

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕЙТРОННЫМ МИКРОСКОПОМ

*С.С.Арзуманов, С.В.Масалович, А.А.Сабельников, А.Н.Стрелетов,
А.И.Франк*

Сообщается о результатах пробных экспериментов с зеркальным нейтронным микроскопом. Зарегистрировано нейтронное изображение двух щелей с шириной 40 и 13,5 мкм и изображение периодического тест-объекта с периодом ≈ 65 мкм. При оптическом увеличении $M = 47\times$, разрешение прибора оценивается величиной 17 мкм.

В большинстве работ по нейтронной микроскопии используются зеркальные оптические системы, основанные на замечательной способности ультрахолодных нейтронов (УХН) испытывать полное отражение при всех углах падения. Такой подход предложен И.М.Франком в 1972 г. ¹.

В настоящей статье сообщается о результатах экспериментов с зеркальным нейтронным микроскопом, созданным группой ИАЭ им.И.В.Курчатова совместно с Ленинградским институтом точной механики и оптики (ЛИТМО) ².

В ³ сообщалось о регистрации двумерного нейтронного изображения с оптической системой малого увеличения. Наилучшая разрешающая способность нейтронного микроскопа составляет в настоящее время 10 мкм ⁴. Обзор ситуации в области нейтронной микроскопии приведен в ⁵.

Особенность нашего микроскопа состоит в использовании оптической схемы с горизонтальным ходом "лучей" ², предложенной М.М.Русиновым. Анализ показал ⁶, что в горизонтальных схемах, в отличие от схем с вертикальным расположением оптической оси, может существовать только один тип гравитационной хроматической аберрации. Это существенно облегчает компенсацию гравитационного хроматизма, наличие которого составляет одну из основных трудностей в приборной оптике УХН.

Оптическая схема микроскопа представлена на рис. 1. Ахроматизация прибора достигается путем применения уголкового оборачивающего элемента. Без него нейтроны разных скоростей формировали бы изображения, смещенные по вертикали, что привело бы к значительному ухудшению разрешения. Реальная конструкция микроскопа несколько сложнее чем изображенная на рисунке (см. ²). В нее введены дополнительные зеркала, что дает возможность использовать прибор либо в режиме регистрации нейтронного изображения, либо как обычный оптический микроскоп.

Микроскоп оснащен объективом Шварцшильда, состоящим из двух концентрических зеркал с радиусами кривизны 14,17 и 5,41 мм. Числовая апертура

объектива $A = 0,5$, увеличение $M = 47^{\times}$. Длина пролета нейтронов от объекта до плоскости изображения, где расположен детектор, около 22 см. Теоретическое разрешение микроскопа при использовании широкого спектра скоростей УХН (4,5 - 7,5 м/с) около 5 мкм. Все оптические элементы изготовлены из стекла и покрыты слоем немагнитного сплава $Ni^{58} - Mo$ толщиной 0,2 мкм имеющего граничную скорость $v_{гр} = 7,8$ м/с (длина волны $\lambda \cong 500 \text{ \AA}$).

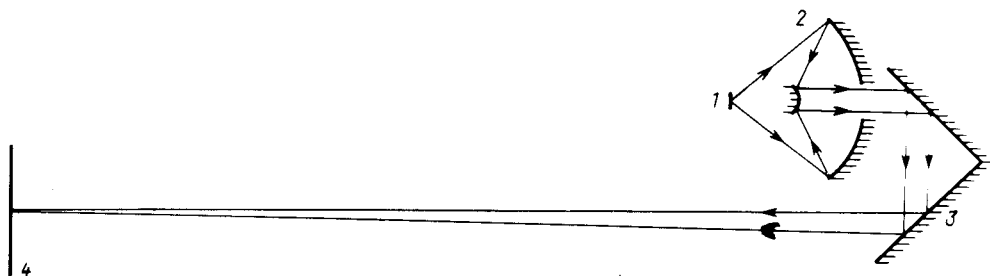


Рис. 1. Оптическая схема микроскопа. 1 - плоскость объекта, 2 - объектив, 3- оборотная система, 4 - плоскость изображения.

Сцинтилляционный позиционно-чувствительный детектор ⁷ имеет собственное разрешение около 300 мкм и, следовательно, ограничивает разрешение микроскопа на уровне 6-7 мкм. Прибор был установлен на пучке УХН жидководородного источника реактора ВВР-М ЛИЯФ ⁸. В качестве первых объектов были использованы две щели шириной соответственно 40 и 13,5 мкм. Щели располагались горизонтально. При этом гравитационный хроматизм, если он не был полностью скомпенсирован, должен проявиться максимальным образом.

Изображение регистрировалось электронной измерительной системой и накапливалось в памяти в виде двумерной матрицы. На рис. 2. приведены гистограммы,

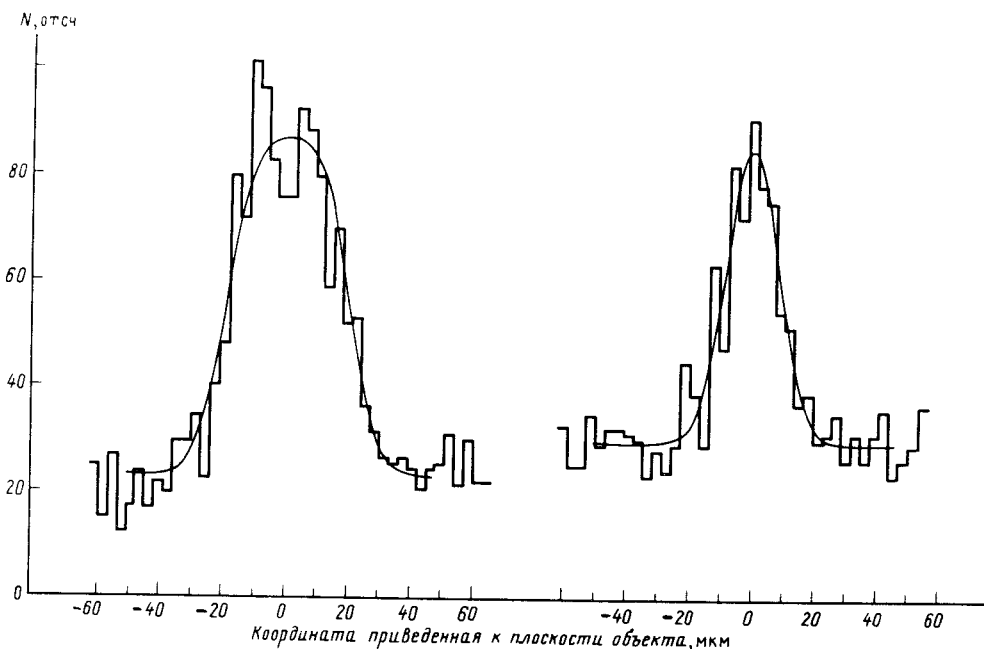


Рис. 2. Зависимость счета нейтронов от координаты при поперечном сечении изображения двух щелей: шириной 40 (слева) и 13 мкм. Плавная кривая представляет собой расчетное распределение для гауссовой функции разрешения с шириной на половине высоты 17 мкм.

представляющие собой поперечные сечения изображений обеих щелей, полученные путем суммирования соответствующих элементов матриц. Ширина канала, приведенная к плоскости изображения составляет 3 мкм. Абсолютная калибровка детектора и измерительной системы была осуществлена в отдельном эксперименте.

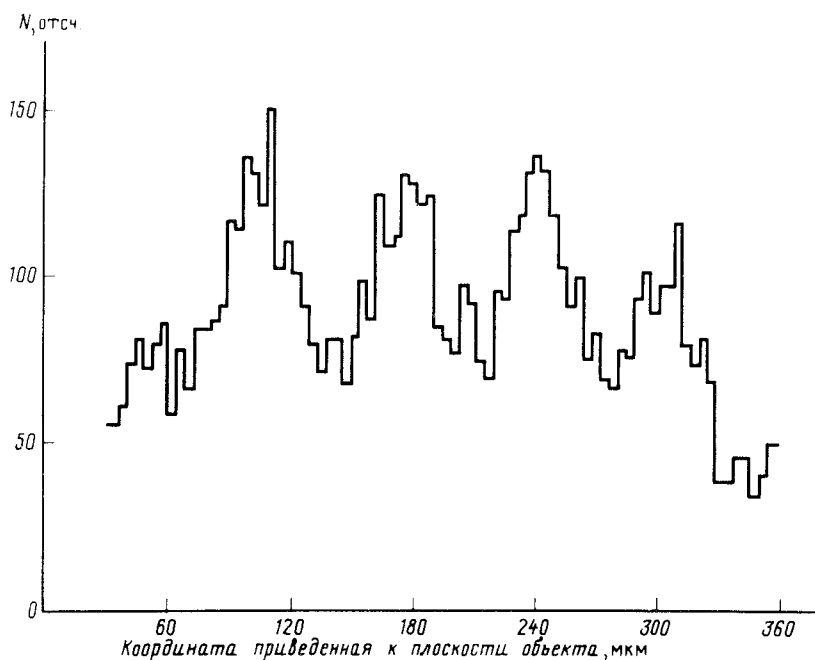


Рис. 3. Зависимость счета нейтронов от координаты при поперечном сечении изображения миры с периодом 66,7 мкм.

Получено, что полная ширина на половине высоты распределений составляет соответственно 40,8 и 20 мкм. Зависимость счета от координат при совместном анализе двух изображений хорошо описывается ($\chi^2 \approx 1$) в предположении, что собственная функция разрешения прибора представляет собой нормальное распределение с шириной на полувысоте 17 мкм. Этот результат можно считать оценкой разрешающей способности микроскопа и измерительной системы. По-видимому, было бы преждевременным делать какие-либо выводы из факта несоответствия полученного и расчетного разрешения.

Следует отметить, что абсолютная скорость счета в максимуме изображения в несколько раз меньше ожидаемого значения. Причина расхождения может быть связана с наличием довольно значительной компоненты незеркального отражения. Такое диффузное отражение, не сильно сказываясь на качестве изображения щели, может существенно снизить контраст изображения объекта, имеющего относительно большую площадь прозрачности.

Был предпринят опыт по наблюдению изображения периодического тест-объекта (миры), имеющего прозрачные и отражающие полосы равной ширины, приготовленного методом фотолитографии Ni^{58} на тонком (140 мкм) стекле (см.рис. 3). Период миры 66,7 мкм. К сожалению, в этом опыте интенсивность УХН была снижена примерно вдвое, что ухудшило отношение эффекта к фону. Тем не менее, можно наблюдать вполне удовлетворительный контраст изображения.

Отметим, что в горизонтальных схемах увеличение нейтронного изображения должно быть равно обычному оптическому. Эксперимент с мирой дал прямое подтверждение этого вывода.

Авторы благодарны Б.Г.Ерозолискому, А.П.Сереброву и другим коллегам из ЛИЯФ за помощь и гостеприимство, оказанные ими во время работы на реакторе ВВР-М.

Литература

1. Франк И.М. Природа, 1972, 9, 24.
2. Арзуманов С.С., Карасева И.А., Кудряшов Ю.В. и др. Нейтронный микроскоп. Препринт ИАЭ-4968/14. М., 1989.
3. Арзуманов С.С., Масалович С.В., Стрелетов А.Н., Франк А.И. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 213.
4. Steyerl A., Drezel W., Ebisawa T. et al Rev.Phys.Appl., 1988, 23, 171.
5. Frank A.I. Nucl Instr.Meth., 1989, A284, 161.
6. Масалович С.В. ВАНТ, сер. общ. и ядерн.физ, 1986, вып.3(36), 69.
7. Архипова Т.А., Мечетин А.М., Пахомов М.Т. и др. Координатно-чувствительный детектор УХН для нейтронного микроскопа: Препринт ИАЭ-5009/14.М., 1990.
8. Алтарев И.С., Боровикова Н.В., Будкин А.П. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 269.

Институт
атомной энергии им.И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
10 августа 1990 г.