УДК 621.384.6

ЭФФЕКТЫ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МИКРОФОКУСНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

© 2021 г. М. М. Рычков^{а, *}, В. В. Каплин^а, В. А. Смолянский^{а, **}

^аНациональный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050 Россия *e-mail: rychkov@tpu.ru **e-mail: vsmol@tpu.ru Поступила в редакцию 04.06.2020 г. После доработки 26.09.2020 г. Принята к публикации 30.09.2020 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования скользящего взаимодействия микрофокусного тормозного излучения с краевыми поверхностями пластиковых и стальных пластин. Для экспериментов использовалось жесткое тормозное излучение, генерированное при скользящем падении внутреннего пучка электронов бетатрона Б-18 с энергией 18 МэВ на поверхность тонкой танталовой фольги толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм вдоль пучка электронов. Мишень устанавливалась вдоль направления электронного пучка с помощью внутреннего гониометра. Поэтому линейный микрофокус излучения, испущенного вдоль Та-мишени, был шириной 13 мкм. При использовании генерированного излучения получены увеличенные изображения пластиковых пластин толщиной 4 и 10 мм, стальных пластин толщиной 10, 5 и 0.9 мм и свинцовых фольг толщиной 25 мкм. Показано, что качественные изображения объектов реализуются за счет малого горизонтального размера источника излучения, когда краевые поверхности пластин ориентируются под скользящими углами к оси конуса излучения. Обсуждается возможное участие в формировании изображений краевого фазового контраста, который определяется рефракцией излучения на боковых гранях пластин. Проведено сравнение результатов с результатами по краевому контрасту, полученными при использовании микрофокусного тормозного излучения из Si-мишени толщиной 8 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов бетатрона Б-18.

Ключевые слова: микрофокусное тормозное излучение, скользящее взаимодействие излучения с поверхностями, краевые абсорбционный и фазовый контрасты. **DOI:** 10.31857/S1028096021030122

ВВЕДЕНИЕ

При использовании тонких кремниевых и танталовых мишеней в бетатроне Б-18 с энергией электронов 18 МэВ было показано, что, если тонкую мишень с толщиной, гораздо меньшей диаметра пучка электронов (1.4 мм), устанавливают вдоль пучка электронов под скользящим углом, то излучение в направлении вдоль поверхности мишени имеет узкий линейный микро-фокус, ширина которого равна толщине мишени [1–5]. Отметим, что использование узких мишеней в циклических ускорителях для генерации тормозного излучения с фокусом меньшим, чем диаметр пучка электронов, было рассмотрено ранее в [6, 7].

При использовании Si-мишеней толщиной 50 и 8 мкм и длиной вдоль пучка электронов 4 мм было подробно исследовано формирование увеличенных изображений проволочных элементов эталона Duplex IQI [8]. Показано, что микрофокус источника излучения обеспечивает высококонтрастные радиографические изображения пары Pt-проволок эталона диаметром 50 мкм. Исследования зависимости контрастности изображений от положения эталона в конусе излучения показали изменение эффективного горизонтального размера такого протяженного вдоль пучка электронов источника излучения, что объясняется зависимостью проекции источника от направления эмиссии излучения относительно плоскости мишени.

В работе [5] также было показано, что для микрофокусного тормозного излучения бетатрона с Si-мишенью толщиной 8 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов, реализуется краевой фазовый контраст, который в случае полихроматического тормозного излучения определяется эффектом преломления излучения на краевой поверхности пластины [9].

В [10] краевой рефракционный контраст был исследован с использованием тормозного излучения, генерированного в микромишенях, установленных в миниатюрном синхротроне MIR-RORCLE-6X с энергией электронов 6 МэВ. Было показано, что эффект преломления излучения на краевой поверхности образцов в виде пластиковых пластин и стержней определяет картину взаимодействия излучения с поверхностями. Из-за малой толщины мишеней вдоль пучка электронов основной вклад вносило излучение с энергией фотонов 10–50 кэВ, которое было значительным в спектре генерированного излучения и доминировало в формировании радиографических изображений объектов.

В настоящее время эффекты, связанные с фазой рентгеновских волн, широко используются для получения увеличенных изображений малых объектов с усиленным контрастом. Как было показано в первых работах, для этого могут использоваться синхротронное излучение [11], излучение рентгеновских трубок [12] и излучение фемтосекундной лазерной плазмы [13, 14].

В работе [15] были представлены результаты по генерации микрофокусного жесткого тормозного излучения при скользящем падении электронов пучка бетатрона с энергией 18 МэВ на поверхность танталовой фольги толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм вдоль пучка электронов. Была показана значительная зависимость угловых распределений жесткого тормозного излучения от ориентации тонкой мишени, что не наблюдается при нормальном падении электронов на ее поверхность.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по исследованию скользящего взаимодействия микрофокусного жесткого тормозного излучения, генерированного электронами с энергией 18 МэВ в бетатронной Та-мишени, с краевыми поверхностями пластиковых пластин толшиной 10 и 4 мм, стальных пластин толщиной 10, 5 и 0.9 мм и свинцовых фольг толщиной 25 мкм. Представленные результаты (когда мягкая часть спектра излучения подавлена поглощением в тяжелом материале Та-мишени) показаны в сравнении с результатами, полученными при использовании микрофокусного излучения, генерированного в Si-мишени, когда излучение мягкой части спектра не поглощалось в более легком материале мишени и (в основном) формировало изображение объекта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты были выполнены на установке, которая использовалась ранее для подобных ис-

следований [1-5, 15]. Ускоренный пучок электронов бетатрона диаметром около $D_e = 1.4$ мм, смещенный действием обмотки сброса на установленную во внутреннем гониометре Та-мишень толщиной t = 13 мкм, высотой H = 10 мм и длиной T = 2.5 мм вдоль пучка электронов, генерировал тормозное излучение с линейным микрофокусом шириной $S_H = 13$ мкм в направлении вдоль плоскости мишени. Ширина микрофокуса источника S_H возрастает как $S_H = t + T \times |\dot{\theta}_H|$ при увеличении угла испускания излучения θ_H относительно плоскости мишени вслелствие увеличения проекции источника в этом направления. Поэтому исследуемые краевые поверхности стальных пластин, установленных во внешнем гониометре перпендикулярно пучку излучения, ориентировались вдоль проекции плоскости Та-мишени и вдоль оси конуса излучения. Объекты исследования располагались во внешнем гониометре на расстоянии $L_1 = 46$ см от мишени и представляли собой пластиковые пластины толщиной 10 и 4 мм. стальные пластины толшиной 10, 5, и 0.9 мм и свинцовые фольги толщиной 25 мкм. Использовались дополнительные стальные пластины толщиной 15, 35 или 55 мм, которые устанавливались за исследуемыми объектами и служили поглотителями излучения мягкой части спектра.

Генерированное излучение выходило через окно экспериментальной камеры, закрытое лавсановой пленкой толщиной 50 мкм. Для получения фотографий угловых распределений излучения, рассеянного краями стальных пластин, использовалась регистрирующая излучение рентгеновская пленка AGFA NDT D4 PbVacuPac, установленная на расстоянии $L_2 = 114$ см от мишени. Полученные фотографии пучков рассеянного излучения обрабатывали на сканере для последующего анализа.

На рис. 1а показано положение пластины в пучке излучения. Фотография углового распределения излучения, генерированного электронами с энергией 18 МэВ, была получена при угле ориентации плоскости Та-мишени $\theta_0 = 0^\circ$ относительно направления пучка электронов. При $\theta_0 = 0^\circ$, т.е. при расположении мишени вдоль направления пучка электронов бетатрона, электроны попадают не только на торец мишени шириной 13 мкм, но и на ее поверхность (из-за бетатронных колебаний электронов). Угловое распределение генерированного тормозного излучения симметричное, но разделено светлой полосой, которая показывает направление плоскости мишени и определяется частичным поглощением мягкой части генерированного излучения в самой мишени. Край пластины располагался вдоль середины светлой размытой полосы, что соответствует линейному микрофокусу излучения с горизонтальным размером 13 мкм. Внешним гониометром



Рис. 1. Схема расположения пластины в пучке излучения (а); упрощенная схема взаимодействия пучка микрофокусного (1) излучения с краем пластины (2) с образованием областей повышенного (3) и пониженного (4) почернения на радиографической пленке (5) за счет эффекта рефракции (6); схема геометрического размытия (1-3) краевого изображения из-за размера S_H источника излучения (в); схема геометрического размытия (1-6) краевого изображения из-за наклона пластины (Γ).

можно было дополнительно ориентировать боковую поверхность пластины вдоль направления оси конуса излучения с шагом около 0.02° (рис. 1б), чтобы получить снимок с наиболее четким краевым изображением.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а представлен фрагмент фотографии распределения излучения, которое взаимодействовало с краем эталонного прибора Duplex IQI [8], состоящего из пластиковой пластины толщиной 4 мм и ряда пар тонких W и Pt-проволок внутри. Прибор предназначен для измерения размеров фокусов источников рентгеновского излучения и определения относительной чувствительности радиографического метода определения малого объекта за толстой преградой, то есть определения качества радиографических снимков для неразрушающего контроля в различных условиях. Фотография была получена при использовании тормозного излучения, генерируемого в узкой (8 мкм) Si-мишени [5] длиной 4 мм вдоль пучка электронов. Прибор был расположен в гониометре перпендикулярно к пучку излучения на расстоянии $L_1 = 38$ см от мишени бетатрона, а его край – вдоль направления плоскости мишени. Фактически, данная фотография —

радиографический снимок края пластикового корпуса прибора Duplex IQI, полученный с увеличением $K = L_2/L_1 = 3$. Снимок демонстрирует высокий абсорбционный контраст изображения пары 50 мкм Pt-проволок прибора вследствие (8 мкм) горизонтального размера источника излучения. Изображение верхнего края прибора, который перпендикулярен светлой полосе (направление проекции мишени) на снимке углового распределения излучения (как на рис. 1а для Та-мишени), размыто из-за большого вертикального размера источника излучения, который составляет около 1.4 мм. Однако наблюдается сложный контраст в изображении края прибора Duplex IQI, боковая поверхность которого была ориентирована вдоль направления излучения с точностью около 0.02°. Дополнительно увеличенный снимок (рис. 2б) края прибора демонстрирует тонкую структуру краевого изображения, состоящую из узких темной и светлой полос. Полученное изображение – типичная картина для рефракционного контраста на резкой границе раздела двух сред с различной диэлектрической проницаемостью (dielectric permittivity), которая обусловлена эффектом преломления полихроматического излучения на поверхности раздела сред [9].



Рис. 2. Изображение угла прибора Duplex IQI, полученное с увеличением $\times 3$ и с использованием тормозного излучения, генерированного в узкой (8 мкм) Siмишени (а); дополнительно увеличенный участок (б) снимка (а); денситограмма изображения (а) вдоль линии *L* (в).

На рис. 16 приведена упрощенная схема взаимодействия пучка микрофокусного 1 излучения с краем пластины 2 с образованием областей повышенного 3 и пониженного 4 почернения на радиографической пленке 5 за счет эффекта рефракции. Преломленный пучок излучения складывается с излучением, прошедшим рядом с краем пластины, что формирует узкие области повышенного и пониженного почернения по обе стороны изображения края на фотографии. Это обеспечивает повышенный контраст изображения. Отметим, что картина контраста подобна той, которая наблюдалась в работе [10], где рефракционный контраст был исследован с использованием тормозного излучения микрофокусного источника, созданного на базе компактного синхротрона.

На рис. 2в приведен профиль плотности почернения (денситограмма) на изображении, измеренный вдоль горизонтальной линии *L*, которая перпендикулярна изображению (рис. 2а) края пластикового корпуса прибора Duplex IQI. Денситограмма демонстрирует резкие максимум и минимум почернения, которые соответствуют темной и светлой полосам на изображении края прибора Duplex IQI. Угловое расстояние между светлой и темной полосами составляет около $\theta_r =$ = 4.3 × 10⁻⁴ радиан или 0.025°. Так как формирование картины определяется рефракцией излучения, то можно приближенно предположить, что угол θ_r приближенно соответствует критическому углу полного внешнего отражения фотонов θ_{cr} определенной энергии $E_{\gamma} = E_{\gamma m}$, которые вносят основной вклад в формирование наблюдаемой картины. Так как $\theta_{cr} = E_{pl}/E_{\gamma}$, где E_{pl} – энергия плазмона материала объекта исследования, получаем $E_{\gamma m} = E_{pl}/\theta_r = 56$ кэВ для пластиковой пластины с $E_{pl} = 24$ эВ, если угол θ_p наклона краевой поверхности относительно излучения $\theta_p \ll \theta_{cr}$. Если в реальности $\theta_p \approx \theta_{cr}$ и более, то величина $E_{\gamma m}$ будет гораздо меньше. Например, при $\theta_p = 0.02^{\circ}$ или 0.04° получим 43.3 и 29.3 кэВ соответственно.

Увеличение рефракционного контраста над абсорбционным определяется превышением отношения $R = r_{max}/r_{min}$ над отношением $A = a_{max}/a_{min}$, где r_{max} и r_{min} – значения плотности почернения пленки в максимуме и минимуме на денситограмме, а a_{max} и a_{min} – значения почернения рядом с максимумом и минимумом соответственно. В нашем случае, увеличение рефракционного контраста над абсорбционным контраста важно, когда необходимо определить на снимке край пластины за гораздо более толстой пластиной.

Для исследования скользящего взаимодействия с краевыми поверхностями более жесткого излучения (с $E_{\gamma} > 1$ МэВ, условно) было использовано тормозное излучение, генерированное в Тамишени толщиной 13 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов. Излучение из Та-мишени более жесткое, чем из Si мишени, из-за эффективного поглощения фотонов мягкой части спектра тяжелым танталом. При использовании излучения, генерированного электронами в Та-мишени, были проведены эксперименты с пластиковыми (плексиглас) пластинами толшиной 4 и 10 мм, стальными пластинами толщиной 10, 5 и 0.9 мм и свинцовыми фольгами толщиной 25 мкм. Такие исследования важны из-за способности жесткого микрофокусного излучения, генерированного в узкой Та-мишени, создавать высококонтрастные изображения деталей сложных исследуемых объектов из тяжелых материалов. Были также использованы дополнительные стальные пластины толщиной 15, 35 и 55 мм, которые служили поглотителями излучения, подавляющими долю тормозного излучения в мягкой области спектра. Кроме того, эти пластины моделировали ситуацию, когда краевые поверхности находятся в толще стальные объекты.

На рис. За представлен фрагмент фотографии распределения излучения, которое взаимодействовало с краем пластиковой пластины толщиной 4 мм. Пластина была расположена во внешнем гониометре перпендикулярно к пучку излучения на расстоянии 46 см от Та-мишени



Рис. 3. Изображение угла пластиковой пластины толщиной 4 мм, полученное с увеличением ×2.5 и с использованием тормозного излучения, генерированного в узкой (13 мкм) Та-мишени (а); дополнительно увеличенный участок (б) изображения (а).

бетатрона. Боковая поверхность пластины была ориентирована вдоль направления излучения с точностью около 0.02°. На фотографии, полученной при увеличении ×2.5, видно, что изображение верхнего края размыто из-за большого вертикального размера источника излучения (рис. 3а). На снимке не наблюдается сложного контраста при изображении края пластиковой пластины, как в случае эксперимента с излучением из Si-мишени. Дополнительное увеличение изображения края пластины (рис. 3б) не выявляет тонкую структуру, состоящую из узких темной и светлой полос, образованных эффектом рефракции излучения. Но можно предположить, что рефракционный контраст вносит вклад в формирование усиленного контраста изображение края пластины. Но этот вклад не наблюдается явно из-за малости угла преломления излучения, который, например, для энергии фотонов излучения E_{γ} = = 1.2 МэВ может составлять около 2 \times 10⁻⁵ радиан, что примерно в 21 раз меньшее, чем угол при $E_{\gamma} = 56 \text{ кэВ}$ (как в случае эксперимента с излучением из Si- мишени). Для эксперимента с жестким тормозным излучением из Та-мишени необходимо было существенно увеличить расстояние от объекта до точки наблюдения, чего не позволяли сделать условия эксперимента.

Качество изображения края пластины определяется контрастностью картины (разностью почернений в области вблизи изображения края) и резкостью изображения края (величиной области размытия изображения края). На снимках (рис. 3а, 3б) видны области пониженного и повышенного почернения слева и справа от изображения края пластины в области углов около $\pm 2 \times 10^{-4}$ рад. Эти области не похожи на картину рефракционного контраста, так как их угловой размер превышает возможный угол преломления излучения более чем на порядок. Но их существование не-

сколько увеличивают контрастность изображения края. Однако, край пластины хорошо обозначился на снимке (рис. 3б), вероятно, из-за резкости абсорбционного изображения (благодаря микрофокусу излучения). Общая нерезкость краевого изображения зависит от геометрии просвечивания, характеристик пленки и взаимодействия излучения с пленкой. На размытие изображения края пластины влияет геометрическая нерезкость Δa_1 изображения края за счет размера источника излучения. На рис. 1в приведена схема геометрического размытия краевого изображения, связанная с размером S_H источника излучения. Лучи 1-3, выходящие из различных точек источника показывают геометрию формирования геометрической нерезкости. В нашем случае $\Delta a_1 = S_H \times (K-1) = 19.5$ мкм, где K = 2.5 -коэффициент увеличения изображения. Дополнительное геометрическое размытие Δa_2 краевого изображения будет обусловлено наклоном краевой поверхности под некоторым углом θ_р относительно пучка излучения. На рис. 1г приведена схема геометрического размытия краевого изображения из-за наклона пластины. Лучи 1-6, выходящие из различных точек протяженного источника, показывают геометрию формирования дополнительной геометрической нерезкости. Лучи, например, 2-5 показывают формирование дополнительной геометрической нерезкости при точечном источнике излучения. В этом случае $\Delta a_2 = K \times t_p \times \theta_p$, где t_p – длина краевой поверхности вдоль пучка излучения. Область этого дополнительного геометрического размытия краевого изображения является увеличенной в К раз проекцией краевой поверхности. Например, при $\theta_{p} =$ $= 0.05^{\circ}$ величина $\Delta a_2 = 8.7$ мкм для пластины толщиной 4 мм и K = 2.5. При протяженном ис-



Рис. 4. Изображение угла пластиковой пластины толщиной 10 мм, полученное с увеличением ×2.5 и с использованием тормозного излучения, генерированного в узкой (13 мкм) Та-мишени (а); изображение пластиковой пластины толщиной 10 мм за дополнительной стальной пластиной-поглотителем толщиной 55 мм (б).

точнике геометрические размытия Δa_1 и Δa_2 складываются. Кроме того, нерезкость изображения края пластины зависит от так называемой собственной нерезкости рентгеновской пленки, которая зависит от размера зерен бромистого серебра в эмульсии и от рассеяния вторичных электронов в эмульсионном слое пленки. Собственная нерезкость рентгеновской пленки может составлять 30–50 мкм и около 250 мкм для фотонов излучения 50 кэВ и 1 МэВ соответственно, что гораздо больше размера зерен в эмульсии.

На рис. 4а представлен фрагмент фотографии распределения излучения, генерируемого в Тамишени, после его взаимодействия с краем пластиковой пластины толщиной 10 мм. Пластина была расположена во внешнем гониометре перпендикулярно к пучку излучения на расстоянии 46 см от Та-мишени бетатрона. На фотографии, полученной при увеличении ×2.5, показано, что изображение верхнего края пластины размыто из-за большого вертикального размера источника излучения, а изображение вертикального края пластины (как и в случае пластиковой пластины толщиной 4 мм) не демонстрирует тонкую структуру, состоящую из узких темной и светлой полос, образованных эффектом рефракции излучения. Также отметим, что размытие края больше, чем в случае пластиковой пластины толщиной 4 мм. Геометрическое размытие краевого изображения в обоих случаях одинаковое (19.5 мкм), так как определяется размером фокуса излучения. Поэтому, вероятно, большее размытие во втором случае определяется наклоном пластины относительно пучка излучения, так как при одинаковом наклоне изображение края более толстой пластины будет в 2.5 раза больше. Тем не менее, резкость изображения достаточно высокая, а контраст увеличен так же, как и на рис. 3 вследствие наличия областей пониженной и повышенной интенсивности слева и справа от изображения края пластины, которые несколько увеличивают контрастность изображения края. Это полезно, если необходимо обнаружить такой слабо поглощающий излучение образец, например, в толстом стальном изделии.

На рис. 4б приведено изображение края этой пластины, расположенной за дополнительной стальной пластиной-поглотителем толшиной 55 мм. Видно, что пластиковая пластина определяется за такой преградой. По способности поглощать, например, излучение с энергией 1 МэВ эта пластина эквивалентна примерно 1.75 мм стали. Это примерно 3.2% от толщины стальной пластиныпоглотителя. Данный параметр определяет относительную чувствительность метода определения малого объекта за толстой преградой. Край пластины определяется (в основном) благодаря резкости его изображения, полученной по причине малого размера источника излучения и достаточно удачной ориентации краевой поверхности относительно пучка излучения.



Рис. 5. Изображение сборки, состоящей из стальной пластины (1) толщиной 10 мм и трех стальных пластин (2–4) толщиной 5 мм, получение с увеличением ×2.5 и с использованием тормозного излучения, генерированного в узкой (13 мкм) Та-мишени (а); изображения сборки (б–г) получены с использованием дополнительных стальных пластинпоглотителей толщиной 15, 35 и 55 мм соответственно.

Экспериментальные исследования были продолжены со стальными пластинами и тонкими свинцовыми фольгами, как с образцами из более тяжелых материалов, которые обладают гораздо большей дисперсией излучения. На рис. 5 показаны увеличенные (×2.5) изображения сборки, состоящей из стальной пластины 1 толщиной 10 мм и трех стальных пластин 2-4 толщиной 5 мм каждая. Пластины располагались перпендикулярно пучку излучения, а их боковые поверхности были приблизительно параллельны друг другу. Боковая поверхность края пластины 1 толщиной 10 мм была ориентирована с точностью 0.02° вдоль направления излучения, которое падало на этот край пластины. Ориентация других пластин не контролировалась. Они были просто приложены стопкой ко второй пластине.

На рис. 5а представлены изображения, полученные без дополнительной стальной пластиныпоглотителя, а на рис. 56—5г — при пластинепоглотителе толщиной 15, 35 или 55 мм соответственно. Рис. 5 демонстрирует повышенную контрастность изображений боковых поверхностей пластин, но не наблюдается двухполосной картины, характерной для эффекта рефракционного контраста.

Прямоугольные пластины были установлены одна за другой так, что излучение проходило через различные толщины, стали в различных участках сборки. Поэтому изображения краев пластин сформированы излучением, имеющим различные микрофокусы и различные мягкие части спектра. Зависимость эффективного размера источника, протяженного вдоль электронного пучка, от положения объекта в конусе излучения была исследована в работе [1]. В случае края четвертой пластины эффективный горизонтальный размер S_H источника излучения равен $S_H = t + T \times$ × $|\theta_H| = 56$ мкм, где t = 13 мкм – толщина Та-ми-шени бетатрона, T = 2.5 мм – длина мишени вдоль пучка электронов, $\theta_H = 1^\circ$ – горизонтальный угол эмиссии излучения из мишени в направлении края четвертой пластины. Это обеспечивает геометрическую нерезкость изображения края около 84 мкм. Кроме того, боковые грани пластин наклонены относительно направления излучения, которое формирует изображения краев в данном случае. Наклон на угол $\theta_4 = 1^\circ$ краевой поверхности четвертой пластины приводит к дополнительной геометрической нерезкости края величиной около 218 мкм.

При увеличении толщины пластины-поглотителя, т.е. при более жестком спектре излучения, вследствие поглощения фотонов мягкой части спектра резкость краевого изображения несколько увеличивается, что определяет хорошую видимость краев пластин сборки. Наилучшая резкость изображения наблюдается для края пластины 2, которая, вероятно, имеет минимальный угол наклона θ_2 относительно направления излучения, падающего на этот край.



Рис. 6. Изображения края стальной пластины толщиной 0.9 мм (а) и сборки из трех свинцовых фольг толщиной 25 мкм (б), полученные с увеличением ×2.5 и с использованием тормозного излучения, генерированного в узкой (13 мкм) Та-мишени. Ниже приведены фрагменты изображений после регулирования "яркость—контраст"; денситограммы (в, г) изображений (а, б).

На рис. 6 показаны изображения края стальной пластины толщиной 0.9 мм (рис. 6а) и правого верхнего угла сборки из трех свинцовых фольг с толщинами 25 мкм (рис. 6б), составленных друг за другом, как это было в случае пластин 1-4(рис. 5). Ниже приведены фрагменты изображений после регулирования "яркость—контраст". Видно, что края образцов хорошо определяются и при гораздо меньших толщинах пластин из тяжелых материалов. Изображения демонстрируют усиленный контраст и высокую резкость изображений вертикально расположенных краев пластины и свинцовых фольг. Верхние края изображения свинцовых фольг размыты из-за большого вертикального размера источника излучения.

Денситограммы изображений края 0.9 ммстальной пластины (рис. 6в) и краев свинцовых фольг (рис. 6г) в сборке демонстрируют особенно резкие изменения почернения на краях свинцовых фольг: наблюдается значительное усиление почернения справа от краев, что и определяет существенное улучшение их видимости. При практически одинаковом почернении на изображении сборки из свинцовых фольг правые края фольг хорошо видны. Это является важным для обнаружения края образца, когда он практически прозрачен для излучения и не обеспечивает хорошего абсорбционного контраста. Здесь также видны области пониженной и повышенной интенсивности слева и справа от изображения краев пластины и свинцовых фольг в области углов, которые существенно превышают угол преломления излучения на краевой поверхности свинцовой фольги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при скользящем падении микрофокусного жесткого тормозного излучения, генерированного в узкой (13 мкм) внутренней Тамишени бетатрона электронами с энергией 18 МэВ бетатрона Б-18 на боковые поверхности пластиковых и стальных пластин, наблюдается усиленная резкость изображения края пластин, связанная с небольшим размером (13 мкм) фокуса излучения. Эффект рефракции явно себя не проявляет, как это имело место в случае микрофокусного излучения, генерированного в узкой (8 мкм) Si-мишени бетатрона.

В случае Si-мишени при скользящих углах падения излучения на краевую поверхность пластиковой пластины толщиной 4 мм рефракционный эффект проявлялся в угловом распределении рассеянного излучении в виде двух полос пониженной и повышенной интенсивности вдоль края пластины. Проведенный анализ показал, что излучение с энергией фотонов менее 56 кэВ вносит основной вклад в формирование двухполосного краевого изображения.

Излучение из Та-мишени гораздо жестче, чем излучение из Si-мишени из-за поглощения мягкой части спектра тяжелым танталом. Изображение края объекта при Si-мишени формируется излучением с энергией фотонов в несколько десятков кэВ вследствие максимальной чувствительности пленки в этой области энергий фотонов. При этом фотоны жесткой части спектра не успевают сделать вклад в формирование изображения за время экспозиции. При Та-мишени, когда мягкая часть спектра подавлена, изображение формируется гораздо более жестким излучением. Ожидаемое расстояние между возможными рефракционными полосами интенсивности при энергии фотонов, например, 1 МэВ составляет около 2.4×10^{-5} рад, то есть около 17 мкм на фотографии. Следовательно, для наблюдения эффекта рефракции необходимо увеличивать расстояние между образцом и пленкой во много раз, однако условия эксперимента этого сделать не позволя-ЮТ.

Тем не менее, на снимках пластин наблюдаются довольно резкие краевые изображения, что определяется микрофокусом (13 мкм) излучения. Общая нерезкость краевого изображения зависит от геометрии просвечивания, рассеяния излучения в прикраевой области пластины, характеристик пленки и взаимодействия излучения с пленкой (вторичные процессы и пробег вторичных электронов в пленке). Эффект геометрического размытия абсорбционного изображения края пластины за счет размера источника излучения в нашем случае составляет 19.5 мкм, что сравнимо с расстоянием между возможными рефракционными полосами интенсивности. Эффект дополнительного геометрического размытия абсорбционного изображения края пластины за счет наклона краевой поверхности зависит от величины ее угла наклона относительно направления излучения и может быть весьма существенным для толстых пластин. Важна также собственная нерезкость рентгеновской пленки, которая может быть довольно велика (десятки микрон) при жестком излучении.

Можно также предположить, что перераспределение интенсивности излучения, определяемое его рассеянием в приповерхностной области пластины, может быть важным в формировании краевого изображения. Такой эффект приповерхностного рассеивателя может дополнительно изменить контраст или резкость краевого изображения.

Полученные результаты показали высокое качество излучения, генерированного в бетатроне с узкой мишенью внутри. Поэтому такой микрофокусный источник может быть также использован в качестве лабораторного источника для исследований, например, различных образцов в материаловедении или волновых эффектов в рентгеновской и гамма оптике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Rychkov M.M., Kaplin V.V., Sukharnikov K., Vaskovsky I.K. // J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2016. V. 103. № 11. P. 723.
- 2. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Sukharnikov K., Vaskovs'kii I.K. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 3. P. 660.
- Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L. et al. // IOP Conf. Ser.: Mate. Sci. Engin. 2017. V. 289. P. 012044.
- Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L., Smolyanskii V.A., Stepanov Yu.B., Lutsenko A.S., Gentsel'man V., Vaskovs'kii I.K. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 881. P. 012007.
- Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L., Smolyanskii V.A., Gentsel'man V., Vaskovs'kii I.K. // J. Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37. № 1. P. 13.
- Pushin V.S., Chakhlov V.L. // Patent RU 2072643, 1997. http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html
- Yamada H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. Pt 2. № 2A. P. L 182.
- 8. www.cituk-online.com
- Wilkins S.V., Gureyev T.E., Gao D., Pogany A., Stevenson A.W. // Nature. 1996. V. 384. P. 335.
- Hirai T., Yamada H., Sasaki M., Hasegawa D., Morita M., Oda Y., Takaku J., Hanashima T., Nitta N., Takahashi M., Murata K. // J. Synchrotron Rad. 2006. 13. P. 397.
- Snigirev A., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Schelokov I. // Rev. Scient. Instrum. 1995. V. 66. P. 5486.
- Gureyev T.F., Paganin D.M., Mayers G.R., Nesterets Y.I., Wilkins S.W. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89(3). P. 034102.
- Laperle C.M., Wintermeyer Ph., Wands J.R., Shi D., Anastasio M. A., Li X., Arh B., Diebold G.J., Rose-Petruck C. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 173901.
- Gasilov S.V., Fayanov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I., Kalegary F., Votstse K., Nicoly M., Sansone D., Valentiny D., De Sil'estry S., Statzira S. // JETP Lett. 2008. V. 87/5-6. P. 286.
- 15. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Smolyanskii V.A., Vaskovs'kii I.K. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. № 4. P. 609.

The Effects at Grazing Interaction of Microfocus Bremsstrahlung with Surfaces of Different Length

M. M. Rychkov^{1, *}, V. V. Kaplin¹, V. A. Smolyanskiy^{1, **}

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia *e-mail: rychkov@tpu.ru **e-mail: vsmol@tpu.ru

The experimental results of studying the grazing interaction of microfocus bremsstrahlung with the edge surfaces of plastic and steel plates are presented. For the experiments, hard bremsstrahlung generated at a grazing incidence of an internal electron beam of a B-18 betatron with electron energy of 18 MeV on the surface of a thin tantalum (Ta) foil 13 μ m thick and 2.5 mm long along the electron beam was used. The target was mounted along the direction of the electron beam using an internal goniometer. Therefore, the linear microfocus of radiation emitted along the Ta-target was 13 μ m wide. When using the generated radiation, magnified images of the plastic plates 10 and 4 mm thick, steel plates 10, 5 and 0.9 mm thick and lead foils 25 μ m thick were obtained. It is shown that high-quality images of objects are realized due to the small horizontal size of the radiation source when the edge surfaces of the plates are oriented at grazing angles to the axis of the radiation cone. The possible participation in the formation of images of the edge phase contrast, which is determined by the refraction of radiation on the side faces of the plates, is discussed. The results are compared with the edge contrast results obtained using microfocus bremsstrahlung from a Si target 8 μ m thick, oriented along the electron beam of the B-18 betatron.

Keywords: microfocus bremsstrahlung, grazing interaction of radiation with surfaces, edge absorption and phase contrasts.