

EXPERIMENTAL METHODS AND PROCESSING OF DATA

УДК 539.124.18.08

СТАТУС МЁЛЛЕРОВСКОГО ПОЛЯРИМЕТРА ЗАЛА А ЛАБОРАТОРИИ Т. ДЖЕФФЕРСОНА

Р.И. Помацалюк

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

E-mail: romrom@kipt.kharkov.ua

Представлено текущее состояние мёллеровского поляриметра после реконструкции для работы с пучком электронов с энергиями до 11,5 ГэВ. Приведены результаты измерений поляризации пучка в диапазоне энергий 8,5...11 ГэВ и анализ систематических ошибок. В рамках подготовки к поляризационным экспериментам рассмотрены планы по модернизации различных систем поляриметра для улучшения точности измерений поляризации пучка.

ВВЕДЕНИЕ

В период 2012-2013 гг. в лаборатории Джефферсона (США) в зале А была проведена реконструкция мёллеровского поляриметра для обеспечения измерений поляризации пучка электронов с энергией до 11 ГэВ [1]. Необходимость модернизации поляриметра вызвана реконструкцией ускорителя лаборатории Джефферсона и увеличением энергии электронного пучка с 6 до 12 ГэВ. Ускоритель лаборатории Джефферсона [2] является рециркуляционным сверхпроводящим ускорителем электронов и способен одновременно доставлять линейно-поляризованный электронный пучок в три из четырех экспериментальных залов (А, В, С, D). Максимальный средний ток пучка ускорителя до 200 мкА, поляризация пучка продольная до 90%, частота повторений 499 МГц/зал. Диапазон энергий пучка от 1,0 до 11,5 ГэВ. Поляриметр предназначен для измерения поляризации пучка электронов в диапазоне энергий от 0,8 до 11 ГэВ при токе пучка до 3,0 мкА.

1. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ МЁЛЛЕРОВСКОГО ПОЛЯРИМЕТРА

Мёллеровский поляриметр [3, 4] состоит из мишени поляризованных электронов (Т), магнитного спектрометра и детектора (Рис. 1). В результате взаимодействия поляризованных электронов пучка с электронами поляризованной мишени происходит рассеяние мёллеровских электронов под углом 90° в с.ц.м., которые затем анализируются магнитным спектрометром. Спектрометр состоит из четырёх квадрупольных магнитов (Q1, Q2, Q3, Q4) и одного дипольного магнита (Dipole). 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 основной пучок электронов без взаимодействия с магнитным полем диполя.

Детектор электронов собран из двух калориметров полного поглощения, позволяющих регистрировать мёллеровские события в совпадениях. Каждый калориметр набран из двух одинаковых блоков типа «спагетти», расположенных вертикально друг над

другом и разделенных на две секции. На выходных торцах блоков калориметра закреплено по четыре фотозлектронных умножителя (ФЭУ). Перед каждым калориметром установлен апертурный детектор, изготовленный из сцинтиллятора и разбитый на четыре секции.

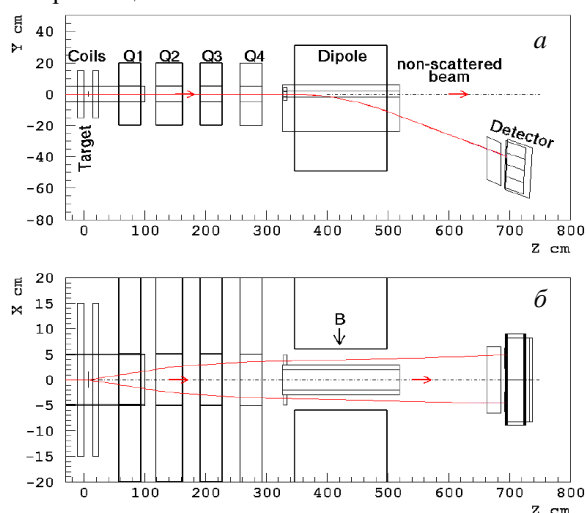


Рис. 1. Схема мёллеровского поляриметра зала А после реконструкции: а) вид сбоку; б) вид сверху

Регистрация мёллеровского события осуществляется путём совпадения сигналов с левого и правого детекторов, что позволяет значительно уменьшить вклад фоновых событий.

Для измерения поляризации электронного пучка с энергией до 11 ГэВ была проведена реконструкция основных элементов мёллеровского поляриметра. Следующие элементы поляриметра были модифицированы (Рис. 2):

- магнитный спектрометр;
- защита детектора и детектор;
- элементы проводки пучка;
- система сбора данных.

Также были изменены элементы электропровода после дипольного магнита. Добавлен вертикальный корректор для компенсации отклонения электронного пучка после диполя. Установлен дополнительный датчик положения пучка для более точного позиционирования пучка на мишени поляриметра.

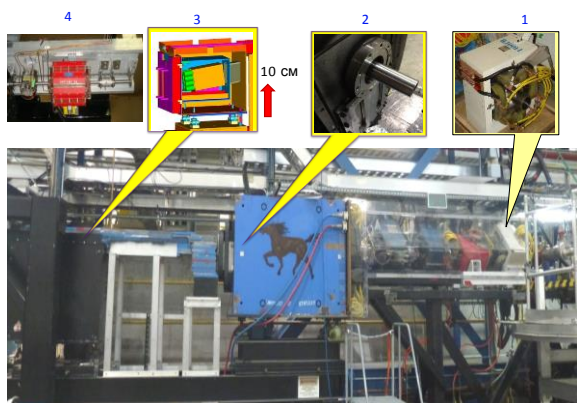


Рис. 2. Реконструкция основных элементов мёллеровского поляриметра: 1 – установлен новый квадруполь $Q4$; 2 – установлена защитная вставка в диполе; 3 – новый корпус защиты детектора, детектор поднят на 10 см; 4 – добавлены вертикальный корректор и датчик положения пучка

1.1. НОВАЯ МИШЕНЬ: ОПЫТ РАБОТЫ

В процессе измерений поляризации пучка при помощи мёллеровского поляриметра используются два типа поляризованных мишеней: 1) мишень с низким магнитным полем (0,03 Тл) и поляризацией вдоль плоскости мишени (“Low Field”) [5]; 2) мишень с большим магнитным полем (4 Тл) и поляризацией поперёк плоскости мишени (“High Field”) [6].

Сверхпроводящий магнит “High Field” мишени для охлаждения использует жидкий гелий. В процессе измерений поляризации магнит необходимо было каждые сутки пополнять жидким He с доступом в экспериментальный зал. Это влекло большие финансовые расходы и затраты времени эксперимента. Для уменьшения расходов на эксплуатацию магнита мишени был приобретен новый сверхпроводящий магнит замкнутого типа (American Magnetics, Inc.), который не требует пополнения жидким гелием (Рис. 3). Новый сверхпроводящий магнит является компактной установкой и содержит:

- источник питания;
- компрессор He;
- водяной охладитель;
- магнитные катушки.

Основные параметры магнита:

- максимальное поле ± 5 Тл;
- максимальный ток 93,28 А;
- коэффициент преобразования 0,536 кГс/А;
- время охлаждения с 300 до 4°К ~ 30 ч;
- время установления поля 3 Тл ~ 35 мин;
- вес 215 кг.

Низкая теплоемкость и производительность нового магнита накладывает ограничения на скорость изменения магнитного поля (3 Тл за ~ 30 мин, 5 Тл за ~ 1 ч).

Работа криогенной холодильной системы магнита основана на замкнутом цикле расширения гелия. Полная система состоит из двух основных компонентов: компрессорной установки с охладителем, которая сжимает хладагент и удаляет тепло из с-

стемы; другая – холодная головка, которая принимает хладагент через один или несколько дополнительных циклов расширения, чтобы охладить его до криогенных температур. Газообразным хладагентом является 99,999% чистый гелий.



Рис. 3. Новый сверхпроводящий магнит и мишень поляриметра

Для нового сверхпроводящего магнита потребовалась реконструкция мишенного устройства поляриметра. Новая “High Field” мишень для поляриметра разработана и изготовлена в Temple University. Конструкция мишени состоит из устройства перемещения (вертикального вращения) и держателя четырех металлических фольг (Рис. 4). Держатель может вращаться вокруг вертикальной оси в диапазоне $\pm 10^\circ$.

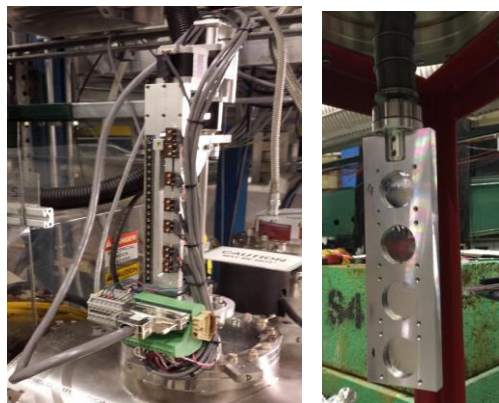


Рис. 4. Новая мишень поляриметра: слева – устройство перемещения, справа – держатель мишеней

Все мишени изготовлены из железа с чистотой 99,85 и 99,99% и толщинами 1, 4, 12 и 25 мкм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

С новой “High Field” мишенью и новым сверхпроводящим магнитом проведено несколько тестовых испытаний поляриметра и измерений поляризации пучка с энергией в диапазоне 8,5...11 ГэВ. Измерения поляризации выполнялись для экспериментов DVCS (Measurements of the Electron-helicity Dependent Cross sections of the Deep Virtual Compton Scattering) и GMp (Precision Measurement of the Proton Elastic Cross Section at High Q^2). Тестовые испытания магнита на пучке показали, что радиационная

нагрузка в экспериментальном зале при «хорошей» проводке пучка не оказывает влияния на работу магнита и его систем.

Результаты измерений поляризации пучка в зале А за период 2016 года в диапазоне энергий 8,5...11 ГэВ представлены на Рис. 5.

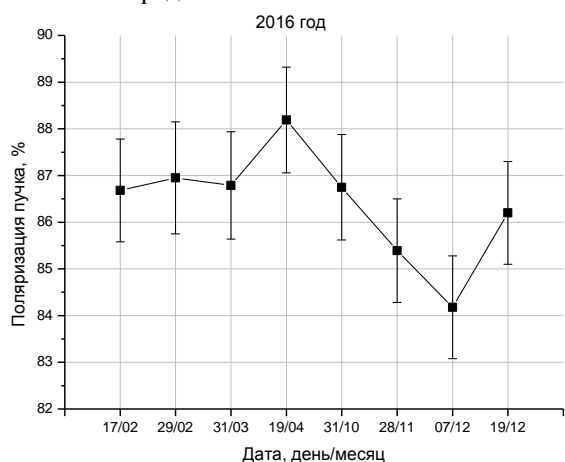


Рис. 5. Результаты измерений поляризации пучка в зале А по датам (ошибки стат.+систем.)

Один из методов проверки параметров пучка, доставляемого в экспериментальный зал (энергия, степень поляризации пучка) – измерение зависимости поляризации пучка в экспериментальном зале от положения спинового ротатора (фильтра Вина). Такого типа измерения получили название «spin-dance».

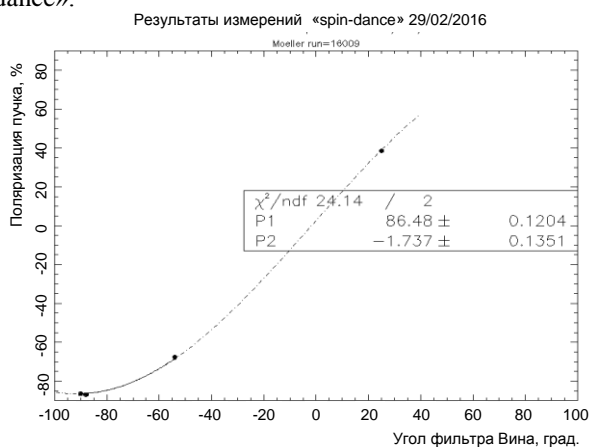


Рис. 6. Зависимость поляризации пучка в зале А от угла фильтра Вина («spin-dance») для энергии пучка 8,82 ГэВ

На Рис. 6 представлены результаты измерений зависимости поляризации пучка в зале А от угла фильтра Вина. Измерения поляризации выполнены для углов фильтра Вина: -54, -90, +25, -88°. Данные измерения позволили более точно определить энергию пучка и задать максимальную поляризацию пучка в экспериментальном зале.

2.1. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Поляриметр измеряет асимметрию рассеяния мёллеровских электронов. Для вычисления поляризации пучка необходимо знать анализирующую способность A_{zz} поляриметра и степень поляризации мишени P_t . Значение A_{zz} рассчитывается при помощи моделирования с использованием пакета

GEANT-3. Степень поляризации мишени P_t , в случае поперечного намагничивания фольги Fe, рассчитывается по известным данным и составляет 8,0%.

Изучение систематических эффектов и их минимизация для величин A_{zz} и P_t позволяет повысить точность измерений поляризации пучка.

Можно выделить следующие основные систематические эффекты, связанные поляризацией мишени P_t :

- степень намагниченности фольги (насыщенность);
- размагничивание фольги за счет эффектов нагрева пучком электронов;
- угловую зависимость намагниченности фольги;
- толщину и чистоту материала мишени (скорость счета, мертвое время, радиационные поправки).

Для изучения этих систематических эффектов проведено несколько измерений.

Чтобы проверить, что фольга полностью намагничена (в насыщении) и положение плоскости мишени соответствует 90° по отношению к направлению поля магнита проведено измерение зависимости поляризации пучка от величины магнитного поля мишени. Выполнено 5 тестовых измерений поляризации пучка для следующих значений магнитного поля мишени: 3, 3.2, 3.5 и 4 Тл (Рис. 7).

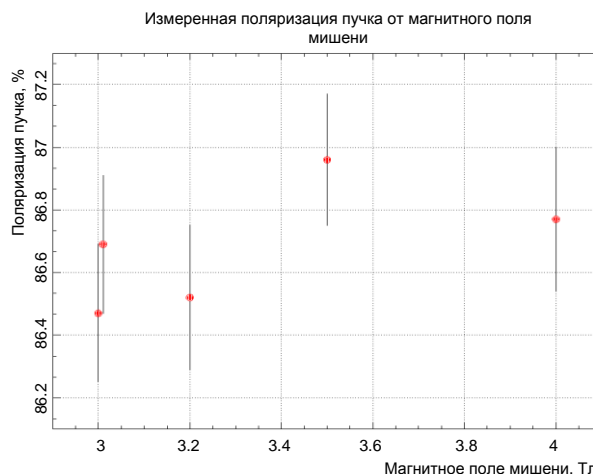


Рис. 7. Зависимость поляризации пучка от величины магнитного поля мишени («кривая насыщения»)

Из полученной зависимости можно сделать вывод, что намагниченность фольги близка к насыщению. Это означает, что положение плоскости мишени близко к 90° по отношению к полю магнита. Такого типа испытания являются одним из способов проверки систематических эффектов, связанных с поляризацией мишени.

Анализирующая способность максимальна и равна $A_{zz}=7/9$ (для углов рассеяния электронов $\theta = 90^\circ$ в с.с.м.). В реальных условиях геометрия магнитных элементов и детектора влияет на величину A_{zz} . Для вычисления эффективной анализирующей способности $\langle A_{zz} \rangle$ поляриметра необходимо моделирование оптики спектрометра и интегрирование A_{zz} по углам захвата детектора поляриметра.

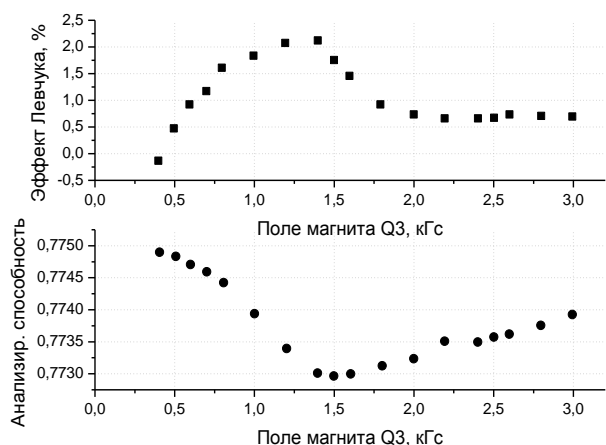


Рис. 8. Результаты моделирования: вклад эффекта Левчука (вверху) и анализирующая способность поляриметра (внизу) в зависимости от величины магнитного поля в квадрупольном магните Q3 для энергии электронов 10,99 ГэВ

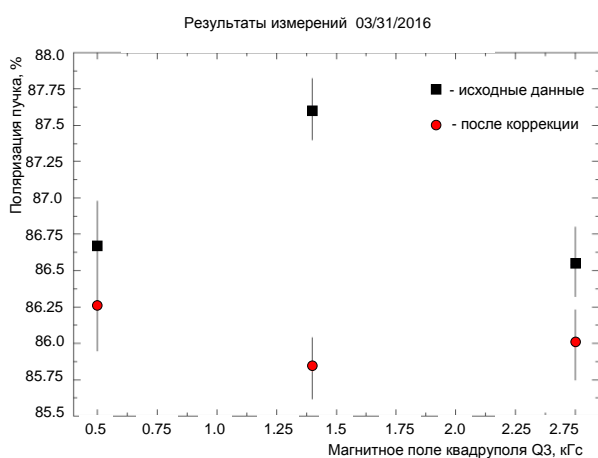


Рис. 9. Измерения поляризации пучка (квадрат) и поляризация с коррекцией на эффект Левчука (круг) для энергии пучка 10,99 ГэВ в зависимости от величины магнитного поля в квадрупольном магните Q3

Электроны в мишени не являются свободными частицами, а связаны с атомными оболочками и движутся с импульсами в диапазоне от 0 до 200 кэВ (для атомов Fe). Эффект Левчука [7] заключается в том, что асимметрия, измеренная мёллеровским поляриметром, может быть подвержена влиянию за счет ненулевых импульсов электронов мишени. Оценка вклада и корректировка эффекта Левчука производятся при помощи моделирования.

На Рис. 8 представлены результаты моделирования вклада эффекта Левчука и анализирующей способности поляриметра в зависимости от величины магнитного поля в квадрупольном магните Q3 (для энергии пучка 10,99 ГэВ).

Для проверки расчетов проведены измерения поляризации пучка и корректировка на эффект Левчука в зависимости от величины магнитного поля в квадрупольном магните Q3 (Рис. 9). Учет данного эффекта практически выравнивает измерения поляризации. Такой результат можно считать подтверждением, что расчеты выполнены верно.

3. ПЛАНЫ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЯРИМЕТРА

В лаборатории Джефферсона планируется проведение нескольких экспериментов, для которых необходимо значение поляризации пучка с более высокой точностью. Например, для эксперимента PREX-II (^{208}Pb Radius Experiment) измерение поляризации пучка необходимо с точностью менее 0,5% (Табл.). Для эксперимента MÖLLER (An Ultra-Precise Measurement of the Weak Mixing Angle Using Möller Scattering) требуется значение поляризации пучка с точностью до 0,4%. Поэтому стоит вопрос о дальнейшем исследовании и минимизации систематических эффектов при измерении поляризации пучка поляриметром.

Оценка систематических неопределенностей мёллеровского поляриметра и требования эксперимента PREX-II

Параметр	“High Field” мишень, %	PREX-II %
Поляризация мишени	0,35	0,25
Анализирующая способность	0,3	0,2
Левчук-эффект	0,3	0,2
Нагрев мишени	0,02	0,02
Мёртвое время	0,3	0,05
Фон	0,3	0,2
Другое	0,5	0,3
Итого	0,87	0,53

Планируется модификация мишенного устройства поляриметра для более точного позиционирования плоскости фольги по отношению к магнитному полю сверхпроводящего магнита. Конструкция новой мишени разрабатывается в Temple University, и первоначальные тесты демонстрируют повторяемость постановки мишени с точностью до 0,01°.

Изучается возможность использования эффекта Керра для измерений намагниченности фольги. Идея состоит в измерении изменений поляризации лазерного луча, отраженного от плоскости намагниченной фольги. Этот метод может быть использован для проверки степени насыщения намагниченности фольги при различных условиях (нагрев фольги, различная ориентация плоскости фольги, отличная от 90° и др.). Причем, благодаря портативности нового сверхпроводящего магнита, испытания могут проводиться на отдельном стенде, вне экспериментального зала.

Ведется разработка нового модуля флеш-АЦП для системы сбора данных. Новый модуль флеш-АЦП позволит формировать совпадения для различных комбинаций блоков «левого» и «правого» детекторов поляриметра и получать количество счетов для оценки влияния систематических эффектов (эффект Левчука и др.).

Также планируется разработка новой программы моделирования оптики поляриметра на базе пакета GEANT-4, чтобы проводить сравнение результатов моделирования с существующей программой, выполненной на пакете GEANT-3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зале А лаборатории Джефферсона завершена реконструкция мёллеровского поляриметра для обеспечения измерений поляризации пучка электронов с энергией до 11 ГэВ.

Выполнены измерения поляризации пучка электронов в диапазоне энергий 8,5...10,99 ГэВ. Описаны основные систематические эффекты, влияющие на точность измерений.

Планируется дальнейшая реконструкция элементов поляриметра для минимизации систематических эффектов и улучшения точности измерений поляризации.

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. R.I. Pomatsalyuk. Möller Polarimeter Hall A Jefferson Lab after reconstruction // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, № 3, p. 133-138.
2. W. Leemann, David R. Douglas, Geoffrey A. Krafft. The Continuous Electron Beam Accelerator Facility: CEBAF at the Jefferson Laboratory // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2001, v. 51, p. 413-450.
3. A.V. Glamazdin, V.G. Gorbenko, L.G. Levchuk, et al. Electron Beam Møller Polarimeter at Jlab Hall A // *Fizika*. 1999, V8, p. 91-95.
4. Е.А. 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, №2(40), с. 43-48.
5. O.V. Glamazdin, E.A. Chudakov, R.I. Pomatsalyuk. Hall A Moller polarimeter (Jefferson Lab) with electron target polarized in foil plane // *Journal of Kharkiv University. Physical series "Nuclei, Particles, Fields"*. 2011, issue 2(50), v. 955, p. 42-50.
6. А.В. Гламаздин. Мёллеровский поляриметр зала А (Лаборатория Джефферсона) после реконструкции // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, № 4, с. 7-10.
7. L.G. Levchuk. The intra-atomic motion of bound electrons as a possible source of the systematic error in electron beam polarization measurements by means of a Møller polarimeter // *Nucl. Inst. and Meth.* 1994, A345, p. 496.

Статья поступила в редакцию 07.11.2017

STATUS OF THE MÖLLER POLARIMETER IN THE HALL A JEFFERSON LAB

R.I. Pomatsalyuk

The current state of the Moller polarimeter after reconstruction to working with an electron beam with energies up to 11.5 GeV is presented. The results of the beam polarization measurements in the energy range 8.5...11 GeV and the analysis of systematic errors are shown. In preparation for upcoming polarization experiments, the plans for modernization of various polarimeter systems to improve the accuracy of beam polarization measurements are discussed.

СТАТУС МЬОЛЛЕРІВСЬКОГО ПОЛЯРИМЕТРА ЗАЛУ А ЛАБОРАТОРІЇ Т. ДЖЕФФЕРСОНА

Р.І. Помацалюк

Представлено поточний стан мьоллерівського поляриметра після реконструкції для роботи з пучком електронів з енергіями до 11,5 Гев. Наведено результати вимірювань поляризації пучка в діапазоні енергій 8,5...11 Гев і аналіз систематичних помилок. В рамках підготовки до поляризаційних експериментів розглянуті плани з модернізації різних систем поляриметра для поліпшення точності вимірювань поляризації пучка.