

10;12

Исследование стабильности моттовских анализаторов поляризации электронов

© В.Н. Петров, М.С. Галактионов, А.С. Камочкин

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: galaktionov@tuexph.stu.neva.ru

(Поступило в Редакцию 9 апреля 2001 г.)

Представлены результаты сравнительных испытаний моттовский поляриметров двух типов: классического сферически-симметричного и конического с задерживающим потенциалом. Исследовалась стабильность приборов при изменении положения электронного пучка на их входах. Представлены результаты экспериментов для двух энергий первичных электронов 500 и 1600 eV. Установлено, что при смещении пучка электронов на 0.6 mm скорость счета поляриметра первого типа остается стабильной, в то время как для второго она изменяется в пределах от ~ 7 до $\sim 18\%$ для энергий 500 и 1600 eV соответственно. Как следствие, такая нестабильность может приводить к ошибке при измерении степени поляризации электронного пучка.

Введение

В настоящее время для измерения спиновой поляризации электронного пучка в основном используется рассеяние электронов высоких энергий на пленках золота [1,2]. В моттовских поляриметрах анализируемый пучок электронов ускоряется до энергии $\sim 20\text{--}120$ keV, а рассеянные электроны регистрируются двумя (или четырьмя) детекторами, расположенными симметрично относительно пучка под углом $\pm 120^\circ$. В результате взаимодействия спина электрона с его орбитальным моментом эффективное сечение рассеяния для электронов с противоположными спинами оказывается различным. Иными словами, в результате спин-орбитального взаимодействия возникает лево-правая асимметрия рассеяния A_{LR} , которую можно определить как нормированную разность между сигналами левого N_L и правого N_R детекторов

$$A_{LR} = (N_L - N_R)/(N_L + N_R). \quad (1)$$

В этом случае поляризация пучка определяется как

$$P_0 = A_{LR}/S_{\text{eff}}, \quad (2)$$

где S_{eff} — эффективная функция Шермана, т. е. асимметрия, которая должна наблюдаться при 100%-ной поляризации электронов.

Существует два типа высоковольтных моттовских анализаторов поляризации электронов.

1. Классический детектор Мотта [3,4] представляет собой линейную ускорительную колонну и камеру рассеяния, находящуюся под высоким потенциалом и включающую мишень и два (или четыре) поверхностно-барьерных (Silicon Surface Barrier — SSB) или планарных имплантированных (Passivated Implanted Planar Silicon — PIPS) кремниевых детектора. Рассеянные электроны, двигаясь в дрейфовом пространстве, регистрируются этими детекторами, с помощью которых и осуществляется селекция электронов по энергии.

Иной вариант классического поляриметра — сферически-симметричный без задерживающего потенциала [5,6]. В данном случае ускорение пучка происходит в пространстве между полусферами, а рассеянные электроны также движутся в дрейфовом пространстве и селекционируются по энергии с помощью SSB- или PIPS-детекторов.

2. Поляриметры с задерживающим потенциалом [7–9]. Название связано с методом селекции электронов по энергии. Рассеянные на золотой фольге электроны, двигаясь в задерживающем поле, регистрируются электронными умножителями или микроканальными пластинами, находящимися при потенциале, близком к потенциалу ”Земли”.

В настоящее время, когда интерес к экспериментам с анализом по спину необычайно велик, существуют различные мнения относительно преимуществ того или иного типа поляриметров. При это сравниваются такие параметры спиновых анализаторов, как эффективность, размеры, простота конструкции, стоимость и т. д. К сожалению, при этом часто упускается из виду один из важнейших параметров — чувствительность измеряемых скоростей счета и асимметрии к смещению анализируемого пучка электронов на Au-фольге, а также к изменениям его диаметра и плотности. Известно, что в процессе многих экспериментов положение и форма пучка в пространстве меняются, что в свою очередь может приводить к появлению ложной асимметрии (A_{LR}). Например, при исследовании магнитных свойств каких-либо материалов часто приходится перемагничивать образцы в противоположных направлениях, что приводит к искажениям траекторий как первичных (если возбуждение осуществляется электронами), так и вторичных пучков. Кроме этого, в процессе, например, температурных измерений намагниченность мишеней может меняться, что сказывается на траекториях электронов. Известно также, что если перед детектором Мотта используются какие-либо анализаторы энергии, то пучки электронов на их выходе могут двигаться под разными углами и

Сравнительные характеристики моттовских поляриметров двух типов

Параметры	Классический сферически-симметричный поляриметр	Конический поляриметр с задерживающим потенциалом
Эффективность	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$
Размеры	450 × 250 mm Представляет из себя самостоятельную вакуумную систему. Не требуется высоковольтный ввод.	135 × 100 mm Необходимо размещать внутри вакуумной системы или использовать отдельную вакуумную камеру. Требуется высоковольтный ввод.
Максимальная скорость счета	10^6 counts/s при эффективности регистрации электронов 80%. $4 \cdot 10^5$ counts/s при эффективности регистрации электронов 100%.	$5 \cdot 10^4$ counts/s
Возможность самокалибровки (достаточно условная)	Методом экстраполяции к высокому уровню дискриминации [10].	Методом экстраполяции к нулевым энергетическим потерям [13].

иметь различную плотность в поперечном сечении при различных энергиях.

Заметим, что важной здесь является именно стабильность скоростей счета, даже несмотря на то, что асимметрия — это нормированная величина. На первый взгляд может показаться, что при использовании формулы (1) для расчета асимметрий рассеяния изменение скоростей счета при изменении параметров первичного пучка будет скомпенсировано. Однако, как показывает практика, это не всегда так, поскольку могут меняться условия рассеяния электронов в различные детекторы вследствие неконтролируемого изменения углов падения на золотую фольгу или изменения точек взаимодействия пучка с последней.

Тем не менее до сих пор не исследовалась чувствительность моттовских поляриметров различных типов к смещению анализируемого пучка электронов на мишени, а также к изменениям его диаметра и плотности.

В связи со всем вышесказанным в идентичных условиях были проведены исследования стабильности измеряемых скоростей счета для двух детекторов Мотта как функции смещения пучка на их входе.

Конструкция детекторов Мотта

Нами были разработаны и испытаны два моттовских поляриметра: 1) классический сферически-симметричный и 2) конический с задерживающим потенциалом, которые в настоящее время используются для научных исследований [10–12]. В таблице представлены некоторые рабочие параметры этих двух приборов, наиболее важные с точки зрения пользователя.

На рис. 1 представлена схема сферически-симметричного поляриметра без задерживающего потенциала. Основными компонентами анализатора являются две металлические полированные полусферы с общим центром. Внешняя полусфера работает при потенциале "Земли" или близком к нему. На внутреннюю полусферу подается потенциал 60 kV. Для этого она фиксируется

посредством двух последовательно соединенных цилиндрических керамических изоляторов, рассчитанных на суммарное напряжение ≈ 80 kV. Электронный пучок, поляризацию которого требуется определить, направляется в область между полусферами через диафрагму с круглым отверстием, после чего, ускоренный сильным сферическим полем, он попадает во внутреннюю полусферу. Внутри малой полусферы установлены четыре кремниевых детектора с большой рабочей поверхностью, Au-мишень и направляющие диафрагмы. Рассеивающая фольга представляет собой слой Au толщиной 800 Å, напыленный на тонкую свободную формваровую пленку. После рассеяния электроны проходят через отверстия в диафрагмах и регистрируются детекторами.

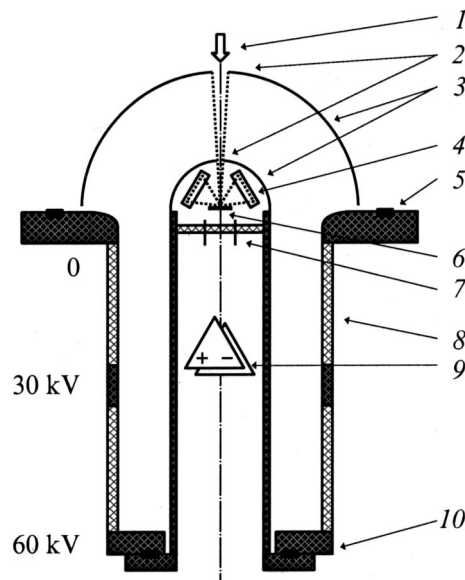


Рис. 1. Схема классического сферически-симметричного поляриметра: 1 — электронный пучок, 2 — входные отверстия, 3 — полусферы, 4 — 4 PIPS-детектора, 5 — фланец CF 200, 6 — золотая фольга, 7 — вакуумный ввод, 8 — керамический изолятор, 9 — 4 усилителя, 10 — фланец CF 63.

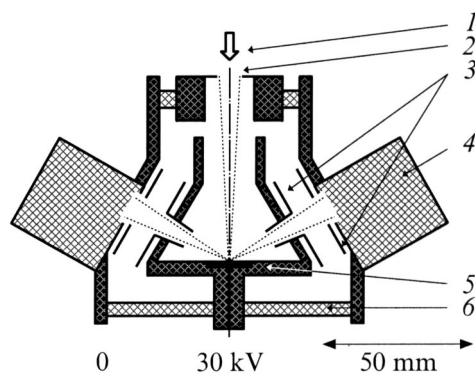


Рис. 2. Схема конического поляриметра с задерживающим потенциалом: 1 — электронный пучок, 2 — входное отверстие, 3 — диафрагмы, 4 — КЭУ, 5 — золотая фольга, 6 — изолятор.

Для селекции электронов по энергии в поляриметре используются PIPS-детекторы, амплитуда импульсов на выходе которых пропорциональна энергии падающих электронов. После усиления и дискриминации этих импульсов на определенном уровне частоты их следования можно считать пропорциональной числу упруго отраженных электронов. Энергетическое разрешение PIPS-детекторов в паре со специальными зарядо-чувствительными усилителями составляет величину ≈ 10 keV. Для уменьшения входной емкости конструкция поляриметра разрабатывалась таким образом, чтобы расстояние между PIPS-детекторами и усилителями было минимальным. Последние монтируются в специальном цилиндрическом корпусе и размещаются внутри поляриметра. Вакуумный разъем расположен в непосредственной близости от PIPS-детекторов. Усилители находятся под высоким рабочим потенциалом ≈ 60 kV. Для дальнейшей обработки сигналы с помощью волоконно-оптической системы передаются на вход усилителей-формирователей, находящихся под потенциалом "Земли". Для подачи высокого напряжения и питания всех усилителей был изготовлен специальный компактный стабилизированный источник на 70 kV, размер которого $300 \times 200 \times 150$ mm.

На рис. 2 представлена схема конического поляриметра с задерживающим потенциалом. Основными компонентами анализатора являются два металлических полых полированных усеченных конуса. Внешний конус работает при потенциале "Земли". На внутренний конус подается потенциал 30 kV. Электронный пучок проходит через входную диафрагму с круглым отверстием, после чего, ускоренный сильным полем, он попадает в область, ограниченную малым конусом. Внутри конуса находится золотая фольга толщиной 100μ . Электроны, рассеянные фольгой на угол $\pm 120^\circ$, выходят из внутреннего конуса через симметрично расположенные диафрагмы и оказываются в тормозящем электрическом поле. Проходя область поля, рассеянные электроны замедляются, и только те из них, которые претерпели малые потери энергии в результате неупругих столкновений, проходят

через диафрагмы, расположенные на внутренней поверхности большого конуса, и регистрируются каналными электронными умножителями (КЭУ). Окно энергетических потерь на неупругие столкновения ΔE в нашем эксперименте составляло 300 eV. Усилители находятся при потенциале "Земли".

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты по проверке стабильности выполнялись по схеме, показанной на рис. 3. Использовалась геометрия рассеяния, типичная для многих реальных экспериментов по электронной спектроскопии с анализом по спине. Возбуждение осуществлялось с помощью электронной пушки, расположенной на расстоянии 60 mm от Al-образца. Поликристаллический Al использовался для того, чтобы исключить нежелательные эффекты, связанные со спин-орбитальным взаимодействием и кристаллографическим упорядочением образца. Рассеянные на 90° электроны регистрировались моттовским поляриметром. Эксперименты выполнялись последовательно: сначала с одним, а затем на его место ставился другой прибор. Поляриметры монтировались таким образом, чтобы условия на их входе были идентичны. Расстояние от Al-образца до входных диафрагм поляриметров, а также диаметр отверстий в диафрагмах были одинаковы. При сравнении работы двух поляриметров никакая электронная оптика на их входе не использовалась. Потенциалы на входных элементах в обоих экспериментах были равны нулю. Селекция по энергии рассеянных на Al-образце электронов не производилась. Моттовские поляриметры устанавливались таким образом, чтобы плоскость второго рассеяния (на Au-фольге) составляла угол примерно 45° относительно первого рассеяния (на Al-образце).

Сканирование электронного пучка осуществлялось вдоль направления, перпендикулярного плоскости первого рассеяния (оси Z, см. рис. 3). Смещение пучка составляло величину ± 1 mm на поверхности Al-образца.

Результаты контрольных экспериментов показаны на рис. 4. Квадраты и кружки соответствуют противополо-

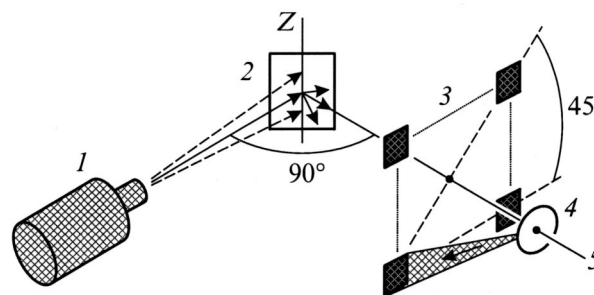


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 — электронная пушка, 2 — образец, 3 — детекторы, 4 — золотая фольга, 5 — ось поляриметра.

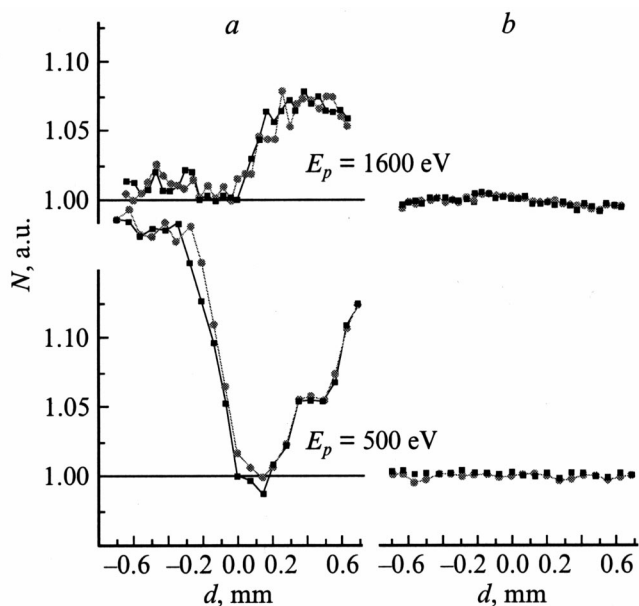


Рис. 4. Нормированная скорость счета как функция смещения первичного пучка электронов (d) относительно оси моттовского поляриметра (оси Z , рис. 3) для двух энергий первичного пучка 500 и 1600 eV. a — с задерживающим потенциалом, b — классический поляриметр.

ложным направлениям сканирования электронного пучка. Как наиболее характерные, представлены результаты нормированных скоростей счета для двух энергий первичного пучка электронов: 500 и 1600 eV. Аналогичные измерения были выполнены и для многих других энергий. Видно, что при смещении первичного пучка электронов на расстояние 0.6 mm скорость счета классического сферического поляриметра остается довольно стабильной, в то время как в случае поляриметра с задерживающим потенциалом она изменяется на $\sim 18\%$ для энергии 500 eV и на $\sim 7\%$ для энергии 1600 eV. Причем видно, что характер этих изменений различен. Кривая, соответствующая энергии 500 eV, выглядит симметричной относительно нулевого смещения, в отличие от кривой, соответствующей энергии 1600 eV, которая, напротив, имеет антисимметричный вид. В настоящей работе мы не ставим цель объяснить такое поведение этих зависимостей, а попытаемся лишь дать объяснение низкой чувствительности классического сферически симметричного поляриметра к смещению электронного пучка на его входе по сравнению с поляриметром с задерживающим потенциалом.

Основными причинами, которые могут вызывать такое различие, по нашему мнению, являются следующие (располагаем их в порядке значимости).

1. Наличие задерживающего потенциала может приводить к значительным изменениям траекторий электронов, рассеявшихся на Au-фольге, чего не происходит в классическом поляриметре, где электроны после рассеяния движутся в дрейфовом пространстве.

2. Сферическое ускоряющее поле в поляриметре без задерживающего потенциала хорошо фокусирует электронный пучок на Au-фольге в отличие от анализатора второго типа.

Таким образом, на стадии проектирования экспериментальной установки при выборе типа спинового анализатора необходимо руководствоваться не только такими параметрами, как максимальная эффективность, минимальные размеры или простота конструкции. Следует учитывать тот факт, что в некоторых экспериментах при смещении электронного пучка на входе, а также при изменении его диаметра и плотности измеряемые скорости счета и, как следствие, асимметрия рассеяния могут меняться. Очевидно, что в этом случае поляризация электронного пучка будет измерена с ошибкой.

Список литературы

- [1] Mott N.F. // Proc. R. Soc. London. 1929. Vol. 124. P. 425.
- [2] Kessler J. Polarized Electrons. New York: Springer, 1985.
- [3] Nelson D.E., Pidd R.W. // Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 728.
- [4] Kalisvaart M., O'Neill M.R., Riddle T.W. et al. // Phys. Rev. 1978. Vol. B17. P. 1570.
- [5] Landolt M., Allenspach R., Mauri D. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. P. 3626.
- [6] Getzlaff M., Bansmann J., Schönhense G. // J. Mag. Mag. Mat. 1994. Vol. 131. P. 304.
- [7] Gray L.G., Hart M.W., Dunning F.B. et al. // Rev. Sci. Instr. 1984. Vol. 55. P. 88.
- [8] Dunning F.B., Gray L.G., Ratliff J.M. et al. // Rev. Sci. Instr. 1987. Vol. 58. P. 1706.
- [9] Qiao S., Kimura A., Harasawa A. et al. // Rev. Sci. Instr. 1997. Vol. 68. P. 4390.
- [10] Petrov V.N., Landolt M., Galaktionov M.S. et al. // Rev. Sci. Instr. 1997. Vol. 68. P. 4385.
- [11] Yashin Yu., Mamaev Yu., Ambrazhei A. // Proc. Low Energy Polarized Electron Workshop. 1998. P. 27.
- [12] Stamm C., Marty F., Vaterlaus A. et al. // Science. 1998. Vol. 282. P. 449.
- [13] Gay T.J., Khakoo M.A., Dunning F.B. et al. // Rev. Sci. Instr. 1992. Vol. 63. P. 114.