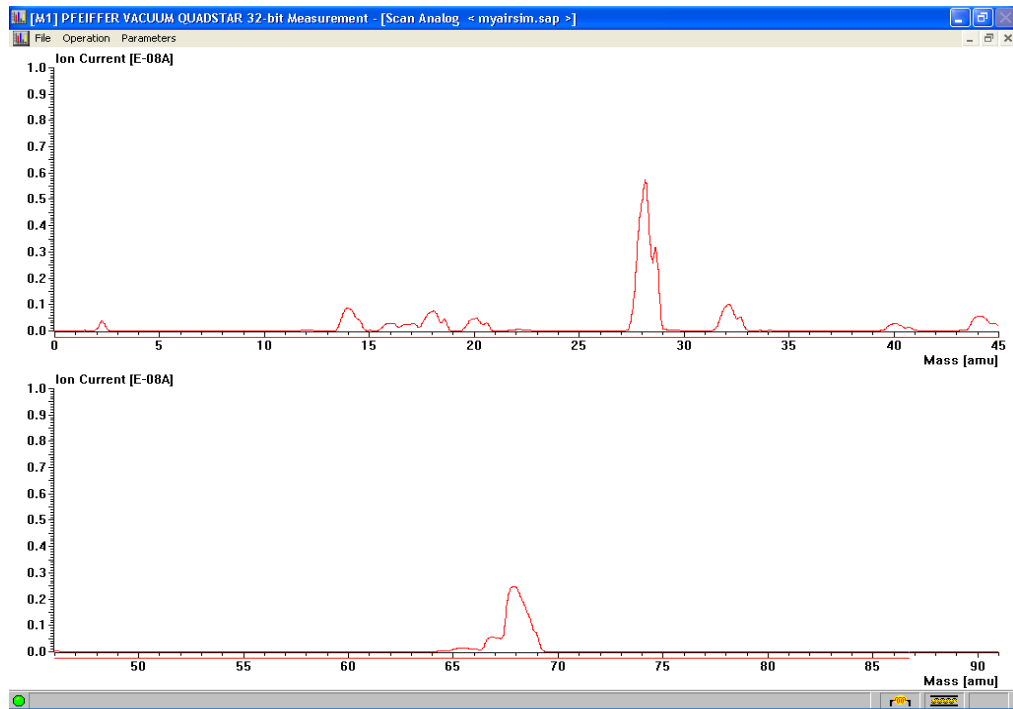


Рис.4.2. Спектральний склад залишкового газу пастки позитронів.

Мас-спектрометр, який використовувався при вимірах, дозволяв виявляти сполуки з атомною масою не більше 100. З'єднання з атомною масою 68, виявлені в залишковому газі, можуть бути як самостійні речовини, так і осколки великих молекул, що утворилися в результаті роботи іонних насосів. Очевидно, що у вакуумній системі були присутні органічні сполуки. Швидше за все вони залишилися через неякісне очищення елементів вакуумної системи після виробництва. Установкою додаткових насосів в пости відкачування проблему було не вирішити. Якщо в системі присутній органіка, то швидкість її випаровування із стінок від швидкості відкачки не залежить. Необхідне було повторне очищення вакуумної камери.

Після очищення вакуумна система була зібрана. Під час складання на всі елементи були намотані нагрівачі для прогріву камери.

Повторні дослідження процесу накопичення показали, що час життя накопиченого пучка збільшилася і склав 20 сек. Такий час життя дозволив почати вивчати процес накопичення більш докладно.

4.2. Дослідження динаміки в пастці

Пастка Пеннінга-Малмберга-Сурко (ПМС) установки LEPTA [96, 97] має традиційну для пасток ПМС геометрію (рис. 4.3). У 2013-2014 рр. відкачку пастки було значно поліпшено: встановлені турбомолекулярний і вакуумний насоси. Вибір розподілу потенціалів електродів 1-8 і тиску буферного газу (високоочищений молекулярний азот) є критичним. При оптимальному розподілі потенціалів і тиску позитрони, спускаються по атомарним і молекулярним рівням, дуже швидко долають область енергії, де ймовірність анігіляції максимальна - т. зв. "Щілина Ore".

Обертаюче електричне (RW) поле створюється в електроді 4, він розрізан на 4 сектори, на які подаються постійний і (попарно) змінні потенціали (Розділ 2). Типова амплітуда RW-напруги на секторному електроді 1 В.

Позитрони, накопичені в пастці, скидаються на колектор, і народжені анігіляційних гамма-кванти реєструються сцинтиляційним лічильником в аналоговому режимі. Чутливість лічильника прокалібрована на еталонному β^+ -джерелі і становить $N_{trap} = 6,66 \cdot 10^3 \cdot V_{[V]}$ позитронів, $V_{[V]}$ — амплітуда сигналу в вольтах. Сигнал від одиночного позитрона має амплітуду $V_1 = 10$ мВ. Звідси статистична похибка вимірювання $\Delta N_{trap} / N_{trap} = 0,1 / \sqrt{V_{[V]}}$. Потік позитронів, що інжектуються в пастку, вимірюється тим же лічильником в режимі рахунку при відкритій пастці: $\dot{N}_{e^+} = 66,6 \dot{N}_{counts}$.

Для вимірювання поперечних розмірів позитронного згустка використовувалися рухливий колектор і сцинтиляційний лічильник.

В експериментах на електронах пучок формується трьохелектродною гарматою з імпрегнованим оксидним катодом діаметром 2 мм. Потенціал катода -50 В. Вибір тривалості і частоти повторення імпульсів напруги на керуючому електроді дозволяє регулювати середній за часом потік електронів, імітуючи при цьому режим накопичення повільних позитронів від радіоактивного джерела.

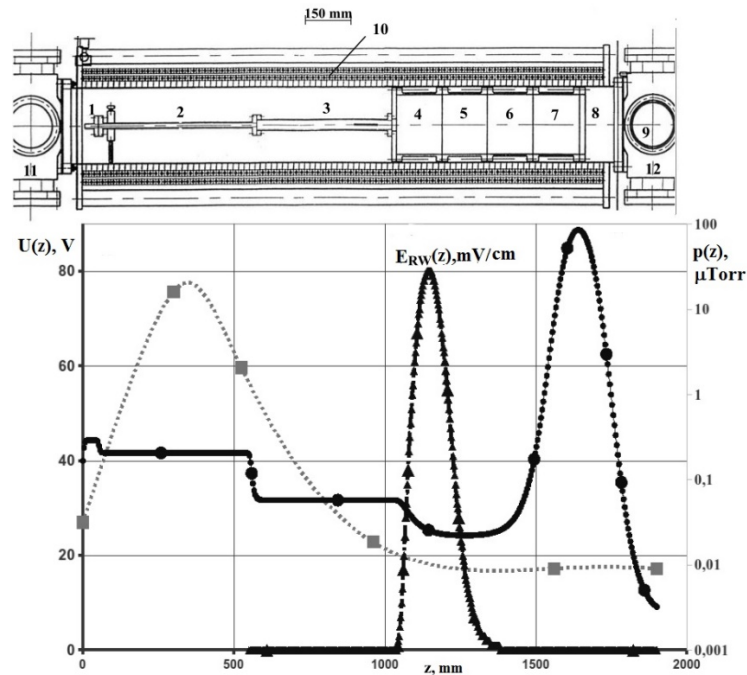


Рис.4.3. Схема пастки ПМС установки LEPTA. 1-8 - электроды, 4 - разрезный (секторный) электрод, за допомогою якого створюється RW-поле, 9 - колектор і сцинтиляційний лічильник, 10 - соленоїд, 11 і 12 - турбомолекулярний і кріогенний вакуумні насоси. Нижче - для режиму накопичення позитронів розподіл на осі пастки потенціалу $U(z)$ електричного поля електродів (●) та RW-поля $ERW(z)$ (▲), а також тиску буферного газу $p(z)$ (■).

Електрони, накопичені в пастці, також скидаються на колектор, і їх заряд вимірюється за допомогою підсилювача струму.

Поперечні розміри електронних згустків вимірювалися за світінням люмінофора в області 9 за допомогою ПЗЗ камери.

В ході експериментів проводилося дослідження накопичення електронів і позитронів при різних режимах роботи пастки [96, 97, 108]. Процес накопичення добре описується залежністю числа накопичених частинок N_{bunch} від часу накопичення при фіксованих значеннях ефективності захоплення ε , потоку інжектуємих позитронів \dot{N} і часу життя частинок згустку в пастці τ .

$$N_{bunch}(t) = \varepsilon \dot{N} \tau (1 - e^{-t/\tau}) \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon \dot{N} t, & t \ll \tau, \\ \varepsilon \dot{N} \tau, & t \gg \tau \end{cases} \quad (4.1)$$

При відомому потоці \dot{N} перша з асимптотик дозволяє визначити значення ефективності ε , а друга - значення $\varepsilon\tau$. Крім того, фітування експериментальної кривої накопичення формулою (4.1) дає незалежно значення τ . Типові параметри для позитронів: $\varepsilon \approx 10\%$, $\dot{N} \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$, $\tau \approx 10 - 20 \text{ c}$.

Принципово нові результати були отримані в дослідженнях «RW-спектрів» в експериментах 2014-2015 рр. [108, 109] (після істотного поліпшення вакуумних умов в пастці). При вимірюванні залежності числа частинок в згустку N_{bunch} , ефективності захоплення частинок в накопичення ε і часу їх життя τ в пастці від частоти RW-поля, були досліджені режими різних - низьких і високих - інтенсивностей потоків інжектуюмих частинок і накопичених згустків. Були знайдені, які раніше не спостерігалися, низькочастотні резонанси частоти RW-поля, що викликають значне збільшення числа накопичених частинок. Крім того, вперше був виявлений ефект «антирезонанса» на низьких, порядку десятків герц, частотах RW-поля, при яких обертання поля призводить до повного руйнування накопичених згустків (рис. 4.4).

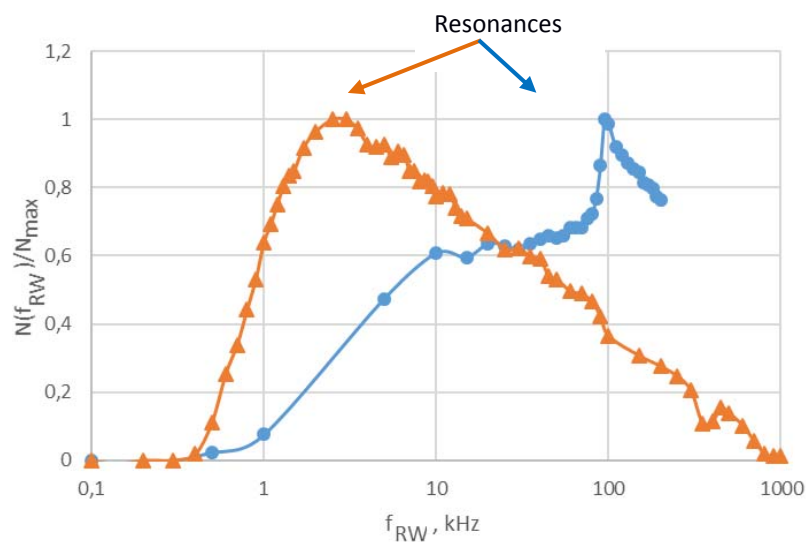


Рис.4.4. Залежність числа накопичених позитронів ▲ і електронів ● від частоти RW-поля, кГц: амплітуда RW-поля 1 В, тиск буферного газу в області накопичення 2,75 мкТорр [108].

Ефективність дії RW-поля істотно залежить від розподілу потенціалів електродів пастки. Значення частоти резонансу зростає експоненціально з кількістю частинок в згустку N_{bunch} (рис. 4.5), і ефективність накопичення на резонансній частоті зростає в міру накопичення частинок $N_{bunch}(t)$, досягаючи максимуму, і потім дещо знижується [108].

У 2014-2015 рр. була детально досліджена залежність ефективності накопичення позитронів від тиску буферного газу (Табл. 4.1). З даних таблиці видно, що при збільшенні тиску час життя частинок τ повільно падає, а ефективність захоплення ε росте. При цьому $\varepsilon\tau$ також зростає. Вмикання RW-поля на резонансній частоті збільшує число накопичених частинок більш ніж удвічі.

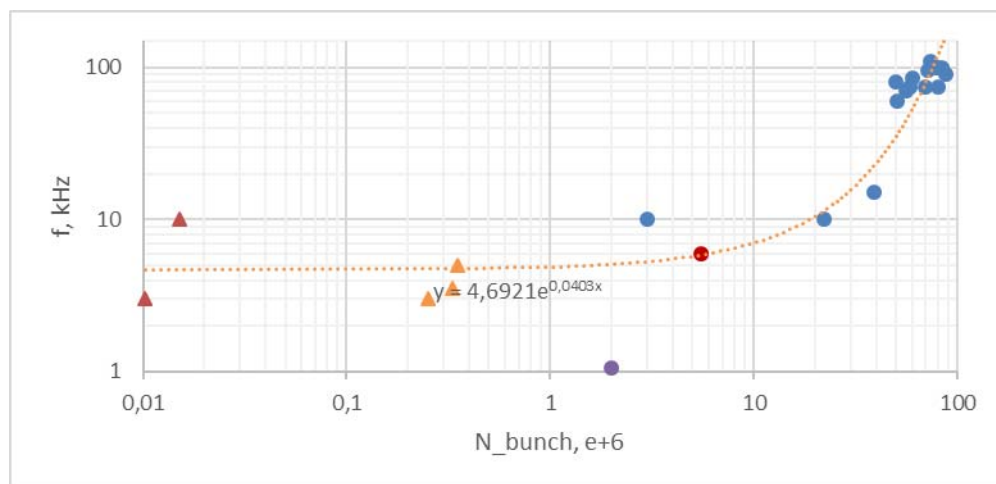


Рис.4.5. Залежність резонансної частоти від кількості частинок N_{bunch} , накопичених за 20 с: ● — електрони, ▲ — позитрони; пунктирна лінія — тренд $y(x) = 4,6921 \times \exp(0,0403 \cdot x)$.

Таблиця 4.1.

Залежність параметрів накопичення від тиску буферного газу

$P, 10^{-6} \text{ Тор}$	$\tau, \text{ sec}$ RW off/RW on	$\varepsilon, \%$ RW off/RW on	$\varepsilon \times \tau, \% \times \text{sec}$ RW off/RW on	$N_{bunch}, 10^5$
1,1	4,5/12,5	1,5/1,4	6,75/17,5	0,3/0,7
4,0	5,0/8,5	6,5/7,1	32,5/60,3	1,2/2,2

7,0	5,0/9,0	11,5/11,3	57,5/101,7	1,7/2,9
10,1	5,0/7,5	16,3/17,2	81,5/129,0	2,0/3,3
13,7	3,5/6,0	25,6/23	89,6/138,0	2,1/3,2

Експериментальні результати послужили підставою для формулювання моделі механізму накопичення частинок в пастці ПМС. Перші деталі механізму були сформульовані в [97]. Потім після серії експериментів [108, 109] була побудована 3D-модель, що описує накопичення частинок в пастці. Перш за все, стало ясно, що рух частинок в пастці ПМС можна розділити на швидке поздовжнє, уздовж осі симетрії пастки, і відносно повільне, в площині, поперечній осі [97]. Характеристики поздовжнього руху у вигляді загасаючих осциляцій («bounce-oscillations») визначаються поздовжньою складовою електричного поля електродів і «тертя», що виникає в зіткненнях з молекулами буферного газу. На поперечний рух основну дію чинять однорідне поздовжнє магнітне поле і радіальна складова електричних полів електродів пастки і просторового заряду накопиченого згустку, а також тертя зіткнень. Дифузія частинок в зіткненнях з буферним газом компенсується дією RW-поля, що мають резонансний характер дії на накопичені частки.

У 2015 р. механізм, що пояснює ефект стиснення позитронних згустків в пастці з поздовжнім магнітним і обертовим електричним полями, було повністю сформульовано та підтверджено експериментально [108]. Він полягає в наступному.

Траєкторія руху частинки в поперечній площині в області поза RW-поля являє собою результат складання швидкого циклотронного обертання і повільного «магнетронного» обертання відносно осі симетрії статичних електричних полів пастки і згустку. Тертя, що виникає у зіткненнях, що призводить до стиснення орбіт циклотронного обертання і розкручування траєкторій магнетронного руху — дифузія накопичених частинок на стінки вакуумної камери з подальшою загибеллю. Буферний газ необхідний для захоплення частинок в область накопичення, однак, його дія значно зменшує

час життя частинок. RW-поле в електроді 4 (рис. 4.3), будучи консервативним, здатне зменшувати розміри згустки, збільшувати час життя частинок і, як наслідок, ефективність їх накопичення. Цей ефект має місце, якщо частота RW-поля узгоджена з частотами ω_{magn} магнетронного обертання і поздовжніх осциляцій частинок. В іншому випадку середня за часом дія RW-поля дорівнюється нулю. В області RW-поля частка з початкової точки (x_0, y_0) вльоту в полі рухається по круговій траєкторії радіусом

$$R_{RW}(z) = cE_{RW}(z)/B\omega_{RW} \quad (4.2)$$

з центром в точці

$$(x_0 - R_{RW} \cdot \cos\alpha, y_0 - R_{RW} \cdot \sin\alpha), \quad (4.3)$$

де E_{RW} та ω_{RW} — амплітуда и частота RW-поля, $B = 0,1$ Тл — однорідне магнітне поле соленоїда пастки, α — кут між вектором E_{RW} та віссю x у момент вльоту (рис. 4.6). Це результат точного рішення рівнянь руху частинки при постійному вздовж осі z поля E_{RW} і наявності магнітного поля (ларморівський радіус багато менше R_{RW}).

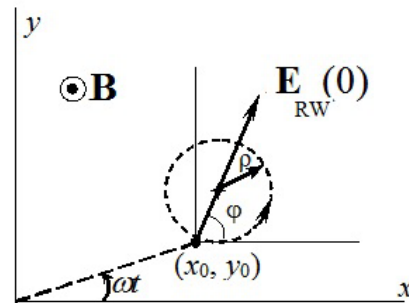


Рис.4.6. Траєкторія «замагніченої» частинки в області RW-поля; вісь пастки при $x = y = 0$.

За час τ_{RW} перебування в RW-поле частка проходить відрізок дуги $\Delta s = R_{RW}\omega_{RW}\tau_{RW}$ кола, та зміщується до осі пастки, якщо в момент вльоту кут α має оптимальне значення. Окремий випадок такої траєкторії показаний на рис. 4.7.

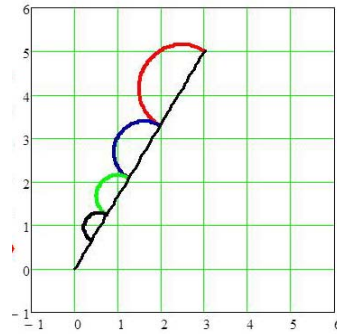


Рис.4.7. Траєкторія частки в області RW-поля при багаторазових "bounce" - осциляціях; вісь пастки при $x = y = 0$, $\alpha = 59^\circ$, $(RRW)n = kn - 1(RRW)l$, $k = 0, 7$, $n = 1, 2, \dots$, $(RRW)l = 1, 0$; частота ω_{RW} обрана така, що частка в області RW-поля здійснює половину обороту.

За період поздовжніх коливань частки T_{bounce} , вектор RW-поля повертається на кут $\Delta\varphi_{RW} = \omega_{RW} \cdot T_{bounce}$, а частка зміщується по азимуту щодо осі пастки на кут

$$\Delta\varphi_e = \int_0^{T_{bounce}} \omega_{magn}(t) dt + \omega_{RW} \tau_{RW}, \quad (4.4)$$

де τ_{RW} — час перебування частинки в RW-поле. З рівності $\Delta\varphi_{RW} = \Delta\varphi_e + 2\pi n$, n — ціле, слідує умова резонансу:

$$(\omega_{RW})_{res} = \frac{\int_0^{T_{bounce}} \omega_{magn}(t) dt + 2\pi n}{T_{bounce} - \tau_{RW}}. \quad (4.5)$$

Ця формула «3D-резонансу» — наближена. Вона справедлива при

$$\Delta s \ll R_{RW}, \text{ або } \omega_{RW} \tau_{RW} \ll 1. \quad (4.6)$$

Таким чином, головні характеристики і умови 3D-резонансу у повздовжньому магнітному полі можна сформулювати наступним чином:

1. Кутова швидкість обертання частинки по круговій орбіті в RW-полі не залежить від енергії частинки.

2. Радіус траєкторії (кола) частинки в RW-поле пропорційний напруженості поля E_{RW} .

3. Період поздовжніх коливань слабо залежить від енергії частинок (квазіпараболічний потенціал поля електродів пастки $U(z)$).

4. При русі в пастці частинки здійснюють обертання навколо її осі під дією схрещених полів – поздовжнього магнітного та радіальної компоненти електричного поля електродів пастки і просторового заряду згустку накопичених частинок.

5. 3D-резонанс виникає при виконанні умов (4.5), (4.6).

Отримані результати дають пояснення давно існуючої проблеми пояснення резонансної дії RW-поля на процес накопичення частинок. Отримані результати, допомагають вибрати параметри пастки ПМС, що дозволяють формувати згустки заряджених частинок високої інтенсивності і утримувати їх тривалий час з метою використання їх у фундаментальних і прикладних дослідженнях (наприклад, для позитронної анігіляційної спектроскопії матеріалів). Розвиток і вдосконалення методів накопичення частинок дозволяє просунути в постановці експериментальних досліджень нового покоління. Даний цикл робіт дозволив отримати результати, що знаходяться на рівні сучасної науки в цій області.

Існує кілька обмежень на максимальне число частинок, що накопичуються в пастці N . межа по просторовому заряду визначається умовою догляду частинок з електричної потенційної ями. Для циліндричного згустку довжини L і радіусу R_b , потенціал просторового заряду ϕ_0 на осі згустку описується формулою [96]

$$\phi_0 = e \frac{N}{L} \left(1 + 2 \ln \frac{R}{R_b} \right), \quad (4.7)$$

де R — радіус електродів в області накопичення. При досягненні такого значення N , коли

$$\phi_0 \geq \Delta\phi_{3-4}, \quad (4.8)$$

($\Delta\phi_{3-4}$ — різниця потенціалів електродів 3 і 4) потенційна яма «відкривається» і перестає утримувати частинки.

Інше обмеження щільності частинок в пастці n_b накладає «критерій Бріллюена» [97] — умова, при якій розштовхуючі сили просторового заряду і відцентрові сили обертового згустку перевершують магнітну складову сили Лоренца утримуючого магнітного поля:

$$n_B \leq \frac{B^2}{8\pi mc^2}. \quad (4.9)$$

Для позитронів при величині магнітного поля 0,1 Тл цей критерій дає $n_B = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Для легких частинок-електронів і позитронів-ліміт встановлюється, перш за все, по просторовому заряду. Граничне число електронів в згустку можна оцінити з умов (4.7), (4.8):

$$N_{\max} = \frac{\Delta U \cdot L}{e \cdot \left(1 + 2 \ln \frac{R}{R_b}\right)}. \quad (4.10)$$

Для $R_b \approx 0,5 \text{ см}$, $R = 10 \text{ см}$, $L = 30 \text{ см}$ и $\Delta U = 10 \text{ В}$ ця оцінка дає $N_{\max} = 3 \cdot 10^8$, що добре узгоджується з експериментальним результатом $N_{\text{exper}} = 1,3 \cdot 10^8$ (максимальне число електронів, накопичених в пастці).

У режимі накопичення були виміряні струми витоків на електроди. Виявилось, що електрони дійсно йдуть на електрод 3. Струми витоків на інші електроди не вдалося зафіксувати. Ці результати є підтвердженням механізму обмеження числа накопичених частинок ефектом просторового заряду, описаного вище (4.10).

Другим підтвердженням цієї гіпотези є експеримент, з вивчення ефекту динамічного збільшення глибини потенційної ями в процесі накопичення: у час накопичення електронів глибина потенційної ями «примусово» збільшувалася, що дозволило накопичити $N_{\text{exper}}^* = 2 \cdot 10^8$. Це значення в 1,3 рази перевищує максимальне число накопичених частинок без застосування методики динамічного збільшення глибини потенційної ями.

4.3. Висновки до розділу:

1. Виявлено, що наявність криогенного екрану в області накопичування збільшує час життя накопичених позитронів. Це пояснюється затриманням на поверхні екрану великих молекул органічних сполук які могли потрапити до вакуумної камері.

2. Проведено спектрометричні дослідження залишкового газу у вакуумній камері. Виявлено, що дійсно в вакуумному об'ємі присутні органічні сполуки. У зіткненнях з цими молекулами позитрони анігілюють, що зменшує час життя накопиченого згустку.

3. Проведене очищення вакуумної камери, оснащення її системою прогріву, а також використання додаткового кріогенного насосу дозволило покращити вакуумні умови та реалізувати режими роботи пастки з підвищеним тиском буферного газу. Завдяки цьому були проведені фундаментальні дослідження процесу накопичення та удосконалене розуміння дії RW-поля.

РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ КАНАЛУ ПАС ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ РАДІАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В СПЛАВАХ.

5.1. Канал ПАС спектроскопії

Позитронна анігіляційна спектроскопія (ПАС) є чутливим методом детектування різних (так званих «open-volume») дефектів розміром від 0,1 до 1 нм з мінімальною концентрацією до 10^{-7} см⁻³ (відношення числа дефектів до числа атомів на одиницю об'єму речовини). Метод ПАС має на 4 порядки кращу просторову чутливість в порівнянні з просвічуючим електронним мікроскопом (transmission electron microscope — TEM).

На відміну від важких частинок (іонів) позитрони в речовині рухаються не по прямолінійній (переважно) траєкторії, а дифундують, зазнаючи розсіювання на великі кути. Тому для них вводять напівемпіричну формулу середньої глибини проникнення

$$h = (A/\rho) \cdot E_{[\text{keV}]}^n \quad (5.1)$$

Тут h — середня глибина, ρ — щільність речовини в г/см³, A , n — константи, що визначаються чисельним моделюванням.

Створення пучка монохроматичних позитронів змінною енергії знайде широке застосування в методі ПАС, наприклад, у вивченні радіаційних дефектів [110, 111] або тонких плівок [112, 113]. Уповільнення і монохроматизація потоку позитронів з радіоактивного джерела відкриває можливість простежувати зміни структури матеріалу в тонких шарах, починаючи від поверхні зразка, що неможливо в традиційній постановці методу ПАС на потоці позитронів в широкому спектрі енергій.

Існує три експериментальних методи ПАС.

Перший -- спостереження кутової кореляції анігіляційних гамма-квантів. Цей метод використовується в фундаментальних дослідженнях, до яких

відносяться визначення розподілу імпульсів електронів і поверхні Фермі. Його застосування ускладнене громіздкістю необхідної апаратури і відсутністю її виробництва промисловістю. У зв'язку з цим метод використовується рідко.

Другий метод — вимірювання часу життя позитронів в речовині (PALS). Він дозволяє визначити вид і розмір дефектів, концентрацію по збільшенню часу життя позитрона в дефекті пропорційно обсягу дефекту. Цей метод може бути використаний як в стандартних експериментах на спеціальних ізотопах, таких як ^{22}Na , так і на імпульсних пучках позитронів з певною часовою прив'язкою.

Третій метод заснований на ефекті Доплера — зміна енергії анігіляційного гамма-кванта («Доплерівське Розширення Анігіляційної Лінії» – ДУАЛ). Цей метод використовується для виявлення вакансій, вакансійних кластерів, а також їх концентрації. Анігіляція захопленого дефектом позитрона дає більш вузький спектр анігіляційної лінії 511 кеВ в порівнянні з тим, який створюється при анігіляції позитрона з електронами атомів ідеальної структури або електронами провідності.

Така відмінність викликана утворенням дефектів, вільних порожнин зазначених вище «нано-розмірів», в яких позитрон вільно «живе», пружно відбиваючись від стінок порожнини, поки не анігілює з електроном одного з атомів стінки. В ідеальній структурі позитрон розсіюється на атомах середовища як пружно, так і непружно. Непружне розсіювання збільшує розкид позитронів по енергії і, відповідно, величину доплерівського розширення енергії анігіляційних гамма-квантів.

Аналіз форми отриманих гамма-спектрів проводиться стандартним для ПАС методом обчислення так званих S -параметрів (рис. 5.1). Він дорівнює відношенню площі під кривою гамма-спектра в «реперному» інтервалі до площі гамма-спектра в повному («нескінченному») інтервалі енергій реєструємих квантів. Реперний (reference) інтервал $\Delta\varepsilon_{ref}$ енергій визначається по гамма-спектру реперного («ідеального») зразка з умови

$$S_{ref} = \frac{A_S}{A} \sim 0,5 \quad (5.2)$$

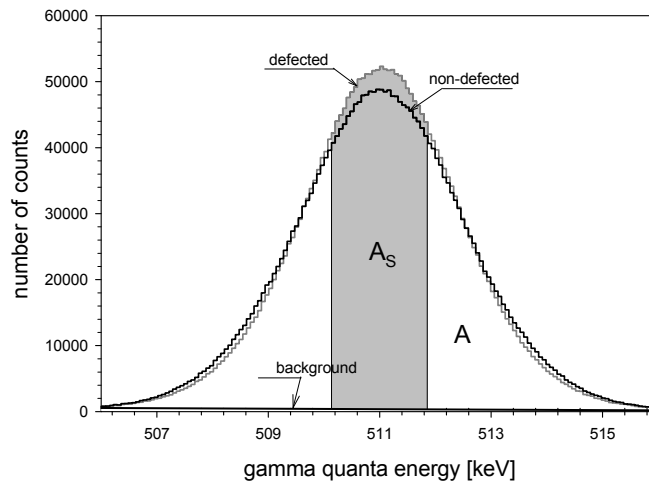


Рис.5.1. Лінії гамма-спектрів реперного (*non-defected*, чорна лінія) і деформованого (*defected*, сіра лінія) зразків; $\Delta\epsilon_{ref} \approx 1,65$ кеВ [107].

Потім проводяться вимірювання S -параметра для спектрів зразків, що досліджуються («дефектних»). На рис. 5.1 добре видно різницю площ під кривими гамма-спектрів в інтервалі $\Delta\epsilon_{ref}$ для реперного і деформованого (деформація ковзання) зразків.

Процедура вимірювання розподілу концентрації дефектів полягає в наступному. Знімається залежність S -значення енергії позитронів $S(E_p)$ (отже, від глибини h) і експериментальні результати для реперного і «дефектних» зразків фітуються і визначаються значення двох «підгінних параметрів — S_{sat} — значення S -параметр, що відповідає рівню насичення кривої $S(E_p)$ при $E_p \rightarrow \infty$ (рис. 5.1), і L_{pdl} — довжина шляху позитрона в речовині (positron diffusion length). Для визначення концентрації дефектів використовується формула

$$C_{def} = \frac{1}{\tau_{ref}\mu} \cdot \left[\left(\frac{L_{pdl}}{L_{ref}} \right)^2 - 1 \right], \quad (5.3)$$

де τ_{ref} — час життя позитрона в реперному зразку, отриманий з незалежних експериментів ПАС за методом вимірювання часу життя, μ — параметр, отриманий чисельним моделюванням, C_{def} — максимальна концентрація дефектів, яка досягається при насиченні функції $S(E_p) = S_{sat}$.

Метод ДУАЛ може бути використаний як в стандартних експериментах на спеціальних ізотопах, таких як ^{22}Na , так і на пучках повільних позитронів. Стандартний метод використовується для дослідження зразків з глибинами залягання дефектів в десятки і сотні мікрометрів. Використання пучка повільних позитронів дозволяє досліджувати приповерхневі дефекти і різні тонкоплівкові покриття. Цей метод дозволяє виявляти дефекти з глибинами залягання від десятків нанометрів до одиниць мікрометрів.

5.2. Спектрометр ДУАЛ

Метод доплерівської ПАС використовується в даний час на комплексі ЛЕРТА в ОІЯД. Спектрометр ДУАЛ виконаний за стандартною схемою (рис. 5.2). Він складається з високовольтного джерела, HpGe детектора, передпідсилювача, багатоканального аналізатора і комп'ютера. Для реєстрації гамма-квантів, що народжуються при анігіляції позитронів, використовується HpGe детектор фірми Baltic Scientific Instruments. Детектор має наступні

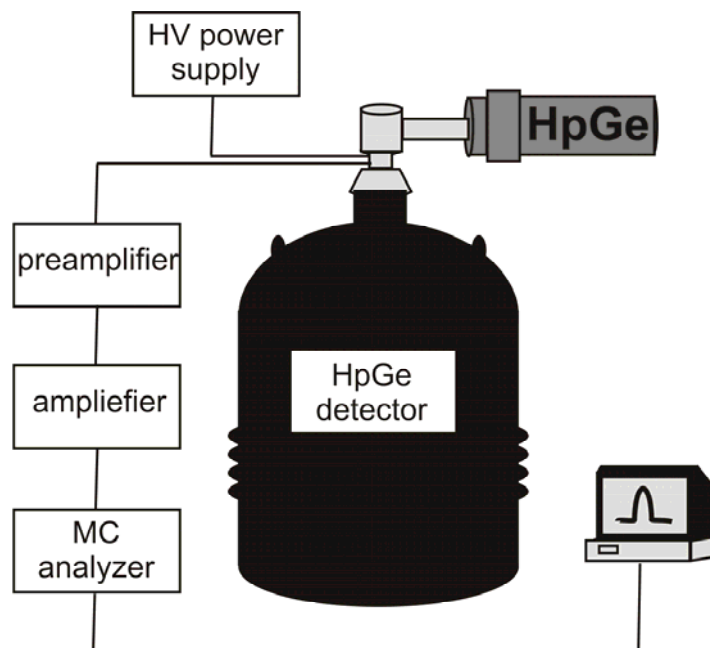


Рис.5.2. Схема спектрометра ДУАЛ.

параметри: відносна ефективність реєстрації 1,33 MeV γ -квантів (по стандарту IEC 60973) дорівнюється 30 %; дозвіл по енергії (повна ширина на напіввисоті на 511 keV) менше 1,25 keV; енергетичний діапазон роботи детектора лежить в

діапазоні від 40 кеВ до 10 МеВ. Детектор живиться від джерела напруги 6 кВ, виконаного в стандарті NIM тією ж компанією.

Досліджувані зразки поміщаються в вакуумну камеру на виході пастки (рис. 5.3, поз. 3) на осі прямого потоку позитронів з КрДПП (потенціали електродів пастки в цьому випадку дорівнюють нулю).

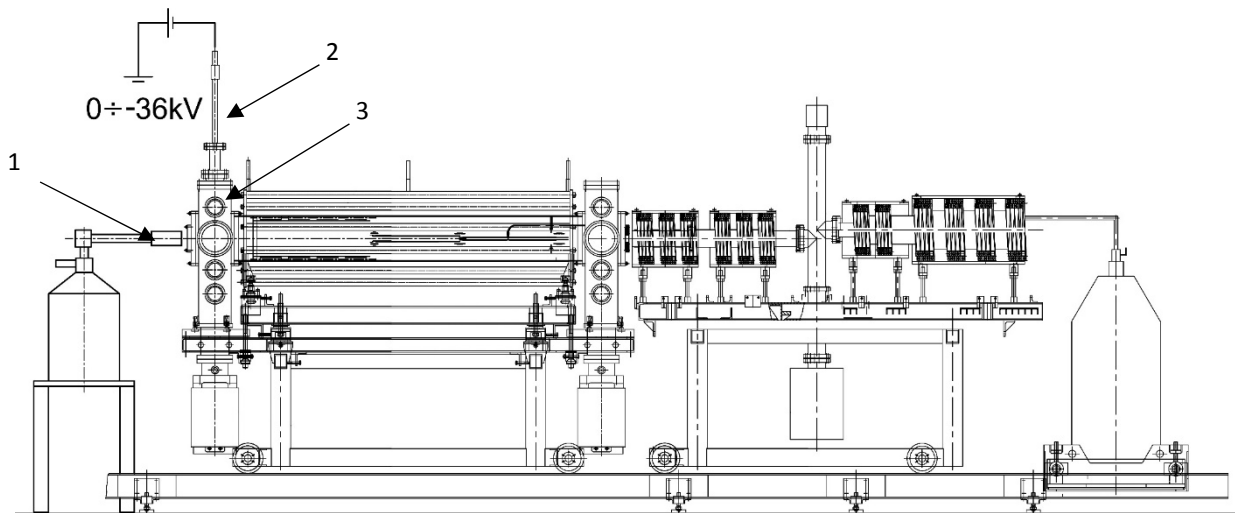


Рис.5.3. Спектрометр ДУАЛ комплексу LEPTA: 1 – детектор, 2 – вакуумний маніпулятор, 3 – вакуумна камера з зразками.

Зразки розміщені на рухомому ізольованому вакуумному введенні, на який подається регульований негативний потенціал до 35 кВ. Анігіляційні гамма-кванти реєструються H_rGe детектором, який при енергії кванта 511 кеВ має роздільність 1,2 кеВ. Детектор розташовано в поглибленні («кишені») вакуумної камери максимально близько до місця де опромінюються зразки.

Сигнал після проходження детектора (передпідсилювач вбудований в детектор) посилюється в підсилювачі ORTEC 572 А і надходить на мультіканальний аналізатор TUKAN 8k з 8192-канальним дозволом, який має зв'язок з комп'ютером.

5.2. Криогенне джерело повільних позитронів

У Розділі 2 було сказано, що джерелом повільних позитронів служить криогенне джерело КрДПП. Емітером позитронів в ньому служить β^+ - активний

ізоотоп ^{22}Na . Такі емітери серійно виробляються лабораторією iThemba LABS (Кейптаун, ПАР).

Створений в ОІЯД КрДПП є ключовим елементом інжектора повільних позитронів. Високоенергійні позитрони, що випускаються при розпаді ізотопу ^{22}Na , потрапляють в твердотільний сповільнювач, де втрачають свою енергію на іонізаційних втратах і (нижче порогу іонізації) через створення пари електрон-дірка і збудження екситонів і фононів сповільнюються до теплових швидкостей. В якості сповільнювача обраний твердий неон.[115] Це необхідно, тому що позитрони, що випускаються ізоотопом ^{22}Na , мають широкий енергетичний спектр з максимумом при енергії близько 200 кеВ. Для формування з цього спектру монохроматичного пучка позитронів низької енергії використовується сповільнювач, який характеризується ефективністю уповільнення ϵ і шириною спектру повільних позитронів.

Для досягнення максимального виходу повільних позитронів з сповільнювача товщину шару твердого неону необхідно підібрати приблизно рівною іонізаційній довжині пробігу позитрона при енергії, що відповідає максимуму спектру позитронів, що емітуються ^{22}Na . В результаті уповільнення в твердому неоні з широкого спектру позитронів, емітованих ^{22}Na , формується безперервний спектр повільних монохроматичних позитронів.

Зазвичай в джерелах, що використовують в якості сповільнювача твердий неон, процес «вирощування» сповільнювача починають з охолодження підкладки емітера до температури порядку 5К, після чого в вакуумну камеру, куди поміщений радіоактивний ізоотоп, напускають газоподібний неон, частина якого конденсується на підкладці, формуючи твердий сповільнювач. Така схема формування сповільнювача має ряд істотних недоліків: неон нерівномірно конденсується на поверхні підкладки, немає можливості контролювати товщину сповільнювача, а процес конденсації проходить зі зміною вакуумних умов. Запропонована схема формування сповільнювача і конструкція КрДПП (рис. 5.4) дозволяють виключити зазначені недоліки — виробляти попереднє охолодження газоподібного неону і направляти потік

охолодженого неону через сопла безпосередньо на підкладку.[116] перевагою такої схеми є можливість контролю товщини конденсованого шару по витраті неону, що напускається.

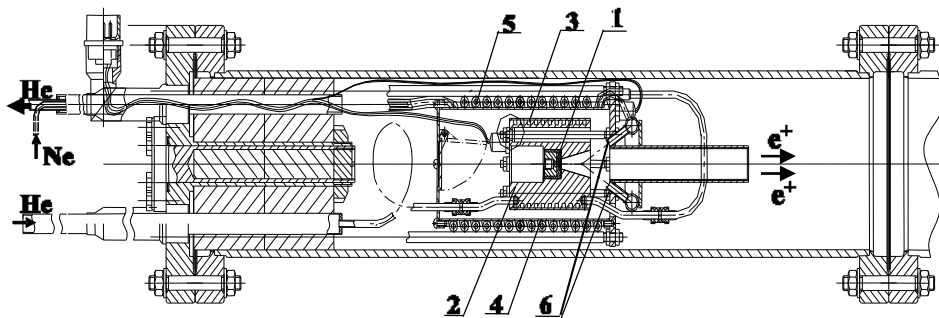


Рис.5.4. Криогенне джерело повільних монохроматичних позитронів. 1-мідна підкладка з ізотопом ^{22}Na , 2-мідний циліндр, 3-криогенний теплообмінник мідного циліндра, 4-тепловий екран, 5-криогенний теплообмінник теплового екрану, 6-сопла.

Джерело КрДПП розташовується у вакуумній камері (рис. 5.4). Капсула з радіоактивним ізотопом ^{22}Na розміщена на мідній підкладці (1), поміщеної всередину мідного циліндра (2) в конусоподібному поглибленні на торці циліндра. Кут розчину конуса становить 18° . Ці елементи утворюють блок емітера позитронів (рис. 5.5), який охолоджується до температури в кілька Кельвін. На поверхні циліндра знаходиться криогенний теплообмінник (3), через який протікає холодний газоподібний гелій при температурі трохи вище 4К, охолоджуючий блок емітера. Мідний циліндр (2) розміщується всередині мідного кожуха (4), який служить тепловим екраном. На зовнішній поверхні кожуха розташовується другий теплообмінник (5). Пройшовши теплообмінник (2), гелій надходить в теплообмінник кожуха (5), охолоджуючи тепловий екран. Газоподібний неон надходить в джерело позитронів через теплообмінник кожуха (4), де попередньо охолоджується і спливає на поверхню конусоподібного поглиблення і на торець мідної підкладки з ізотопом через чотири сопла (6). На мідному циліндрі (2) і на кожусі (4) розташовані температурні датчики, що дозволяють контролювати температуру блоку

емітера і теплового екрана. Блок емітера позитронів електрично ізольований від теплового екрану. Прикладаючи до нього електростатичний потенціал, можна регулювати енергію позитронного пучка в діапазоні від 0 до 1000 В.

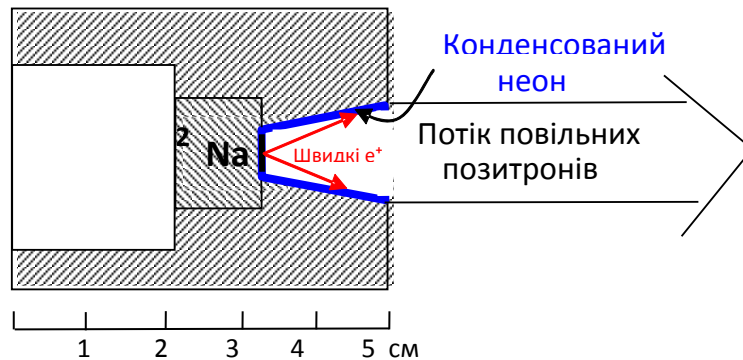


Рис.5.5. Блок емітера позитронів [116].

Процес конденсації сповільнювача починається після того, як в охолодженій підкладці встановлюється стаціонарна температура. Основними елементами лінії напуску неону (рис. 5.6), що дозволяють контролювати товщину шару замороженого неону, є мірний об'єм і дросель з великим імпедансом.

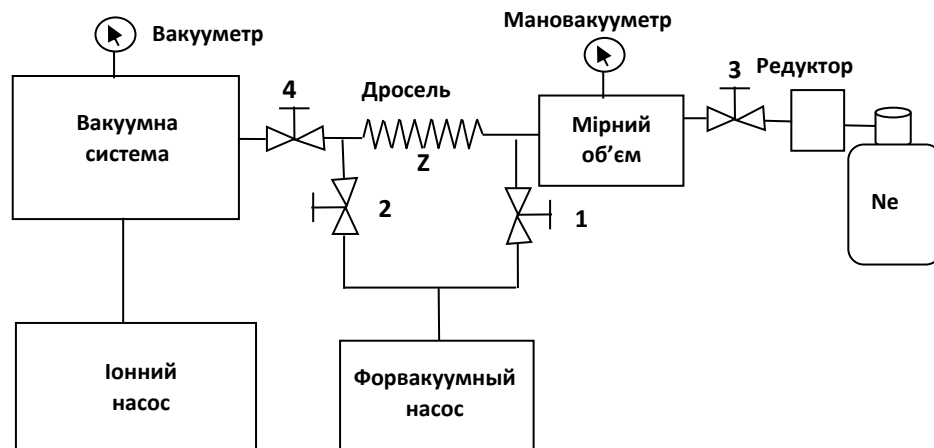


Рис.5.6. Схема лінії напуску неону в систему. 1, 2, 3, 4 — вакуумні вентилі [116].

Перед напуском неону в систему проводиться попередня відкачка лінії напуску. При цьому вентилі 3 і 4 закриті, а через вентилі 2 і 1 відкачується мірний об'єм і лінія подачі газу між дроселем і вентилем 4. Після попередньої відкачування вентилі 1 і 2 закриваються. Вентиль 4 відкривається для того, щоб

уникнути кидка тиску в системі після початку напуску газу. Хімічно чистий неон за допомогою вентиля 3 напускається з балона в мірний об'єм до тиску 0,5–0,7 атмосфери, і вентиль 3 перекривається. З мірного обсягу неон через дросель і вентиль 4 надходить в систему. Витрата неону контролюється по зміні показань мановакуумметра.

Перші експерименти по вимірюванню характеристик джерела КрДПП проводилися з тестовим радіоактивним ізотопом ^{22}Na активністю 0,8 МБк. Для детектування параметрів пучка повільних монохроматичних позитронів стенд «Джерело позитронів» був забезпечений пристроями сепарації позитронів і аналізу їх енергії (рис. 5.7). Всередині вакуумної камери знаходиться КрДПП і мікроканальна пластина (МКП) - детектор для реєстрації позитронів. Між ними встановлена заслінка, що запобігає прямому попаданню позитронів в МКП. Вакуумна камера поміщена в поздовжнє магнітне поле. До і після заслінки розташовуються котушки, що створюють поперечне магнітне поле. Вони формують траєкторію повільних позитронів («слалом»), що огинає заслінку. Перед МКП розташований електростатичний енергоаналізатор - циліндр, на який подається аналізує потенціал. Крім того, зовні вакуумної камери розташований гамма-детектор, що реєструє гамма-кванти від анігіляції позитронів. Обидва детектора калібровані по еталонному β^+ - активному джерелу.

З ростом товщини сповільнювача відбувається зростання виходу повільних позитронів (рис. 5.8). Максимум виходу повільних позитронів

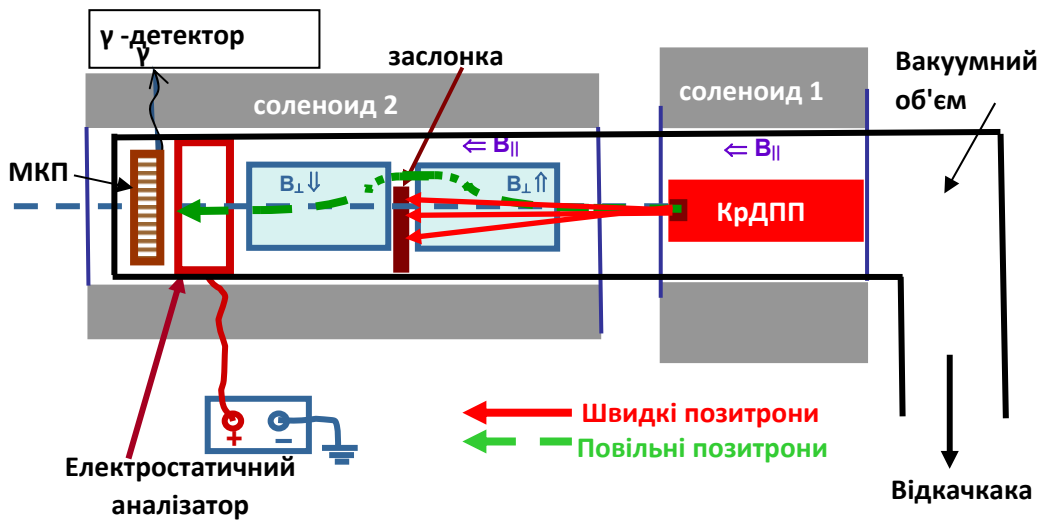


Рис.5.7. Вимірювальна схема стенду «Джерело позитронів» [117].

відповідає товщині сповільнювача 130 мкм. Подальше зростання товщини сповільнювач призводить до зменшення виходу.

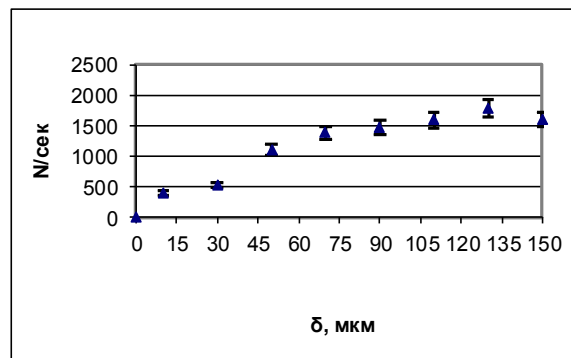


Рис.5.8. Залежність рахунку позитронів від товщини замороженого сповільнювач [116].

Вперше для даного типу джерел була виміряна залежність форми спектра повільних позитронів від товщини замороженого шару. Формування спектра починається з товщини сповільнювач 10 мкм. Зі збільшенням товщини замороженого шару спектральна щільність в максимумі зростає (рис. 5.9), а ширина спектра зменшується. При цьому зменшується також середня енергія позитронів.

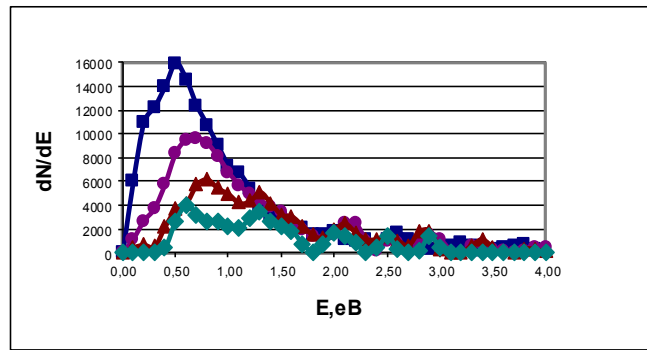


Рис.5.9. Залежність форми спектра позитронів від товщини намороженого сповільнювача, мкм: 30 (◆), 50 (▲), 90 (●), 130 (■) [116].

Після припинення конденсації вихід позитронів продовжує зростати. При цьому число реєстрованих повільних позитронів збільшується на 12% (рис. 5.10).

Після оптимізації товщини сповільнювача і налаштування системи реєстрації була досягнута максимальна швидкість рахунки. Ефективність уповільнення при цьому склала $\varepsilon = 1\%$ при ширині спектра 1 eВ.

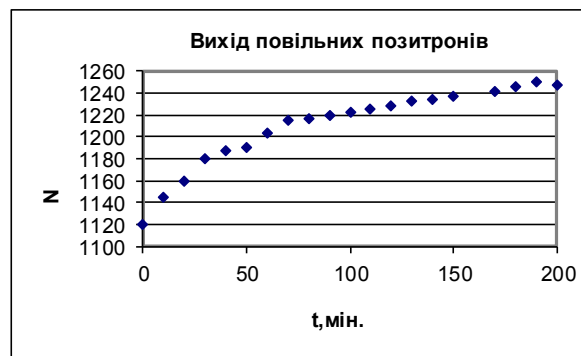


Рис.5.10. Приклад еволюції виходу повільних позитронів після припинення намотування сповільнювача [116].

Суттєвою проблемою при роботі з позитронами є використання для охолодження КрДПП рідкого гелію. Це значно обмежує час роботи (дефіцит рідкого гелію) і вимагає тривалої, близько 6-7 годин, попередньої підготовки джерела. У зв'язку з цим був придбаний криокулер фірми «Sumitomo» і розроблено джерело нової конструкції, що охолоджується за допомогою криокулера. До вересня 2015 р джерело КрДПП-2 було сконструйовано і його

елементи виготовлені (рис. 5.11). Завершення збирання і початок «холодних» випробувань проводилися протягом 2016 року, а в листопаді джерело було встановлено на інжектор повільних позитронів і випробувано. В результаті випробувань досягнута температура робочої поверхні джерела 5,5 К, а інтенсивність потоку повільних позитронів $3 \cdot 10^6$ / сек.



а)



б)

Рис.5.11. Джерело КрДПП-2: а) внутрішня частина, б) КрДПП встановлений на штатне місце.

5.3. Спеціалізований канал повільних позитронів (СКПП)

Під час конструювання інжектора позитронів не передбачалося використовувати пучок повільних позитронів для інших завдань крім накопичення. Перші дослідження методом ПАС велися на зразках, які завантажувалися в вакуумний обсяг другого відкачного поста пастки позитронів (Розділ 4, рис. 4.3). Така постановка експерименту була тимчасова, тому що мала істотні недоліки. При заміні зразків потрібно розкривати весь вакуумний об'єм інжектора, що, в свою чергу, вимагало тривалого відкачування для відновлення вакуумних умов. Від чистоти вакууму сильно залежить вихід повільних позитронів. Після охолодження джерела позитронів до температури декількох десятків Кельвін і нижче, вся його поверхня починає працювати, як

вакуумний кріогенний насос і, відповідно, ще до початку процесу конденсації плівки неону відбувається конденсація всіх складових залишкового газу на робочу поверхню джерела. Це призводить до зменшення ефективності уповільнення. Зменшення ефективності уповільнення веде до зменшення потоку повільних позитронів, що збільшує час набору статистики і, найчастіше, робить неможливими вимірювання ПАС. Другий недолік такого способу завантаження зразків, полягає в тому, що стає неможливим проводити фундаментальні дослідження з вивчення процесу накопичення на пастці позитронів. Для таких досліджень необхідний базовий вакуум 10^{-9} - 10^{-10} Торр. При накопиченні позитрони здійснюють багаторазові поздовжні коливання між стінками потенційної ями і, відповідно, підсумковий сумарний пробіг кожного позитрона набагато більше, ніж при однопрогінному режимі в разі ПАС. Час життя такого згустку сильно залежить від вакууму, а також від складу залишкового газу, тому що позитрони анігілюють при зіткненні з його молекулами.

Рішенням перерахованих вище проблем повинен був стати Спеціалізований канал повільних позитронів. Перед його проектуванням ставилося дві умови: по-перше, необхідно мати експериментальну камеру з можливістю ізоляції від вакуумного обсягу пастки, по-друге, необхідно зберегти здатність інжектора позитронів інжекувати згустки в накопичувальне кільце. Тобто необхідно було відхилити пучок в сторону від напрямку інжекції. Розташування прискорювального комплексу в експериментальному залі дозволяло розглядати відведення пучка тільки вправо. При цьому бралися до уваги дві можливі точки відведення: перша перед пасткою позитронів, друга відразу за нею. Від першого варіанту відмовилися у зв'язку з майбутніми планами зі створення спектрометра часу життя на пучку позитронів (буде описано нижче). Таким чином, був розроблений, виготовлений і введений в експлуатацію СКПП (рис. 5.12).

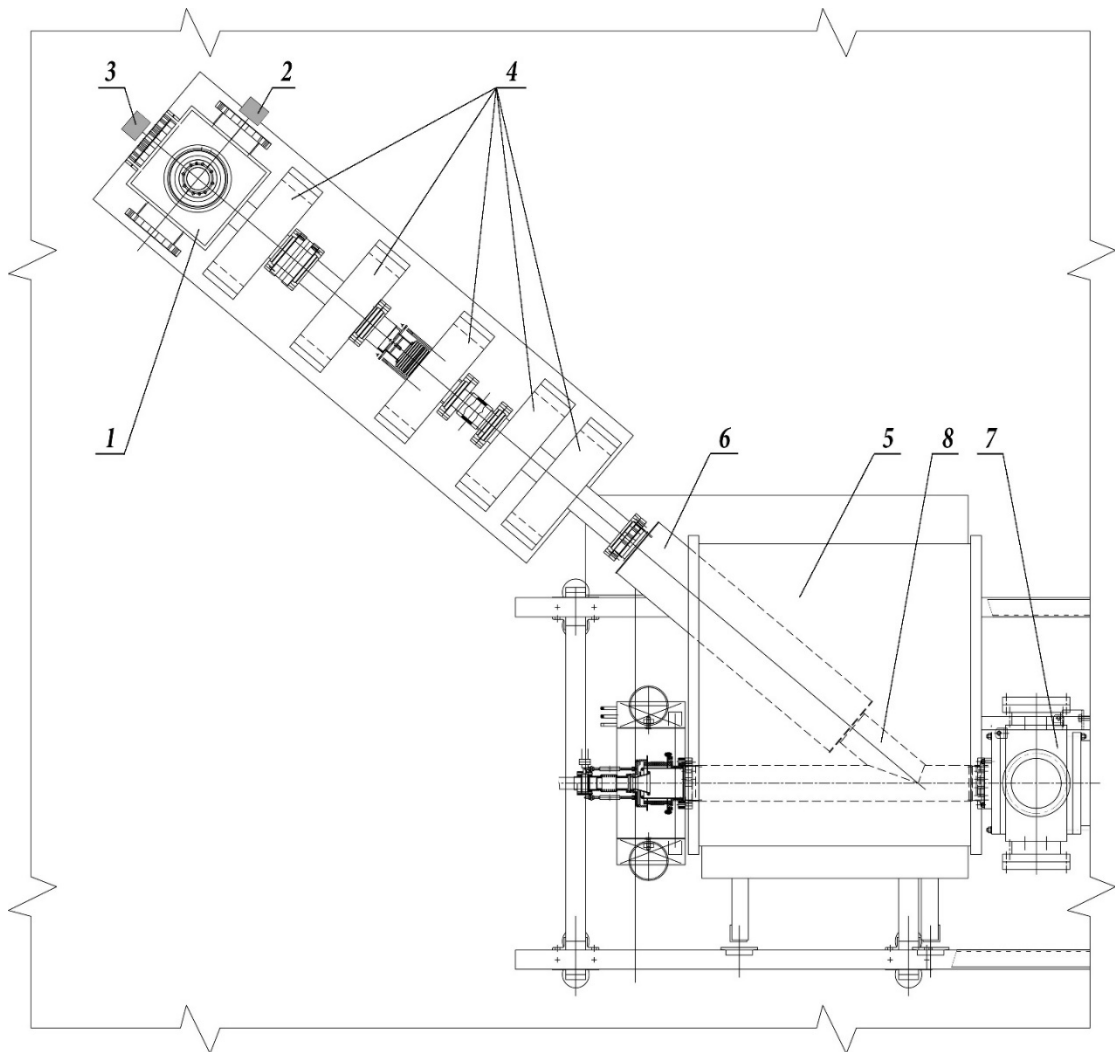


Рис.5.12. Загальний вигляд СКПП (вид зверху). 1 - експериментальна станція; 2 - детектор; 3 - сцинтиляційний лічильник; 4 - котушки подовжнього магнітного поля; 5 - соленоїд; 6 - соленоїд; 7 - вакуумний пост пастки; 8 - вакуумна камера.

Канал складається з соленоїда 6, основного соленоїда 5, вакуумної камери 8, котушок 4 і експериментальної станції 1. Для початкового налаштування орбіти позитронного пучка використовується сцинтиляційний лічильник 3, а для досліджень матеріалів використовується германієвий детектор 2. Експериментальна станція оснащена вакуумним відкачним постом, який знаходиться з низу і на малюнку не видно. Експериментальна станція приєднана до вакуумної камері каналу через прохідній шибер. Така конструкція вакуумної системи дозволяє відкривати експериментальну станцію для зміни

зразків, при цьому забезпечується збереження вакуумних умов в камері позитронного джерела і каналу транспортування.

Первинна настройка орбіти позитронного пучка проходила в кілька етапів. Спершу були спроби зареєструвати позитрони на виході соленоїда 6. При проектуванні передбачалося, що настройка орбіти пучка це разова процедура, тому для каналу не було спроектовано і встановлено ніяких засобів діагностики положення пучка. Для діагностики використовувався лічильник 3, який рухався вздовж вакуумної камери. Також були виготовлені і встановлені всередину соленоїда 5 кілька пар спеціальних коригувальних котушок, які формують поперечне магнітне поле. Головна їхня функція полягає в тому, щоб зігнути силову лінію повздовжнього магнітного поля в області відгалуження каналу від прямолінійної траєкторії інжекції в кільце, а далі пучок "підхоплюється" полем соленоїда 6. Перебираючи різні струми в котушках корекцій і переміщаючи лічильник уздовж каналу вдалося зареєструвати сигнал від анігіляції позитронів на виході соленоїда 6.

Подальша настройка орбіти проходила простіше і швидше. За попередніми оцінками діаметр пучка становив близько 10 мм, а внутрішній діаметр вакуумної камери 80 мм. При такому співвідношенні розмірів положення орбіти "грубо" виставляється підбором положення котушок 4. Також канал був оснащений рядом додаткових котушок корекції вертикального і горизонтального положення пучка. Вони дозволяють акуратно проводити підстроювання орбіти в межах 10 - 20 мм як вертикалі, так і горизонталі.

Тримач зразків кріпиться до спеціального вакуумного введення, яке приєднане до верхнього фланця експериментального обсягу через ізолятор. Вакуумне введення забезпечує вертикальне переміщення тримача зразків всередині камери. Переміщення автоматизовано і здійснюється дистанційно з пульта управління. Швидкість переміщення рамки становить близько 1 мм/сек. Контроль за переміщенням ведеться візуально за допомогою відеокамери. Енергія позитронів задається за допомогою високовольного джерела живлення, напруга з якого підводиться безпосередньо до вакуумного введення.

Налаштування орбіти здійснюється наступним чином. Спершу необхідно отримати стійкий максимальний рахунок на лічильнику 3 при повністю піднятому тримачі із зразками. Максимальний рахунок відповідає хорошему проходженню пучка позитронів від джерела до місця анігіляції. Як правило, настройки всього каналу слабо змінюються між сеансами ПАС. Потрібно лише незначна зміна струмів деяких корекцій. Потім проводиться введення рамки зі зразками в область проходження пучка. За зміною рахунку лічильника 3 оператор може судити в яку область рамки потрапляє пучок, при цьому для сканування по горизонту використовується горизонтальна корекція на вході в експериментальний обсяг. Максимальне зменшення рахунку відповідає точному приходу пучка позитронів на зразок. Після отримання мінімального рахунку починається набір статистики за допомогою детектора 2.

В описаному алгоритмі настройки при тривалому використанні були виявлені деякі недоліки. Положення досліджуваного зразка в вакуумному обсязі знаходилося близько до місця анігіляції позитронів пучка під час налаштування. Через невеликої різниці в рахунку з введеним і виведеним зразком важко було точно домогтися мінімального рахунку на зразках, розміри яких були близько 10 мм (поперечний переріз пучка). Також через те, що частина позитронів просто пролітала повз зменшувався відлік детектора 2 і, відповідно, збільшувався час всього експерименту. Усунення описаних недоліків здійснили двома шляхами. По-перше, був відсунутий лічильник 3 на 45 см (рис.5.13, поз.6). Для цього була встановлена додаткова ділянку дрейфу 5. Соленоїд для формування поздовжнього поля намотаний поверх цієї ділянки в два шари проводом з перетином 16 мм². По-друге, для посилення поля в області розташування зразків, поверх експериментальної камери були намотані дві додаткові котушки 3, а перед ділянкою дрейфу встановлена додаткова котушка 2. Також змінилася система електроживлення магнітної системи. До модернізації всі котушки каналу живиться послідовно від одного джерела струму. У новому підключенні котушки 2 і 7 живляться струмом від окремого

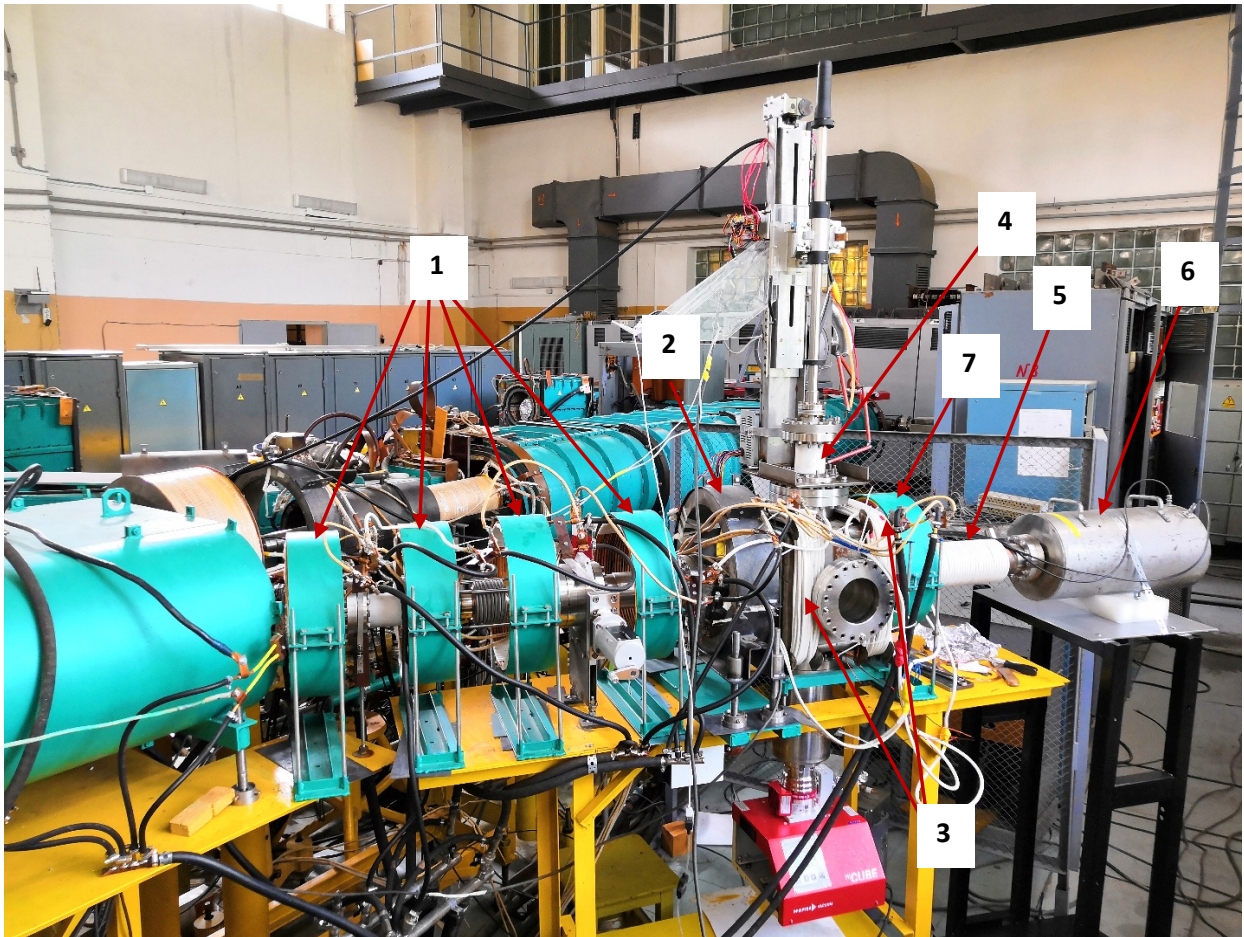


Рис.5.13. Експериментальний канал ПАС. 1, 2, 3, 7 - котушки подовжнього магнітного поля; 4 - ізолятор; 5 - ділянка дрейфу; 6 - сцинтиляційний лічильник.

джерела живлення, що перевищує в 2,5 рази струм інших котушок каналу ПАС. Ці зміни дозволили стиснути пучок позитронів, що приходить на зразки до 5 - 7 мм, що в сукупності з додатковою ділянкою дрейфу спростило настройку положення орбіти пучка.

5.4. Застосування джерела позитронів для визначення концентрації дефектів в зоні термопружного впливу електронного пучка на алюмінієвий сплав.

Алюмінієві сплави широко застосовуються як в машинобудуванні, так і в ядерній енергетиці, наприклад, як з них виготовляють центрифуги для

збагачення ядерного палива, їх використовують для виготовлення тепловидільних елементів дослідницьких реакторів. Для наших досліджень було обрано промисловий алюмінієвий сплав 1933 системи Al-Zn-Mg-Cu [118]. На сьогодні, він набув широкого використання завдяки своїй малій питомій густині, високій міцності, добре себе проявив при експлуатації в умовах циклічних навантажень [119]. Сплав 1933 використовується в цивільному авіабудуванні (Ан-148, SSJ-100), військовому авіабудуванні і ракетних технологіях, при цьому суттєво знижуючи вагу, споживання палива, підвищуючи вагову ефективність устаткування, міцність та довговічність. Серед його характеристик важливими є також стійкість до різноманітних екстремальних впливів таких як удар блискавки, механічні ударні навантаження. З огляду на це, опромінення сплаву сильнотривим релятивістським пучком електронів дає можливість як дослідити можливість покращення його експлуатаційних характеристик, так і здійснити тестовий вплив на стійкість до екстремальних навантажень. Сплави системи Al-Zn-Mg-Cu є деформованими сплавами, і тому їх часто використовують в загартованому та штучно зістареному станах. Ці високоміцні сплави мають високі показники вібраційної стійкості, втомлю вальної міцності, вигідно відрізняючись від інших серій алюмінієвих сплавів [118]. Наприклад, межа міцності на розрив сплаву 1933 в 8 разів більша, чим технічного промислового алюмінію 1050А, як і відношення міцності до густини. З іншого боку, високоміцним сплавам системи Al-Zn-Mg-Cu властиві гірші показники зварюваності, пластичності, ковкості, тріщиностійкості та корозійної стійкості. Електронно-пучкова обробка є одним із можливих шляхів покращення фізичних та механічних властивостей сплаву 1933. Більш того, для оптимізації технологічних процесів СРЕП-обробки важливим є детальне вивчення фізичних механізмів модифікації на різних відстанях від площини опромінення. Якщо в зоні, товщина якої вимірюється глибиною проникнення пучка та в суміжній області високотемпературного впливу структурні перетворення є досить наочними [120, 121], наприклад, на металографічних або РЕМ знімках, то область більш

віддалена від зони радіаційного та термічного впливу може мати відмінність лише в показниках концентрації дефектів. З цією метою для більш детального вивчення доцільно залучити такі прецизійні методи, як позитронна анігіляційна спектроскопія, що незважаючи на досить тривалу історію розвитку залишається перспективним інструментом вивчення будови твердого тіла [8].

5.4.1. Матеріал та методика експерименту

Дослідний зразок – квадратна пластина з алюмінієвого сплаву (Таблиця 5.1) товщиною ~ 2 мм і довжина сторони ~ 10 мм мав такий елементний склад [118].

Таблиця 5.1

Склад алюмінієвого сплаву 1933.

Елемент	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Ti	Cr	Zr	Al
%	6,35	1,6	1	0,1	0,2	0,1	0,06	0,05	0,1	~90

Опромінення одним імпульсом здійснено на прискорювачі електронів «ТЕМП-А» ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» за наступних параметрів: тиск в камері 10^{-5} Торр, енергія електронів ~ 0,35 МеВ, струм пучка ~ 2 кА, тривалість опромінення - 5 мкс, потужність 10^{12} Вт/м². Тривалість імпульсу τ_{imp} була значно довшою ніж час електрон-фононої релаксації τ_r (10^{-11} с). Гаусо-подібний холівський пучок мав внутрішній радіус 1,5 мм; зовнішній радіус 2,3 мм. Густина енергії виділена на поверхні була не більше ніж 5 МДж/м². Лінійні розміри пластини були більшими за характерні розміри області взаємодії. Растрову електронну мікроскопію проводили на приладі JEOL – 840. Концентрацію вакансій оцінювали на установці LEPTA Об'єднаного інституту ядерних досліджень, м. Дубна.

5.4.2. Обговорення результатів

Утворився кратер глибиною 0,4 мм в епіцентрі опромінення. Руйнування зразку відбулось у змішаному режимі з елементами як теплового, так і

гідродинамічного режимів [122, 123], що експериментально підтвердилось одночасною генерацією великої кількості рідкої фази і газоподібних продуктів. На початку обробки, після перевищення характерного порогу потужності пучка, який визначає перехід від десорбції поверхні до руйнування поверхні, абляція зразка відбувається в тепловому режимі. Продукти абляції є переважно тоді є переважно газоподібними. Далі, при великих потоках існує певна критична густина енергії ϵ^* , що залежить від форми, тривалості імпульсу, і також від теплофізичних параметрів матеріалу для обробки. Після досягнення цієї характерної величини відбувається інтенсивне плавлення мішені з вибуховим характером у гідродинамічному режимі.

Здійснено металографічні дослідження поперечного зрізу мішені та дослідження застиглої каплі розплаву на поверхні неподалік від кратеру в зоні брустверу (рис.5.14). Зі шліфу очевидно прослідковуються три відмінні з внутрішньою структурою зони (рис.5.14). Мікрорельєф ударного зламу каплі є ямковий, з безструктурними ділянками, які чергуються. Характер структури каплі подібний до області загартування, горизонтальна (паралельно поверхні)

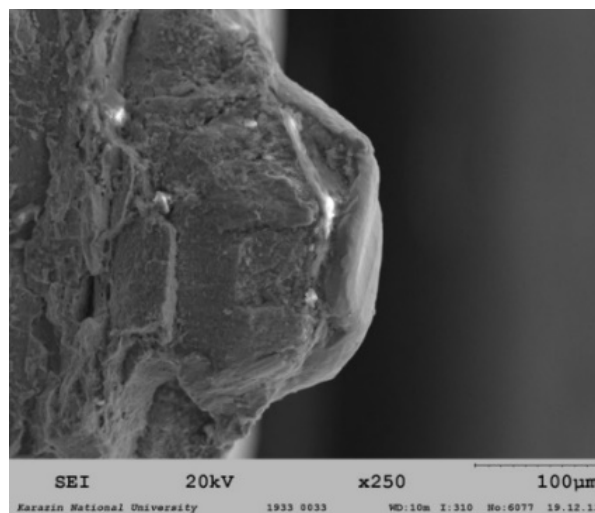
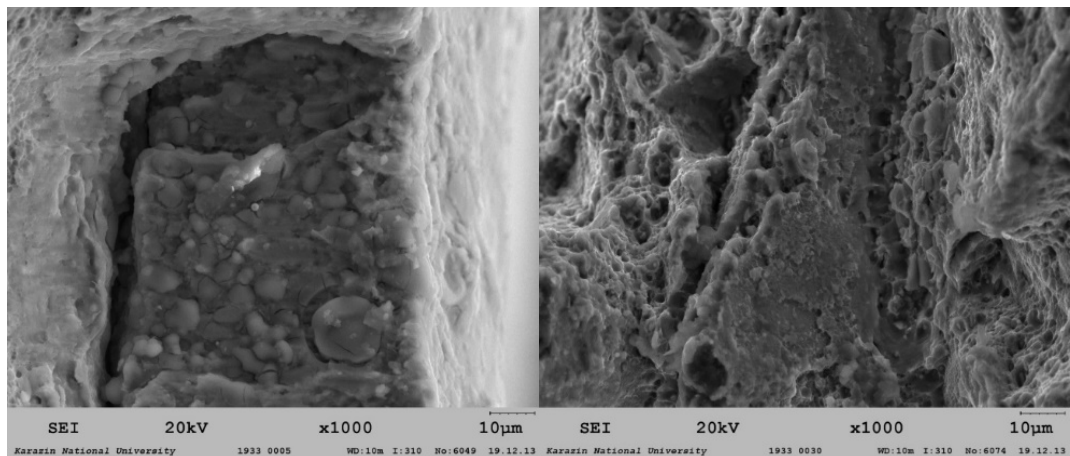


Рис.5.14. Злам застиглої каплі на поверхні опроміненого зразка.

симетрія мікроструктури менше виражена у порівнянні з вертикальною симетрією, що вказує на те, що капля сформувалась шляхом конденсації викинутого оплавленого матеріалу. Структурі каплі характерна незначна

пористість, зерна є сильно розорієнтованими. Значних протяжних тріщин не зафіксовано, наявні міжкристалічні руйнування.

Значення поглиненої дози визначає перебіг процесів в опроміненій мішені. Якщо величина дози є достатньою для локального розплавлення, модифікуючий вплив відбувається лише за тепловим та термопружним механізмами. Якщо ж відбувається розплавлення мішені, тоді додатково має місце гідродинамічний режим. Таким чином, в нашому випадку модифікуючий вплив пучка полягав у змішаному режимі [124]. Такий особливий механізм руйнування і модифікації став основною причиною формування унікальної та складної структури опроміненого об'єму. Нами досліджена природа поперечних зламів опроміненого та неопроміненого сплаву (рис.5.15).



а)

б)

Рис.5.15. Злам в зоні пучкового переплаву (а - опромінений матеріал, б – початкова структура).

Зона пучкового переплаву має щільно упаковану, дрібнозернисту, безпоровату мікроструктуру, яка складається з розорієнтованих зерен з лінійними розмірами 1 – 3 мкм, її злам є ямковим а механізм руйнування – квазів'язким її товщина становить близько 200 мкм, вона сформувалась як результат високо швидкісного охолодження і зворотної конденсації ежектованого, абльованого матеріалу. Ця область має певне відшарування від основного матеріалу мішені.

Область теплового впливу з товщиною до 400 мкм утворилась завдяки впливу швидкої теплової фіксації результатів впливу ударних хвиль на розплав (рис. 5.16). Ця область модифікованого об'єму характеризується мікропластичним механізмом зламу та безпоруватою дрібнозернистою мікроструктурою сильно оплавлених фасеток з середнім лінійним розміром 1 мкм, без виділеної орієнтації зерен.

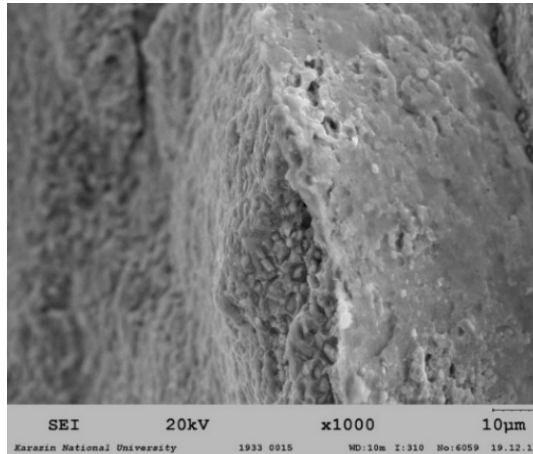


Рис.5.16. Злам в зоні теплового впливу пучка.

Проведені нами дослідження підтверджують спостереження зроблені в роботі [125], стосовно того, що обробка сильнострумовим пучком утворює зону радіаційного впливу, зону теплового впливу та зону ударно-хвильового впливу. Однак, ми не знайшли суттєвих відмінностей між неопроміненою зоною та зоною ударно-хвильової дії.

В нашому випадку модифікований об'єм складається з зон пучкового переплаву, теплової дії і ударно-хвильової дії, які відрізняються одна від одної своїми мікроструктурою, хімічним складом, механізмом зламу, концентрацією та типом дефектів.

У зоні теплової та ударно-хвильової дії помітні впорядковані шари паралельно поверхні з товщиною 5-30 мкм. Для немодифікованої частини мішені характерна добре організована структура фасеток квазісколу з лінійним розміром фасеток в інтервалі 0,6 – 1,5 мкм. У мікроструктурі необробленого сплаву помітні ямки, відстань між якими 5-10 мкм, розмір ямок ~ 2-3 мкм, а також гребені відриву з характерною відстанню один від одного ~ 10 мкм.

Зазначена зміна мікроструктури сплаву 1933 свідчить про те, що СРЕП-обробка забезпечує суттєве підвищення мікров'язких властивостей сплаву 1933.

Разом з тим є актуальним дослідити ефекти від впливу ударно-акустичних хвиль, що виникають в опромінюваних мішенях в понадпробігових областях. Для цього були проведені дослідження за допомогою позитронно-анігіляційної спектроскопії на комплексі LEPТА (Об'єднаного інституту ядерних досліджень, Дубна) [85]. ПАС метод є дуже чутливим до наявності дефектів в матеріалах. Його добре поставлене вимірювання дозволяє детектувати недосконалість кристалічної ґратки розміром з константу ґратки, зокрема, він застосовувався до вивчення дефектів, що утворювались внаслідок опромінення сплавів потоками іонів [123].

Дослідження кутових кореляцій анігіляційних квантів, змін енергій та часу життя є основою трьох технік ПАС [8]. У нашій роботі, ми досліджували лише доплерівське розширення анігіляційних ліній.

Техніка доплерівського розширення анігіляційних ліній використовується для детектування концентрацій таких дефектів як вакансій та їх накопичень. Сигнал від анігіляції захопленого позитрону, що зумовлює розширення 511 кеВ лінії, відносно більший ніж сигнал, що відповідає анігіляції з електронами ядер. Іншими словами, чим більше дефектів зразку, тим менше розширення 511 кеВ лінії.

Практично, інформація про концентрацію дефектів отримується з аналізу форми анігіляційної лінії, шляхом розрахунку двох важливих параметрів, що називаються відповідно S і W . Параметр S визначає пропорцію анігіляцій позитронів з низькими імпульсами. Це тісно зв'язано з концентрацією дефектів в матеріалі. Він визначається як відношення площі поверхні центральної частини 511 кеВ лінії до всієї площі під кривою.

Ефект впливу потоків випромінювання на концентрацію дефектів можна спостерігати за зміною S -параметру (рис.5.17).

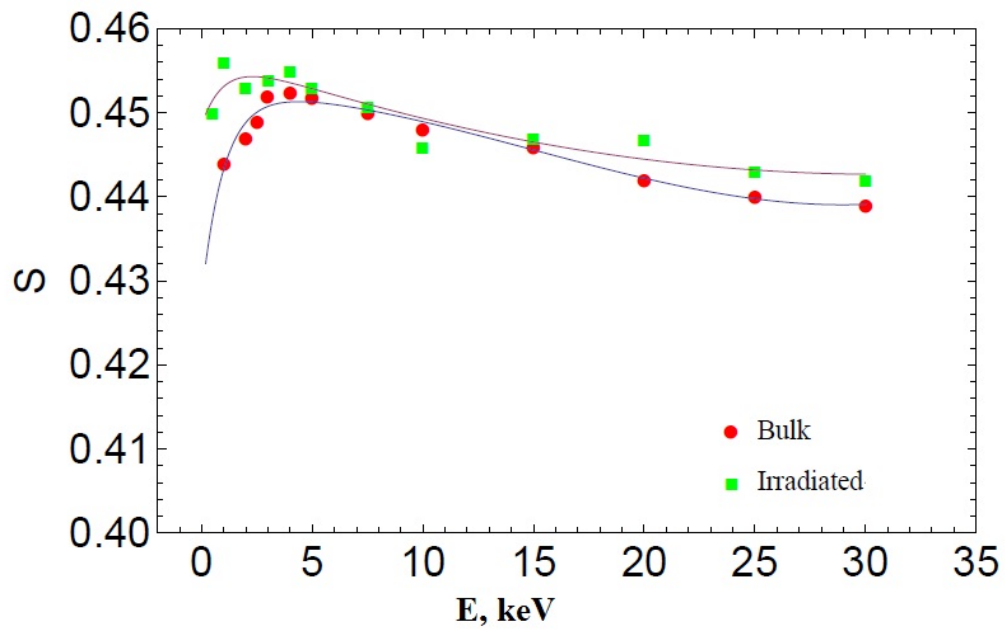


Рис.5.17. Залежність S -параметру доплерівського розширення від енергії позитрону E для опроміненого та неопроміненого сплаву 1933.

Енергія позитронів відповідає глибині занурення пучка в тильну частину мішені, при значенні енергії в 10 кеВ глибина становить приблизно 400 нм. На

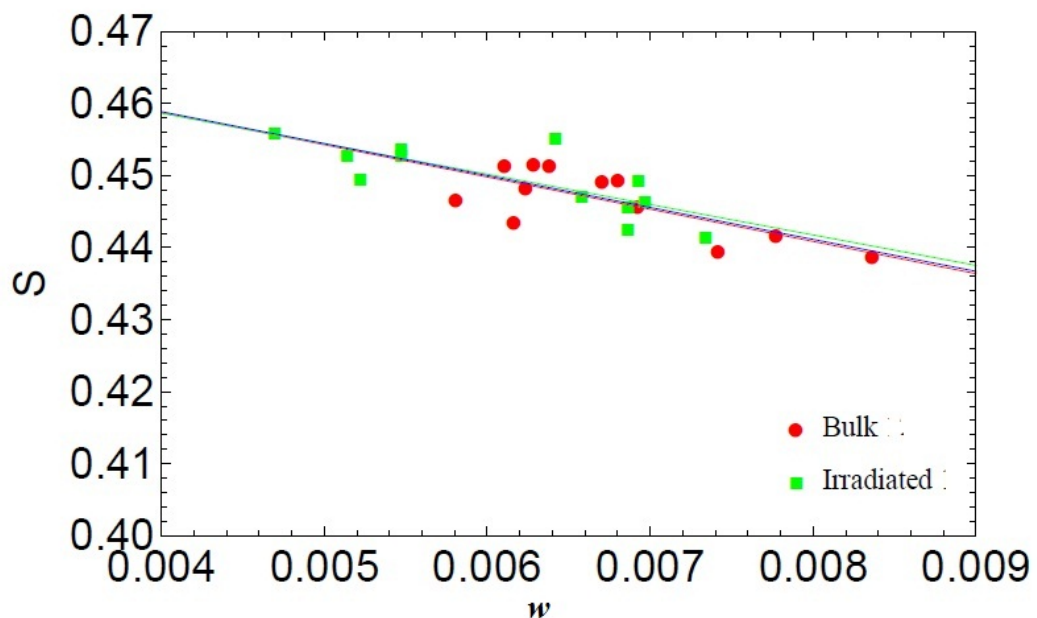


Рис.5.18. Залежність S -параметру від W -параметру доплерівського розширення для опроміненого та неопроміненого) сплаву 1933.

поверхні більше значення S -параметру пов'язано з дефектами, що були внесені механічною обробкою. На більших глибинах спостерігаємо відмінність між опроміненим та неопроміненим зразками. Така відмінність може бути пояснена лише ефектом ударно-акустичного впливу СРЕП, оскільки зона термічного впливу обмежена приблизно 600 мкм з протилежного боку мішені. Ці результати кореспондуються з даними роботи [124], одержаними на аналогічному зразку. Вплив на тильну сторону мішені електронно-пучкового опромінення також в незначній мірі, але проявився на залежності S -параметру від W -параметру, (рис. 5.18).

Ефекти далекодії, що спостерігаються в матеріалах, опромінених, сильнострумовими електронними пучками, такі як, наприклад, пульсуючий характер зміни значення мікротвердості по глибині мішені пояснюються виникненням уданих хвиль, як результату суперпозиції первинного поля стискаючих напружень з біполярною хвилею напружень, відбитою від тильної сторони, [126]. В нашому випадку ми спостерігаємо ознаки впливу пучка на відстані, що майже на порядок перевищує глибину проникнення електронного пучка.

Опромінення конструкційних алюмінієвих сплавів сильно струмовими релятивістськими електронними пучками складається з зони проникнення пучка, яка піддається переплавленню, з зони термічного впливу, де здійснюють вплив на структуру сплаву термопружні ефекти, а також зони ударно-акустичного впливу. Остання зона не має очевидних відмінностей з неопроміненим зразком за структурою, але є відмінності за концентрацією вакансій, що ідентифікується методом позитронно-анігіляційної спектроскопії. Таким чином створене нами джерело позитронів дозволяє ідентифікувати відмінності в концентрації вакансій, які здатні впливати на механічні властивості, та значення яких відповідають початковим стадіям утворення дислокаційних петель [127].

5.5. Використання джерела повільних позитронів для дослідження дефектів в нержавіючій сталі 304 AISI після піскоструминної обробки

Піскоструминна обробка -- це процес обробки матеріалів, що полягає в бомбардуванні поверхні дрібними частинками піску. Цей процес використовується для очищення поверхонь металевих виробів, а також для їх декоративної обробки і поліпшення текстури. Проте, подібно до інших процесів поверхневої обробки таким, як різання, шліфування, механічна обробка і т. д., він вносить зміни в мікроструктуру поверхні, але також в підповерхневу зону, яка є шаром, що прилягає до поверхні. Підповерхневий шар являє собою область, схильну до пружних і пластичних деформацій, що виникають під поверхнею, наприклад, в результаті процесу обробки поверхні [128]. Дослідження цього шару зазвичай виконуються з використанням традиційних інженерних методів, таких як тести на мікротвердість та інші аналітичні методи, такі як TEM, SEM, XRD [129]. Ці методи дозволяють отримати багато характеристик шару, однак пластичні деформації, що виникають при обробці, породжують структурні дефекти, які в значній мірі не виявляються зазначеними вище методами. Дефекти кристалічної решітки, такі як вакансії та їх кластери, відносно легко спостерігаються за допомогою позитронної анігіляційної спектроскопії [130].

Знання про вплив піскоструминної обробки на властивості підповерхневого шару все ще недостатні. За даними літератури основним напрямком досліджень є поверхнева характеристика стоматологічних сплавів [131]. Іншим популярним напрямком є дослідження процесу нанокристалізації, викликаного вибухом і відпалом [132-134]. Той факт, що піскоструминна обробка змінює внутрішню поверхню зразка на певній глибині, розглядається досить рідко. Минулі дослідження показали, що ця глибина є значною [130].

Були використані зразки нержавіючої сталі 304 AISI (0,06% C; 1,0% Si; 2,0% Mn; 0,043% P; 0,015 S; 0,1 N; 17% Cr; 10% Ni) у вигляді дисків товщиною 5 мм і діаметром 10 мм [135]. На першому етапі зразки відпалювалися при 1000

° С протягом 4 годин в умовах вакууму 10^{-5} Торр. Потім їх повільно охолоджували у вакуумі до кімнатної температури. Ця процедура дозволила отримати зразки тільки з залишковими дефектами. Один зразок був збережений в якості еталонного (RF), в той час як інші піддавалися поверхневій обробці. Застосовувався абразивний матеріал, що містить 99,8% оксиду алюмінію (Al_2O_3) розміром 50 мкм. Поверхні оброблялися протягом 60 с під тиском 5 бар з відстані 10 мм між зразком і соплом. Кут між поверхнею і соплом дорівнював 30° , 45° , 60° и 90° для різних зразків.

Спершу поверхні досліджувалися за допомогою растрового електронного мікроскопа (PEM) Hitachi s-3500N і оптичним профілометром WYKO NT9300 (Veeco).

Другий етап досліджень проводився за допомогою пучка позитронів зі змінною енергією [136]. Інтенсивність потоку позитронів 10^6 e^+/c і діаметр пучка 5 мм. Енергія позитронів варіювалася в діапазоні від 0,1 кеВ до 36 кеВ і розкидом енергії до ~ 30 еВ. Реєструвалося $2,5 \times 10^5$ відліків в області піку 511 кеВ. Всі вимірювання проводилися з використанням детектора HPGe з енергетичною роздільною здатністю 1,20 кеВ для енергії 511 кеВ. Кожен отриманий спектр аналізували для розрахунку параметрів S і W . Параметр S відображає анігіляції з малими імпульсами електронів, що відбуваються в дефектах. Він чутливий до дефектів, таких як вакансії, їх скупчення або виступи на лініях дислокації. Зазвичай його більш високе значення відповідає збільшенню концентрації дефектів. W -параметр відображає анігіляцію позитронів з високоімпульсними електронами і чутливий до хімічного оточення місця анігіляції. У деяких випадках параметр W може вказувати на зміну виду або розміру дефектів решітки.

Спочатку слід зазначити, що при піскоструминній обробці спостерігається зменшення Δd товщини зразків (Табл. 5.2). Зменшення Δd зі збільшенням кута піскоструминної обробки добре видно.

Зміна товщини зразка в залежності від кута обробки.

Зразок (кут обробки)	Δd [мкм]	S_a [мкм]	S_{sk} [мкм]	S_{ku} [мкм]
RF	-	0.20	-2.34	65.08
30°	52	1.21	-0.28	4.25
45°	31	1.33	-0.51	5.00
60°	10	1.58	-0.08	4.02
90°	9	1.63	-0.7	8.78

РЕМ мікрофотографії поверхні досліджуваних зразків показані зліва на рис. 5.19.

Еталонний зразок (рис. 5.19, а) має гладку поверхню, розділену добре помітними тріщинами, які, швидше за все, позначають межі зерен. Однак після піскоструминної обробки поверхні змінюються, стаючи шорсткими (рис.5.19, b-e). Дослідження РЕМ не виявило суттєвого впливу кута піскоструминної обробки на рельєф поверхні. Аналогічні висновки можна зробити із зображень оптичного профілометра, представлених праворуч на рис.5.19. Однак деякі ефекти були виявлені після детальних розрахунків кількісних параметрів шорсткості, таких як S_a , S_{sk} и S_{ku} [137]. Отримані значення представлені в Таблиці 5.2.

На рис.5.20, а представлені залежності значень параметра S вимірених зразків від енергії падаючого позитрона. Вони мають типовий вигляд для даного матеріалу [138]. Можна помітити, що значення параметра S зменшуються з енергією і досягають насичення в разі всіх зразків. Залежність для еталонного зразка (чорні кола) стабілізується при найбільшій енергії позитрона і значно меншому значенні параметра S . Більш високі значення насичення параметрів S , що спостерігаються для оброблених зразків, вказують на наявність дефектів вакансійного типу, які захоплюють позитрони. Це підтверджує значну модифікацію підповерхневої області в процесі піскоструминної обробки. Можна відзначити, що безпосередньо на поверхні

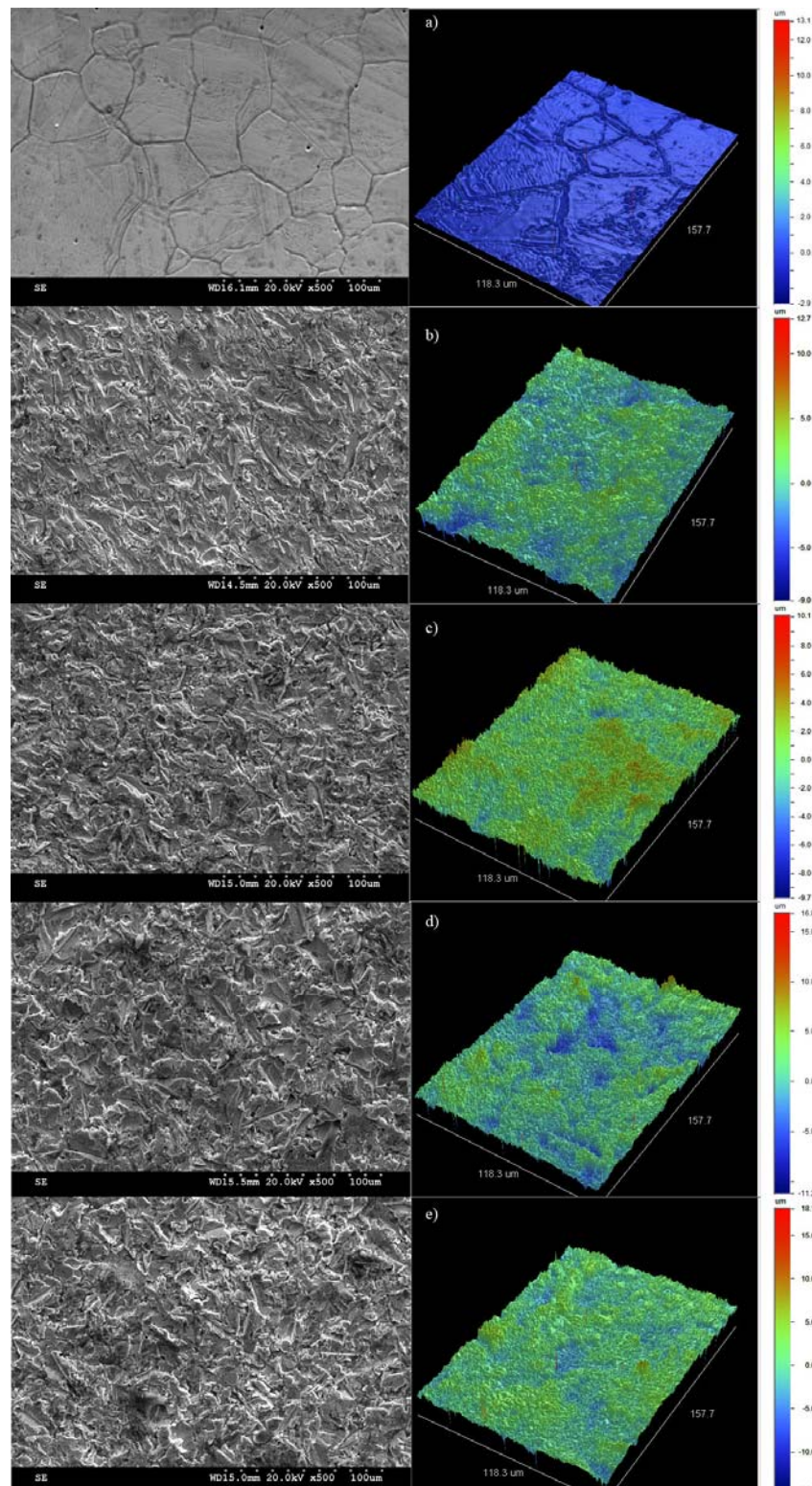


Рис.5.19. Мікрофотографії РЕМ (ліворуч) і зображення оптичного профілометра (праворуч) для зразків нержавіючої сталі 304 AISI, після піскоструминної обробки під різними кутами.

значення параметра S істотно не відрізняються. Це вказує на те, що піскоструминна обробка не створює ніяких нових позитронних пасток безпосередньо на поверхні в порівнянні з еталонним зразком.

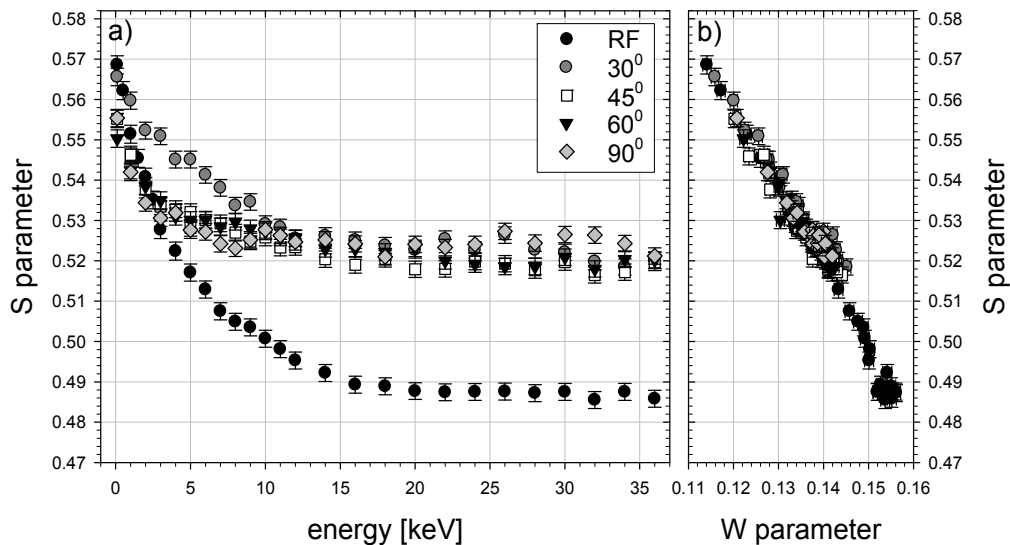


Рис.5.20. Залежність S параметра для зразків нержавіючої сталі 304 AISI, після піскоструминної обробці під різними кутами.

Ніяких важливих залежностей між профілями параметрів S і кутом піскоструминної обробки не відображається на отриманих кривих. Однак для енергії нижче 10 кеВ тільки для зразка, після піскоструминної обробки під кутом 30° , отримана залежність відрізняється від інших. Лінійна залежність $W(S)$, побудована на рис.5.20, б додатково інформує про домінування тільки одного виду дефектів вакансійного типу у всіх зразках.

5.6. Висновки до розділу:

1. Розроблено спектрометр для позитронної анігільційної спектроскопії з застосуванням пучка повільних позитронів для прикладних та фундаментальних досліджень у фізиці твердого тіла. В спектрометрі реалізовано метод вимірювання розширення анігільційної лінії.

2. Отримано потік повільних позитронів понад 10^6 за секунду від нового джерела позитронів. Завдяки іншому принципу охолодження джерела значно

зменшився час підготовки до експерименту, та вдалося відмовитися від використання рідкого гелію.

3. Проведено пучок повільних позитронів через канал позитронної спектроскопії до експериментальної станції де знаходяться досліджувані зразки. Відпрацьовано алгоритм влучення пучка позитронів у досліджуваний зразок. Для цього було встановлено додаткову ділянку дрейфу позитронів, а також додаткові котушки повздовжнього магнітного поля.

4. Були досліджені зразки нержавіючої сталі після обробки піскоструминним апаратом. Виявилось, що така обробка призводить до утворення в підповерхневому шарі дефекти переважно вакансійного типу. При цьому кут під яким обробляється поверхня не має значення. Обробка алюмінієвого сплаву 1933 електронним пучком призвела до утворення дефектів на глибинах значно більших ніж глибина проникнення електронів. Це може бути пов'язано з ударно-акустичним механізмом утворення дефектів.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішено науково-технічну задачу створення джерела низькоенергетичних позитронів на основі застосування низки електрофізичних ефектів та ефектів конденсованого стану а також його застосування до вирішення задач ідентифікації дефектів в твердих тілах з низькою концентрацією.

1. Із застосуванням низькотемпературного конденсату неону, нанесеного на титанову фольгу, що оточує ізотоп ^{22}Na , створено джерело позитронів з керованою енергією, яке дозволяє здійснювати зондування початкових фаз утворення дефектів типу вакансії та міжвузловинні атоми в металах і сплавах, що утворюються під дією опромінення та механічних впливів. Розроблено та створено систему одержання позитронію як об'єкту для перевірки базових фізичних постулатів фізики конденсованого стану, а саме, теореми про порушення зарядової парності, принципу калібрувальної інваріантності.

2. Вивчено особливості внеску різноманітних процесів на поглинання частинок оточуючим середовищем та фізичними полями, а саме, атомами залишкового газу в прискорювальній камері та розсіюванням на неоднорідностях магнітного поля.

3. Розроблено конструкцію шин зворотного струму для соленоїдів, розроблено систему корегуючих котушок повздожнього магнітного поля, а також конструкцію водо охолоджувального спірального квадруполя, що дозволило зменшити неоднорідності магнітного поля на стиках соленоїдів та поліпшити вакуумні умови в секції охолодження.

4. Оцінено вплив радіаційно-термічної обробки сталей на значення коефіцієнта вторинної електронної емісії.

5. З метою збільшення часу життя позитронів та з'ясування ролі органічних домішок в поглинання позитронів розроблено конструкцію криогенного екрану, який виконує функцію температурного конденсатора

домішок. Це дало можливість покращити показники вакууму та збільшити кількість накопичуваних позитронів та побудувати 3D-модель, що описує накопичення частинок в пастці.

6. Розроблено канал позитронної анігіляційної спектроскопії на основі методу доплерівського розширення анігіляційних ліній. Доведено чутливість методу до ідентифікації дефектів, що утворюються в алюмінієвому сплаві внаслідок ударно-хвильової дії сильнотривового релятивістського електронного пучка. Доведена здатність каналу спектроскопії виявляти заглиблені точкові дефекти в нержавіючій сталі, що була піддана впливу під певними кутами піскоструминною обробкою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А.М.Поляков, Калибровочные поля и струны / Ижевск «Издательский дом «Удмуртский университет». - 1999.-312 с.
- [2] V.F. Klerikov, Gauge principle and spontaneous symmetry breaking Low Temperature Physics.-Vol. 44, Iss. 12.-2018, P. 1309-1312.
- [3] FAIR - Facility for Antiproton and Ion Research, / Green Paper The Modularized Start Version, 2009. – URL: https://fair-center.eu/fileadmin/fair/publications_FAIR/FAIR_GreenPaper_2009.pdf
- [4] Home page: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- [5] CERN Bulletin, / Issue No. 28-29/2012 - Monday 2 July 2012. – URL: <http://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2012/28/News%20Articles/?ln=en>
- [6] Забаев В.Н. Применение ускорителей в науке и промышленности: учебное пособие / В.Н. Забаев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 195 с.
- [7] А.С. Алимов Практическое применение электронных ускорителей / Препринт НИИЯФ МГУ №201-13/877
- [8] В. И. Графутин, Е. П. Прокопьев, / УФН, 2002, том 172, номер 1, 67–83. – URL: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0172.200201c.0067>
- [9] Chernin D., Sprangle P. // Particle Accelerators. 1982. V. 12. P. 85–100.
- [10] Kapetanacos C.A. et al., Equilibrium of a high - current electron ring in a modified - betatron accelerator, // Phys. Fluids. 1983. V. 26. P. 1634, <https://doi.org/10.1063/1.864300>.
- [11] Mandelbaum B. et al., Injection, trapping, and acceleration of an electron beam in a stellatron accelerator, // Phys. Fluids. 1988. V. 31, No. 4. P. 916–923, <https://doi.org/10.1063/1.866775>.

- [12] Koert P. et al. // Proc. of PAC 1987. P. 972–974.
- [13] Kapetanacos C.A. et al., The Naval Research Laboratory Modified Betatron Accelerator and assessment of its results, // Phys. Fluids B. 1993. V. 5, No. 7. P. 2295, <https://doi.org/10.1063/1.860764>.
- [14] Humphires S. Jr., Terry R.L., Frauenglass A. // J. Appl. Physics. 1991. V. 69, No. 4. P. 1822–1834.
- [15] Budker G.I., Skrinsky A.N., Electron cooling and new possibilities in elementary particle physics, // Sov. Phys.-Usp. 1978. V. 21. P. 277, .
- [16] Artamonov A., Derbenev Ya., Saldin E. // Particle Accelerators. 1988. V. 23. P. 79–92.
- [17] Meshkov I.N., Skrinsky A.N. JINR Commun. E9–95–130. Dubna, 1995.
- [18] Meshkov I.N., Skrinsky A.N. // NIM A. 1996. V. 379. P. 41.
- [19] Meshkov I., Sidorin A. // Proc. of Intern. Workshop on Medium Energy Electron Cooling, Novosibirsk, 1997. P. 183.
- [20] А.Н. Скринский, В.В. Пархомчук, Методы охлаждения пучков заряженных частиц // ЭЧАЯ, 1981г., т.12, вып.3.
- [21] А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев Теория циклических ускорителей, М., 1962г.
- [22] Wine land D. J., Dru11inger R. E., Walls F. L.— Phys. Rev. Lett., 1978, v. 40, p.1639.
- [23] Neuhauser W., Hohenstatt M., Toschek P., Dehmelt H.— Ibidem, v.41, p. 233.
- [24] В.И. Балыкин, В.С. Летохов, В.Г. Миногин Охлаждение атомов давлением лазерного излучения, УФН, 1985г., т.147, вып.1.
- [25] Van der Meer S., CERN Intern. Report, CERN/ISR-RF/72-46, 1972.
- [26] Van der Meer S., CERN Intern. Report, SPS/DI/PP/, 11-05, 1977.
- [27] Будкер Г.И. In: Proc. Intern. Symposium Electron and Positron Storage Rings. Saclay, 1966, p. II-I-I; Атомная энергия, 1967, т. 22, с. 346.

- [28] Пархомчук В.В. Наука из первых рук, 2012г., т. 46, №4.
- [29] Мешков И.Н. Электронное охлаждение: статус и перспективы, ЭЧАЯ, 1994г., т.25, вып.6.
- [30] Будкер Г.И., Скринский А.Н., Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц, УФН, 1978г., т.124, вып. 4.
- [31] Будкер Г.И., Диканский Н.С., Куделайнен В.И. и др. – В сб.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975, т.2, с. 309.
- [32] V. B. Reva, N.I. Alinovskiyy et al, COMMISSIONING COSY COOLER WITH ELECTRON BEAM AT NOVOSIBIRSK / Proceedings of COOL2013, Murren, Switzerland, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/COOL2013/papers/tupm2ha01>.
- [33] R. Maier, R. Seligmann, H.J. Stein, ELECTRON COOLING IN COSY-JULICH, Proceedings of EPAC1990, http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e90/PDF/EPAC1990_1580.PDF
- [34] X.D. Yang et al, HIRFL-CSR ELECTRON COOLING DEVICES / Proceedings of Sixteenth International Conference Cyclotrons and Their Applications 2001.
- [35] https://www.gsi.de/en/work/accelerator_operations/accelerators/beam_cooling/electron_coolers_at_sis18_esr_cryring.htm
- [36] Extra Low ENergy Antiproton (ELENA) ring and its Transfer Lines: Design Report / April 2014, DOI: 10.5170/CERN-2014-002
- [37] I. Procházka, POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY, Materials Structure, vol. 8, number 2 (2001).
- [38] W. Brandt, Positrons Solid-State Physics, Proc. Internat. School of Physics «Enrico Fermi», Course LXXXIII, Varenna 1981, North-Holland, Amsterdam (1983).

- [39] A. Dupasquier and A.P. Mills, Jr, Positron Spectroscopy of Solids, Proc. Internat. School of Physics «Enrico Fermi», Course CXXV, Varenna 1993, IOS Press, Amsterdam (1995).
- [40] M.J. Puska and R.M. Nieminen, Rev. Mod. Phys. 66 (1994) 841.
- [41] J. Cizek, I. Prochazka, T. Kmiec, P. Vostry, Physica status solidi (a) 180 (2000) 439.
- [42] P. Pikart, C. Hugenschmidt, M. Horisberger, Y. Matsukawa, M. Hatakeyama, T. Toyama, and Y. Nagai. Positron annihilation in Cr, Cu, and Au layers embedded in Al and quantum confinement of positrons in Au clusters. Phys. Rev. B, 84(1):014106, Jul 2011.
- [43] D. J. Keeble, R. A. Mackie, W. Egger, B. L'owe, P. Pikart, C. Hugenschmidt, and T. J. Jackson. Identification of vacancy defects in a thin film perovskite oxide. Phys. Rev. B, 81(6):064102, Feb 2010.
- [44] M. Reiner, P. Pikart, and C. Hugenschmidt. Thin film annealing and alloying of a Au/Cu two-layer system studied by positron annihilation spectroscopy. Journal of Alloys and Compounds, 587(0):515 – 519, 2014.
- [45] M. A. Noah, D. Fl'ototto, Z. Wang, M. Reiner, C. Hugenschmidt, and E. J. Mittemeijer. Interdiffusion in epitaxial, single-crystalline au/ag thin films studied by auger electron spectroscopy sputter-depth profiling and positron annihilation. Acta Materialia, 107:133 – 143, 2016.
- [46] В.В. Погосов, А.В. Бабич, П.В. Вакула, А.Г. Кравцова, О работе выхода позитрона из металла с диэлектрическим покрытием, Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 11.
- [47] В.В. Погосов, Метод определения работы выхода электронов и позитронов из металла, содержащего вакансии, Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 6.
- [48] 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.
doi:10.1134/s0020441207050028
- [49] Hagen, D., Ley, R., Weil, D., Werth, G., Arnold, W., Rückert, M., & Schneider, H. (1993). Positronium spectroscopy at a LINAC-based slow positron source. *Hyperfine Interactions*, 76(1), 295–303. doi:10.1007/bf02316728
- [50] Howell, R. H., Alvarez, R. A., Woodle, K. A., Dhawan, S., Egan, P. O., Hughes, V. W., & Ritter, M. W. (1983). Low Energy Positron Production at the Livermore Linac. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 30(2), 1438–1441. doi:10.1109/tns.1983.4332554
- [51] Operating instructions for ORELA (Oak Ridge Electron Linear Accelerator) positron beam line. DOI: 10.2172/6042522
- [52] Krause-Rehberg, R., Jungmann, M., Krille, A., Werlich, B., Pohl, A., Anwand, W., Cowan, T. E. (2011). Use of superconducting linacs for positron generation: the EPOS system at the Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD). *Journal of Physics: Conference Series*, 262, 012003. doi:10.1088/1742-6596/262/1/012003
- [53] Shidara, T., Enomoto, A., Kamitani, T., Kobayashi, H., Kurihara, T., Shirakawa, A., ... Nakahara, K. (1994). The KEK Slow-Positron Source. *Materials Science Forum*, 175-178, 205–208. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.175-178.205
- [54] T. Nakano et al., Experiment at SPring-8, *Nucl. Phys. A* 670, (2000), p. 332.
- [55] M.Fedurin, G.Kulipanov, N.Mezentsev and V.Shkaruba, Superconducting high-field three-pole wigglers at Budker INP, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* 448, (2000), p. 51.
- [56] L.Madansky and F. Rasetti, An Attempt to Detect Thermal Energy Positrons, *Phys. Rev.* 79 (1950), p. 397, DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRev.79.397>.

- [57] W.H. Cherry, Secondary electron emission produced from surfaces by positron bombardment, Ph.D. Dissertation, Princeton University, (1958).
- [58] D.G. Costello, D.E. Groce, D.F. Herring, G. Wm. MacGovan, Phys. Rev. B 5, (1972), p.1433.
- [59] Jr. Mills, L. Pfeifer, Desorption of Surface Positrons: A Source of Free Positronium at Thermal Velocities, Phys. Rev. Lett. 43, (1979), p. 1961.
- [60] A. P. Mills, Jr. and E. M. Gullikson, Solid Neon Moderator for Producing Slow Positrons, Appl. Phys. Lett. 49, (1986) p. 1121.
- [61] Pareige P., Radiguet B., Suvorov A., Kozodaev M., Krasikov E., Zabusov O., Massoud J. Three-dimensional atom probe study of irradiated, annealed and re-irradiated VVER-440 weld metals// Surf. Interface Anal. – 2004. – Vol.36. – P.581-584.
- [62] Рогожкин С. В., Никитин А. А., Алеев А. А., Залужный А. Г., Чернобаева А. А., Ерак Д. Ю., Штромбах Я. И., Забусов О. О. Исследование тонкой структуры материала сварного шва с высоким содержанием фосфора корпуса реактора ВВЭР-440 после облучения, отжига и по вторного облучения // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 73–82
- [63] Гурович Б. А., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Федотова С. В., Фролов А. С., Забусов О. О., Салтыков М. А, Структурные исследования стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочей температуре корпуса реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – Т. 4. – С. 110–121.
- [64] Kuleshova E. A., Gurovich B. A., Shtrombakh Ya. I., Nikolaev Yu. A., Pechyonkin V. A. Microstructural behavior of VVER-440 reactor pressure vessel steels under irradiation to neutron fluences beyond the design operation period // J. of Nucl. Mater. – 2005. – № 342. – P. 77–

- 89.
- [65] V. Slugen, H. Hein, S. Sojak, J. Veternikova, Irradiation induced damage of the reactor pressure vessel steels studied by positron annihilation lifetime techniques.
- [66] S. van der Zwaag, A. Van Veen, H. Schut, A. J. Hill and T. J. Bastow, Determination of Fatigue Damage at Precipitate Level in 2024-T3 using Positron Annihilation and Nuclear Magnetic Resonance, Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys, 2004, p. 363 – 368.
- [67] Jana Simeg Veternikova, Jarmila Degemova, Vladimir Slugen, Applicability of Positron Annihilation Method for Corrosion Study, 2014.
- [68] C.H. Henry, Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells, *J. Appl. Phys.* 51 (1980) 4494, <https://doi.org/10.1063/1.328272>.
- [69] Lijuan Zhang, et al., Positron annihilation study on CuInSe₂ solar cell thin films, *Thin Solid Films*, V.525, (2012), p.68–72.
- [70] Z. Q. Chen, a) S. Yamamoto, M. Maekawa, et.al., Postgrowth annealing of defects in ZnO studied by positron annihilation, x-ray diffraction, Rutherford backscattering, cathodoluminescence, and Hall measurements, *J. Appl. Phys.* 94, 4807 (2003); doi: 10.1063/1.1609050.
- [71] M.F. Ferreira Marquesa, C. Lopes Gil, P.M. Gordo, Zs. Kajcsos, A.P. de Lima, D.P. Queiroz, M.N. de Pinho, Free-volume studies in polyurethane membranes by positron annihilation spectroscopy, *Radiation Physics and Chemistry*, 68, 2003, p. 573 – 576.
- [72] Alexandra L. Howie, Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy of Metals, Semiconductors, Thin Films and Zeolites, Thesis for Bachelor of Science, Centre for Antimatter-Matter Studies at School of Physics, UWA

- [73] Мешков, И.Н. Экспериментальные исследования физики антиводорода и позитрония. Проблемы и возможности / И.Н. Мешков // ЭЧАЯ. – 1997. – Т. 28. – С. 495-540.
- [74] Пауль В. Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц. / В. Пауль // УФН. – 1990. – Т. 160. – С. 109-127.
- [75] Measurement of the hyperfine structure of antihydrogen in a beam / E. Widmann et al, // Hyperfine Interactions. – 2013. – V. 215. – P. 1-8.
- [76] C. Amole et al. The ALPHA antihydrogen trapping apparatus // Nucl. Instr. Meth. A. – 2014. – V. 735. – P. 319-340.
- [77] Графутин В.И., Прокопьев Е.П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172 – С. 67–83.
- [78] I. Meshkov, A.Sidorin, Conceptual design of the low energy positron storage ring, NIM A, 391,(1997), 216-220.
- [79] В.Антропов, А.Иванов, Ю.Коротаев и др., Атомная энергия, 94, (2003), 68-70.
- [80] Мешков И. Н. и др. Накопитель заряженных частиц с продольным магнитным полем ЛЕРТА (Стеллатрон) // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 7(136). С. 78-83
- [81] Е.В. Ахманова, В.Ф. Быковский, М.К. Есеев, А.Г. Кобец, В.И. Лохматов, И.Н. Мешков, В.Н. Павлов, Р.В. Пивин, А.Ю. Рудаков, А.А. Сидорин, С.Л. Яковенко, Развитие проекта ЛЕРТА / Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7, № 7(163). С. 814-820.
- [82] Е.В. Ахманова, М.К. Есеев, А.Г. Кобец, И.Н. Мешков, А.Ю. Рудаков, А.А. Сидорин, С.Л. Яковенко, Проект ЛЕРТА: формирование и инжекция позитронного пучка / Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, №4-5(174-175). С. 618-623.
- [83] В. Н. Малахов, И. Н. Мешков, А. Я. Силенко, Интерференция

- позитрония в магнитном поле // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, №2(144). С. 161-166.
- [84] Окунь Л. Б. Зеркальные частицы и зеркальная материя: 50 лет гипотез и поисков // УФН. 2007. Т. 177, №4. С.397-406.
- [85] 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.
- [86] В. К. Антропов, Е. В. Болтушкин, А. В. Иванов и др. Проект LEPTA: первые эксперименты с электронным пучком // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 3, №. 3(126). С. 19-23
- [87] Мешков И.Н., Транспортировка пучков заряженных частиц. // Наука, Сибирское отделение. 1991.
- [88] I.Meshkov, Y.Korotaev, A.Sidorin, A.Smirnov, E.M.Syresin, I.Titkova, High perveance electron gun for the electron cooling system, NIM A 441 (2000), Nos 1–2, p. 92.
- [89] Boussard D. Schottky noise and the beam transfer function diagnostics, CERN SPS 86-11 (ARF).
- [90] Shultz P.J., Lynn K.G., Rev. Mod. Phys., 60, (1988), 701-775
- [91] C.F. Driscoll, J.H. Malmberg, “Length-Dependent Containment of a Pure Electron Plasma” / Phys. Rev. Lett., 50, (1983), 167.
- [92] J. J. Bollinger, D. J. Wineland, and D. H. E. Dubin, “Non-neutral Ion Plasmas and Crystals, Laser Cooling, and Atomic Clocks,” Phys. Plasmas 1, 1403 (1994).
- [93] Wineland, D., Ekstrom, P., & Dehmelt, H. (1973). Monoelectron Oscillator. Physical Review Letters, 31(21), 1279–1282. doi:10.1103/physrevlett.31.1279 1279.
- [94] Н.А.Лебедев, Д.В.Философов, А.Ф.Новгородов, И.В.Островский, Метод изготовления источника позитронов на основе ^{22}Na , Тезисы

- докладов 54-го Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Белгород 2004, 314
- [95] Huang, X.-P., Anderegg, F., Hollmann, E. M., Driscoll, C. F., & O'Neil, T. M. (1997). Steady-State Confinement of Non-neutral Plasmas by Rotating Electric Fields. *Physical Review Letters*, 78(5), 875–878. doi:10.1103/physrevlett.78.875
- [96] Eseev M.K., Ahmanova E.V., Vititnev A.N., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Yu., Sidorin A.A., Yakovenko S.L., Compression and Confinement of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility, Proc. of RUPAC2012, St.Peterburg, Russia, 2012, (CERN: JACoW) 319–321.
- [97] Eseev, M. K., Kobets, A. G., Meshkov, I. N., Rudakov, A. Y., & Yakovenko, S. L. (2013). Study of nonneutral plasma storage in a magnetic trap with a rotating electric field at the lepta facility. *Plasma Physics Reports*, 39(10), 787–794. doi:10.1134/s1063780x13100036
- [98] E. Ahmanova, M. Eseev, A. Kobets, V. Lokhmatov, I. Meshkov, O. Orlov, V. Pavlov, A. Rudakov, A.A. Sidorin, S. Yakovenko. LEPTA project: towards positronium // Proc. of COOL2013, Murren, Switzerland, 2013, (CERN: JACoW) 119–120.
- [99] Трубников Г.В., Динамика частиц в циклических ускорителях с фокусирующим продольным магнитным полем // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ОИЯИ, Дубна, 2005 г..
- [100] Bykovsky V., Ahmanova E., Kaplin V.I., Karpinsky V.N., Kobets A., Lokhmatov V., Malakhov V., Meshkov I., Pivin R., Rudakov A., Trubnikov G., Yakovenko S., Status of the LEPTA project // (2008) RuPAC 2008 Contributions to the Proceedings - 21st Russian Particle Accelerator Conference, pp. 101-103.
- [101] Ahmanova E., Kaplin V., Karpinsky V., Lokhmatov V., Meshkov I.,

- Pavlov V., Rudakov A., Sidorin A.A., Yakovenko S., Kobets A., Eseev M., LEPTA project: Towards positronium // (2012) RuPAC 2012 Contributions to the Proceedings - 23rd Russian Particle Accelerator Conference, pp. 316-318.
- [102] Ahmanova E., Drobin V., Horodek P., Meshkov I., Orlov O., Rudakov A., Seleznev V., Sidorin A.A., Yakovenko S., Kobets A., Eseev M., Lepta - The facility for fundamental and applied research // (2014) 24th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2014, pp. 83-84.
- [103] Бронштейн И. М., Вторичная электронная эмиссия // монография, "Наука", 1969 г.
- [104] Степанов Г. В., Вторичная эмиссия в электронных приборах // Массовая радиобиблиотека, Выпуск 332, 1959 г.
- [105] O. S. Orlov, A. G. Kobets, I. N. Meshkov, A. A. Sidorin, V. I. Hilinov // SETUP FOR SECONDARY ELECTRON-ELECTRON EMISSION COEFFICIENT STUDY//, RuPAC 2018, pp. 270-271.
- [106] Design and Construction of Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) // Conceptual Design Report, http://nica.jinr.ru/files/NICA_CDR.pdf
- [107] P. Horodek, A.G. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, Positron Annihilation Spectroscopy at the LEPTA Facility // 5th International Particle Accelerator Conference IPAC2014, Dresden, Germany, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-WEPRO107.
- [108] Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Сидорин А.А., Орлов О.С. Механизм накопления заряженных частиц в ловушке Пеннинга-Малмберга-Сурко с вращающимся электрическим полем, Письма в ЖЭТФ, 102 (5), 291–296 (2015).
- [109] Eseev M.K., Ahmanova E., Kobets A., Meshkov I., Orlov O., Sidorin A., Yakovenko S., Mechanism of Compression of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility, Proc. of RUPAC-2014, Obninsk,

- Russia, 2014, (CERN: JACoW) 20–22.
- [110] E. Dryzek, M. Sarnek, M. Wróbel, Reverse transformation of deformation-induced martensite in austenitic stainless steel studied by positron annihilation, *J. Mater. Sci.* 49 (2014) 8499–8458.
- [111] E. Dryzek, M. Sarnek, K. Siemek, Annealing behaviour of plastically deformed stainless steel 1.4307 studied by positron annihilation methods, *Nukleonika* 58 (2013) 215–219.
- [112] P. Horodek, J. Dryzek, M. Wróbel, Positron annihilation study of defects induced by various cutting methods in stainless steel grade 304, *Tribol. Lett.* 45 (2012) 341–347.
- [113] J. Simeg Veternikova, V. Slugen, S. Sojak, M. Skarba, E. Korhonen, S. Stancek, J. Degmova, V. Sabelova, I. Bartosova, Application of slow positron beam for study of commercial oxide-dispersion-strengthened steels, *J. Nucl. Mater.* 450 (2014) 99–103.
- [114] A. Van Veen, H. Schut, M. Clement, A., Kruseman, M.R., Ijma, J.M.M. De Nijs VEPFIT applied to depth profiling problems, *Appl. Surf. Sci.* 85 (1995) 216–224.
- [115] A. P. Mills, Jr. and E. M. Gullikson, Solid Neon Moderator for Producing Slow Positrons, *Appl. Phys. Lett.* 49, (1986) p. 1121.
- [116] С. Л. Яковенко, Импульсный инжектор позитронов низкой энергии // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ОИЯИ, Дубна, 2007 г.
- [117] В.Ф.Быковский, А.Г.Кобец, Е.В.Болтушкин, В.Н.Малахов, И.Н.Мешков, В.Н.Павлов, Р.В.Пивин, И.А.Селезнев, В.Г.Шмаровоз, С.Л.Яковенко, Инжектор позитронов для накопителя LEPTA, *Письма в ЭЧАЯ* 3, (2006), p. 65–69.
- [118] I.N. Fridlyander/ Aluminum Alloys// Kiev: Komintech. -2005. - 365 p.
- [119] V.P. Poida, D.E. Pedun, V.V. Bryukhovetskii, A.V. Poida, R.V. Sukhov, A.L. Samsonik, V.V. Litvinenko/ Structural changes during

- superplastic deformation of high-strength alloy 1933 of the Al–Mg–Zn–Cu–Zr system// *Phys Met Metallogr.* – 2013. - 114(9).- 848–858.
- [120] В.И. Бойко, В.А. Скворцов, В.Е. Фортов, И.В. Шаманин. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003, 288 с.
- [121] Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В. Теплофизические процессы в твердом теле при воздействии мощных импульсных пучков заряженных частиц // *Известия Томского политехнического университета* .- т.303.вып.2.- Радиационная физика твердого тела и радиационные технологии.-2000.-с.71-91
- [122] S.I. Anisimov, Ya.A. Imas, G.S. Romanov and Yu.V. Khodyko // *Action of high-power radiation on metals*// Springfield. - VA: National Technical Information Service. – 1971. - 272 p.
- [123] V.I. Boiko, A.N. Valyaev, A.D. Pogrebnyak/ *Metal modification by high-power pulsed particle beams*// *PHYS-USP.* – 1999. - 42(11). - 1139-1166.
- [124] A.G.Kobets, P.R. Horodek, Yu. F.Lonin, V.V. Lytvynenko, A. G.Ponomarev, O.A. Startsev, V.T. Uvarov // *Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 51.- № 5.-2015.- pp. 478-482. DOI: 10.3103/S1068375515050075.
- [125] Козырь И.Г., Бородин Р.В., Воропаев А.В. и др. Структура и свойства инструментальной стали после обработки электронным пучком и термического отпуска // *Физика и химия обработки материалов* 1998, №3, С.30-33
- [126] Ротштейн В.П. Модификация структуры и свойств металлических материалов интенсивными импульсными электронными пучками. Автореф. дисс. докт.ф.-м.н.:01.04.07.- Томск.-1995.- 37 с.
- [127] Дидык А.Ю., Регель В.Р., Скуратов В.А., Михайлова Н.Ю.

- Радиационное упрочнение металлов, облученных тяжелыми ионами // ЖТФ, т.59, в.5 (1989) с.107-11.
- [128] Rice, S., Nowotny, H., Wayle, S.: A survey of the development of subsurface zones in the wear of materials. *Key Eng. Mater.* 33, 77–100 (1989).
- [129] Zandrahimi, M., Reza Bateni, M., Poladi, A., Szpunar, J.: The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel. *Wear* 263, 674–678 (1997).
- [130] Dryzek, E.: Defect depth profiling after sphere indentation and blasting in aluminium and aluminium alloy detected by positron annihilation. *J. Mater. Sci.* 38, 3755–3763 (2003).
- [131] Su, N., Yue, L., Liao, Y., Liu, W., Zhang, H., Li, X., Wang, H., Shen, J.: The effect of various sandblasting conditions on surface changes of dental zirconia and shear bond strength between zirconia core and indirect composite resin. *J. Adv. Prosthodont.* 7, 214–223 (2015).
- [132] Belbasi, M.R., Ramezani, M.: The effect of sandblasting time on producing nanocrystalline surface of PO733 steel (DIN: 1.8509). *Mater. Phys. Mech.* 17, 33–37 (2013).
- [133] Li, X.Y., Wang, D.Y.: Mechanical, electrochemical and tribological properties of nano-crystalline surface of 304 stainless steel. *Wear* 255, 836–845 (2003).
- [134] Fard, S.B., Guagliano, M.: Effects of surfaces nanocrystallization induced by shot peening on material properties: a Review. *F&IS* 7, 3–16 (2009).
- [135] Horodek P., Siemek K., Dryzek J., Kobets A. G., Wróbel M.// Positron Annihilation and Complementary Studies of Stainless Steel Exposed to Sandblasting at Different Angles. *Tribology Letters*, (2017), 65(1) doi:10.1007/s11249-017-0813-0
- [136] 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).
- [137] Bhushan, B.: *Introduction to Tribology*. Wiley, New York (2002).
- [138] Wu, Y.C., Zhang, R., Chen, H., Li, Y., Zhang, J., Zhu, D.M., Jean, Y.C.: Corrosion of iron and stainless steels studied using slow positron beam technique, *Radiat. Phys. Chem.* 68, 599–603 (2003).

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. V. K. Antropov, E. B. Boltushkin, A. V. Ivanov, S. A. Ivashkevich, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, V. I. Lokhmatov, I. N. Meshkov, V. N. Pavlov, R. V. Pivin, I. A. Seleznev, A. O. Sidorin, A. V. Smirnov, E. M. Syresin, G. V. Trubnikov, S. L. Yakovenko, Project LEPTA: First Experiments with an Electron Beam. *Particles and Nuclei, Letters*. 2005. V. 3, №. 3(126). pp. 19-23.
2. V. F. Bykovsky, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, V. N. Malakhov, I. N. Meshkov, V. N. Pavlov, I. A. Seleznev, A. O. Sidorin, V. G. Shmarovoz, S. L. Yakovenko, Positron Injector for Accumulator LEPTA. *Particles and Nuclei, Letters*. 2006. V. 3, №7(136), pp. 65-69.
3. E. V. Akhmanova, V. F. Bykovsky, M. K. Eseev, A. G. Kobets, V. I. Lokhmatov, I. N. Meshkov, V. N. Pavlov, R. V. Pivin, A. Yu. Rudakov, A. A. Sidorin, S. L. Yakovenko, Progress in LEPTA Project. *Particles and Nuclei, Letters*. 2010. V. 7, № 7(163). pp. 814-820.
4. Ahmanova E.V., Eseev M.K., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Yu., Sidorin A.A., Yakovenko S.L., LEPTA Project: Forming and Injection of Positron Beam. *Particles and Nuclei, Letters*. 2012. V. 9, №4-5(174-175). pp. 618-623.
5. Eseev M. K., Kobets A. G., Meshkov I. N., Rudakov A. Y., & Yakovenko S. L., Study of nonneutral plasma storage in a magnetic trap with a rotating electric field at the lepta facility. *Plasma Physics Reports*, (2013). 39(10), pp. 787–794. doi:10.1134/s1063780x13100036.
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. *Particles and Nuclei, Letters*.

2014. V. 11, № 5(189). pp. 1092-1098.
7. Eseev M.K., Kobets A.G., Meshkov I.N., Sidorin A.A., Orlov O.S., Mechanism of accumulation of charged particles in a penning-Malmberg-Surko trap with a rotating electric field. *JETP Letters*, 102 (5), pp.291–296 (2015).
 8. A.G.Kobets, P.R. Horodek, Yu. F.Lonin, V.V. Lytvynenko, A. G.Ponomarev, O.A. Startsev, V.T. Uvarov, Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 51.- № 5.-2015.- pp. 478-482.
 9. 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).
 10. Horodek P., Siemek K., Dryzek J., Kobets A. G., Wróbel M., Positron Annihilation and Complementary Studies of Stainless Steel Exposed to Sandblasting at Different Angles. *Tribology Letters*, (2017), 65(1) doi:10.1007/s11249-017-0813-0.
 11. Bykovsky V. Ahmanova E., Kaplin V.I., Karpinsky V.N., Kobets A., Lokhmatov V., Malakhov V., Meshkov I., Pivin R., Rudakov A., Trubnikov G., Yakovenko S., Status of the LEPTA project. *Proc. of RuPAC 2008*, (CERN: JACoW) pp. 101-103.
 12. Eseev M.K., Ahmanova E.V., Vititnev A.N., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Yu. , Sidorin A.A., Yakovenko S.L., Compression and Confinement of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility. *Proc. of RUPAC2012*, (CERN: JACoW) pp. 319–321.
 13. Ahmanova E., Kaplin V., Karpinsky V., Lokhmatov V., Meshkov I., Pavlov V., Rudakov A., Sidorin A.A., Yakovenko S., Kobets A., Eseev M., LEPTA project: Towards positronium. *Proc. of RuPAC2012*, (CERN: JACoW) pp. 316-318.
 14. E. Ahmanova, M. Eseev, A. Kobets, V. Lokhmatov, I. Meshkov, O. Orlov, V. Pavlov, A. Rudakov, A.A. Sidorin, S. Yakovenko., LEPTA project: towards

- positronium. Proc. of COOL2013, Murren, Switzerland, 2013, (CERN: JACoW) pp. 119–120.
15. P. Horodek, A.G. Kobets, I.N. Meshkov, O.S. Orlov, A.A. Sidorin, Positron Annihilation Spectroscopy at the LEPTA Facility. Proc. of 5th International Particle Accelerator Conference IPAC2014, Dresden, Germany, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-WEPRO107.
 16. Eseev M.K., Ahmanova E., Kobets A., Meshkov I., Orlov O., Sidorin A., Yakovenko S., Mechanism of Compression of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility. Proc. of RUPAC-2014, (CERN: JACoW) pp.20–22.
 17. A.G.Kobets, P.R. Horodek, V.V. Lytvynenko, U.F. Lonin, A.G. Ponomarev, O. A. Startsev, V.T. Uvarov, Modification of aluminum alloy 1933 by the high-current electron beam irradiation. Proc. of the Int. Conf. Nanomaterials: application and properties.-Lviv.-2014.-vol.3.-No 1.-2014.- 01001 (3pp)
 18. Ahmanova E., Drobin V., Horodek P., Meshkov I., Orlov O., Rudakov A., Seleznev V., Sidorin A.A., Yakovenko S., Kobets A., Eseev M., Lepta - The facility for fundamental and applied research. Proc. of RuPAC 2014, (CERN: JACoW) pp. 83-84.
 19. O. S. Orlov, A. G. Kobets, I. N. Meshkov, A. A. Sidorin, V. I. Hilinov, SETUP FOR SECONDARY ELECTRON-ELECTRON EMISSION COEFFICIENT STUDY. Proc. of RuPAC RuPAC 2018, pp. 270-271.

Апробація результатів дисертації

Наукові результати були опробовані на наступних конференціях:

- IX European Particle Accelerator Conference, EPAC'04, Switzerland;
- XIX Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2004, Russia;
- XX Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2006, Russia;
- XXI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2008, Russia;
- XXII Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2010, Russia;
- XXIII Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC'2012, Russia;

- Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'07, Germany;
- Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'09, China;
- Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'11, Ukraine;
- Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'13, Switzerland;
- Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'15, USA;
- The 10-th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry, Slovakia;
- VI Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, (2005), Ukraine;
- VII Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, (2007), Ukraine;
- VIII Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, (2009), Ukraine;
- IX Scientific Seminar in Memory of V.P.Sarantsev, (2011), Ukraine;
- 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications, SLOPOS'15, Czech Republic;
 - XV Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів, 2017 р., Харків, ХФТІ НАН Україна;
 - XXV Міжнародний семінар з прискорювачів заряджених частинок, 2017 р., Харків, ХФТІ НАН Україна;
- XII-th International Conference on Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons, ION'2018, Poland;
- International Conference Nanomaterials: application and properties, Lviv, 2014;
- International Conference Nanomaterials: application and properties, Odesa, 2019;
- 20-th International Conference on Radiation Effects in Insulators, Kazakhstan, 2019.

Документи, що підтверджують використання результатів

"Затверджую"

В. о. директора

Наукового фізико-

технологічного центру

МОН та НАН України



Турбін П.В.

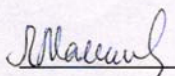
2019 р.

АКТ


спільних випробувань методу позитронної анігіляційної спектроскопії для визначення концентрації дефектів в багатошарових покриттях

1. Метод позитронної анігіляційної спектроскопії (ПАС), заснований на реєстрації доплерівського уширення анігіляційних ліній, і реалізований на каналі спектроскопії установки LEPTA є ефективним засобом вимірювання концентрації дефектів типу вакансій у багатошарових багатоелементних покриттях типу MoN/CrN, (TiCr)N, (TiAl)N та (TiZrNb)N та ін..
2. Застосування методу ПАС спектроскопії при відпрацюванні технологічних режимів іонно-плазмового та магнетронного нанесення покриттів дозволяє більш обґрунтовано досягати заданих експлуатаційних характеристик завдяки вимірюванню профілю просторового розподілу дефектів.

Від Наукового фізико-технологічного центру МОН та НАН України

 к.ф.м.н. Маліков Л.В.

Від Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України
заст. директора з наукової роботи

 д.т.н. Литвиненко В.В.

Відповідальний виконавець

Молодший науковий співробітник

Кобець А.Г..

Заст. директора
Інституту електрофізики і
радіаційних технологій НАН
України

д.т.н. В.В. Литвиненко

2019 р.



АКТ

впровадження методу позитронної анігіляційної спектроскопії у
фундаментальні та прикладні дослідження в галузі радіаційного
матеріалознавства

Розроблені та створені джерела позитронів а також створений канал позитронної анігіляційної спектроскопії дадуть можливість одержувати нові важливі знання про фізичні механізми еволюції накопичення радіаційних дефектів в матеріалах корпусів ядерних реакторів. Завдяки високій точності ідентифікації дефектів типу вакансій атомів розроблені методи дадуть можливість зрозуміти механізми таких явищ в оболонках тепловідільних елементів АЕС, як радіаційний ріст та розпухання, таким чином даючи можливість підвищення надійності експлуатації матеріалів активної зони.

Провідний науковий співробітник ІЕРТ
НАН України

_____ д.ф.м.н. П.М. Остапчук

Відповідальний виконавець

Молодший науковий співробітник ІЕРТ
НАН України

_____ А.Г. Кобець