

ПЛОСКИЙ ВОЛНОВОД ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Многие исследования в физике, химии, биологии опираются на взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Более 20 лет назад был открыт метод формирования и транспортировки излучения с помощью воздушных щелевых структур наноразмерной ширины. Изменение их параметров ведет к повороту механизма транспортировки от многократного полного отражения к волноводно-резонансному.

Вопрос: «Как перейти от количественного тестирования вещества на микроуровне к объективному анализу свойств и параметров его нанообъемов?» – определил развитие инструментальных методов диагностики. Они, прежде всего, созданы на основе устройств, способных формировать зонды с наноразмерным сечением и обеспечивать условия возбуждения пространственной области исследуемого материала, соответствующей сечению зонда. При выборе метода зондирования, естественно, внимание обращается на его многофункциональность. С этой точки зрения наиболее эффективным зондом для нанодиагностики материалов может быть пучок рентгеновского излучения. Однако задача формирования потоков рентгеновских лучей наноразмерного сечения пока не решена.

Появление нового устройства рентгеновской оптики – плоского рентгеновского волновода-резонатора (ПРВР) [1] – внесло некоторый оптимизм. Это относительно простое по конструкции устройство, созданное на базе волноводно-резонансного механизма распространения потока квази-монохроматического (характеристического) рентгеновского излучения, как оказалось, подходит для транспортировки жесткой электромагнитной радиации узкими плоскими протяженными щелевыми зазорами [2]. Толчком к разработке этого механизма послужила предпринятая нами попытка [3] адекватно объяснить высокую радиационно-транспортную

эффективность так называемых «бесщелевых» рентгеновских коллиматоров. Впервые экспериментально это было обнаружено группой проф. Т.А. Мингазина [4]. Явление полного внешнего отражения (ПВО) такого потока на материальном интерфейсе было открытого в 1923 году проф. А. Комптоном [5]. И в значительной степени на его следствиях построена концепция механизма волноводно-резонансного распространения потока рентгеновских лучей (или, другими словами, механизма радиационной сверхтекучести). Поэтому необходимо остановиться на некоторых особенностях этого явления.

Первое сообщение о том, что в локальной области ПВО потока экспериментально зафиксировано интерференционное поле стоячей рентгеновской волны, появилась в работе [6]. В отличие от упрощенной схемы ее эксперимента мы создали свою, принимая во внимание ряд фундаментальных обстоятельств. На рис.1 показана геометрическая схема, отражающая некоторые особенности явления ПВО. Слева – схема образования интерференционного поля рентгеновской стоячей волны при полном внешнем отражении потока рентгеновского излучения. Справа – эюра, характеризующая интенсивность стоячей волны. Во-первых, в этой схеме учтено ограничение размера интерференционной области в вакууме над интерфейсом – с одной стороны, шириной падающего рентгеновского пучка, а с другой – его

длиной когерентности. Длина когерентности L – это фундаментальное свойство потока квазимонохроматического излучения. По определению: $L = \lambda_0^2 / \Delta\lambda$, где λ_0 – средняя длина волны излучения, а $\Delta\lambda$ – степень его немонахроматичности. Во-вторых, в силу принципа непрерывности, это интерференционное поле следует рассматривать как проникающее в объем материала рефлектора. Его интенсивность промодулирована экспонентой. Надо учесть, что возбуждается весь объем рефлектора, независимо от степени локальности взаимодействия потока радиации с интерфейсом. В рассмотрение включен тот фактор, что на практике мы имеем дело с протяженным источником рентгеновских лучей, а не идеальную монохроматическую плоскую волну. Поэтому при обсуждении возникновения интерференционной зоны стоячей рентгеновской волны следует иметь в виду пространственную когерентность излучения [7]. Это крайне важно, ведь если рассматривать полное внешнее отражение единичного рентгеновского фотона, то появление области интерференции оказывается в принципе невозможным вследствие существования так называемого сдвига Гусса-Хансен [8], характерного для любых волновых процессов [9–11]. Однако, поскольку факт существ-

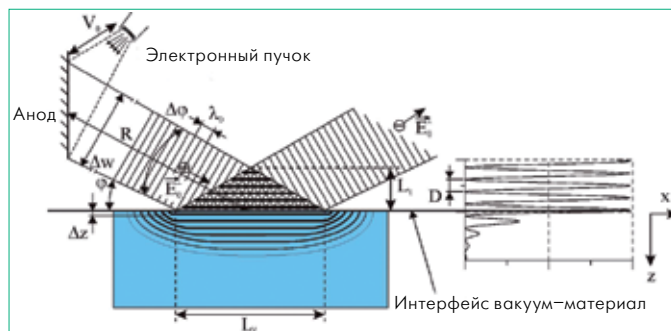


Рис.1 Схема образования интерференционного поля рентгеновской стоячей волны: V_0 – дистанция между анодом и электронной пушкой; w – ширина проекции анода; R – расстояние между анодом и рефлектором; Φ – угол падения потока; $\Delta\Phi$ – угловая характеристика расходимости потока; L_1 и L_2 – поперечный и продольный размеры поля интерференции; D – период стоячей волны ($D \gg \lambda_0$), Δz – глубина проникновения при ПВО, E_0 – вектор поля падающего излучения, E_R – вектор поля отраженного излучения

ования интерференционного поля стоячей рентгеновской волны экспериментально фиксируется и, более того, явился основой для создания реального диагностического метода на базе стоячих рентгеновских волн [12], следует признать, что его существование является следствием проявления

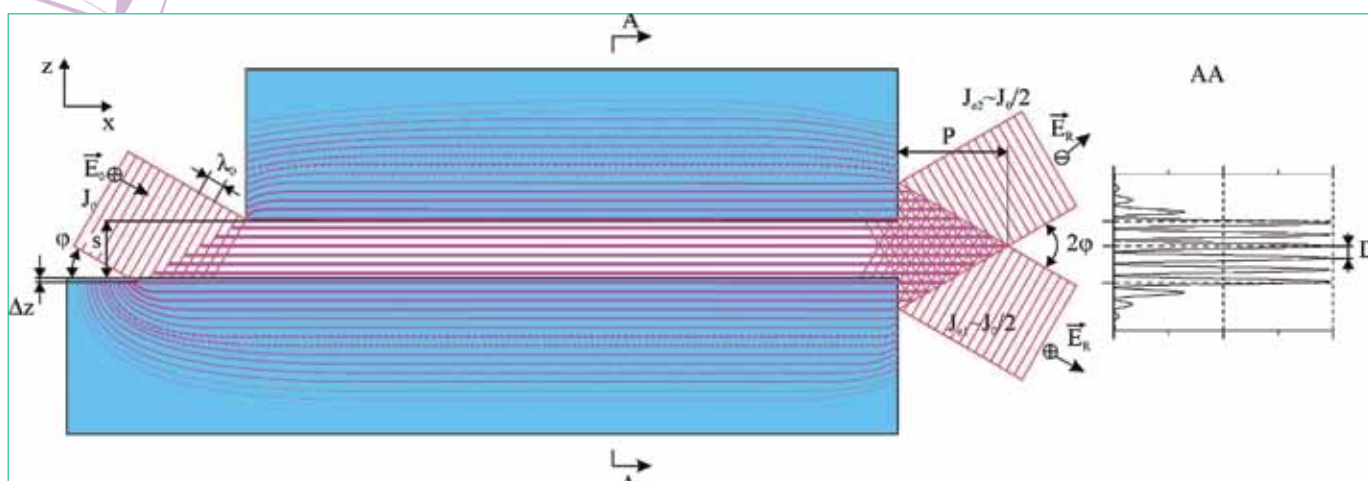


Рис.2 Схема образования однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны в плоском узком щелевом зазоре: J_0 и J_{e1} , J_{e2} – интенсивности захваченного волноводом и исходящего потоков, λ_0 – средняя длина волны

пространственной когерентности. Концепция механизма волноводно-резонансного распространения в значительной степени опирается на отмеченные выше особенности ПВО потока рентгеновских лучей.

При параллельном расположении двух плоских материальных рефлекторов поток рентгеновского излучения, попадающий в образованный ими щелевой зазор, начнет испытывать многократное последовательное полное отражение. При этом, если расстояние между рефлекторами оказывается больше длины когерентности захваченного в зазор квази-монохроматического излучения, то будет реализован механизм многократного полного отражения. Его характеризует появление в зазоре большого количества локальных областей интерференционного поля стоячей рентгеновской волны. В то же время ситуация кардинально изменится, если расстояние между рефлекторами станет меньше длины когерентности этого излучения. В этом случае локальные области интерференции сольются, и в щелевом зазоре возникнет

однородное интерференционное поле стоячей рентгеновской волны [13]. На рис.2 представлена схема образования интерференционного поля стоячей рентгеновской волны в плоском узком щелевом зазоре при захвате им рентгеновского потока с интенсивностью J_0 , средней длины волны λ_0 и степенью монохроматичности $\Delta\lambda$. Созданы условия, когда ширина щели S_0 меньше длины когерентности L , а параметр выпячивания интерференционного поля из зазора $P = \lambda_0^3 / 8\Delta\lambda^2$. Справа на рис.2 показана эпюра распределения интенсивности стоячей волны в произвольном сечении А-А. Появление такой конфигурации интерференционного поля говорит об изменении механизма транспортировки потока рентгеновского радиации с многократного полного отражения на волноводно-резонансное распространение. Дальнейшее уменьшение расстояния не меняет природы движения рентгеновского потока в щелевом зазоре между рефлекторами. Однако снижение ширины зазора имеет предел, ограничивающий возможность волноводно-резонанс-

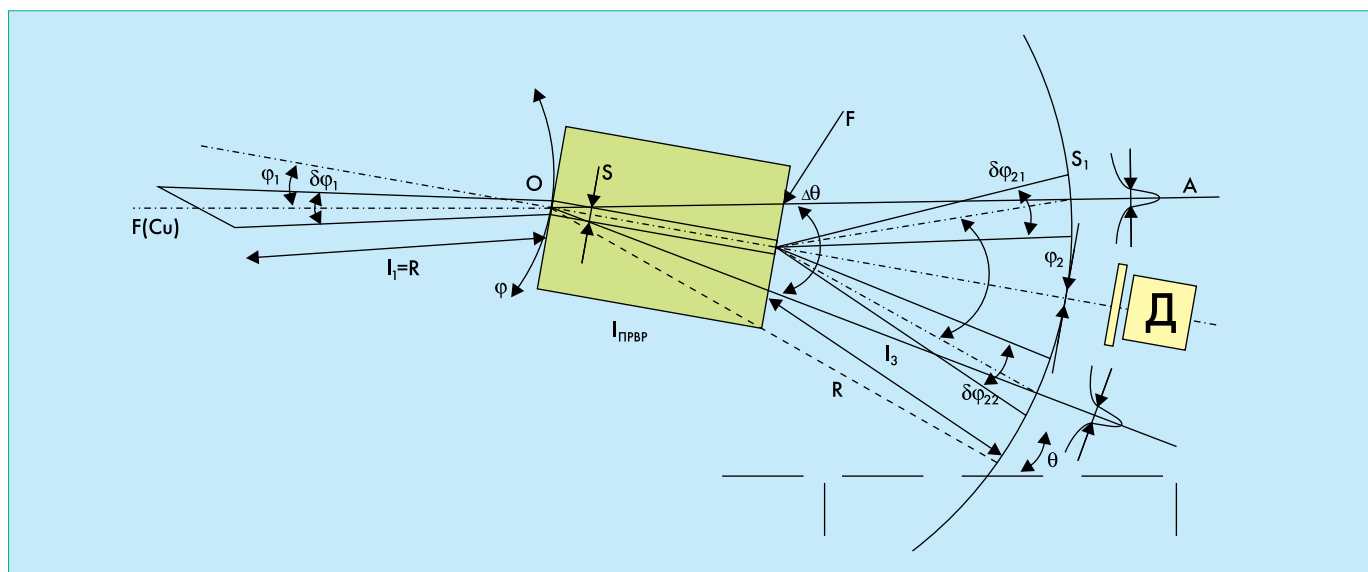


Рис.3 Неосевое падение малорасходящегося рентгеновского пучка. Геометрическая схема измерений: $\delta\varphi_1$ – угол раствора первичного пучка, φ_1 – угол падения первичного пучка, φ_2 – угловое расстояние между пиками, $\delta\varphi_{21}$ и $\delta\varphi_{22}$ – углы раствора пиков, $\delta\theta_{21}$ и $\delta\theta_{22}$ – углы расходимости пучков

ного распространения потока. Это связано с условием соответствия ширины зазора хотя бы одному периоду рентгеновской стоячей волны. Как верхний предел размера ширины плоского щелевого зазора связан с длиной когерентности, так и нижний предел связан с возможностью распространения потока рентгеновских лучей. Оба запрета зависят от параметров материала рефлекторов и типа квазимонохроматического излучения. Например, для излучения $\text{CuK}\alpha\beta$ данный механизм реализуется в щелевом зазоре, образованном кварцевыми рефлекторами, в диапазоне размеров 20–195 нанометров. С учетом пространственного размытия поверхностного потенциала рефлекторов и принятия в расчет глубины проникновения излучения, нижний предел указанного интервала может оказываться сдвинутым относительно расчетной величины в сторону меньших размеров на 20–30% [14]. Указанный интервал ширины протяженных щелевых зазоров реализован в конструкциях плоских рентгеновских волноводов-резонаторов. При этом существенно, что малорасходящийся рентгеновский поток, направленный вдоль оси этого устройства, не будет захвачен в его щелевой зазор. Однако, если этот поток направить под некоторым небольшим углом к этой оси (не превышающим Θ_c – критический угол ПВО для материала рефлекторов ПРВР), он будет захвачен волноводом-резонатором. А на его выходе будет сформирован пучок, состоящий из двух потоков, разделенных неко-

торым угловым интервалом. Именно такое пространственное распределение интенсивности было зарегистрировано нами экспериментально для малорасходящегося потока $\text{CuK}\alpha\beta$, падавшего на входной срез кварцевого ПРВР в широком интервале углов, не превосходивших критического значения ПВО для кварца [15]. Геометрическая схема измерений пространственного распределения интенсивности в пучке рентгеновских лучей представлена на рис.3. Пучок сформирован ПРВР при неосевом падении на его входной срез потока, имеющего малую расходимость. Геометрические параметры установки: $R=200$ мм, $l_3=100$ мм, $S_1=0,05$ мм, коэффициент ослабления фильтра А составил $K_A=200$, режим измерений $U=20$ кВ, $I=12$ мА. Параметры распределения не противостоят следствию модели волноводно-резонансного распространения потока рентгеновских лучей в щелевом зазоре ПРВР при его неосевом падении на входной срез волноводно-резонатора (рис.2). Интенсивности компонент двухпикового пространственного распределения J_{e1} и J_{e2} сформированного пучка приблизительно равны между собой и составляют половину интенсивности падающего на входной срез ПРВР потока (J_0). Угловое расстояние между компонентами распределения равняется удвоенному значению угла отклонения падающего потока от оси волноводно-резонатора.

Измерение пространственного распределения интенсивности от вклада квазимонохроматической компоненты в

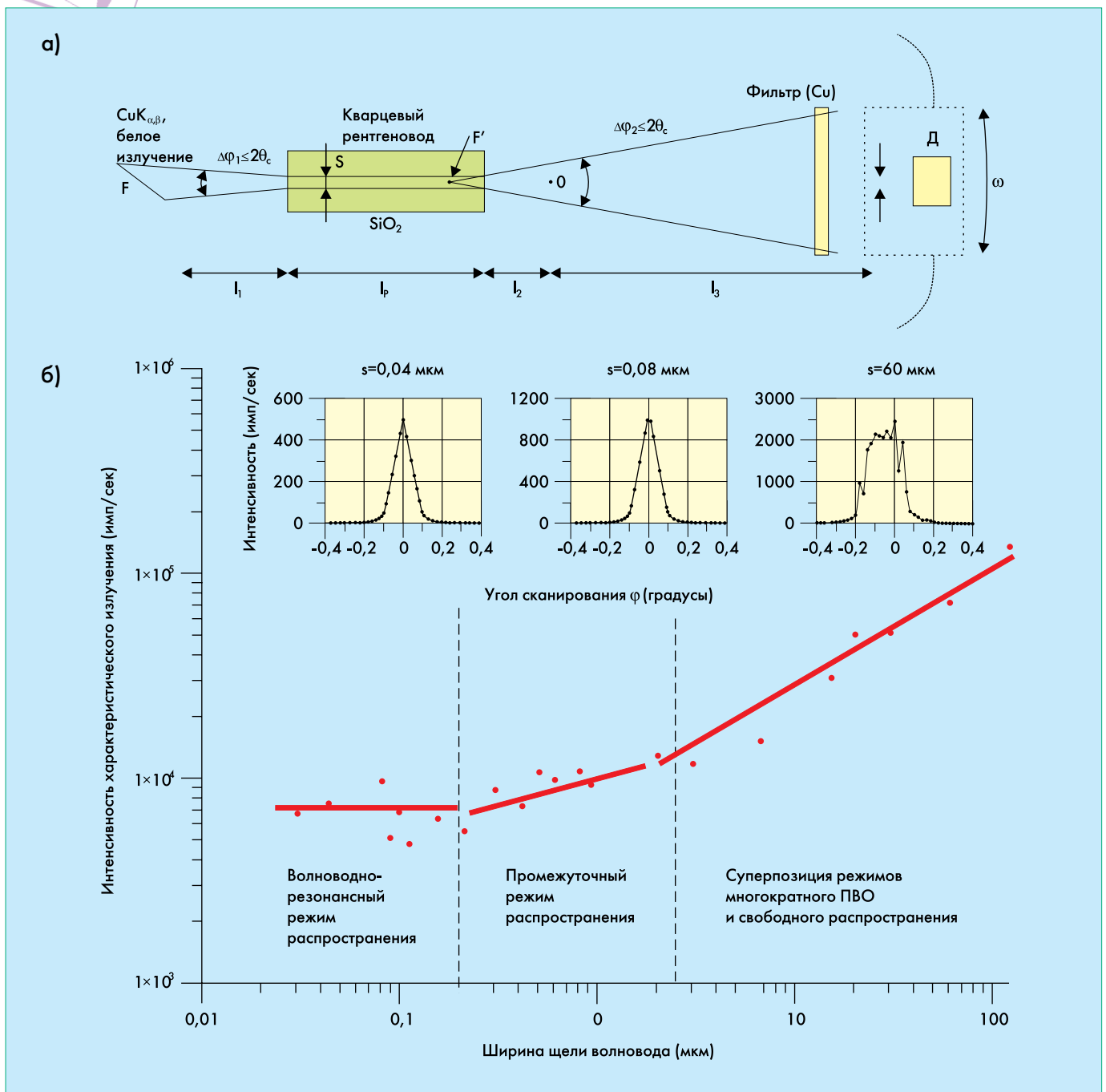


Рис. 4 Измерение пространственного распределения интенсивности вклада квазимонохроматической компоненты в пучке рентгеновского излучения: а) геометрическая схема измерений при варьировании ширины щелевого зазора: θ_c – критический угол, $S_2 = 0,1$ мм – щель стандартная; б) зависимость интегральной интенсивности компоненты $\text{CuK}_{\alpha\beta}$ в пучке от ширины щелевого зазора. Условия эксперимента: $l_1 = 75$ мм, $l_p = 100$ мм, $l_2 = 60$ мм, $l_3 = 400$ мм, $K_A = 200$, режим измерений $U = 20$ кэВ, $I = 10$ мА (БСВ-24 (Cu))

пучок рентгеновского излучения провели по схеме рис.4а. При этом варьировали ширину щелевого зазора. Убедились, что интегральная интенсивность пучка, формируемого ПРВР, не зависит от ширины щели. Это показывает анализ диаграммы зависимости интегральной интенсивности квазимонохроматической компоненты $\text{CuK}_{\alpha\beta}$ пучка от ширины этого зазора (рис. 4б). На рисунке показаны пространственные распределения, выполненные при условиях: $l_1 = 75$ мм, $l_p = 100$ мм, $l_2 = 60$ мм, $l_3 = 400$ мм, $K_A = 200$, режим измерений $U = 20$ кэВ, $I = 10$ мА (БСВ-24 (Cu)).

Интенсивность регистрируется на выходе плоского протяженного щелевого зазора, который образован полированными кварцевыми рефлекторами. Диаграмма позволяет выделить две размерные области, соответствующие реализации волноводно-резонансного распространения потока излучения и его многократного полного отражения. Также появляется интервал постепенной смены механизма распространения потока. В верхней части рисунка представлена геометрическая схема, лежащая в основе выполнения экспериментальных измерений, и экспериментально зарегистрированные пространствен-

ные распределения интенсивности $\text{CuK}\alpha_{\text{св}}$. Они характерны для всех трех выделенных размерных областей. Распределения, соответствующие волноводно-резонансной и промежуточной областям, можно рассматривать как однокомпонентные. Форма огибающих их кривых близка к гауссову распределению. Очевиден многокомпонентный характер области, где наблюдается суперпозиция обоих механизмов распространения потока, свободного и многократного полного отражения. Такая форма ожидаема, так как рентгеновский источник (трубка типа БСВ-24 (Cu)), используемый в измерениях, был двухфокальным. То есть центральная часть фокуса трубки шириной около 0,05 мм не давала вклада в излучаемый поток из-за прогара. В то же время проявилась интересная практическая особенность устройств, функционирующих на базе механизма волноводно-резонансного распространения потоков рентгеновской радиации. Она существенна для его практического применения в дифрактометрии. Оказалось, что форма распределений, соответствующих волноводно-резонансной области, нивелировала наличие двухфокальности источника.

Другим важным для практического использования свойством является способность ПРВР понижать вклад нехарактеристической компоненты в формируемый им пучок. Это заметно при сравнении ее интенсивности с величиной компоненты в свободно распространяющемся потоке. Дело в том,

что белое рентгеновское излучение не может быть охарактеризовано степенью монохроматичности $\Delta\lambda$, а следовательно, и параметром длины когерентности. Поэтому реализация волноводно-резонансного механизма транспортировки потока рентгеновских лучей приводит к ослаблению интенсивности немонахроматической компоненты в сформированном на выходе ПРВР пучке. Эксперименты показали, что это действительно так. На рис.5 представлены дифрактограммы монокристалла SiO_2 . Дифрагирующий пучок сформирован с помощью одиночной обрезавшей щели шириной 0.1 мм (рис.5а) и при использовании кварцевого ПРВР (рис.5б). Сравнение этих дифрактограмм показывает, что реальная интенсивность белой компоненты пучка, сформированного ПРВР с шириной щелевого зазора $S=0,1$ мкм, существенно ниже, чем в свободно распространяющемся потоке рентгеновской радиации, прошедшей через обрезавшую щель. При этом важно отметить, что ослабление претерпевает не только жесткая часть спектра, как это имеет место при формировании потока с помощью зеркал ПВО, а весь спектр белого излучения. (Обе дифрактограммы получены в условиях одинакового режима работы источника БСВ-24 (Cu) $U=20$ кэВ, $I=10$ мА.) Если необходимо максимально подавить вклад белой компоненты, то следует применять ПРВР с минимально возможной шириной щелевого зазора.

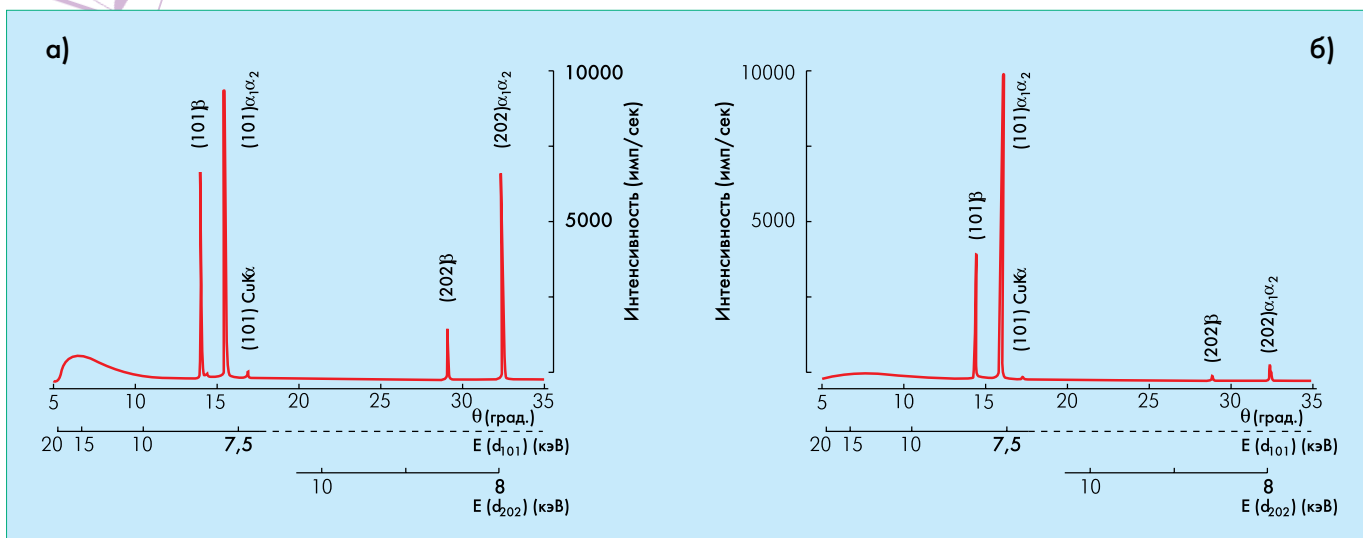


Рис. 5 Диффрактограммы монокристалла SiO₂ (101). Условия получения: диффрактометр HZG-4, источник БСВ-27 (Cu), режим U=20 кэВ, I=5 мА: а) стандартная обрезаящая монощель S1=0,1 мм ; б) кварцевым волноводом-резонатором с щелевым зазором S=0,1 мкм

Выше было сказано, что для протяженных щелевых зазоров наноразмерного диапазона характерен механизм волноводно-резонансного распространения потока рентгеновских лучей. Именно этот факт определяет главное достоинство плоского рентгеновского волновода-резонатора – способность формировать потоки рентгеновского излучения наноразмерной ширины. К сожалению, волноводы-резонаторы простейшей конструкции имеют недостаток. Это заметная расходимость формируемого ими пучка, которая сводит на нет важное свойство ПРВР – формирование наноразмерного пучка. Об этом мы поговорим в следующей публикации. Тогда мы обсудим другие характеристики устройства, полезные для практического использования.

Авторы благодарны академику Ю.А.Золотову, д.т.н. А.Г.Ревенко и проф. И. Каваю за интерес к результатам, представленным в работе, а также проф. Р. Ван Гриекену за внимание и моральную поддержку исследований по волноводно-резонансному распространению рентгеновского излучения. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 06-08-01075, 06-02-17406 и 09-06-00952).

ЛИТЕРАТУРА

1. Egorov V.K., Egorov E.V. Planar waveguide-resonator: a new device for X-ray optics. – X-ray Spectrometry. 2004, V33.
2. Egorov V.K., Egorov E.V. The experimental background and the model description for the waveguide-resonance propagation of X-ray radiation through a planar narrow extended slit (Review). – Spectrochimica Acta. B59. 2004.
3. Egorov V.K., Egorov E.V. Discovery of a planar waveguide for an X-ray radiation. – Los Alamos e-print archive: <http://arxiv.org/abs/physics/0101059> 2001.
4. Лейкин В.Н., Мингазин Т.А., Зеленов В.И. Формирование рентгеновских пучков бесщелевым коллиматором. – ПТЭ. 1984, №6.

5. Compton A.H. The total reflection of X-ray. – Philos. Mag. V45, 1923.
6. Bedzyk M., Bommarito G., Schildkraut J. X-ray standing waves at a reflecting mirror surface. – Phys. Rev. Lett, 1989, V69.
7. Mandel L., Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge Univ. Press: Cambridge. 1995.
8. Von F. Goos, Hanchen H. Ein neuer und fundamentale versuch zur totalreflektion. – Ann. Physik. Folge 6. Band 1. 1947. Von C.V. Fragstein. Zur seinerversetzung des totalreflektierten lichtstrahles. – Ann. Physik. Folge 6. Band 4. 1949.
9. Lotsch H.K.V. Reflection and refraction of a beam of light at a plane interface. – Opt. Soc. Am. 1968, V58(4).
10. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Наука: М. 1973.
11. Ковальчук М.В., Кон В.Г. Рентгеновские стоячие волны – новый метод исследования структуры кристаллов. – УФН. T149(1). 1986. Egorov V.K., Egorov E.V. Background of X-ray nanophotonics based on the planar air waveguide-resonator. – X-ray Spectrometry, 2007, V36.
12. Егоров Е.К., Егоров В.К. Экспериментальные исследования и модель формирования рентгеновских пучков наноразмерного диапазона. – Поверхность (рентг. синх. и нейтр. исследования), 2005, №12.
13. Егоров Е.К., Егоров В.К. Условия реализации радиационной сверхтекучести и некоторые свойства пучков, сформированных плоскими рентгеновскими волноводами-резонаторами. – Поверхность (рентг. синх. и нейтр. исследования), 2007, №1.
14. Егоров В.К., Зуев А.П., Малюков Б.А. Диагностика загрязнения поверхности кремниевых пластин методом РФА ПВО. – Известия ВУЗов. Цветная металлургия, 1997, №5.
15. Егоров В.К., Егоров Е.В. Условия реализации радиационной сверхтекучести и некоторые свойства пучков, сформированных плоскими рентгеновскими волноводами-резонаторами. – Поверхность, 2007, №1.