

РАДИОГРАФИЯ С РЕФРАКЦИОННЫМ КОНТРАСТОМ

К. М. Подурец, В. А. Соменков, С. Ш. Шильштейн

Предложен новый способ получения изображения в нейтронной радиографии. Способ основан на разделении непреломленного излучения и излучения, испытавшего преломление на неоднородностях внутри объекта. Необходимое угловое разрешение обеспечивается последовательным отражением нейтронов от двух совершенных кристаллов, при этом объект располагается между ними. Проведенные эксперименты показали наличие высокого контраста даже на изображениях слабопоглощающих объектов. Получены нейтронные изображения неоднородного магнитного поля.

В радиографии информация о внутренней структуре объекта получается на основе картины пропускания излучений (рентгеновских, гамма-лучей, нейтронов). Контраст этой картины определяется ослаблением излучения в разных участках объекта. Наряду с ослаблением должно происходить преломление излучения на поверхностях раздела, и характерные угловые отклонения составляют для тепловых нейтронов и рентгеновских лучей величину порядка угловых секунд [1, 2]. Поэтому при секундном угловом разрешении, достаточном для разделения преломленного и непреломленного излучений, на радиограммах должен появиться дополнительный контраст.

Необходимое разрешение обеспечивается при расположении объекта между двумя совершенными кристаллами, параллельными друг другу, т. е. при использовании метода двухкристального спектрометра [1-3]. Цель данной работы состоит в демонстрации на примере нейтронной радиографии возможности повышения контраста за счет процесса рефракции при обеспечении секундного углового разрешения с помощью двухкристального спектрометра.

Принцип метода

Высокое угловое разрешение обусловлено тем, что последовательное отражение двумя идеальными кристаллами происходит только в угловом интервале в несколько секунд вблизи параллельного положения даже при угле коллимации пучка порядка градуса [3]. Если в результате взаимодействия с объектом, помещенным между кристаллами, направление пучка изменяется, то он будет отражаться вторым кристаллом-анализатором после поворота от параллельного положения на угол, равный угловому отклонению пучка в объекте. Таким образом, двухкристальный спектрометр обеспечивает эффективное угловое разрешение порядка секунд, при этом не требуется жесткой коллимации первичного пучка. С помощью двухкристального спектрометра проводят эксперименты по нейтронной оптике, в которых определяются малые угловые отклонения, например наблюдение процессов рефракции на поверхностях раздела [3, 4]. Когда кристалл-анализатор параллелен кристаллу-монокроматору, детектор регистрирует под углом Брэгга после анализатора только нейтроны, которые не преломляются в объекте (рис. 1, а). Если же кристалл-анализатор отведен от этого положения на угол, превышающий углы преломления, то он практически не отражает нейтронов и детектор, расположенный за анализатором под

нулевым углом рассеяния, регистрирует суммарную интенсивность преломленного и непреломленного пучков (рис. 1, б).

Из вышеизложенного следует, что проведение двух экспериментов по схеме рис. 1, а, б дает возможность прямого сравнения картин пропускания с рефракционным контрастом и без него. При этом геометрическое разрешение не изменяется. Такое сравнение и осуществляли в данной работе.

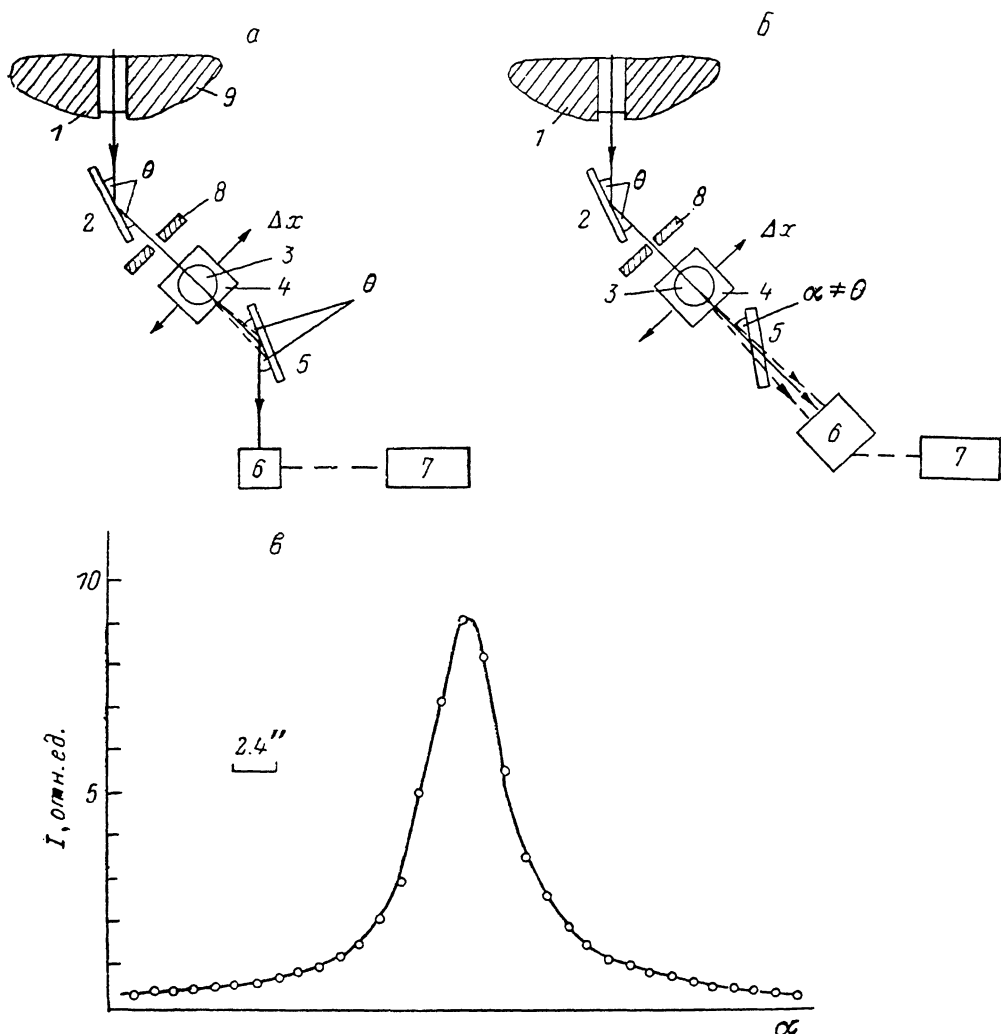


Рис. 1. Схема эксперимента по просвечиванию объекта с использованием двухкристального спектрометра в условиях рефракционно-абсорбционного контраста «рефракция+ослабление» (а) и чисто абсорбционного контраста — «ослабление» (б).

1 — коллиматор; 2 — кристалл-монокроматор; 3 — объект; 4 — стол образца, обеспечивающий его смещение Δx ; 5 — кристалл — анализатор; 6 — детектор; 7 — система сбора и обработки данных; 8 — щель ($0.3 \leq 2r \leq 3$ мм); 9 — защита реактора; θ — угол Брэгга; σ — кривая отражения для кристаллов германия (111) при длине волны $\lambda=2.26 \text{ \AA}$ (α — угол поворота кристалла-анализатора).

Методика эксперимента

Измерения проводили при длинах волн $1.5-2.5 \text{ \AA}$ на спектрометре СТОИК [5], установленном на реакторе ИР-8 Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. При использовании в качестве монокроматора и анализатора кристаллов германия (111) угловое разрешение составляло $\sim 1''$ (рис. 1, в), угловая коллимация — 0.5° , размер пучка $\sim 2 \times 2 \text{ см}^2$.

Проводили эксперименты двух типов: со сканированием объекта пучком регулируемой ширины (сформированным щелью в листовом кадмии) и с непосредственной визуализацией картины пропускания. В экспериментах со ска-

нированием интенсивность пропускания измеряли детектором спектрометра СТОИК, а визуализация осуществлялась с помощью n - β -конвертора (фольга из гадолиния) и рентгеновской пленки в геометрии «на отражение».

Результаты экспериментов и их обсуждение

В качестве модельного объекта был выбран алюминиевый стакан с двумя медными стержнями внутри него — аналог «фантома Кормака» [6] (рис. 2, *д*). В условиях чисто абсорбционного контраста («ослабление») картины пропускания характеризовались фоном, который увеличивался при сужении щели (вследствие возрастания доли быстрых нейтронов, не поглощающихся в кадмии) и достигал ≈ 70 % полной интенсивности в отсутствие объекта. В то же время в условиях рефракционно-абсорбционного контраста («ослабление + рефракция») фон на этих картинах значительно меньше.

Контраст характеризовали величиной

$$k(x) = \frac{I_0 - I(x)}{I_0 - I_\phi},$$

где x — поперечное смещение объекта относительно щели; I_0 — интенсивность пучка нейтронов, регистрируемая при прохождении мимо образца в начале и конце сканирования; $I(x)$ — интенсивность пропускания при смещении x , I_ϕ — фоновая интенсивность (регистрируемая детектором через листовую кадмий без щели).

Определенные таким образом величины контраста приведены на рис. 2, *а—г*. При абсорбционном контрасте крайние минимумы, соответствующие прохождению максимального пути в стенках стакана, составляют ≤ 10 %, минимумы, соответствующие прохождению максимального пути в медных стержнях вдоль их оси, составляют ≈ 30 и ≈ 10 %, что согласуется с литературными данными об ослаблении в меди [1]. Такой же контраст наблюдается для аксиального прохождения и в условиях «ослабление + рефракция», так как нейтроны проходят все поверхности по нормали, т. е. без преломления. Максимальный контраст на этих картинах наблюдается на краях цилиндров, где углы скольжения уменьшаются, в пределе малых углов должно происходить полное отражение. Для конечного геометрического разрешения контраст даже при регистрации рефракции остается меньше 100 %.

Возрастание контрастов можно характеризовать отношением его максимальных уровней (на краях в условиях «ослабление + рефракция», в центре цилиндров в условиях «ослабление»), это возрастание достигает порядка величины. Расчет контраста в условиях «ослабление + рефракция» на основе геометрической оптики с учетом разрешения щели в виде «столика» и инструментальной кривой (рис. 1, *е*) дал кривые, показанные на рис. 2, *а, в* штриховыми линиями.

Сравнение фотографий модельного объекта, полученных в условиях «ослабление» (рис. 3, *б*) и «ослабление + рефракция» (рис. 3, *а*), также указывает на значительное увеличение контраста во втором случае. Действительно, тонкий стержень и алюминиевый стакан, трудно различимые на рис. 3, *б*, хорошо видны на рис. 3, *а* с регистрацией рефракции. Возрастание контраста при удалении от оси толстого цилиндра обуславливает известное сходство с объемным изображением. Отметим, что возрастание контраста при визуализации изображений уменьшено по сравнению с экспериментами по сканированию из-за ухудшения геометрического разрешения (в экспериментах по сканированию оно определяется расстоянием цель—объект, равным ≈ 1 см, а при регистрации на пленку — ее расстоянием от объекта, равным ≈ 6 см).

Как видно из результатов экспериментов с модельным объектом, регистрация рефракции на поверхностях раздела способствует повышению контраста составных образцов. Примером может служить также фотография внутренней структуры шариковой ручки. В то время как в условиях «ослабление» видны паста внутри стержня (ослабление в ней велико, как в любом водородосодержащем веществе) и толстый металлический корпус (рис. 4, *б*), в условиях «ослабление + рефракция» отчетливо различимы все детали внутреннего строения пи-

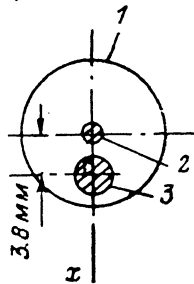
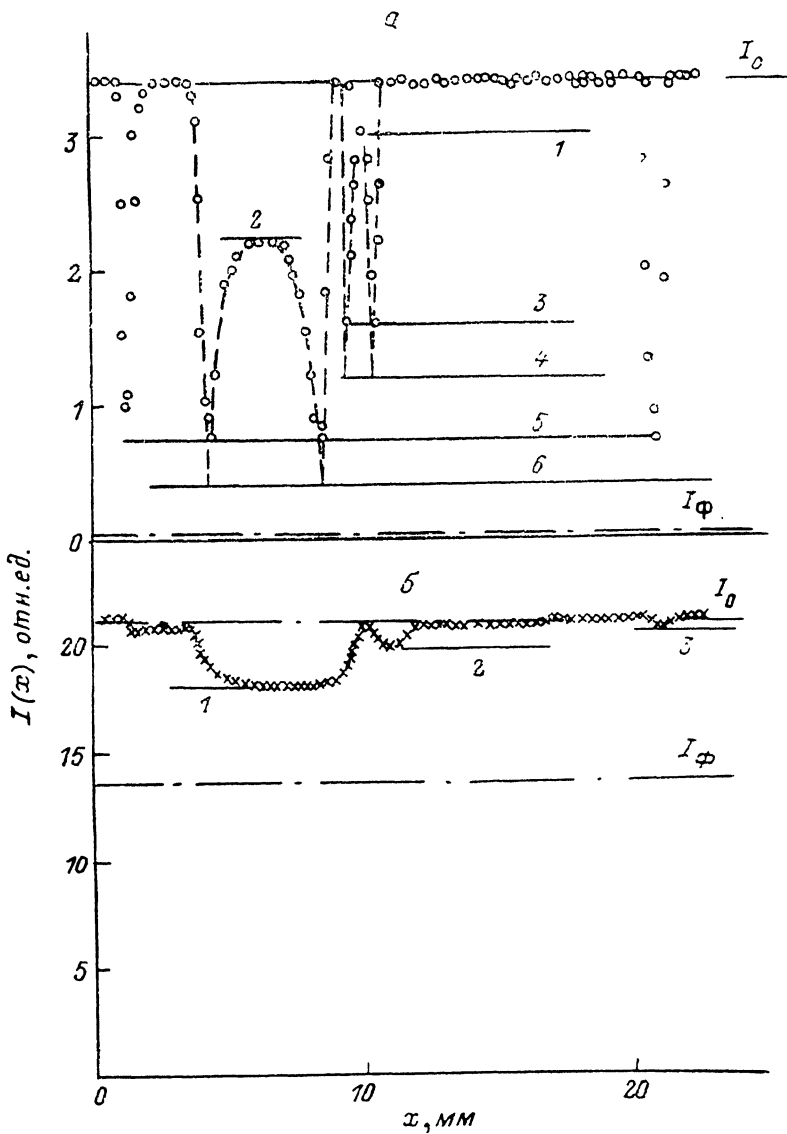


Рис. 2. Результаты сканирования модельного объекта щелью шириной 0, 0,2 (а, б) и 1 мм (в, г) при $\lambda = 2.26 \text{ \AA}$ в условиях «рефракция+ослабление» (а, в) и «ослабление» (б, г).

Штриховые линии — расчет для медных цилиндров, штрихпунктир — уровень фона I_0 и уровень интенсивности в отсутствие образца на пучке I_0 : а — $2r=0.2 \text{ мм}$; $k, \%$: 1 — 10, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 65, 5 — 80, 6 — 90; б — $k, \%$: 1 — 35, 2 — 15, 3 — 10; в — $2r=1 \text{ мм}$; $k, \%$: 1 — 25, 2 — 40, 3 — 65; г — $k, \%$: 1 — 30, 2 — 10, 3 — 5. д — схематический разрез модельного объекта и размеры алюминиевого стакана и медных стержней: 1 — $R_2=9 \text{ мм}$, $\delta=0.5 \text{ мм}$; 2 — $R_2=0.5 \text{ мм}$; 3 — $R_1=2.15 \text{ мм}$.

пущего узла, пружина, тонкостенный баллон с пастой (рис. 4, а). Обращает на себя внимание просветление на периферии столба пасты. Оно объясняется переходом от преимущественно абсорбционного контраста в центре цилиндра к преимущественно рефракционному на его краях. Этот минимум контраста хорошо виден на картинах сканирования медных цилиндров (рис. 2, а, в). Таким обра-

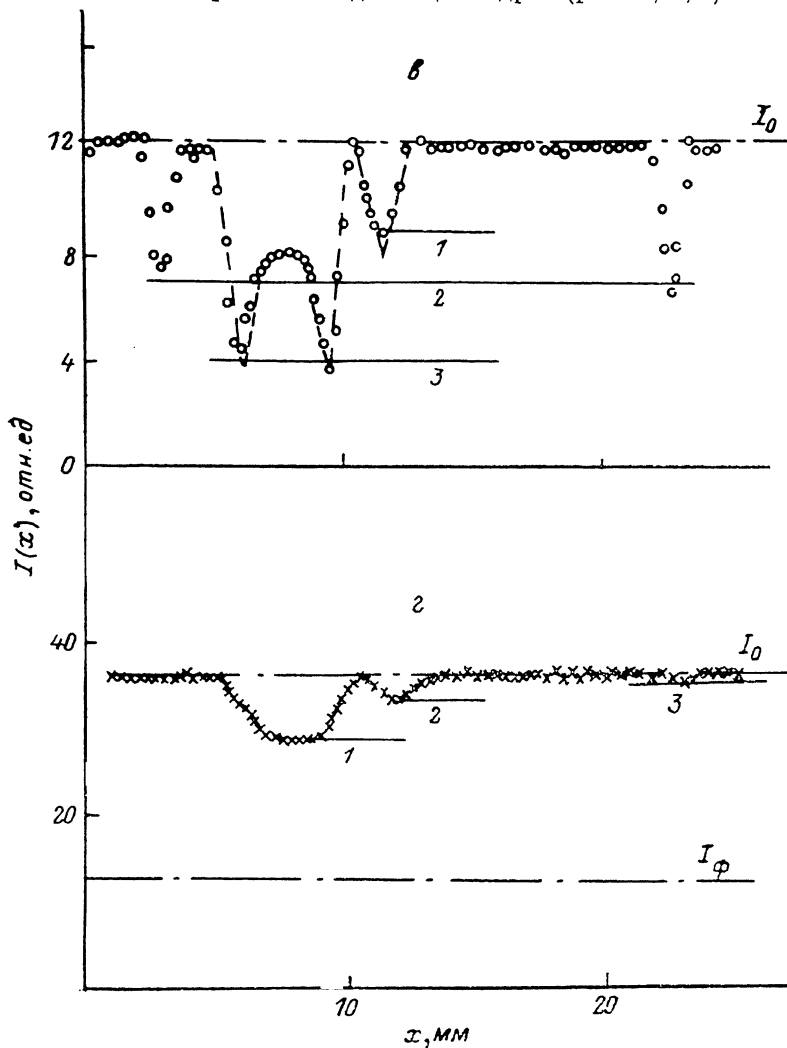


Рис. 2 (продолжение).

зом, рефракционный контраст может проявляться в заметной мере даже для веществ, характеризующихся сильным ослаблением.

На приведенных выше нейтронных радиограммах составных объектов регистрация рефракции обуславливает возрастание контраста, когда наряду с различием ослабления в разных участках объекта играет роль различие коэффициентов преломления. Такое использование рефракционного контраста целесообразно не только в нейтронной радиографии, но и в радиографии с использованием рентгеновского, синхротронного или гамма-излучения.

В нейтронной радиографии имеется специфическая возможность появления чисто рефракционного контраста при полном отсутствии абсорбционного. Эта возможность обусловлена тем, что при прохождении неоднородных магнитных полей происходит магнитное преломление нейтронов [1, 3]. Аналогичный эффект связан с прохождением нейтронов через границу доменов в ферромагнетике, где происходит изменение направления вектора магнитной индукции [4]. Вследствие этого открываются новые области применения нейтронной радио-

графии с рефракционным контрастом: наблюдение градиентов магнитного поля (например, в магнитных системах для исследований по физике плазмы, когда использование других способов затруднительно) и внутренней доменной структуры ферромагнетиков.

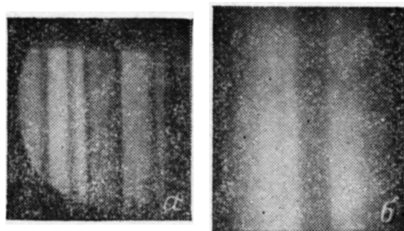


Рис. 3. Радиограмма модельного объекта в условиях «рефракция+ослабление» (а) и «ослабление» (б).

Экспозиция 5 ч, размер алюминиевого стакана уменьшен по сравнению с рис. 2, в.

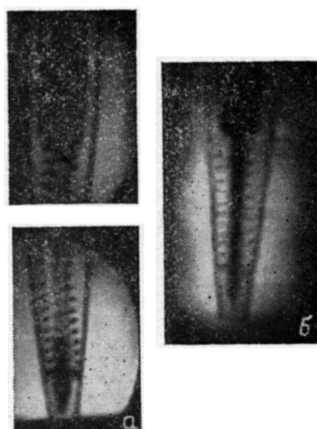


Рис. 4. Радиограмма шариковой ручки в условиях «рефракция+ослабление» (а) и «ослабление» (б).

Эти возможности подтверждают следующие два эксперимента. В первом из них пучок нейтронов проходил зазор между двумя постоянными магнитами (рис. 5, а), поле на краю которого возрастает от нуля до 6 кЭ в области шири-

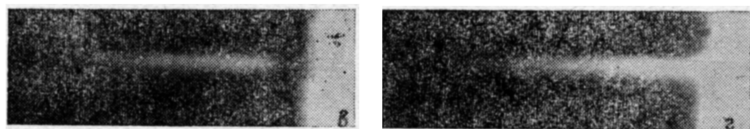
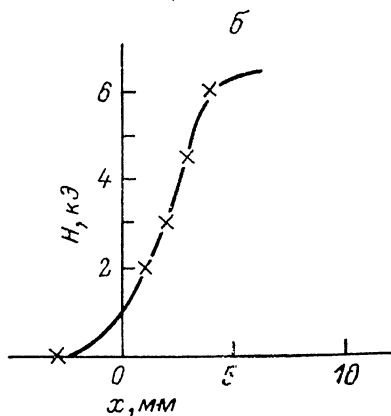
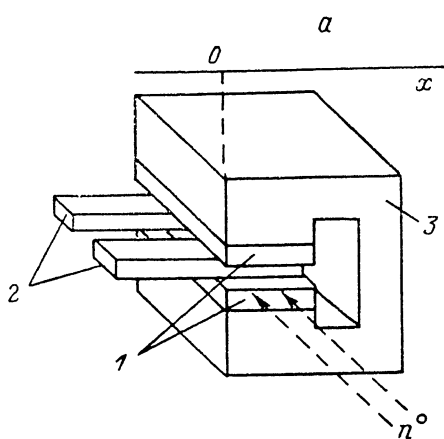


Рис. 5. Схема эксперимента по наблюдению градиента магнитного поля в зазоре постоянных магнитов (а), изменение поля у края зазора (б) и картина пропускания нейтронов (увеличение) в условиях «рефракция+ослабление» (с) и «ослабление» (д).

1 — постоянные магниты, 2 — алюминиевые вкладыши, 3 — ярмо из железа ярмо.

ной ≈ 2 мм (рис. 5, б). В этой области интенсивность прохождения без преломления уменьшена (рис. 5, в), так как отклонение на пути в 4 см при градиенте $\sim 10^4$ Э/см в соответствии с [7] составляет $\sim 1.5''$, что, согласно рис. 1, в,

обуславливает уменьшение интенсивности отражения от кристалла-анализатора на 20—30 %. В то же время в условиях «ослабления» контраст, естественно, отсутствует (рис. 5, з). Второй эксперимент проведен с монокристаллической пластиной кремнистого железа с ориентацией (110) и толщиной 1.5 мм. При такой ориентации границы основных доменов должны проходить вдоль оси легкого намагничивания [001], а на торцах пластины, перпендикулярных этому направлению, должно происходить замыкание магнитного потока в клиновидных доменах [8]. Действительно, на картине прохождения нейтронов с рефракционным контрастом видны вертикальные границы, проходящие в объеме кристалла вдоль направления [001], а на торцах — области замыкающих доменов (рис. 6). Среднее расстояние между границами хорошо согласуется с величиной 1.4 мм, полученной на основе измерений ориентационной зависимости эффектов рефракции нейтронов на внутренних границах доменов в этом же кристалле [9].

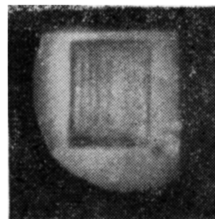


Рис. 6. Рефракционная топограмма (радиограмма с рефракционным контрастом) пластины кремнистого железа толщиной 1.5 мм.

Заключение

Предложенный принцип увеличения контраста на нейтронных радиограммах полезен при решении широкого круга задач: наблюдение внутренней структуры непрозрачных материалов, изделий и приборов, диагностика магнитных систем, изучение внутренней доменной структуры ферромагнетиков и т. п. Принцип рефракционного контраста может быть использован во всех областях интроскопии с использованием нейтронного или электромагнитного излучения: радиографии, топографии, томографии. Можно полагать, что связанная с отражением от кристаллов потеря светосилы будет компенсироваться повышением качества изображений.

Литература

- [1] Нозик Ю. З., Озеров Р. П., Хенниг К. Структурная нейтронография. М.: Атомиздат, 1979. 344 с.
- [2] Линскер З. Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982. 392 с.
- [3] Rauch H., Petrascheck D. // Neutron Diffraction (Topics in Current Physics). Berlin: Springer Verlag, 1978. Vol. 6. P. 303—352.
- [4] Шильштейн С. Ш., Соменков В. А. // Кристаллография. 1975. Т. 20. № 5. С. 1096—1103.
- [5] Наумов И. В., Петушков С. А., Подурец К. М. и др. Препринт ИАЭ. № 4368/14. М., 1986. 25 с.
- [6] Cortack A. // J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 2908.
- [7] Ероволимский Б. Г., Мостовой Ю. А., Обиняков Б. А. Препринт ИАЭ. № 597. М., 1964. 17 с.
- [8] Невель Л. // Физика ферромагнитных областей. М.: ИЛ, 1956. С. 194—214.
- [9] Шильштейн С. Ш., Соменков В. А., Каланов М. // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. Вып. 6. С. 2214—2220.

Поступило в Редакцию
7 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
13 апреля 1988 г.