

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.386.8

**ПОЛУПРОЗРАЧНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ МОНОХРОМАТОР
РЕШЕТЧАТОГО ТИПА**

© 2000 г. А. Г. Турьянский, И. В. Пиршин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Россия, 117924, Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 30.12.99 г.

Описан полупрозрачный рентгеновский монохроматор решетчатого типа, который может быть использован для расщепления полихроматических пучков, смешивания пучков различного спектрального состава и мониторинга интенсивности излучения. Монохроматор выполнен из монокристалла кремния и содержит набор периодически расположенных щелевых отверстий, ориентированных параллельно плоскости дифракции. Приведены данные измерений коэффициентов отражения и пропускания, полученные путем сканирования диафрагмой перпендикулярно измерительной плоскости, которые сравниваются с результатами математического моделирования.

Характеристики рентгеновского эшелон-монохроматора из последовательно расположенных полупрозрачных пластин пиролитического графита были исследованы нами в [1]. На основе полученных результатов был собран двухволновой рентгеновский рефлектометр [2], обеспечивающий возможность одновременных измерений в разных участках спектра, например на K_{α} - и K_{β} -линиях характеристического излучения анода рентгеновской трубки. При этом, как показано в [2, 3], в режиме относительных измерений удалось устранить ряд принципиальных ошибок рентгеновской рефлектометрии, связанных с неконтролируемыми условиями освещенности поверхности при малых углах скольжения зондирующего пучка и дрейфом параметров рентгеновской аппаратуры.

Однако предложенная в [2] измерительная схема с тонкими пластинчатыми монохроматорами может быть эффективно применена при длинах волн < 0.5 нм, так как в более мягком рентгеновском диапазоне резко возрастает массовый коэффициент ослабления излучения, что не позволяет пропустить излучение через используемые в эшелоне пластины толщиной ≥ 10 мкм [1, 2]. Попытки же уменьшения до ~ 1 мкм толщины кристаллических образцов площадью ~ 1 см² приводят к их неконтролируемой деформации и разрушению вследствие внутренних напряжений и неравномерного химического и механического воздействия на образец в процессе его обработки.

Другая проблема связана с тем, что для прецизионных измерений параметров периодической структуры и спектрального состава необходимо выделение из падающего излучения узкого спектрального диапазона, например, для обеспечения надежного разделения дублета часто используе-

мых характеристических линий K_{α} . Это пока не может быть практически реализовано с помощью пирографита в силу несовершенства его кристаллической структуры.

В данной работе описаны полупрозрачные монохроматоры решетчатого типа, которые позволяют устранить отмеченные недостатки.

Рассмотрим типичную измерительную схему (рис. 1), в которой линейный фокус рентгеновской трубки размером d_f размещен на расстоянии L от оси вращения образца O_s , параллельной линейному фокусу, причем $L \gg d_f$. Коллимационными щелями создается ленточный пучок, ширина которого в зоне оси O_s приблизительно равна d_f . Проведем измерительную ось z параллельно оси O_s . В отсутствие монохроматора выражение для плотности потока через площадку ΔS на оси O_s в спектральной полосе $\Delta\lambda$, создаваемое элементом фокуса Δz , может быть представлено в виде

$$\Delta^3 P = J(\lambda, \mathbf{k}, z) |(\mathbf{s}, \mathbf{k})| \Delta\Omega \Delta z \Delta\lambda, \quad (1)$$

где $J(\lambda, \mathbf{k}, z)$ – пространственная спектрально-угловая плотность потока рентгеновских квантов,

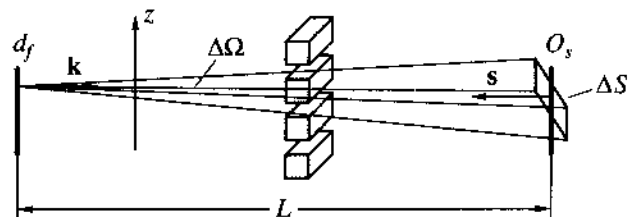


Рис. 1. Геометрия хода лучей от фокуса к оси образца через решетчатую структуру в телесном угле $\Delta\Omega$.

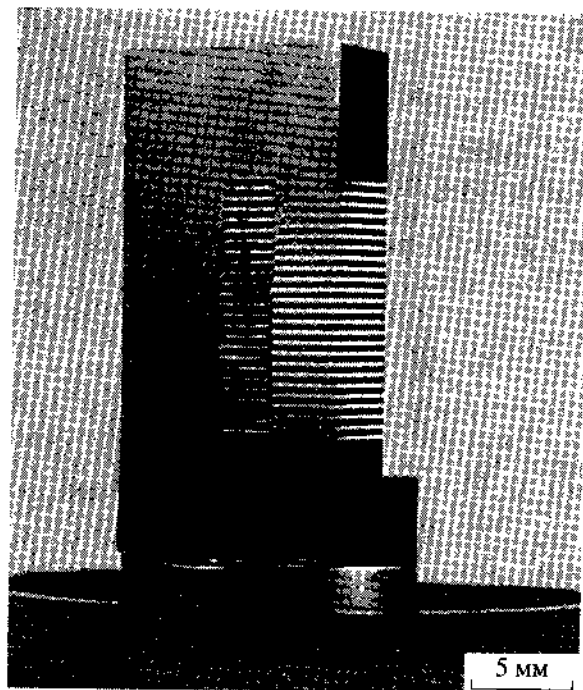


Рис. 2. Общий вид решетчатого монохроматора из монокристалла кремния.

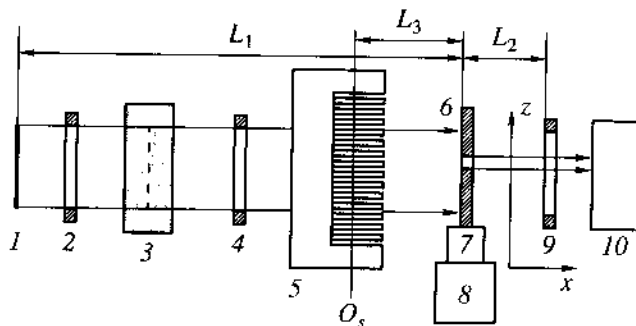


Рис. 3. Расположение элементов экспериментальной схемы в осевой плоскости. 1 – фокус рентгеновской трубки; 2, 9 – вертикальные щели; 3 – первичный монохроматор; 5 – решетчатый монохроматор; 6 – горизонтальная щелевая диафрагма; 7 – подвижный шток; 8 – устройство линейного сканирования; 10 – детектор.

$\Delta\Omega$ – телесный угол, опирающийся на площадку ΔS с вершиной на излучающем элементе фокуса, \mathbf{k} , \mathbf{s} – единичные вектора, проведенные соответственно от излучающего элемента фокуса в направлении к центру площадки ΔS и нормально к ее поверхности.

Допустим, что в пучок между фокусом и осью образца введен тонкий пластинчатый кристалл-монохроматор (к.м.), в котором имеется ряд узких щелевых отверстий, расположенных по все-

му сечению ленточного пучка с периодом d и ориентированных перпендикулярно оси O_s . Тогда очевидно, что при малых d , выбрав соответствующие размеры элементов разбиения, выражение (1) для плотности потока через площадку ΔS на оси O_s можно представить как

$$\Delta^3 P = b/dJ(\lambda, \mathbf{k}, z)|(\mathbf{s}, \mathbf{k})|\Delta\Omega\Delta z\Delta\lambda, \quad (2)$$

где b – ширина отверстия щели. Отношение b/d является коэффициентом пропускания, а величина $b/d\Delta\Omega$ может рассматриваться как эффективный телесный угол отбора с поверхности излучающего элемента на фокусе. Таким образом, после введения решетчатого монохроматора с периодом прорезей $d \rightarrow 0$ распределение плотности потока в зоне оси образца с точностью до постоянного множителя не изменяется. Указанное утверждение справедливо, если $a \tan \varphi / \sin \theta \ll b$, где a – толщина к.м., φ – максимальный угол расходимости в плоскости ленточного пучка, θ – брэгговский угол поворота, так как при нарушении этого условия к.м. может существенно изменить угловое распределение излучения.

Изготовление периодической щелевой структуры в промышленных дисках монокристаллов толщиной $a = 0.3\text{--}0.4$ мм с шагом $d \ll a$ современными методами фотолитографии практически трудно реализуемо вследствие неизбежного растравливания боковых стенок отверстия в процессе химической обработки. Для решения указанной проблемы нами был выбран вариант механической резки кристалла алмазным диском. Были изготовлены два образца решетчатого монохроматора в виде гребенки (рис. 2). Первый образец размером $24 \times 12 \times 4$ мм вырезался непосредственно из монокристаллической булы Si, ориентированной по направлению [111]. Ориентирование пластины осуществлялось с помощью рентгеновского дифрактометра, что обеспечивало угловое отклонение кристаллографической плоскости (111) от поверхности кристалла $\sim 10'$. После резки проводилось химическое травление исходной пластины для удаления нарушенного слоя. Второй образец был изготовлен путем соединения эпоксидной смолы пластины Si(111), полученной методом химико-механической обработки, с графитовой подложкой. Исходная толщина подложки и пластины Si составляли соответственно 5 и 0.35 мм. Резка щелей проводилась внутренней кромкой алмазного диска со стороны боковой поверхности заготовки с постоянным шагом $d = 500$ мкм, равным удвоенной толщине диска. Размер решетчатой зоны на отражающей поверхности обоих образцов равнялся 6×12 мм (рис. 2). Для уменьшения эффективной площади рассеяния толщина графитовой подложки второго образца уменьша-

лась до 2 мм; повторное химическое травление Si после резки не проводилось.

На рис. 3 показана экспериментальная схема измерения параметров дифракционно отраженного и прошедшего через решетчатый монохроматор пучков, собранная на базе дифрактометра ДРОН-3М. В качестве источника излучения использовалась трубка БСВ-22 с медным анодом. Измерения проводились с первичным кристаллом-монохроматором 3 из Si(111) и в полихроматическом излучении. Полная длина пути от фокуса до решетчатого монохроматора 5 составляла 330 мм. Устройство линейного сканирования 8, которое размещалось перед или за решетчатым монохроматором 5, обеспечивало перемещение щелевой диафрагмы 6 шириной 50 мкм со скоростью 400 или 100 мкм/мин в направлении оси z, перпендикулярном измерительной плоскости. Управление сбором данных осуществлялось с помощью компьютера.

На рис. 4 показаны дифракционные кривые качания $\theta - 2\theta$ для монохроматора из монолитной пластины Si, полученные в режиме двухкристального спектрометра от решетчатого и сплошного участков монохроматора. Как видно из их сравнения, полуширины дифракционных кривых от указанных участков практически идентичны, что подтверждает возможность получения с помощью механической резки решетчатого к.м., обеспечивающего высокое спектральное разрешение. Незначительное увеличение интенсивности на крыле дифракционной кривой со стороны меньших углов, по-видимому, связано с частичным попаданием излучения на боковые стенки щелевых отверстий, что эквивалентно смещению по нормали части отражающей поверхности кристалла относительно круга фокусировки.

На рис. 5 показаны зависимости интенсивности прошедшего $I_T(z)$ и отраженного $I_R(z)$ излучения от положения диафрагмы 6 при ее перемещении по оси z для монолитного к.м. и к.м. на графитовой подложке. Диафрагма располагалась перед решетчатым монохроматором на расстоянии 20 мм; коллиматор Соллера не использовался. Резкое уменьшение величины $I_R(z)$ при $z > 5$ мм для монохроматора на подложке объясняется угловым отклонением части элементов гребенки вследствие неконтролируемых деформаций при склеивании и механической обработке. Это подтверждается возможностью вывода в дифракционное положение различных частей указанного к.м. путем его качания по оси образца. Для к.м. из монолитного Si все элементы решетчатой структуры сохраняют ориентацию исходной пластины.

Наблюдаемое увеличение регистрируемых величин $I_T(z)$, $I_R(z)$ и уменьшение степени модуляции интенсивности при перемещении горизонтальной диафрагмы от края к центру пучка объясняется

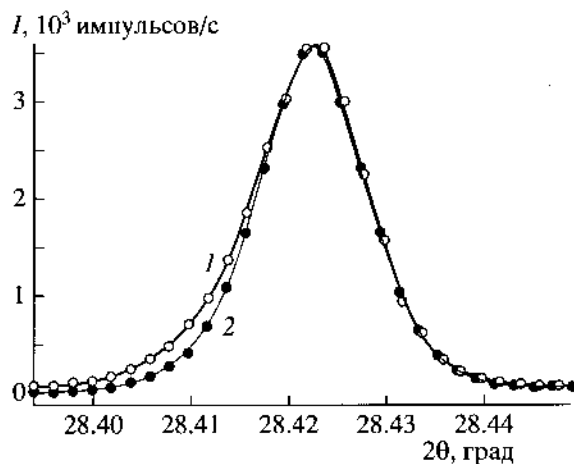


Рис. 4. Дифракционные кривые качания ($\theta - 2\theta$) решетчатого монохроматора для линии $\text{CuK}\alpha_1$: 1 – решетчатый участок (масштабирующий множитель 2.2); 2 – сплошной участок.

следующим. В осевой плоскости, проходящей через ось вращения образца и приемную щель, сканирующая диафрагма может рассматриваться как камера-обскура, которая создает в плоскости, перпендикулярной прямому пучку, перевернутое изображение фокуса рентгеновской трубки. Если указанная плоскость совмещена с приемной щелью, то коэффициент увеличения $M = L_2/L_1$, где L_1 , L_2 – соответственно расстояния от фокуса до диафрагмы и от диафрагмы до приемной щели (рис. 3). При сканировании диафрагмой по оси z, параллельной оси вращения образца, изображение фокуса перемещается по площади приемной щели детектирующего устройства и при некотором значении z начинает выходить за границу щелевого отверстия. Этим объясняется монотонный спад средней величины интенсивности к краям. При этом смещение изображения фокуса за пределы щели означает сокращение видимого в пределах приемника размера фокуса d_f , что формально соответствует уменьшению эффективной угловой расходимости пучка в вертикальной плоскости. Если сканирующая диафрагма размещена перед решетчатым монохроматором и расстояние между ними $L_3 \ll L_2$, то необходимо учесть конечный размер отверстия диафрагмы d_s , и поэтому в плоскости изображения, проходящей через ось вращения монохроматора, эффективный размер изображения фокуса $d_i = d_s + d_f L_3/L_2$. Очевидно, что при $d_i < b$ ($b = d/2$) глубина модуляции интенсивности сигнала в прошедшем и отраженном излучении по мере движения щели от оси пучка к краю будет достигать максимальной величины. Указанные соображения хорошо подтверждаются результатами математического моделирования отражения и пропуска

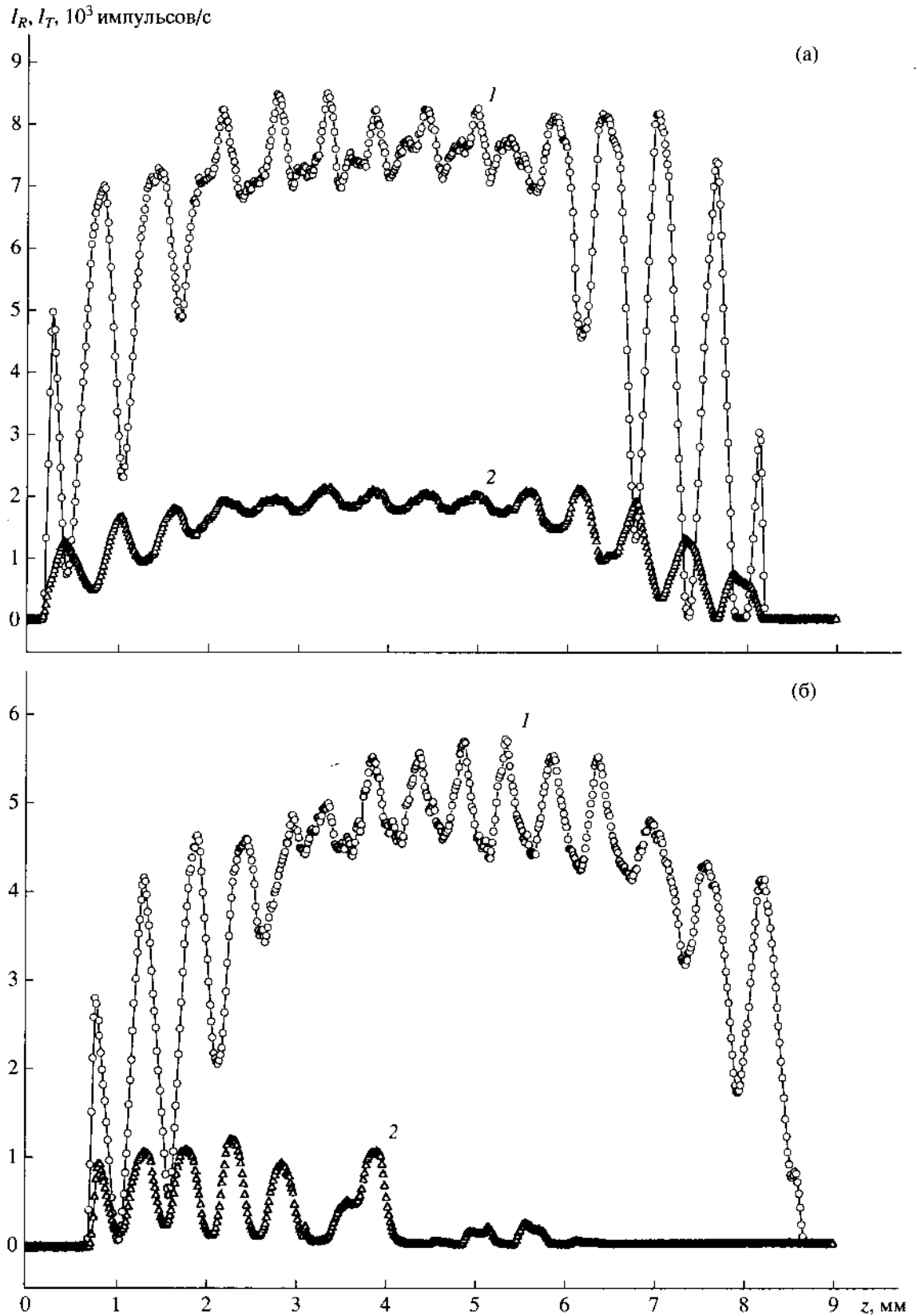


Рис. 5. Экспериментальные зависимости интенсивности прошедшего (1) и дифракционно отраженного (2) излучений от положения сканирующей диафрагмы для решетчатого к.м.: а – монолитная пластина Si, б – пластина Si на графитовой подложке. Расстояние сканирующая диафрагма – ось образца $L_3 = 20$ мм.

ния излучения через решетчатый к.м. (рис. 6). При вычислениях учтено размытие границ изображения фокуса вследствие рассеяния на краях путем введения сглаживающей функции типа $\exp[-(\alpha\xi)^2]$, где ξ – текущая координата по оси z , $\alpha \approx d_f/2$ – подгоночный параметр.

Рассмотренные выше соображения могут быть использованы для анализа распределения интенсивности излучения за монохроматором, поскольку по отношению к падающему пучку рабочая зона монохроматора представляет собой набор периодически расположенных щелевых диафрагм, а по отношению к отраженному – набор периодически расположенных отражателей с коэффициентом отражения $R(z)$. Тогда при установке решетчатого к.м. перед образцом и использовании его в качестве монохроматора в схеме двухкристального спектрометра для обеспечения однородного распределения интенсивности излучения на поверхности образца должно выполняться условие

$$Md_f \gg d. \quad (3)$$

В измерительных схемах серийных аппаратов отношение расстояния образец – монохроматор к расстоянию монохроматор – фокус обычно находится в пределах 1.2–2.5. Так как типичный размер фокуса 10 мм, то при выбранной величине периода $d = 0.5$ мм условие (3) удовлетворительно выполняется. Отметим, что неравномерное распределение регистрируемого излучения по оси отсчета z не приводит к появлению дополнительной погрешности измерений. Фактически подобный краевой эффект происходит также при введении коллиматора Соллера с целью ограничения угловой расходимости в направлении, перпендикулярном измерительной плоскости. При совместном использовании решетчатого к.м. и коллиматора Соллера для минимизации потери интенсивности необходимо, чтобы периоды прорезей в к.м. и пластин в коллиматоре совпадали. При этом для проходящего и отраженного от к.м. пучков пластины коллиматора должны быть сдвинуты на $d/2$.

Замена монокристалла искусственной многослойной структурой, в которой диэлектрическая проницаемость среды изменяется по периодическому закону, позволяет получить в мягкой области спектра пиковый коэффициент отражения >0.5 и одновременно выделять узкую полосу спектра [4, 5]. Использование такой структуры не требует каких-либо принципиальных изменений формы решетчатого к.м. Необходимо выполнение лишь общих требований, предъявляемых к многослойным рентгеновским зеркалам, заключающихся в том, чтобы отклонения от заданной

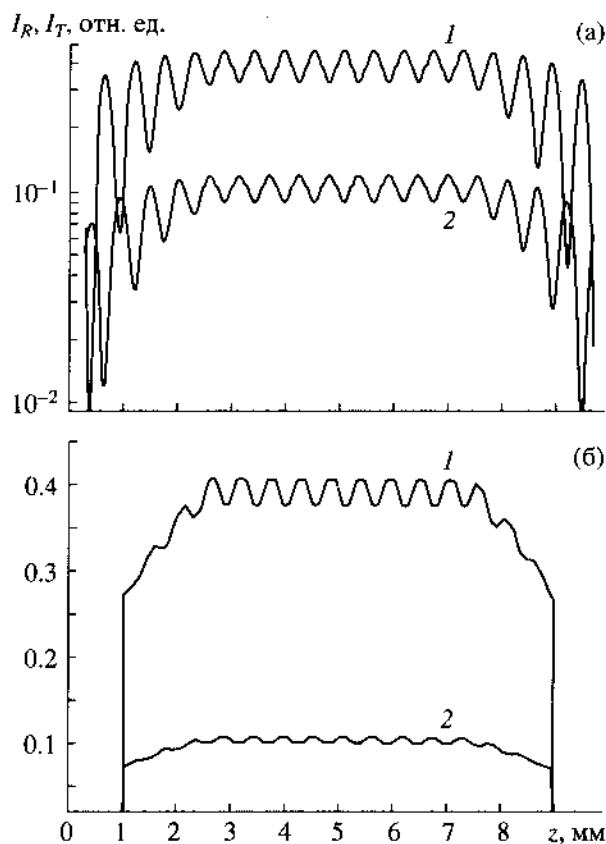


Рис. 6. Расчетные зависимости интенсивности прошедшего (1) и дифракционно отраженного (2) излучений от положения сканирующей диафрагмы для решетчатого к.м. с локальным коэффициентом отражения 0.2: а – $L_3 = 14$ мм, б – $L_3 = 47$ мм.

формы отражающей поверхности и закона изменения диэлектрической проницаемости по глубине, а также параметры шероховатости границ раздела находились в допустимых пределах.

Таким образом, предложенный тип полупрозрачных монохроматоров может найти применение в измерительных рентгеновских устройствах, в которых целесообразно использование нескольких рабочих длин волн. Они могут быть также применены для мониторинга интенсивности рентгеновского излучения и, в особенности, пучков импульсных рентгеновских лазеров [6, 7], поскольку стандартная схема для квазиизотропного источника излучения с отводом части пучка в боковой канал в данном случае непригодна.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы “Интеграция” (проект № А0 133).

Авторы выражают признательность Ю.В. Коростелину за обработку монокристаллов кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турьянский А.Г., Пиршин И.В. // ПТЭ. 1998. № 5. С. 118.
2. Турьянский А.Г., Виноградов А.В., Пиршин И.В. // ПТЭ. 1999. № 1. С. 105.
3. Feshchenko R.M., Pirshin I.V., Touryanski A.G., Vиноградов A.V. // J. of Russian Laser Research. 1999. V. 20. № 2. P. 136.
4. Loevezijn P. van, Schlatman R., Verhoeven J. et al. // Appl. Opt. 1996. V. 35. № 19. P. 3614.
5. Sammer A., Kratsev K., Andre J.-M. et al. // Rev. Scient. Instrum. 1997. V. 68. № 8. P. 2969.
6. Benware B.R., Macchietto C.D., Moreno C.H., Rocca J.J. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 5804.
7. Marconi M.C., Chilla J.L.A., Moreno C.H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 2799.