

Оптимизация поляризующего устройства для установки SANS-2 на реакторе ПИК

К А Павлов^{1,2}, П И Коник^{1,2}, В Г Сыромятников^{1,2}, С В Григорьев^{1,2} и Е В Москвин^{1,2}

¹ Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ «КИ», 188300 Россия, Ленинградская область, г. Гатчина

² Санкт-Петербургский Государственный Университет, 199034 Россия, г. Санкт-Петербург

E-mail: orbital.pk@lens.pnpi.spb.ru

Аннотация. В работе был рассмотрен клиновидный (V-cavity) поляризатор для малоуглового дифрактометра. Работа устройства была смоделирована методом трассировки лучей в программном пакете McStas, с входными параметрами для суперзеркал домашнего производства ПИЯФ (CoFe/TiZr, $m = 2.13$). Показано, что два сменных устройства длинами 0.75 м и 1.8 м покрывают диапазон по длине волны 4–25 Å, обеспечивая поляризацию пучка не менее 95%.

Введение

Нейтронный малоугловой дифрактометр SANS-2 был перевезен в Петербургский Институт Ядерной Физики (ПИЯФ) из Центра им. Гельмгольца в Гестахте (HZG), Германия, после закрытия реактора FRG. В настоящий момент установка реконструируется для запуска на реакторе ПИК в Гатчине (РФ). Помимо других узлов, для SANS-2 должен быть разработан новый поляризатор. При работе на реакторе FRG на SANS-2 в качестве поляризатора использовался бендер в отражающей геометрии. Это создавало неудобство в использовании, поскольку при каждой смене режима работы установки с поляризованного на неполяризованный требовалось перемещать и заново юстировать весь оптический тракт. Помимо того, пропускание полезного излучения также оставляло желать лучшего: бендер имеет пропускание не более 70% ввиду поглощения в стеклянных стенках. Таким образом, проектирование нового поляризатора существенно важно для создания высокоэффективной исследовательской установки. Для расчетов был выбран поляризатор клиновидного (V-cavity) типа [1, 2, 3], так как монозеркало для заданного спектрального диапазона было бы чрезмерно длинным для изготовления и юстировки, а устройства бендерного типа не способны повысить пропускание рабочего излучения в сравнении с предыдущей модификацией установки.

В работе рассмотрены устройства, основанные на поляризующих суперзеркалах, что обосновано следующим. По сравнению с ячейками изотопа гелия ^3He [4], зеркальные поляризаторы существенно проще в изготовлении и не требуют обслуживания в ходе работы. Технология производства поляризующих суперзеркал в настоящий момент хорошо разработана в ПИЯФ. Доступные значения коэффициента качества покрытия m не так

высоки, но данные покрытия пока не применялись для оптики широкого спектрального диапазона, и цель данной работы — выяснить возможность их применения для таких задач.

1. Входные параметры

Для расчётов плотности потока и поляризации в пучке после поляризатора использовался пакет McStas, реализующий трассировку нейтронных лучей [5, 6]. Блок-схема использованной модели приведена на рис. 1. В качестве входных параметров мы использовали расчётный спектр в реакторном канале ГЭК-3, оборудованном источником холодных нейтронов (см. рис. 1), и модель нейтронновода, создаваемого сейчас для SANS-2 ($m = 1$, сечение $30 \times 30 \text{ mm}^2$). Для моделирования оптической схемы установки мы использовали штатный компонент селектора скоростей и коллимационную линию, состоящую из 3 сменных секций длиной 2 м каждая, согласно устройству SANS-2.

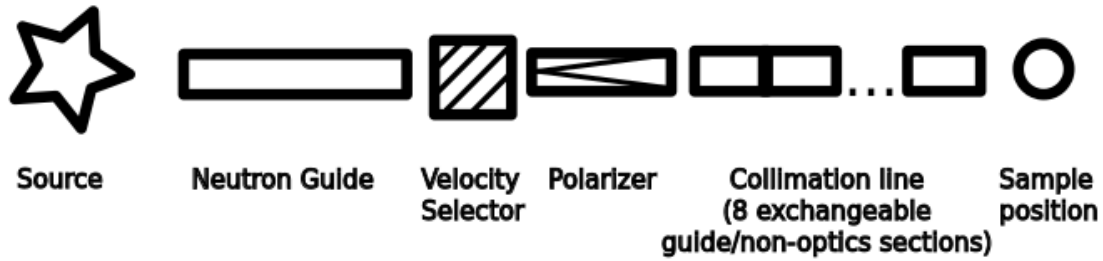


Рис. 1. Схема модели.

Согласно описанию процессов отражения в McStas [6], необходимо задать ряд параметров: критический волновой вектор Q_c , суперзеркальный коэффициент m , наклон кривой в суперзеркальной области α и ширину быстрого спада на mQ_c W . Требуемые значения были получены из аппроксимации экспериментальных данных по CoFe/TiZr многослойным структурам, созданным в ПИЯФ [7, 8]. Значения приведены в табл. 1. Величинами R^\pm обозначены две компоненты поляризации, а R_{dbl}^+ — отражательная способность суперзеркала, покрытого с двух сторон, рассчитанная для симуляций. Для учёта отражений на обеих сторонах зеркала, мы добавили в выражение для интенсивности вклад доли излучения, пропущенного на внешнем покрытии и отражённого от внутреннего. Математически это можно выразить как

$$R_{dbl}^+ = R^+ + (1 - R^+)R^+, \quad (1)$$

Эффективно это выражается в изменении наклона суперзеркальной области α (см. третью строку в табл. 1). Новый наклон даёт повышенную величину рефлексивности на срезе — $R_m = 0.90$ вместо оригинальных $R_m = 0.75$ для одностороннего зеркала. Для отрицательной компоненты R^- никаких изменений нет, поскольку на её кривой отражения отсутствует суперзеркальная область линейного спада, присущая многослойным структурам: коэффициент отражения равен 0.99 вплоть до Q_c , а затем стремительно падает.

Поляризатор должен обеспечивать поляризацию не менее 95% при максимально возможном пропускании во всём спектральном диапазоне установки. На SANS-2 планируется использовать длины волн от 4.5 до 20–25 Å. Как показано ниже, покрыть столь широкий диапазон одним поляризатором на зеркалах $m = 2.13$ оказалось невозможным,

Таблица 1. Входные параметры для CoFe/TiZr суперзеркала

Комп.	$Q_c[\text{\AA}^{-1}]$	m	R_0	$\alpha [\text{\AA}]$	$W [\text{\AA}^{-1}]$
R^+	0.0219	2.13	0.995	13.87	0.00187
R^-	0.0102	1	0.99	0	0.001
R_{dbl}^+	0.0219	2.13	0.995	3.43	0.00187

поэтому мы пришли к двум сменным устройствам — на более коротковолновый и на длинноволновый диапазон. Для оптимизации к монохроматическому пучку мы использовали модель селектора скоростей, настроенного на длины волн 4.5 \AA и 10 \AA со спектральным разрешением 10%.

2. Результаты и обсуждение

Сначала мы оптимизировали поляризатор на коротковолновую часть спектра. На рис. 2 приведена зависимость поляризации в монохроматической линии 4.5 \AA от длины поляризатора для 5 различных коллимаций пучка. Минимальная допустимая длина

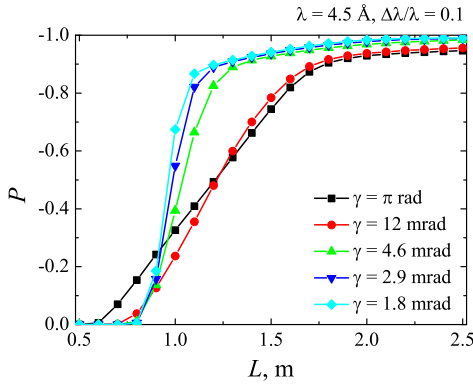


Рис. 2. Зависимость поляризации на $\lambda = 4.5 \text{\AA}$ от длины поляризатора.

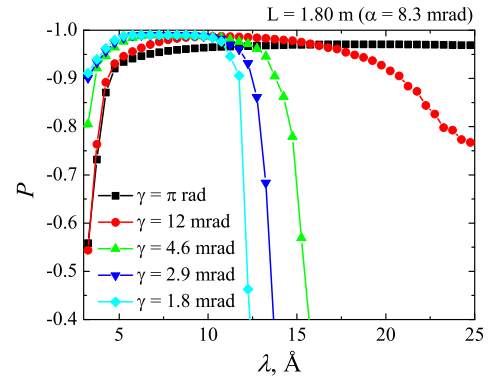


Рис. 3. Спектральная зависимость поляризации для поляризатора длиной 1.8 м.

поляризатора составляет $L = 1.8 \text{ m}$, где все кривые удовлетворяют условиям. Эта длина напрямую связана с углом наклона суперзеркальных пластин к пучку. Соответствующий угол равен 8.3 мрад. На рис. 3 приведена спектральная зависимость поляризации. Видно, что поляризатор обеспечивает требуемую поляризацию в интервале от 4.5 \AA до примерно 11 \AA для всех ограничений на расходимость.

На рис. 4 и 5 приведены спектральные зависимости пропускания по спин-компонентам R^- and R^+ соответственно. Видно, что поляризатор хорошо работает в диапазоне от 4.5 до 10 \AA . Коротковолновый предел обусловлен спадом рефлексивности R^+ на высоких значениях Q : коротковолновые нейтроны не отражаются вовсе, и степерь поляризации в пропущенном пучке низкая. С другой стороны, длинноволновая граница вызвана областью полного внешнего отражения в кремнии: обе спин-компоненты отражаются, и пропускание по рабочей падает до 0. Это не выполняется для неколлимированного пучка ($\gamma = \pi \text{ рад}$), так как в нём всегда найдутся траектории, падающие на зеркало под докритическими углами. Таким образом, существенно важным в оптимизировании оптики является учёт индивидуальных требований установки по параметрам пучка.

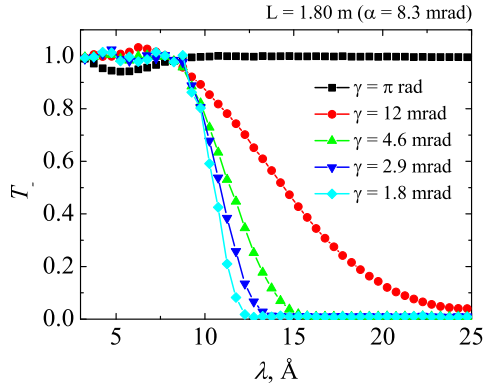


Рис. 4. Спектральная зависимость пропускания по R^- .

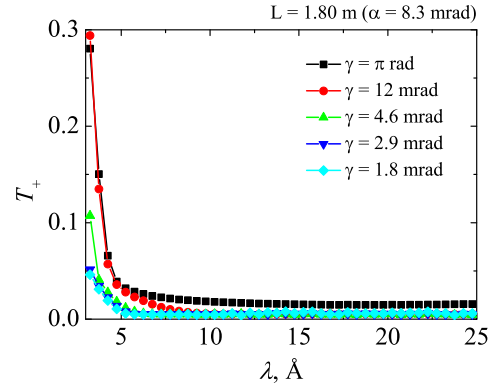


Рис. 5. Спектральная зависимость пропускания по R^+ .

Аналогичным образом был рассчитан второй поляризатор, оптимизированный под длинные волны (от 10 до 20 Å). Соответствующие кривые приведены на рис. 6-9.

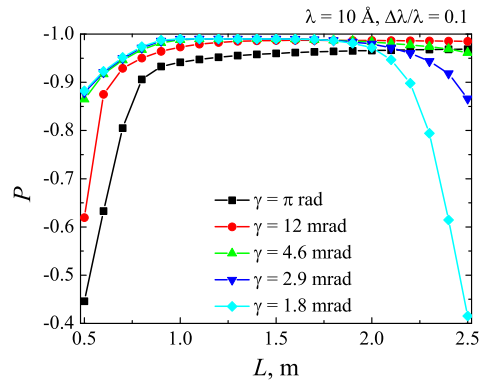


Рис. 6. Зависимость поляризации на $\lambda = 10$ Å от длины поляризатора для различных коллимаций.

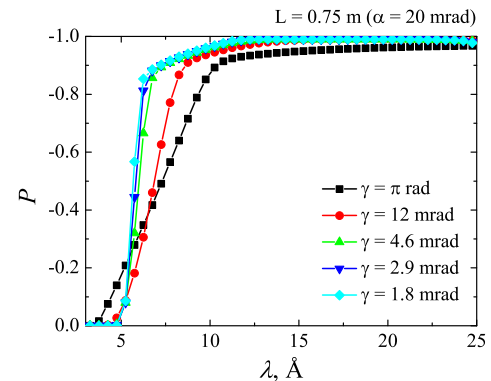


Рис. 7. Спектральная зависимость поляризации пучка для поляризатора длиной 0.75 м.

Оптимальная длина сменного поляризатора составляет 0.75 м, что соответствует углу наклона поляризующих зеркал 20 мрад.

3. Заключение

Использование рассмотренных покрытий (доступных для производства в ПИЯФ на сегодняшний день) не позволяет создать один поляризатор на весь спектральный диапазон. Как показали наши расчёты, на интервал от 4.5 до примерно 25 Å требуются два сменных устройства. Первое из них (рис. 3, 4, 5) действует в диапазоне от 4.5 до 10 Å, второе (рис. 7, 8, 9) покрывает диапазон от 10 до 25 Å. Оба поляризатора обеспечивают хорошую поляризацию пучка — не менее 0.95 на любой длине волны в интервале $4.5 \div 25$ Å. Пропускание по отрицательной спин-компоненте также удовлетворительно высокое: не менее 0.95 в большей части диапазона и не менее 0.7 на его краях. Стоит отметить, что впервые была смоделирована работа суперзеркал домашнего производства ПИЯФ и показана их применимость в широкодиапазонной оптике.

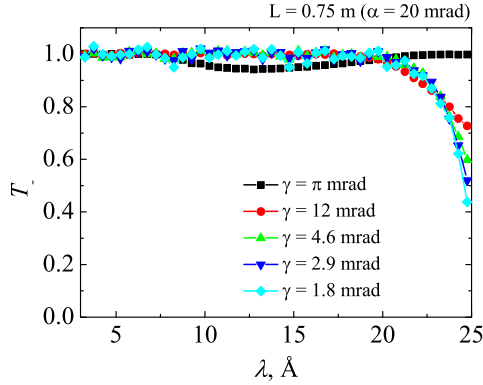


Рис. 8. Спектральная зависимость пропускания по R^- .

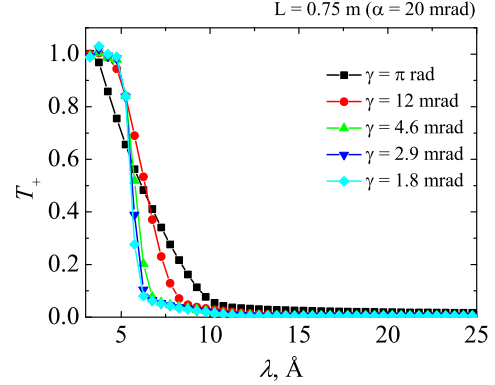


Рис. 9. Спектральная зависимость пропускания по R^+ .

В принципе, возможно покрыть целый диапазон длин волн, используя только одно устройство, но для этого необходимы суперзеркала с большим коэффициентом m . В качестве примера мы смоделировали работу поляризатора на зеркалах с $m = 5.5$, коммерчески доступных в настоящее время, используя данные, открыто предоставленные изготовителем SwissNeutronics [9].

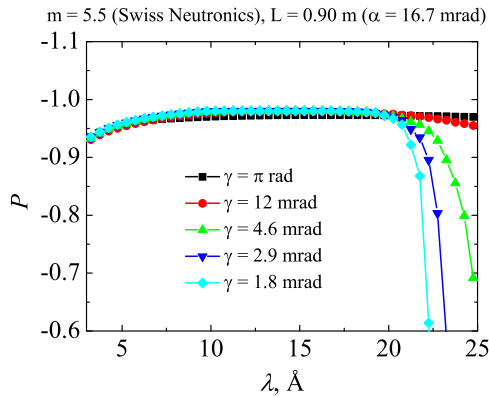


Рис. 10. Спектральная зависимость поляризации для V-cavity на зеркалах $m = 5.5$.

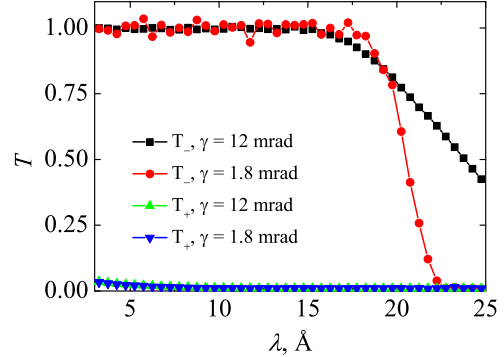


Рис. 11. Спектральная зависимость пропускания для V-cavity на зеркалах $m = 5.5$.

На рис. 10-11 показана работа V-образного поляризатора длиной 0.9 м. Как видно из графиков, такое устройство функционирует во всём спектральном диапазоне (от 4.5 до 20 Å).

Стоит обратить внимание на следующий момент. Степень поляризации у поляризатора на зеркалах с высоким m на несколько процентов ниже в сравнении с аналогичным, реализованным на покрытиях с более низким коэффициентом. Это вызвано более низкой средней отражательной способностью в суперзеркальной области (от Q_c до mQ_c) для компоненты R^+ . Более высокое m , естественно, делает эту область шире, но рефлексивность падает по одинаковому линейному закону. Пропускание по отрицательной спин-компоненте (T_-) составляет около 1 для обоих типов зеркал (см. рис. 4 для $m = 2.13$ и рис. 11 чёрные квадраты и красные кружки для $m = 5.5$). Для положительной спин-компоненты (T_+) пропускание должно быть мало настолько, насколько это возможно, но для зеркал $st = 5.5$

оно возрастает, по сравнению с $m = 2.13$ (см. рис. 5 и рис. 11 синие и зелёные треугольники). Чем выше становится пропускание T_+ , тем хуже получаемая степень поляризации. В нашем случае это не самый важный фактор, поскольку мы изначально установили довольно слабое требование к поляризации в 0.95, но в ряде других случаев это может быть существенно.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ПИЯФ Н.К. Плешанова и В.А. Ульянова за плодотворные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ФЦП, проект №RFMEFI61614X0004).

Литература

- [1] Krist T, Lartigue C and Mezei F 1992 *Physica B* **180–181** 1005–1006
- [2] Keller T, Krist T, Danzig A, Keiderling U, Mezei F and Wiedenmann A 2000 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **451** 474–479
- [3] Dewhurst C 2008 *Measurement Science and Technology* **19**
- [4] Babcock E, Boag S, Becker M, Chen W C, Chupp T E, Gentile T R, Jones G L, Petukhov A K, Soldner T and Walker T G 2009 *Phys. Rev. A* **80**(3) 033414
- [5] Lefmann K and Nielsen K 1999 *Neutron News* **10** 20–23
- [6] Willendrup P, Farhi E, Knudsen E, Filges U, Lefmann K and Stein J 2016 *User and Programmers Guide to the Neutron Ray-Tracing Package McStas, Version 2.3*
- [7] Chen B, Huang C, Li X, Pleshanov N, Syromyatnikov V and Schebetov A 2006 *Physica B* **385–386**, part 1 663–666
- [8] Pleshanov N, Peskov B, Schebetov A, Syromyatnikov V, Chen B, Huang C and Li X 2007 *Physica B: Condensed Matter* **397** 62–64
- [9] <http://www.swissneutronics.ch>