

Фольга с током как прерыватель пучка поляризованных нейтронов

© В.Н. Забенкин, Л.А. Аксельрод, Г.П. Диденко, А.А. Сумбатян, Г.П. Гордеев,
И.М. Лазебник, В.Г. Сыромятников

Санкт-Петербургский институт ядерной физики, НИЦ Курчатовский институт,
Гатчина, Россия
e-mail: zabenkin@pnpi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 17 июля 2013 г.)

Обсуждена возможность применения фольги с током для модуляции пучка поляризованных нейтронов с целью измерения их спектра. Приведены экспериментальные результаты такого применения при измерениях спектров с разными характерными распределениями нейтронов по длинам волн. Отмечен ряд преимуществ такого модулятора.

Введение

В настоящее время в нейтронных экспериментах широко используется метод измерения спектров нейтронов по „времени пролета“ [1]. При этом прерывателем пучка нейтронов служит механическое устройство. Основой его является либо массивный ротор с набором щелей, либо диск из поглощающего нейтроны материала со щелями. Щели располагаются периодически или статистически на нем. С помощью таких устройств интенсивность пучка нейтронов модулируется таким образом, что образуются нейтронные пакеты (вспышки) малой длительности (порядка микросекунд). Во вспышках присутствуют нейтроны всего спектра скоростей данного пучка. После пролета нейтронами определенного расстояния регистрируется их время прихода в детектор, по которому определяется соответствующая скорость. Глубина модуляции (отношение „эффект–фон“) определяется качеством механического устройства, а именно способностью перекрывать (поглощать) нейтроны в промежутке между щелями. Это отношение можно сделать в принципе очень большим. Характерными недостатками таких прерывателей являются их большие габариты и вес, что ограничивает мобильность их использования, механические вибрации, сложная система стабилизации оборотов.

Внедрение в практику нейтронных исследований поляризованных нейтронов позволяет отказаться от механических прерывателей при работе с пучками медленных поляризованных нейтронов. Появляется возможность получать модуляцию интенсивности с помощью магнитных полей, создаваемых тем или иным источником. Дело в том что модуляция может создаваться повторяющимися кратковременными (импульсными) переворотами вектора поляризации из состояния с направлением, антипараллельным ведущему полю (или полю анализатора), в состояние, параллельное ему. Для этого могут использоваться радиочастотная катушка в постоянном магнитном поле, перпендикулярном переменному полю катушки [1], или катушки, питаемые постоянным пульсирующим током [2–4]. Однако использование таких кату-

шек для измерения спектров нейтронов с применением техники „времени пролета“ сопряжено с трудностями получения хорошего временного разрешения, поскольку приходится переключать большие индуктивности. Кроме того, неизбежно искажение измеряемых спектров из-за того, что переворот спинов нейтронов в них происходит только для определенной длины волны при данном поле H и фиксированном расстоянии d (толщина катушки), которое пролетают нейтроны вспышки. К тому же неизбежны искажения из-за влияния рассеянных магнитных полей вне катушек, которые, складываясь с ведущим полем, меняют состояние поляризации, т. е. направление и величина вектора поляризации может сильно меняться при входе и выходе из катушек.

1. Почему фольга?

Ясно, что идеальным в этом смысле является флиппер, который воздействует на спины всех нейтронов равным образом одновременно. В „статическом“ режиме (флиппер включается на определенное время) ранее были предприняты успешные попытки поиска таких флипперов. Так, тонкая пластина или набор параллельно расположенных проволочек, через которые пропускался постоянный ток, использовались для создания резкой границы между магнитными полями противоположных направлений и тем самым для изменения угла между вектором поляризации и направлением ведущего магнитного поля на 180° (реверс поляризации) при пересечении этой границы [5–7]. Однако в „динамическом“ режиме, т. е. когда в эти устройства подаются с определенной частотой короткие импульсы тока в сочетании с время-пролетной техникой, они не использовались до настоящего времени. По крайней мере, нам это неизвестно. Поэтому здесь мы представляем результаты применения фольги с током в качестве прерывателя пучка поляризованных медленных нейтронов.

При измерениях спектрального состава пучков поляризованных нейтронов с помощью фольги с током к ней как и к прерывателям любого типа предъявляются те же требования, а именно обеспечение минимальной неопре-

деленности во времени пролета и получение максимально возможного отношения интенсивности нейтронов в импульсе к интенсивности фона, т. е. глубину модуляции. Неопределенность во времени связана с длительностью импульса тока, его фронтами и, конечно, шириной канала временного анализатора, что в совокупности ухудшает энергетическое разрешение измеряемого спектра. Фронты импульсов определяются индуктивностью электрических контуров, которая в этом случае мала (примерно в 100 раз меньше индуктивности упоминавшихся катушек), и поэтому появляется возможность получать импульсы с более крутыми фронтами. Что касается второго требования, то глубина модуляции в данном случае зависит от степени поляризации пучка, ее направления относительно ведущего поля (положительная или отрицательная) и эффективности переворачивающего поляризации устройства. Максимальная глубина модуляции, вероятно, получается при 100% отрицательной поляризации, так как в этом случае нейтронный фон в отсутствие импульсов тока будет минимальным. Таким образом, можно видеть, что свойства предлагаемого прерывателя вполне удовлетворяют названным требованиям. Кроме того, следует отметить, что с этим более светосильным прерывателем диапазон измеряемых длин волн нейтронов широк, поскольку резкая граница между полями обеспечивает неадиабатическое прохождение ее нейтронами всех длин волн, т. е. вектор поляризации \mathbf{P} сохраняет свое первоначальное направление в пространстве. Иными словами, одновременный переворот спинов происходит у нейтронов всех длин волн из вспышки при переходе границы полей. Для того чтобы сохранить угол между полем и поляризацией вплоть до анализатора необходимо осуществить адиабатический поворот поля от направления $-Z$ сразу после фольги до $+Z$ при подходе к анализатору. Для этого достаточно добавить на этом участке поле, направленное по оси X .

Результирующее поле тогда поворачивается в плоскости ZX и если для самых быстрых нейтронов этот поворот адиабатический, то и для более медленных он тоже адиабатический.

2. Эксперимент

В эксперименте использовалась медная фольга с размерами $150 \times 40 \times 0.08$ mm. Она представляла собой три последовательно соединенные полоски (рис. 1) для увеличения поля при одном и том же токе. Для получения импульсов тока был разработан и создан генератор, позволивший получать импульсы с амплитудой до 400 А микросекундной длительности. Индуктивность контура с фольгой составляла $0.8 \mu\text{H}$. Ориентация фольги относительно нейтронного пучка, направление тока через нее и качественное распределение необходимых полей показаны на рис. 2. В промежутке „фольга–анализатор“ сразу за фольгой создавалось магнитное поле с компонентами вдоль осей X и Z такими, чтобы вектор

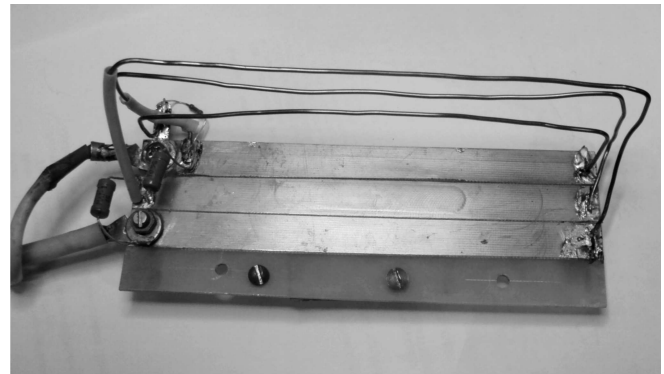


Рис. 1. Вид экспериментального образца фольги-модулятора.

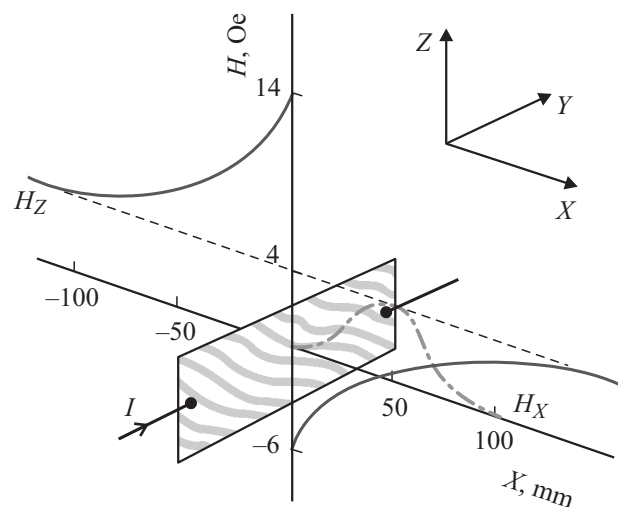


Рис. 2. Магнитное поле тока через фольгу и качественное представление дополнительного поля $H(x)$ (штрихпунктирная кривая), ведущее поле — штриховая прямая.

результирующего поля \mathbf{H} плавно поворачивался к направлению поля анализатора. При этом использовалось поле тока в подводящих проводниках. Их расположение можно было менять относительно фольги для достижения условий плавного поворота вектора суммарного поля на 180° . На рис. 3 показано экспериментально измеренное распределение компонент результирующего поля при токе 10 А. Видно, что модуль поля, действительно, плавно поворачивается на 180° на расстоянии 10–12 см при этом токе. При желании измерять спектр, содержащий быстрые нейтроны, например с $\lambda = 0.1$ nm, вероятно, требуется большее поле и большая область действия этого поля, что достижимо с импульсами тока $I \gg 10$ А. Так, например, поле $H \approx 12$ Oe обеспечивало адиабатический поворот спинов нейтронов с $\lambda \approx 0.1$ nm на расстоянии ≈ 50 см. В этом случае выполнялось условие адиабатичности [8]

$$k = \omega/\omega_0 = LH\lambda/34$$

со значением $k \approx 8$ для $\lambda \approx 0.1$ nm. Здесь ω — частота прецессии спинов, ω_0 — частота изменения поля,

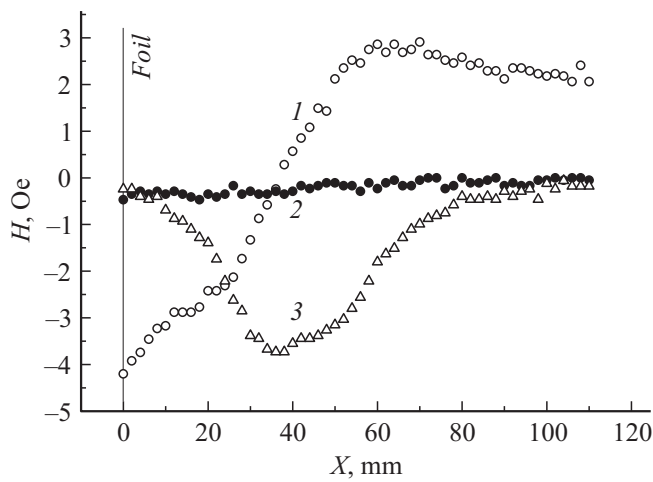


Рис. 3. Экспериментально измеренное распределение компонент результирующего поля $H(x)$ около фольги при постоянном токе $I = 10$ А: 1 — H_z ; 2 — H_y ; 3 — H_x .

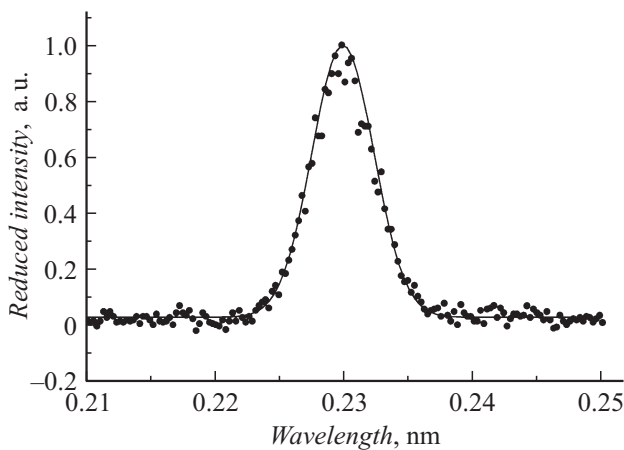


Рис. 4. Спектр квазимонохроматического пучка нейтронов с $\lambda_{av} = 0.23$ nm, $\Delta\lambda/\lambda = 0.02$. Снят при $I_{imp} = 190$ А, $\tau = 5 \mu s$, $f = 200$ Hz, ширина временного канала анализатора $\Delta t = 1.6 \mu s$, пролетная база $s = 2.5$ м.

L — длина области поворота поля на 90° ($L \approx 25$ см), H — результирующее ведущее поле. С помощью такого прерывателя были измерены спектры пучков поляризованных нейтронов с разными распределениями по длинам волн. Значения электрических параметров в таких измерениях варьировали в следующих пределах: ток в импульсе 90–300 А, длительность импульса $(5–100) \cdot 10^{-6}$ с, частота импульсов 10–100 Hz, время нарастания фронта $0.1 \cdot 10^{-6}$ с. Значения параметров импульсов тока при каждом конкретном измерении спектра указаны в подписи к соответствующему рисунку.

Спектр квазимонохроматического распределения нейтронов со средней длиной волны $\lambda_{av} = 0.23$ nm и с немонахроматичностью $\Delta\lambda/\lambda = 0.02$ показан на рис. 4. Спектр, характеризующийся наличием нескольких дискрет-

ных линий, представлен на рис. 5. Этот спектр получен отражением нейтронов от кристалла фторфлогопита. Он содержит несколько линий, соответствующих порядкам отражений n с последующим отражением их от зеркала — поляризатора. Наиболее интенсивные линии с $\lambda = 0.54, 0.18$ и 0.108 nm соответствуют нечетным порядкам отражений ($n = 1, 3, 5$ соответственно). При увеличении угла зеркала — поляризатора до значения, близкого к критическому для $\lambda = 0.54$ nm, в спектре остается лишь эта линия. На рис. 6 приведен максвелловский сплошной спектр, обрезанный со стороны коротких длин волн при $\lambda \approx 0.09$ nm. Здесь приведен этот же спектр, измеренный с механическим прерывателем (кружки). Видно удовлетворительное совпадение спектров.

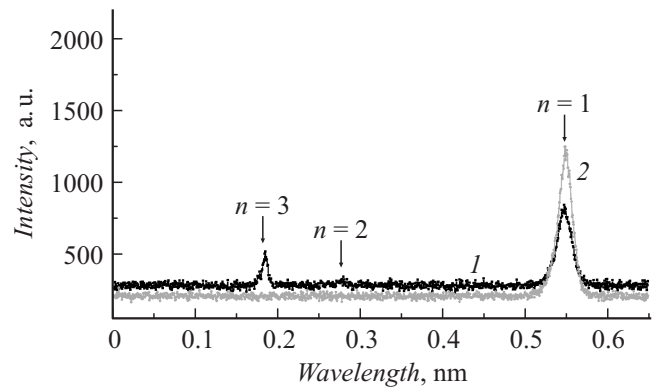


Рис. 5. Линейчатый спектр (см. текст). Снят при $I_{imp} = 90$ А, $\tau = 50 \mu s$, $f = 100$ Hz, $\Delta t = 1.6 \mu s$, пролетная база $s = 2.53$ м; 1 — угол поляризатора $\alpha \approx \alpha_{crit}$ для $\lambda \approx 0.18$ nm, 2 — угол поляризатора $\alpha \approx \alpha_{crit}$ для $\lambda \approx 0.54$ nm.

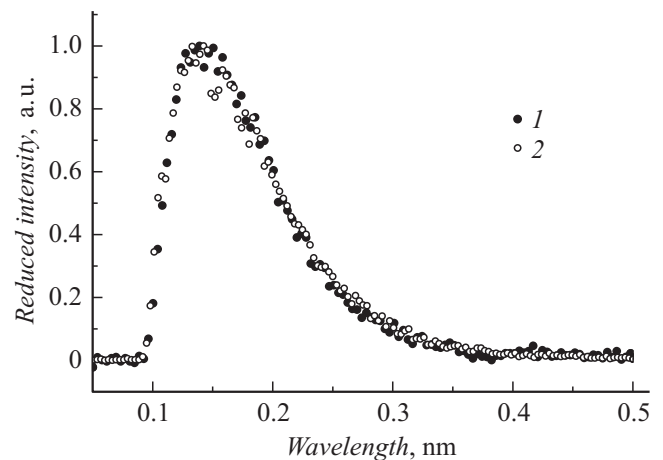


Рис. 6. Максвелловский спектр: 1 — снятый с фольгой при $I_{imp} = 190$ А, $\tau = 150 \mu s$, $f = 10$ Hz, $\Delta t = 40 \mu s$, пролетная база $s = 4$ м; 2 — спектр, снятый с механическим прерывателем при ширине щели $d = 1.8$ мм, $f = 99$ Hz, пролетная база $s = 5.0$ м.

Заключение

Представленные результаты показывают высокую эффективность способа модуляции поляризации (следовательно, и интенсивности) нейтронного пучка с помощью проводящей фольги, питаемой импульсами постоянного тока. Такой прерыватель может представлять собой компактный легкий прибор, обладающий высокой мобильностью, простотой настройки и, самое главное, большей светосилой по сравнению с механическими прерывателями. Это следует хотя бы из того, что в случае последних используются в основном узкие пучки нейтронов (для дисков со щелями), поэтому приходится ограничивать исходные пучки. В то время как с фольгой используется вся площадь пучка. Даже у прерывателей с широким пакетом щелей, сравнимым с шириной пучка, принципиально невозможно получить 100% пропускание. Эффективно используемая площадь также меньше площади падающего пучка на величину, равную общей площади поперечного сечения перегородок щелей. Заметим, что фольги из алюминия или меди практически не ослабляют нейтронный пучок.

Список литературы

- [1] Землянов М.Г., Черноплеков Н.А. // ПТЭ, 1962. № 5. С. 40.
- [2] Rauch H. Proc. Panel on Instrumentation for neutron inelastic scattering research. Vienna, 1969 (IAEA, Vienna, 1970), P. 181.
- [3] Badurek G., Westphal G.P. // Nucl. Instr. Meth. 1975. Vol. 128. P. 315.
- [4] Badurek G. // Nuclear Instr. Meth. 1981. Vol. 189. P. 543–553.
- [5] Haas R., Leipuner L.B., Adair K.K. // Phys. Rev. 1959. Vol. 116. P. 1221.
- [6] Gulko A.D., Trostin S.S., Hudokin A. // Nucl. Instrum. Meth. 1965. Vol. 34. P. 88.
- [7] Abrahams K., Steinvoll O., Bongaarts P.J.M., Lange P.W. // Rev. Sci. Instrum. 1962. Vol. 33. P. 524.
- [8] Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Крупчицкий Н.А. Поляризованные медленные нейтроны. М.: Атомиздат, 1966. С. 38.