

УДК 539.12

МОДЕРНИЗАЦІЯ МЬОЛЛЕРІВСЬКОГО ПОЛЯРИМЕТРУ ЗАЛА А (ТJNAF) ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ PREX**А.П. Липовський¹, О.В. Гламаздин², В.Г. Горбенко², Р.І. Помацалюк²**¹Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, м. Харків, пл. Свободи, 4, Україна²Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, вул. Академічна, 1, Україна

E-mail: lipovskiy@gmail.com

Надійшла до редакції 21 грудня 2007 р.

Розглянуто деякі аспекти реконструкції мьоллерівського поляриметра Зала А лабораторії ім. Т. Джеферсона. Наведено фізичну основу методу вимірювання нейтронного формфактора ядра ^{208}Pb на базі досліджень порушення парності у пружному розсіянні поляризованих електронів. Розглянуто експериментальні можливості прецизійних вимірювань величини поляризації пучка електронів за допомогою існуючої в залі А апаратури, деякі деталі реконструкції обладнання та вдосконалення експериментальних процедур. Наведені результати розрахунків параметрів магнітооптичної системи для критично низької енергії первинного пучка електронів 850 МеВ, термодинамічних процесів взаємодії інтенсивного пучка електронів у 50 мікроампер з матеріалом мішені, впливу наявності сильного у 40000 Ерстед магнітного поля на траєкторії мьоллерівських електронів. Коротко описана оригінальна конструкція мішенного пристрою з магнетизацією феромагнітних фольг методом “грубої сили”.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мьоллерівський поляриметр, модернізація, нейтронний радіус ядра, ядро ^{208}Pb , порушення парності, електро-слабка асиметрія, пружне розсіяння, поляризовані електрони.

Реконструкція мьоллерівського поляриметра Залу А лабораторії ім. Т. Джеферсона (ТJNAF) [1] є одним з ключових елементів підготовки фізичного обладнання для проведення експерименту по вимірюванню радіусу нейтронної оболонки ^{208}Pb за допомогою дослідження порушення парності у пружному розсіянні поляризованих електронів (експеримент PREX). Це дасть змогу поглибити знання про розміри нейтронних зірок, структуру нейтронних ядер, фізику зіткнення важких іонів, ефекти порушення парності в атомах, можливість існування кваркових зірок та в інших сферах ядерної фізики і астрономії. Теоретичні аспекти згаданого методу вимірювання нейтронного радіусу важких ядер докладно розглянуті в роботі [2]. В експерименті PREX (“Вимірювання нейтронної шкіри ^{208}Pb за допомогою досліджень порушення парності у розсіянні електронів” E00-003 [3]) буде виміряна величина електрослабкої асиметрії обумовлена ефектом порушення парності при пружному розсіянні пучка поляризованих електронів з енергією 850 МеВ на мішені ^{208}Pb з кутом розсіяння 6° . Метою роботи є розрахунок параметрів магнітооптичної системи для критично низької енергії первинного пучка електронів 850 МеВ, термодинамічних процесів взаємодії інтенсивного пучка електронів у 50 мікроампер з матеріалом мішені, впливу наявності сильного у 40000 Ерстед магнітного поля на траєкторії мьоллерівських електронів.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Суть експерименту полягає в вимірюванні асиметрії у виході розсіяних електронів в реакції пружного розсіяння поляризованих електронів на ядрах ^{208}Pb при лівій та правій спіральності електронів пучка. Оскільки протонний формфактор для ^{208}Pb відомий з великою точністю, нейтронний формфактор у цьому випадку можна отримати з формули:

$$A = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R - \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_L}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R + \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_L} = \frac{G_F Q^2}{2\pi\alpha\sqrt{2}} \cdot \left[\underbrace{1 - 4\sin^2\Theta_w}_{\approx 0} - \frac{F_n(Q^2)}{F_p(Q^2)} \right], \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{A_T P_T} \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L} \sim 10^{-6}, \quad (2)$$

де F_n – нейтронний формфактор, F_p – протонний формфактор, Q – переданий імпульс, G_F – константа Фермі, Θ_w – кут Вайнберга, A – величина асиметрії, яка буде виміряна на протязі експерименту, $N_{L,R}$ – швидкість лічби для лівої та правої спіральності електронів, відповідно, A_T, P_T – аналізуюча здатність та поляризація електронів феромагнітної мішені.

Схема розміщення експериментального обладнання для проведення експерименту PREX у Залі А Лабораторії ім. Джеферсона [4] приведена на рис. 1.

Особливістю експерименту PREX є дуже низька очікувана величина асиметрії (близько 10^{-6}) та різниця протонного і нейтронного радіусів (декілька відсотків). Як наслідок, необхідно досягти високої статистичної та систематичної точності на рівні одного відсотка. Це зумовлює вибір кінематичних параметрів процесу та висуває додаткові вимоги до режиму роботи прискорювача (енергія пучка 850 МеВ та величина току

50 мікроампер) та апаратури детектора (швидкість лічби в кожному спектрометрі 860 МГц). В свою чергу, це вимагає суттєвої реконструкції систем вимірювання поляризації пучка електронів, яка безпосередньо пов'язана з точністю розрахунків аналізуючої здатності A_T та вимірювання поляризації електронів P_T .

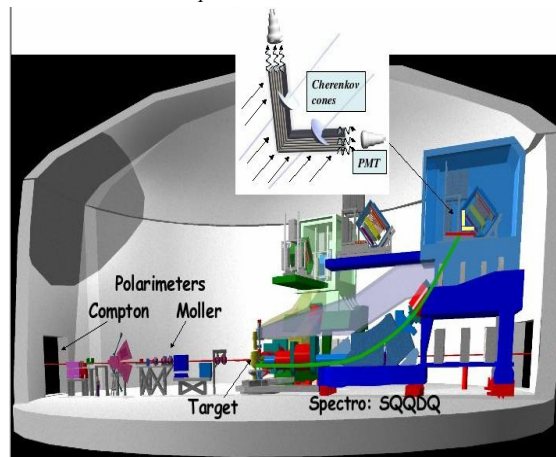


Рис. 1. Схема експериментального обладнання для експерименту PREX у Залі А Лабораторії ім. Джефферсона.

Висока статистична точність може бути легко досягнута набором достатньої кількості статистики, що забезпечується великою ефективністю магнітної системи та високою швидкістю лічби детектора та електронної системи. Отже, більш суттєвими є систематичні похибки, які можуть бути пов'язані з кількома факторами. По-перше, при використанні в якості мішені поляризованих електронів феромагнітних матеріалів важливою проблемою є калібрування величини поляризації електронів мішені в умовах недостатньо повного її насичення. Це може бути вирішено застосуванням надсильного поля, що намагнічує, яке створюється за допомогою сучасних надпровідних систем з величиною поля до 40 кЕрстед. По-друге, оптимальним є вимірювання поляризації пучка електронів безпосередньо під час набору даних для процесу, що досліджується. Для цього не може бути використано, не руйнуючий первинний пучок, комптонівський поляриметр Зала А, який при такій низькій енергії не забезпечує необхідної систематичної точності та, до того ж, має бути калібрований за допомогою, наприклад, мьоллерівського поляриметра. Мьоллерівський поляриметр Зала А з нахиленими під кутом 20° відносно пучкової осі феромагнітними фольгами у якості мішені порушує пучок, що вимагає припинення набору основної статистики під час вимірювання поляризації пучка. До того ж, при середньому струмі пучка близько 50 мікроампер матеріал мішені у точці взаємодії з пучком швидко нагрівається, що деполаризує електрони в мішені поляриметра. Для усунення цього ефекту планується використовувати тонкі ~ 1 мікрон фольги, орієнтовані площиною поперек напрямку пучка. Таким чином з використанням надпровідного магніту реалізується метод "грубої сили", який за висновками роботи [5] здатен забезпечити точність вимірювання поляризації електронного пучка на рівні одного відсотка. Додатково, структура пучка значно змінюється і стає імпульсною з тривалістю імпульсу в 1 нс при частоті повторення 30 Герц. При цьому імпульсна величина струму пучка не змінюється, що зберігає поляризацію, а середній струм зменшується до 0,5 мкА, що знімає температурні навантаження. При такому співвідношенні термінів нагріву та охолодження мішені через короткий час, як буде доведено нижче, температура у зоні взаємодії лише на 12°K перевищує кімнатну.

Оптимальна для проведення експерименту PREX енергія пучка 0,85 ГеВ є критично низькою для мьолерівського поляриметра Зала А, який розрахований на роботу у широкому енергетичному діапазоні майже до 12 ГеВ. До того ж застосування нової схеми намагнічування та імпульсного режиму роботи прискорювача електронів потребує реконструкції мішеного пристрою та розрахунків впливу нових методик на параметри магнітної системи та безпосередньо мішені.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відповідно до реконструкції мьоллерівського поляриметра було виконано наступну роботу:

1) Розроблено і узгоджено проект та розпочато виготовлення нової камери мішені поляризованих електронів (рис. 2). В основу проекту реконструкції покладено існуючий та готовий для застосування гелієвий кріостат зала С. Вакуумний корпус цього пристрою зображено на рисунку без систем кріогенного забезпечення, проектування та виготовлення яких здійснюється спеціалістами лабораторії ім. Джефферсона.

Згідно технічних умов механічний мішений пристрій, адаптований до наявного гелієвого кріостату з надпровідною магнітною системою, включає в себе три феромагнітні мішені різної товщини з найменшою

товщиною у 1 мікрон, орієнтовані по площині поперек напрямку магнітного поля, які здатні дистанційно позиціонуватися відносно електронного пучка з точністю близько 10 мікрон. Для вивчення та вилучення супутніх до процесу, що досліджується, фонових асиметрій у механічний пристрій має бути додана четверта феромагнітна мішень з поляризацією електронів, що орієнтована уздовж площини фольги та поперек напрямку пучка, яка здатна обертатися на повний оберт навколо пучка з прецизійною фіксацією позиції і напрямку поляризації. Мішень міститься в отворі діаметром 20 мм уздовж осі постійного магніту циліндричної форми діаметром 30 мм, що здатний обертатися разом з мішенню та має додаткові наскрізні отвори на циліндричній поверхні тіла магніту для проходу пучка. Постійний магніт утворює уздовж фольги магнітне поле соленоїдальної форми величиною близько 500 Ерстед. Наявність магнітних матеріалів в мішенюму пристрої і засобах позиціонування ускладнює як конструктивні рішення, так і процедуру позиціонування. Наприклад, необхідно максимально віддалити постійний магніт разом з відповідною мішенню від надпровідного магніту під час його роботи. Усі ці технічні умови забезпечені завдяки оригінальній кінематичній схемі із застосуванням єдиного лінійного транслятора, що не порушує вакуум, з довжиною пересування близько 500 мм. Усе управління гелієвим кріостатом та мішеннюм пристроєм здійснюється у дистанційний спосіб з застосуванням крокових двигунів та електронно-обчислювальної техніки, що забезпечується пакетом керуючих кодів. В системі позиціонування застосовані магнітні кінцеві вимикачі, лінійні резистивні кодувальники та телевізійні магніто-нечутливі камери для візуального контролю приладнаних до транслятора лінійок з міліметровою шкалою.

Згодом, наявність трьох феромагнітних мішеней різної товщини, можливість їх позиціонування відносно осі електронного пучка, наявність мішеней з перпендикулярною поляризацією електронів відносно осі пучка з можливістю її обертання на повний оберт навколо пучка дає унікальну можливість вивчення та мінімізації похибок вимірюванні величини поляризації, що пов'язані з різноманітними експериментальними факторами.

2) Суттєво реконструйовано систему електронного збору даних. Для модернізації електронної системи застосовуються більш швидкі прилади та блоки: фотопомножувачі XR2020 (з довжиною імпульсу у 3,5 нс), дискримінатори P/S 708 (до 250-300 МГц), схеми збігу P/S 754, програмована логічна схема CAEN V1495, часово-цифровий перетворювач TDC CAEN V1190B, цифро-аналоговий перетворювач DAC VMIVME-4140. Внесено відповідні зміни до програмного забезпечення поляриметра.

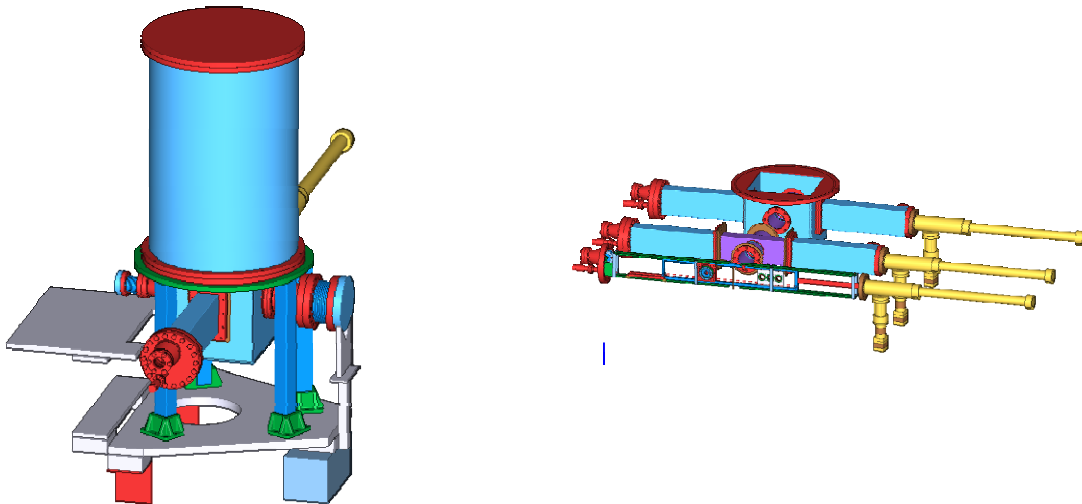


Рис. 2. Зовнішній та внутрішній вигляд нового мішенюго пристрою мьоллерівського поляриметра.

3) За допомогою моделювання (з використанням програми GEANT [6,8,9]) отримано координати розташування мішеней поляриметра та величини полів квадрупольних магнітів, що є оптимальними для досягнення найвищої ефективності реєстрації розсіяних мьоллерівських електронів і мінімізації впливу ефекту Левчука [7] (розмивання кінематики мьоллерівського розсіяння, спричиненого їх зв'язком у атомах матеріалу мішеней) при проведенні експерименту PREX з енергією пучка 0,85 ГеВ. Результат розрахунку, отриманий у вигляді тривимірних гістограм залежності кожної обчислюваної величини від величин полів у першому та третьому квадруполі, представлений на рис.3 у вигляді перерізів через тривимірний оптимум. Отже, отримано оптимальні, з точки зору максимальної ефективності, величини полів $H_1=1,44$ кГаус та $H_3=0,32$ кГаус та величини аналізуючої здатності, які мають корегувати її невелике збільшення за рахунок ефекту Левчука.

За допомогою програми GEANT проведено моделювання ефекту впливу координати розташування мішеней на вихід реакції мьоллерівського розсіяння для мішенюго пристрою з полем у 40 кЕрстед надпровідного магніту, позиція якого на осі пучка не змінюється, але високе магнітне поле якого суттєво впливає на неаксіальні траєкторії мьоллерівських електронів. Розрахунки, наведені на рис.4-5, показали, що в системі з надпровідним магнітом зміна кінематичних параметрів суттєва, але аналізуюча здатність та вихід реакції залишаються незмінними і в допустимих межах, якщо позиція пучка відносно нульової точки мішенюго

пристрою строго фіксується у поперечному до пучка напрямі (у межах декількох десятих міліметра). Позиція по осі Z менш критична і виявляє відносний максимум навколо 15 см відстані від нулевої точки.

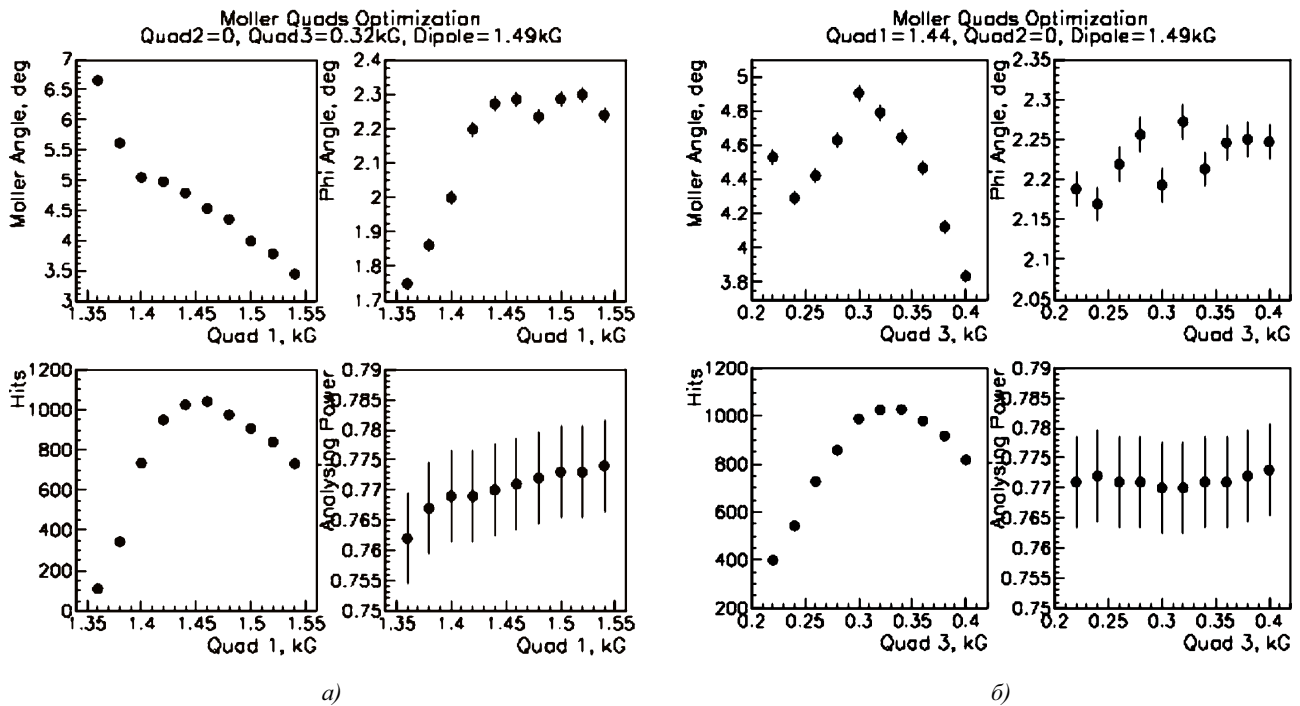


Рис.3. Залежність кутів реєстрації електронів, аналізуючої здатності та виходу реакції від величини поля а) - в першому квадруполі; б) - в третьому квадруполі

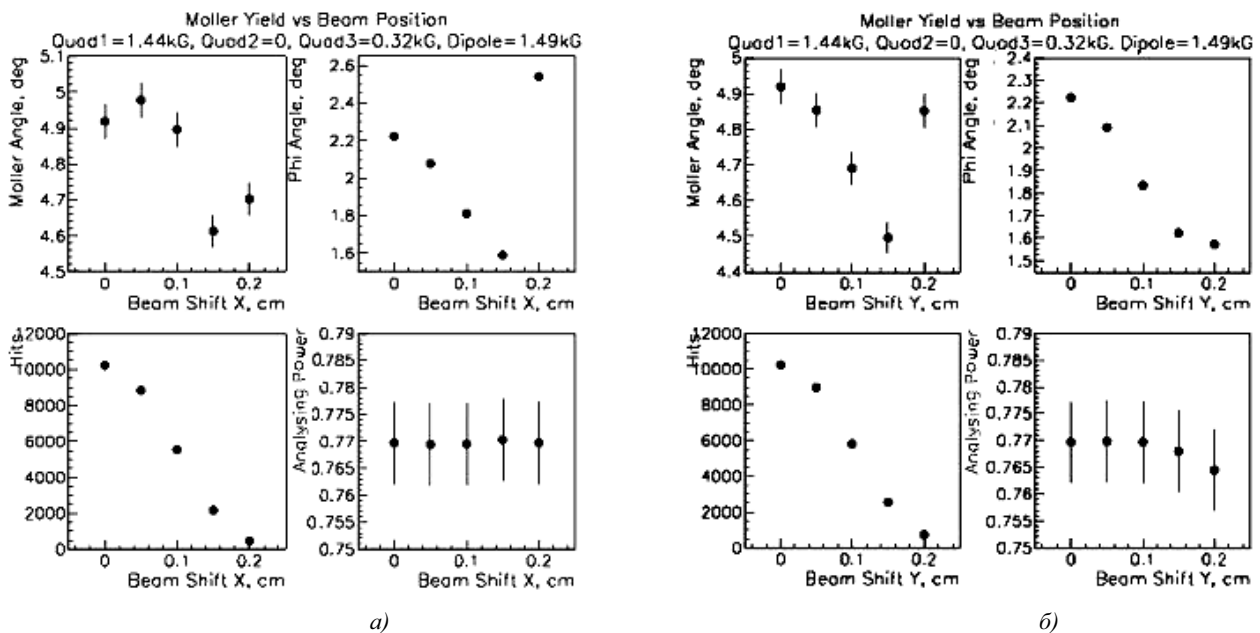


Рис.4. Ефект впливу координат X і Y (а і б відповідно) пучка на реєстровані кути, аналізуючу здатність та вихід реакції мьоллерівського розсіяння для наведених на рисунку величин магнітних полів для магнітного поля котушок Гельмгольца у 40 кЕрстед а) – від координати X; б) – від координати Y.

Розрахунки температурного нагріву точки взаємодії під впливом теплової енергії, залишеної завдяки іонізаційним втратам електронів у матеріалі мішені наведені на рис.6. До уваги брались розмір пучка та його структура в часі з урахуванням застосування швидкого растру, товщина мішені, діаметр її обойми та теплові константи вибраного матеріалу, коефіцієнти теплопровідності та питомої теплоємності.

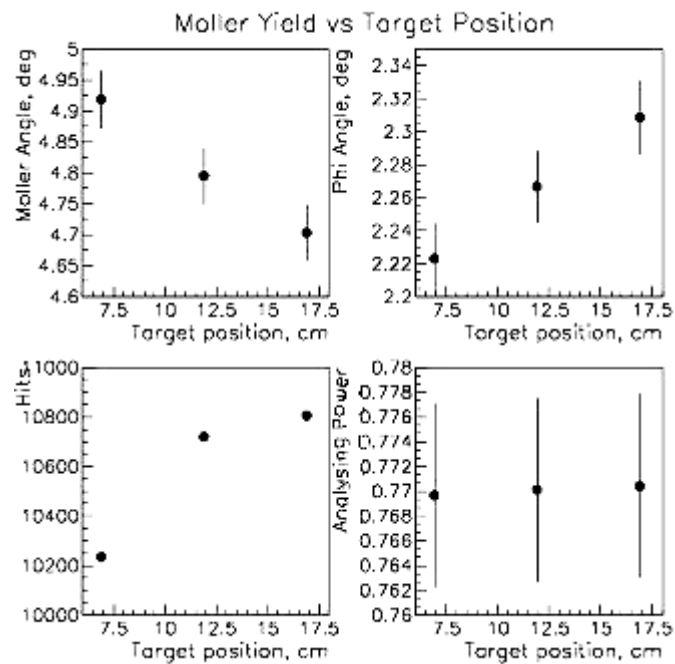


Рис. 5. Ефект впливу магнітного поля котушок Гельмгольца та координати Z мішені на кути реєстрації електронів, аналізуючу здатність та вихід реакції мьоллерівського розсіяння

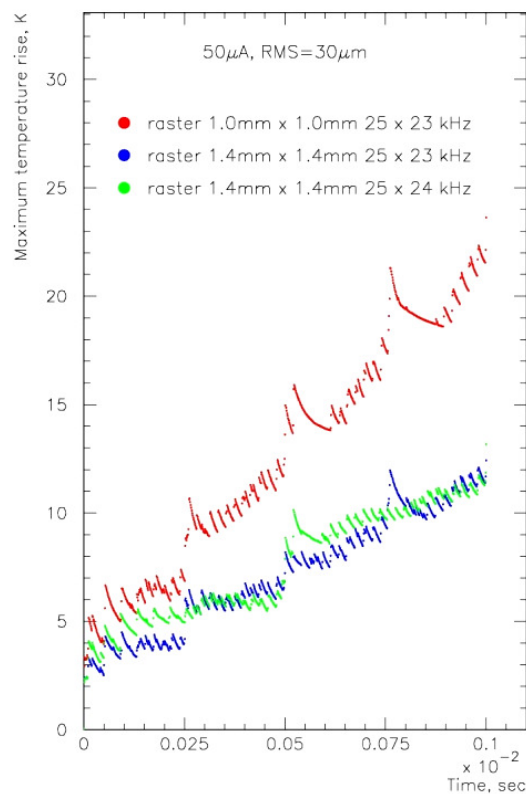


Рис.6. Результат моделювання нагріву мішені мьоллерівського поляриметра при використанні спеціальної імпульсної структури пучка прискорювача та швидкого растру пучка.

ВИСНОВКИ

В результаті наведеної вище роботи розглянуті деякі аспекти підготовки експериментальної апаратури та результати моделюючих розрахунків, які необхідні для забезпечення прецизійного вимірювання поляризації електронного пучка у відповідності з вимогами запланованого у найближчому майбутньому експерименту по дослідженню нейтронного радіусу ядра ²⁰⁸Pb. Показано, що з допомогою оптимізації магніто-оптичної системи, застосування імпульсної структури пучка електронів, реконструкції мішенного пристрою з застосуванням

надпровідної системи намагнічування феромагнітних фольг методом “грубої сили”, реконструкції електронної системи детектування розсіяних мьоллерівських електронів та прецизійного транспортування пучка електронів на мішень можна забезпечити здатність мьолерівського поляриметра вимірювати поляризацію пучка електронів з сумарною (статистична + систематична) похибкою не вище одного відносного відсотка.

Дана робота виконувалась згідно з наступними програмами і договорами:

- “Програмою робіт по атомній науці і техніці ННЦ ХФТИ до 2010 року”, затверджена 13.06.2005;
- Меморандумом про взаєморозуміння між ННЦ ХФТИ, Україна, та Лабораторією Джефферсона, США;
- контрактом Міністерства Енергетики США DE-AC05-84150-M175, на основі якого Дослідницька Асоціація Університетів Південного Сходу (SURA) забезпечує функціонування лабораторії Джефферсона.

Автори виказують окрему подяку співробітнику лабораторії Джефферсона Чудакову Є.А. за постановку загальної проблеми та допомогу в проведенні розрахунків температурних ефектів, а також керівництву і співробітникам лабораторії ім. Джефферсона за фінансову підтримку та співпрацю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A.V. Glamazdin, J.P. Chen, E.A. Chudakov, D.S. Dale Electron beam Moller polarimeter at Hall A, TJNAF // Fizika.- 1999.- Vol.B8.-P.91-95.
2. C.J. Horowitz, S.J. Pollock, P.A. Souder, R. Michaels Parity Violating Measurements of Neutron Densities // Phys. Rev.-2000.- Vol.C63.-P.025501(1-17).
3. R. Michaels, P.A. Souder, G.M. Urciuoli A Clean Measurement of the Neutron Skin of Pb(208) Through Parity Violating Electron Scattering // Proposal to Jefferson Lab PAC 29.-P.20.
4. J. Alkorn, B.D. Anderson, K.A. Aniol, J.R.M. Annand Basic Instrumentation for Hall A at Jefferson Lab // Nucl. Instr.& Meth.- 2004.-Vol.A522.-P. 294-346.
5. M. Hauger // Nucl. Instrum Meth. Phys. Res., Sect. A.-2001.-Vol.462.-P.382.
6. GEANT 321. Detector Description and Simulation Tool // CERN Geneve.- 1993.-P. 427.
7. L.G. Levchuk The intra-atomic motion of bound electrons as possible source of the systematic error in electron beam polarization measurements of a Möller polarimeter // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.-1994.-Vol.345.-P496.

HALL A (TJNAF) MÖLLER POLARIMETER UPGRADE FOR PREX

A.P. Lypovskiy¹, A.V. Glamazdin², V.G. Gorbenko², R.I. Pomatsalyuk²

¹V.N. Karazin Kharkiv National University

²National Scientific Center, Kharkiv Institute of Physics and Technology

Some aspects of the Hall A Möller polarimeter reconstruction of the Möller Polarimeter at Jefferson Laboratory were observed. The physic basis of a measuring method of the neutron form factor of ²⁰⁸Pb nucleous from electro-weak asymmetry investigation at the elastic scattering of polarized electrons is presented. The experimental possibilities of the presize measurements of a electron beam polarization value by using Hall A equipment and some details of the equipment upgrade and experimental procedure improvement are shown. The calculation results of the magnet optic system parameters at the critical low primary electron beam energy 850 MeV, of the thermodynamic processes of the intense electron beam at 50 microamper interaction with the target material, of the influence of a strong magnetic field at 40000 Oersted presence on Möller electron trajectories are presented. The original construction of a target device with the “brute force” ferromagnetic foils magnetization is shortly written.

KEY WORDS: Möller polarimeter, modernization, nucleous neutron form factor, parity violating, electro-weak asymmetry, elastic scattering, polarized electrons.