

МЁЛЛЕРОВСКИЙ ПОЛЯРИМЕТР ЗАЛА А (ЛАБОРАТОРИЯ ДЖЕФФЕРСОНА) ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

А.В. Гламаздин

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

E-mail: glamazdi@jlab.org

В начале 2010 г. мёллеровский поляриметр зала А (лаборатория Джефферсона, США) был реконструирован с целью повышения точности измерения поляризации пучка электронов. На поляриметре была установлена новая мишень поляризованных электронов. Новая мишень поляризуется в плоскости, перпендикулярной плоскости мишени, методом «грубой силы» в магнитном поле 3...4 Тл. В детектор поляриметра были установлены два 4-канальных апертурных детектора взамен одноканальных. Параллельно со старой системой сбора данных использовалась новая быстродействующая система сбора данных. В статье представлены результаты эксплуатации реконструированного поляриметра во время экспериментов PREX и DVCS. Приведен анализ величины систематической ошибки поляриметра после реконструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Мёллеровский поляриметр зала А был разработан в ННЦ ХФТИ и создан совместно с Лабораторией Джефферсона и Университетом штата Кентукки (Лексингтон, Вирджиния, США) [1,2]. Поляриметр предназначен для измерения поляризации пучка электронов в диапазоне энергии 0,8...6,0 ГэВ при токе пучка не более 1,5 мкА. Систематическая ошибка измерения величины поляризации пучка электронов мёллеровским поляриметром составляла 1,7 %. Необходимость реконструкции поляриметра была вызвана проведением в зале А эксперимента PREX [3]. Целью эксперимента являлось измерение плотности нейтронной материи в ядре ^{286}Rb . Для проведения эксперимента PREX с требуемой точностью необходимо измерять поляризацию пучка электронов с точностью не хуже 1 %. Для достижения требуемой точности измерения поляризации пучка на мёллеровский поляриметр была установлена новая мишень поляризованных электронов, создана новая система сбора данных и установлен новый сегментированный апертурный детектор.

1. МЁЛЛЕРОВСКИЙ ПОЛЯРИМЕТР

Мёллеровский поляриметр основан на использовании процесса мёллеровского рассеяния [4]. Сечение мёллеровского рассеяния пучка поляризованных электронов на поляризованной электронной мишени описывается формулой:

$$d\sigma^{Moll} / d\Omega^* = d\sigma_0^{Moll} / d\Omega^* \times (1 + A_{Moll} \times P^b \times P^t), \quad (1)$$

где $d\sigma_0^{Moll} / d\Omega^*$ – сечение мёллеровского рассеяния пучка неполяризованных электронов на неполяризованных электронах мишени; P^b и P^t – поляризации пучка электронов и электронной мишени; A_{Moll} – анализирующая способность реакции мёллеровского рассеяния. С помощью поляриметра измеряется асимметрия рассеяния пучка поляризованных электронов на поляризованной электронной мишени, которая описывается формулой:

$$A_{meas} = \frac{N^{\uparrow\uparrow} - N^{\uparrow\downarrow}}{N^{\uparrow\uparrow} + N^{\uparrow\downarrow}} = A_{Moll} \times P^b \times P^t, \quad (2)$$

где $N^{\uparrow\uparrow}$ и $N^{\uparrow\downarrow}$ – скорости счета детектора, измеряемые при направлении вектора продольной составляющей поляризации мишени, параллельном и антипараллельном направлению поляризации пучка электронов, соответственно. Из формулы (2) легко увидеть, что:

$$P^b = A_{meas} / A_{Moll} \times P^t. \quad (3)$$

Анализирующая способность поляриметра A_{meas} определяется геометрией его магнитного спектрометра и детектора и рассчитывается с помощью программы GEANT [5]. Следовательно, для измерения поляризации пучка надо измерить асимметрию рассеяния, знать величину и знак поляризации электронной мишени.

Поляриметр состоит из мишени поляризованных электронов (Т), магнитного спектрометра и детектора (Рис.1). Мёллеровские электроны, возникающие в результате взаимодействия пучка электронов с мишенью, анализируются магнитным спектрометром. Спектрометр состоит из трех квадрупольных (Q1, Q2, Q3) и одного дипольного магнитов. Рассеянные электроны фокусируются квадрупольными магнитами в горизонтальной плоскости на входе дипольного магнита. Дипольный магнит отклоняет эти электроны вниз для регистрации детектором. В центре дипольного магнита располагается экранирующая вставка, через которую проходит пучок электронов без взаимодействия с магнитным полем диполя.

Детектор электронов состоит из двух калориметров полного поглощения, позволяющих регистрировать мёллеровские события в совпадениях. Каждый калориметр набран из четырёх одинаковых блоков типа «спагетти», расположенных вертикально друг над другом. На выходных торцах блоков калориметра закреплены фотоэлектронные умножители. Перед каждым калориметром установлен апертурный детектор, изготовленный из пластического сцинтиллятора и разбитый на четыре секции. Регистрация мёллеровского события осуществляется путем совпадения сигналов с левого и правого детекторов, что позволяет значительно уменьшить вклад фоновых событий.

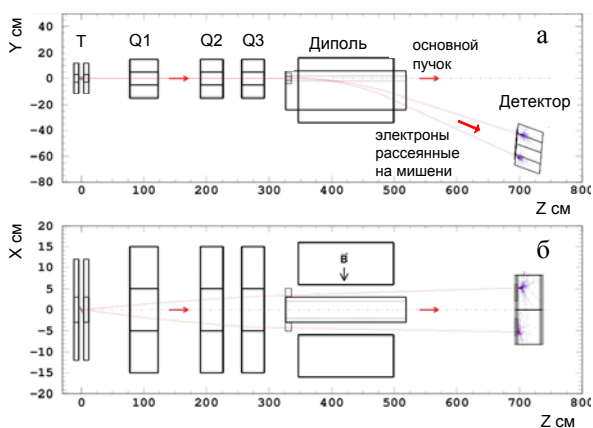


Рис. 1. Схема мёллеровского поляриметра зала А: вид со стороны (а); вид сверху (б)

2. МЕТОД «ГРУБОЙ СИЛЫ»

В качестве мишеней поляризованных электронов для мёллеровских поляриметров используются намагниченные ферромагнитные фольги из чистого железа (чистота 99,85...99,99 %) или супермендюр (49 %Fe, 49 %Co, 2 %V). Схема поляризации мишени методом «грубой силы» показана на Рис.2.



Рис. 2. Схема поляризации ферромагнитной фольги методом «грубой силы»

Если фольгу из ферромагнитного материала поместить в слабое магнитное поле, домены в фольге выстраиваются вдоль плоскости фольги. Таким образом, в фольге поляризация электронов будет направлена вдоль плоскости фольги.

При использовании метода «грубой силы» ферромагнитная фольга помещается в сильное магнитное поле, направленное вдоль пучка электронов [6]. Величина внешнего магнитного поля должна быть больше, чем величина магнитного поля внутри доменов ферромагнетика ($\sim 2,2 \text{ Тл}$). В этом случае «грубой силы» внешнего намагничивающего поля должно быть достаточно для ориентации доменов в ферромагнетике вдоль внешнего поля и, соответственно, пучка электронов. Следовательно, поляризация электронов в фольге будет происходить вдоль направления внешнего намагничивающего поля.

Преимуществом этого метода является то, что ферромагнитная мишень находится в состоянии полного насыщения, поэтому величину поляризации мишени можно рассчитывать, а не измерять.

3. МИШЕНЬ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Схема новой мишени поляризованных электронов мёллеровского поляриметра зала А показана на Рис.3. Мишень состоит из:

- сверхпроводящего магнита с максимальным полем $\pm 4 \text{ Тл}$;
- мишенного устройства с набором из четырёх мишеней. Все мишени изготовлены из чистого же-

леза с чистотой 99,85 и 99,99 % и толщинами 1, 2, 4 и 10 микрон для исследования возможных систематических ошибок;

- юстировочного устройства для ориентации плоскости мишени относительно направления магнитного поля;
- устройства для смены и контроля положения мишеней;
- камеры мишени с устройством ориентации направления магнитного поля вдоль пучка электронов.

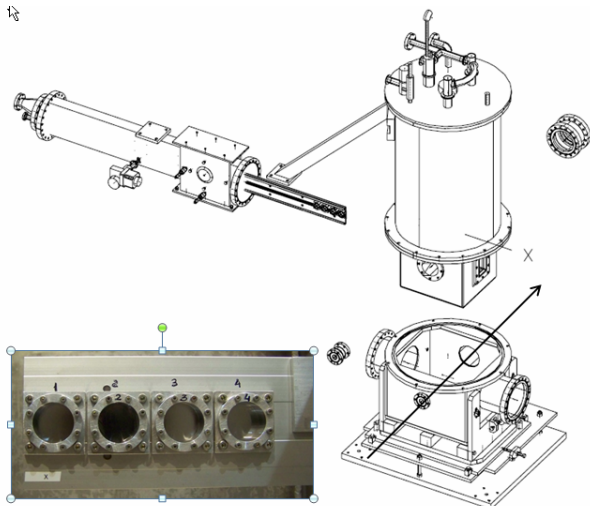


Рис. 3. Схема мишени поляризованных электронов мёллеровского поляриметра зала А.

На схеме показаны: сверхпроводящий магнит, мишенное устройство и камера мишени. Стрелкой показано направление пучка электронов. На фотографии показан держатель мишени с набором железных фольг

Юстировочные устройства позволяют ориентировать мишенное устройство и магнитное поле с линейной точностью $\pm 0,2 \text{ мм}$ и угловой точностью $\pm 0,2 \text{ мрад}$.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Мёллеровский поляриметр с новой мишенью поляризованных электронов был введён в эксплуатацию и протестирован в марте 2010 г., и был использован для измерения поляризации пучка электронов во время проведения экспериментов PREX [3] и DVCS [7].

Для получения величины поляризации пучка электронов поляризация измерялась при помощи всех четырёх мишеней, и данные, полученные по всем мишеням, усреднялись. Измерения поляризации проводились примерно раз в неделю после изменения энергии ускорителя или активации катода инжектора поляризованных электронов.

На Рис.4 показаны результаты измерения поляризации пучка электронов различными мишенями поляриметра. Так как величина поляризации пучка электронов изменялась от измерения к измерению, на рисунке приведены не величины поляризации, измеренные при помощи разных мишеней, а их отклонения от усреднённой по всем измерениям величины.

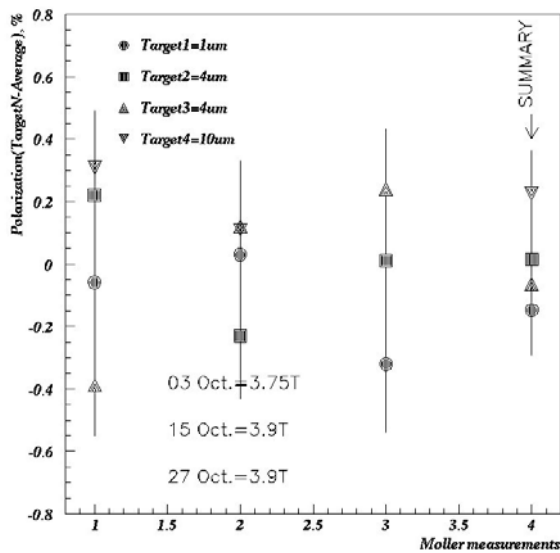


Рис.4 Результаты измерения поляризации пучка электронов различными мишенями мёллеровского поляриметра

Из Рис.4 видно, что результаты измерения поляризации пучка электронов мишенями, отличающимися по толщине и чистоте материала, совпадают с точностью до величины статистической ошибки. Это указывает на то, что величина поляризации всех мишеней совпадает, и, следовательно, мишени в магнитном поле 3,75...3,9 Тл находятся в состоянии насыщения.

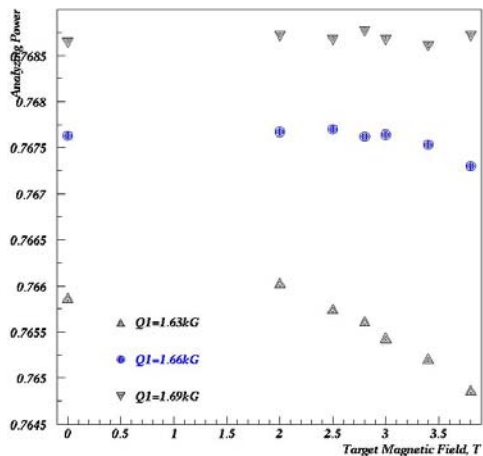


Рис.5. Зависимость величины анализирующей способности мёллеровского поляриметра от величины намагничивающего поля мишени поляризованных электронов

Величина магнитного поля в центре мишени составляет 3...4 Тл. Это поле создаёт интегральное поле ~2 Тл вдоль пучка электронов. В сочетании с неидеальной юстировкой магнитного поля вдоль пучка электронов это поле может приводить к изменению аксептанса поляриметра. На Рис.5 показана зависимость величины анализирующей способности поляриметра в зависимости от величины намагничивающего поля мишени поляризованных электронов для нескольких значений магнитного поля в первом квадруполе магнитного спектрометра поляриметра.

На Рис.6 показаны результаты измерения кривой насыщения поляризации электронной мишени в зависимости от намагничивающего поля. Из этих ре-

зультатов видно, что поляризация электронной мишени достигает насыщения начиная с величины магнитного поля 3,5 Тл. Следовательно, измерения поляризации пучка электронов с помощью мёллеровского поляриметра должны проводиться при величине магнитного поля мишени не менее 3,5 Тл.

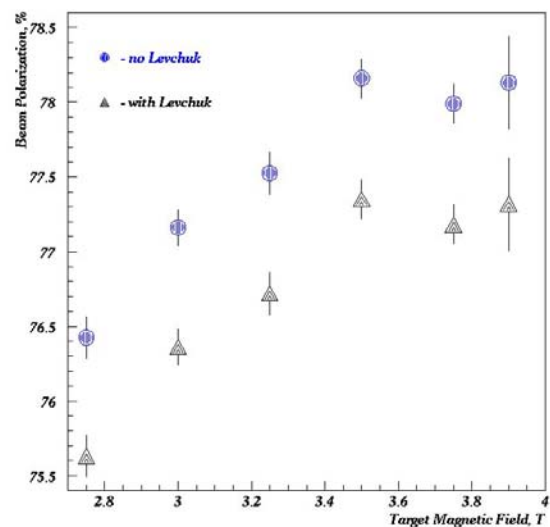


Рис.6. Результаты измерения зависимости поляризации электронной мишени от намагничивающего поля. Приведены результаты измерения (кружки) и поляризация пучка электронов после учета поправок на Левчук-эффект и анализирующую способность поляриметра (треугольники)

Левчук-эффект является хорошо известным эффектом, оказывающим влияние на точность измерения поляризации пучка мёллеровским поляриметром [8]. Он связан с тем фактом, что в мёллеровской поляриметрии используется рассеяние свободных электронов пучка на связанных электронах электронной мишени. В ферромагнетике поляризованные электроны располагаются на внешних оболочках, а неполяризованные – на внутренних. Энергия связи неполяризованных электронов на внутренних оболочках больше, чем энергия связи для поляризованных электронов. Это приводит к разной величине размытия мёллеровского угла рассеяния для поляризованных и неполяризованных электронов. В общем случае это приводит к тому, что измеряемая величина поляризации оказывается больше реальной.

На Рис.6 показаны результаты измерения величины поляризации пучка электронов мёллеровским поляриметром зала А с учетом поправок на зависимость анализирующей способности поляриметра и Левчук-эффекта от намагничивающего поля мишени поляризованных электронов.

В таблице приведены систематические ошибки измерения поляризации пучка электронов мёллеровским поляриметром зала А до и после реконструкции мишени поляризованных электронов.

Как видно из таблицы, использование методики «грубой силы» для поляризации электронной мишени поляриметра позволило улучшить знание величины поляризации мишени в четыре раза и позволило вдвое повысить точность измерения поляризации пучка электронов мёллеровским поляриметром.

Систематическая ошибка мёллеровского поляриметра зала А до и после реконструкции

Параметр	До реконструкции, %	После реконструкции, %
Поляризация мишени	1,5	0,35
Анализирующая способность	0,3	0,3
Левчук-эффект	0,2	0,3
Мёртвое время	0,3	0,3
Фон	0,3	0,3
Высокий ток пучка	0,2	0,2
Другое	0,5	0,5
Итого	1,7	0,88

Ошибка, связанная с высоким током пучка, обуславливается тем фактом, что максимальный рабочий ток мёллеровского поляриметра составляет ~ 3 мкА, тогда как рабочий ток пучка электронов для эксперимента PREX составлял ~ 50 мкА.

Новая система сбора данных работает параллельно со старой и находится в состоянии доводки и тестирования. Результаты измерения поляризации пучка электронов с помощью старой и новой систем находятся в хорошем согласии.

Использование новых четырёхканальных апертурных детекторов позволило уменьшить загрузки в одиночных каналах апертурного детектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мёллеровский поляриметр зала А был реконструирован с целью повышения точности измерения поляризации для проведения эксперимента PREX. В результате реконструкции была создана и установлена на пучок мишень поляризованных электронов, поляризуемая с помощью метода «грубой силы». Как показали измерения, использование новой мишени позволило улучшить точность измерения поляризации пучка электронов в два раза.

Мёллеровский поляриметр с новой мишенью удовлетворяет требованиям эксперимента PREX (точность измерения поляризации пучка электронов при энергии пучка ~ 1 ГэВ не хуже, чем 1 %).

Мёллеровский поляриметр с новой мишенью был использован для измерения поляризации пучка электронов во время проведения двух экспериментов: PREX и DVCS. Поляриметр с новой мишенью планируется использовать во время проведения эксперимента PREX-II и ряда других экспериментов. Опыт, полученный за время эксплуатации поляриметра, позволяет надеяться на увеличение точности измерения поляризации пучка электронов при использовании нового типа электронной мишени.

Данная работа была выполнена при поддержке контракта DE-AC05-06OR23177 Министерства энергетики США, на основании которого Научная Ассоциация им. Джефферсона (Jefferson Science Associates) осуществляет управление Лабораторией Джефферсона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A.V. Glamazdin, V.G. Gorbenko, L.G. Levchuk, et al. Electron Beam Møller Polarimeter at JLab Hall A // *Fizika*. 1999, В8, р. 91-95.
2. А.Е. Чудаков, А.В. Гламаздин, В.Г. Горбенко, Л.Г. Левчук, Р.И. Помацалюк, П.В. Сорокин. Мёллеровский поляриметр для электронного пучка в зале А Джефферсон Лаб // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2002, в.2(40), с.43-48.
3. <http://hallaweb.jlab.org/parity/prex/>
4. А. А. Креснин, Л. Н. Розенцвейг. Поляризационные эффекты в рассеянии электронов и позитронов электронами // *ЖЭТФ*. 1957, т.32, с.353-358.
5. GEANT 321, Detector description and simulation tool. – Geneva: CERN, 1993, p.427
6. P. Steiner, A. Feltham, I. Sick, et al. A high-rate coincidence Moller polarimeter // *Nucl. Instrum. Methods A419*. 1998, p.05-12.
7. <http://hallaweb.jlab.org/experiment/DVCS/>
8. L.G. Levchuk. The Intra-Atomic Motion of Band Electrons as a Possible Source of the Systematic Error in Electron Beam Polarization Measurements by Means of a Muller Polarimeter // *Nucl. Instr. and Meth.* 1994, v.A345, p.496-499.

Статья поступила в редакцию 11.10.2011 г.

HALL A MULLER POLARIMETER (JEFFERSON LABORATORY) AFTER RECONSTRUCTION

A.V. Glamazdin

In the beginning of 2010 Hall A Muller polarimeter (Jefferson Laboratory, USA) had been reconstructed to increase accuracy of the beam polarization measurements. New polarized electron target was installed to the polarimeter. “Brute force” methodic with magnetic field 3...4 T is used to polarize the new target in plane which perpendicular to the target plane. Two 4-channels aperture detectors were installed in the polarimeter detector instead of single-channel detectors. In parallel with old DAQ new fast DAQ based on FADC was used in the polarimeter after upgrade. Results of the reconstructed Moller polarimeter operation for PREX and DVCS experiments are presented. Analysis of the reconstructed polarimeter systematic error is presented.

МЬОЛЛЕРІВСЬКИЙ ПОЛЯРИМЕТР ЗАЛУ А (ЛАБОРАТОРІЯ ДЖЕФФЕРСОНА) ПІСЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ

О.В. Гламаздин

На початку 2010 р. мьоллерівський поляриметр залу А (лабораторія Джефферсона, США) було реконструйовано задля підвищення точності вимірювання поляризації пучка електронів. На поляриметр було встановлено нову мішень поляризованих електронів. Нова мішень має напрямок поляризації в площині, що перпендикулярна площині мішені, та використовує методику «грубої сили» в магнітному полі 3...4 Тл. У детектор поляриметра було встановлено два 4-канальних апертурних детектори замість одноканальних. Нова бистродіюча система збору даних використовувалася паралельно зі старою системою збору даних. У статті представлено результати використання реконструйованого поляриметру під час проведення експериментів PREX та DVCS. Наведено аналіз систематичної похибки мьоллерівського поляриметру після реконструкції.