

УДК 621.384.6

ГЕНЕРАЦИЯ ЖЕСТКОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ПАДЕНИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПУЧКА БЕТАТРОНА С ЭНЕРГИЕЙ 18 МЭВ НА ПОВЕРХНОСТЬ Та ФОЛЬГИ ТОЛЩИНОЙ 13 МКМ

© 2019 г. М. М. Рычков¹, В. В. Каплин¹, С. И. Кузнецов^{1, *},
В. А. Смолянский¹, И. К. Васьковский¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

*E-mail: smit@tpu.ru

Поступила в редакцию 06.06.2018 г.

После доработки 11.08.2018 г.

Принята к публикации 20.08.2018 г.

На установке, созданной на базе бетатрона Б-18, исследованы свойства жесткого тормозного излучения, генерированного при скользющем падении электронов с энергией 18 МэВ на поверхность тонкой танталовой фольги толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм. Фольга установлена в гониометре внутри камеры бетатрона для получения ориентационной зависимости генерированного излучения. Выявлена сильная зависимость угловых распределений жесткого тормозного излучения от ориентации тонкой мишени, что не наблюдается при нормальном падении электронов на ее поверхность. При использовании генерированного излучения получены увеличенные изображения эталона Duplex IQ1 и объекта, состоящего из тонких слоев различных материалов. Исследован вклад абсорбционного и краевого фазового контрастов в формирование изображений проволочных структур эталона и плоских границ раздела сред в сложном объекте. Показано, что качественные изображения объектов реализуются за счет малого горизонтального размера источника излучения, который составляет 13 мкм для излучения, испускаемого вдоль мишени, и возрастает при увеличении угла эмиссии излучения.

Ключевые слова: бетатрон, релятивистские электроны, тонкая мишень, взаимодействие электронов с поверхностью при скользющем падении, генерация излучения, угловые распределения, ориентационные зависимости.

DOI: 10.1134/S0207352819070138

ВВЕДЕНИЕ

Ранее при использовании бетатрона Б-35 с энергией электронов внутреннего пучка 35 МэВ была исследована генерация параметрического рентгеновского излучения в многослойных рентгеновских зеркалах [1] и острофокусного излучения в рентгеновских волноводах [2, 3] при скользшем падении электронов на поверхность структур, изготовленных на Si подложках. Для изучения влияния на генерацию излучения в поверхностных структурах фонового излучения быстрых электронов в подложках были проведены эксперименты на бетатронах с энергией электронов 35 [4, 5] и 18 МэВ [6].

При использовании бетатрона Б-18 [7–10] было показано, что если тонкая мишень установлена вдоль пучка электронов и электроны падают на ее поверхность под скользющим углом, то генерированное излучение имеет линейный фокус с

горизонтальным размером S_H , равным толщине мишени, которая направляет эмитированное излучение вдоль ее поверхности. Вертикальный размер S_V линейного источника равен диаметру D_e пучка электронов, если высота H мишени превышает диаметр пучка электронов. При увеличении угла эмиссии излучения относительно поверхности мишени θ_H эффективный горизонтальный размер источника увеличивается как $S_H = t + T|\theta_H|$, где t и T – толщина мишени и ее длина соответственно. В этих экспериментах использовали Si пластины толщиной $t = 50$ и 8 мкм и с параметрами $H = 5$ мм и $T = 4$ мм, которые помещали на гониометр внутри камеры бетатрона. В качестве мишени использовали также Та фольгу толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм. Наиболее подробные исследования угловых свойств тормозного излучения, генерированного в узких мишенях, были проведены в [7] для Si пластины толщиной 50 мкм. Была показана сильная зависимость угловых рас-

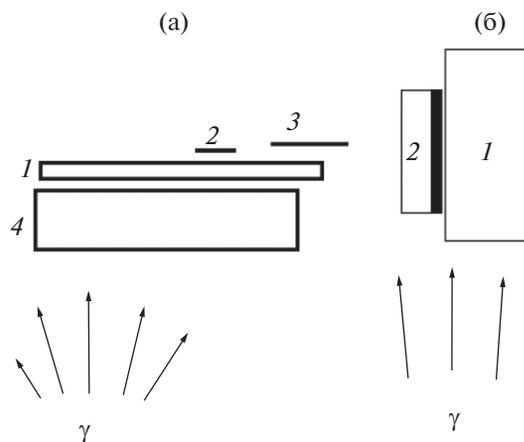


Рис. 1. Схемы расположения деталей исследуемых объектов в пучках излучения, генерированного в Ta мишени толщиной 13 мкм: а – эталон Duplex IQI (1), стальные пластинки толщиной 0.2 (2) и 0.5 мм (3), стальная пластина толщиной 9 мм (4); б – пластиковый держатель Si пластины (1); Si пластина толщиной 360 мкм с W слоем толщиной 5 мкм на ее поверхности (черная вертикальная линия между держателем и пластиной) (2).

пределений излучения от ориентации пластины относительно скользящего пучка электронов, что не имеет места в геометрии нормального падения.

В экспериментах с Si мишенями было подробно исследовано формирование увеличенных изображений проволочных элементов эталона Duplex IQI [11]. В результате исследования зависимости их контрастности от положения эталона в конусе излучения обнаружено изменение эффективного горизонтального размера протяженного источника излучения, что объясняется зависимостью проекции источника от направления эмиссии излучения относительно плоскости мишени.

Целью настоящей работы было исследовать на установке, созданной на базе бетатрона Б-18, свойства жесткого тормозного излучения, генерированного при скользящем падении электронов с энергией 18 МэВ на поверхность тонкой танталовой фольги. Также представляло интерес изучить вклад абсорбционного и краевого фазового контрастов в формирование изображений проволочных структур эталона Duplex IQI и плоских границ раздела сред в составных объектах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Танталовую мишень с параметрами $t = 13$ мкм, $H = 10$ мм и $T = 2.5$ мм помещали внутри камеры бетатрона на тонкий держатель компактного гониометра в пределах радиуса орбиты ускоряемых

электронов. Внутренним гониометром управляли извне с помощью тяг, проложенных по дну камеры. Гониометр позволял вращать пластину вокруг вертикальной оси для изменения ее ориентации относительно пучка электронов в области скользящих углов $-2^\circ < \theta_0 < 2^\circ$.

Дополнительное магнитное поле, создаваемое обмоткой сброса в течение 30 мкс в конце режима ускорения, уменьшало радиус орбиты электронов, и они попадали на мишень с частотой 50 Гц. Генерированное излучение выходило через окно экспериментальной камеры, закрытое лавсановой пленкой толщиной 50 мкм. При фотографировании пучков излучения рентгеновскую пленку устанавливали на расстоянии 46 см от пластины. Для получения увеличенных изображений объекты располагали на внешнем гониометре, на расстоянии 46 см от мишени, а рентгеновскую пленку устанавливали на расстоянии 114 см от мишени. Внешний гониометр позволял ориентировать объект исследования относительно пучка излучения. Полученные фотографии пучков излучения и рентгенограммы образцов обрабатывали на сканере для последующего анализа негативных или позитивных изображений.

На рис. 1 приведена схема расположения деталей исследуемых объектов в пучках излучения, генерированного в Ta мишени толщиной 13 мкм, которая ориентирована вдоль пучка электронов. Один объект исследования (рис. 1а) содержал эталон Duplex IQI (1) стальные пластинки (2) и (3) толщиной 0.2 и 0.5 мм, соответственно, и стальную пластину 4 толщиной 9 мм, которая служила поглотителем излучения мягкой части спектра. Другой объект (рис. 1б) включал пластиковый держатель 1 Si пластины 2 толщиной 360 мкм с W слоем толщиной 5 мкм на ее поверхности (черная вертикальная линия между держателем и пластиной).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате детальных исследований в [7] угловых распределений излучения, генерированного в узкой Si мишени, обнаружена их сильная зависимость от ориентации мишени относительно пучка электронов. Фотографии распределений, полученные при некотором угле θ_0 между поверхностью Si пластины толщиной 50 мкм и пучком электронов с энергией 18 МэВ, показали их асимметрию и преимущественную генерацию излучения в направлении пучка электронов. На фотографиях присутствуют интенсивные пятна почернения от тормозного излучения в направлении пучка электронов и пятна меньшей интенсивности по другую сторону от светлой полосы, которая является “тенью” от мишени, образующейся

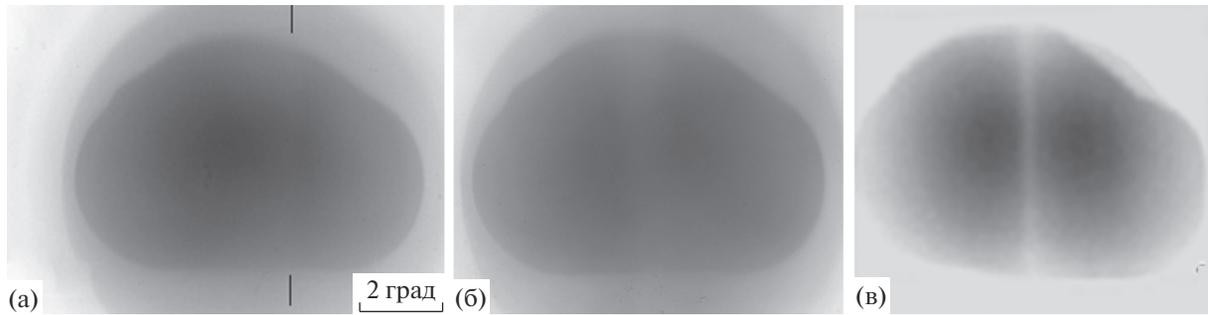


Рис. 2. Изображения пучков излучения, генерированного электронами с энергией 18 МэВ при углах ориентации Та мишени толщиной 13 мкм $\theta_0 = -1^\circ$ (а), 0° (б) и Si мишени толщиной 50 мкм при $\theta_0 = 0^\circ$ (в) относительно пучка электронов.

в результате поглощения излучения в мишени и его частичного преломления и выхода через ее боковые поверхности. При ориентации мишени вдоль пучка электронов ($\theta_0 = 0^\circ$) наблюдалась симметричная картина из двух одинаковых пятен почернения по обе стороны от мишени. Эти компоненты излучения были сгенерированы двумя частями электронного пучка, на которые делится первоначальный пучок при взаимодействии с мишенью.

На рис. 2а, 2б приведены фотографии угловых распределений излучения, генерированного электронами с энергией 18 МэВ в Та мишени толщиной 13 мкм при углах ориентации $\theta_0 = -1^\circ$ и 0° относительно электронного пучка. Для сравнения на рис. 2в приведена фотография углового распределения излучения, генерированного электронами с энергией 18 МэВ в Si мишени толщиной 50 мкм при $\theta_0 = 0^\circ$, которая была получена в [7]. Угловые распределения излучения, генерированного в Та мишени (рис. 2а, 2б) сильно отличаются от распределений, полученных в [7] для Si мишени. Распределения гораздо шире, а пятна размыты, что свидетельствует о сильном рассеянии электронов в мишени. Но можно видеть, что на рис. 2а присутствует пятно почернения от тормозного излучения в направлении пучка электронов и пятно меньшей интенсивности по другую сторону от размытой светлой полосы (отмечено вертикальными линиями) вдоль мишени. При $\theta_0 = 0^\circ$ симметричное угловое распределение размыто. Оно состоит из двух широких пятен интенсивности, расположенных по обе стороны от размытой светлой полосы, как и в случае Si мишени при $\theta_0 = 0^\circ$ (рис. 2в). Но в случае Si мишени наблюдается более узкая угловая картина. Это объясняется меньшим рассеянием электронов в более легком материале мишени. Кроме того, на фотографиях пучков излучения (рис. 2а, 2б) присутствуют изображения толстого стального фланца выходного окна камеры бетатрона, что не имело места в

случае Si мишени. Это свидетельствует о том, что из Та мишени испускается более жесткое излучение, так как мягкая часть спектра эффективно поглощается в тяжелом материале мишени и не участвует в формировании изображения на фотографии.

Другим свойством излучения, генерированного в узкой Та мишени, является способность создавать высококонтрастные изображения деталей исследуемых объектов из тяжелых материалов. На рис. 3а представлено позитивное изображение сборного объекта (рис. 1а), полученное с увеличением 2.5 при использовании излучения, генерированного в Та мишени. Нумерация изображений деталей, составляющих объект исследования, соответствует их нумерации на рис. 1а. На рис. 3б продемонстрировано дополнительно увеличенное изображение 13 и 12 пар (5 и 6 на рис. 3а) самых тонких Pt проволок прибора Duplex IQI диаметром 50 и 63 мкм, расположенных на расстояниях друг от друга 50 и 63 мкм соответственно. Для сравнения на рис. 3в представлено изображение этих пар проволок, полученное при использовании излучения, генерированного в Si мишени толщиной 50 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов. Видно, что излучение, генерированное в Та мишени, при получении изображений тонких деталей объекта не так эффективно, как излучение в Si мишени, так как излучение в Та мишени более жесткое из-за поглощения мягкой части спектра тяжелым танталом. Поэтому (рис. 3а) только более толстые проволоки обеспечивают достаточно хороший абсорбционный контраст. Стальная пластина 4 толщиной 9 мм использовалась как поглотитель, который дополнительно “ужесточает” спектр излучения. Поэтому на изображении нижней части прибора Duplex IQI за стальной пластиной видны только достаточно толстые Pt проволоки прибора.

Обращает на себя внимание усиленный контраст краев достаточно тонких стальных пластин 2

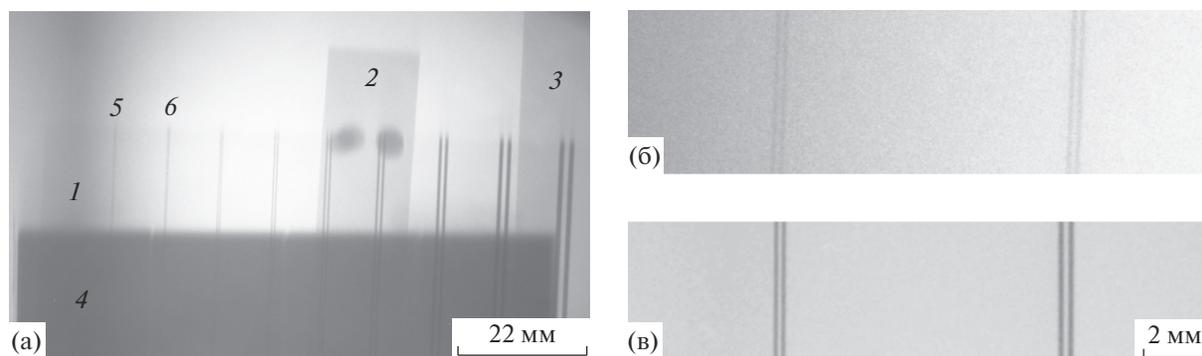


Рис. 3. Позитивное изображение сборного объекта (рис. 1а), полученное с увеличением 2.5 и с использованием излучения, генерированного в Та мишени толщиной 13 мкм (а) (нумерация изображений деталей соответствует их нумерации на рис. 1а). Изображение 13 и 12 пар проволок прибора Duplex IQI: б – увеличенное 5 и 6 на рис. 3а; в – полученное при использовании излучения, генерированного в Si мишени толщиной 50 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов.

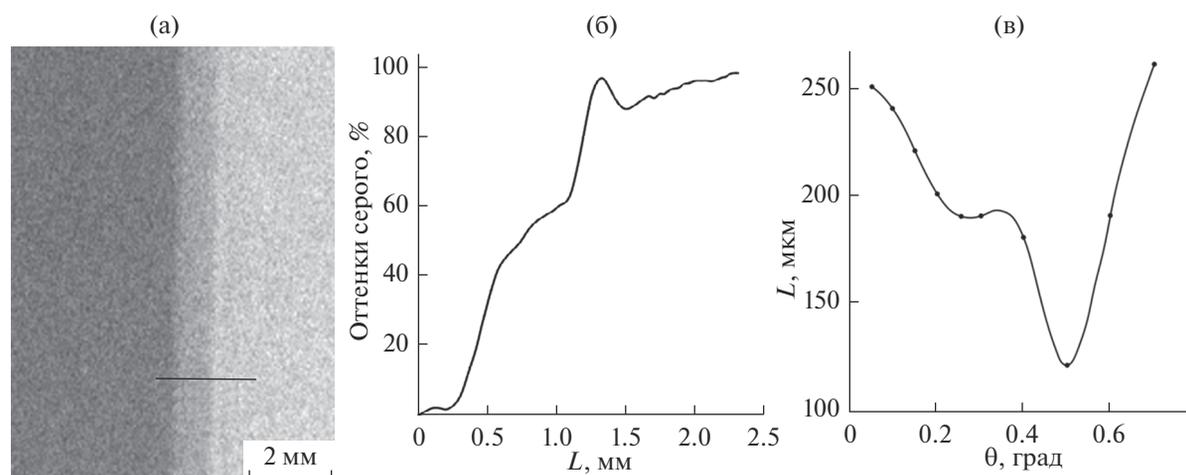


Рис. 4. Увеличенное изображение (а) Si пластины толщиной 360 мкм с W слоем толщиной 5 мкм на ее поверхности, ориентированной вдоль оси конуса излучения, денситограмма (б), измеренная вдоль линии, показанной на рис. а, и зависимость ширины изображения W слоя от его ориентации в пучке излучения (в).

и 3, что определяется эффектом краевого фазового контраста, который реализуется и в случае полихроматического пучка излучения, характеризующегося малым фокусом [12]. Здесь контраст изображений краев пластин определяется преломлением излучения на их краевых поверхностях. Преломленный пучок излучения интерферирует с излучением, прошедшим рядом с краем пластины. Это формирует узкие области повышенного и пониженного почернения по обе стороны изображения края на фотографии, что обеспечивает повышенный контраст изображения. На данном позитивном изображении светлая область расположена вне края пластины.

Анализ изображений деталей объекта (рис. 3а) показал, что из-за высокой энергии фотонов излучения, генерированного в Та мишени, только достаточно толстые детали объекта достаточно

хорошо видны за счет абсорбционного контраста. В то же время контраст изображений краев достаточно тонких деталей может быть усилен краевым фазовым контрастом.

На рис. 4а приведено увеличенное негативное изображение Si пластины толщиной 360 мкм с W слоем толщиной 5 мкм на ее поверхности, которая ориентирована вдоль оси конуса излучения. Длина Si пластины и W слоя излучения составляет 10 мм. Это может обеспечить достаточно сильное поглощение излучения и сформировать изображение слоя за счет абсорбционного контраста. Некоторый вклад может внести также фазовый контраст. Четко видно изображение W слоя (светлая вертикальная полоса) и изображение левого края Si пластины, усиленное эффектом фазового контраста, который проявляет себя на этом негативе темной полосой вне края Si пластины. Рис. 4б

демонстрирует денситограмму, которая была измерена вдоль линии, показанной на рис. 4а. Денситограмма позволяет определить параметры изображений деталей составного объекта исследования. Например, ширина L изображения W слоя может быть использована для определения горизонтального размера источника жесткого излучения, для которого неприменим прибор Duplex IQI, эффективный для источников излучения с энергией фотонов до 400 кэВ.

На рис. 4в представлена зависимость ширины L изображения W слоя от его ориентации (угла θ) в пучке излучения. Из измеренной ориентационной зависимости следует, что при угле $\theta \sim 0.5^\circ$ Si пластина и W слой ориентированы вдоль пучка излучения, так как ширина изображения W слоя в этом случае минимальна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что при скользящем падении электронов с энергией 18 МэВ внутреннего пучка бетатрона Б-18 на Та пластину толщиной 13 мкм вид углового распределения генерируемого излучения существенно зависит от угла падения электронов. При скользящих углах падения распределение имеет асимметричную форму с максимумом в направлении пучка электронов. При ориентировании пластины вдоль пучка электронов угловое распределение состоит из двух одинаковых конусов равной интенсивности, которые расположены по обе стороны от плоскости пластины. Угловые распределения излучения из Та мишени гораздо шире, чем распределения излучения, генерированного в кремниевых пластинах, за счет большего рассеяния электронов в тантале. Излучение из Та мишени гораздо жестче, чем излучение из Si мишеней, из-за поглощения мягкой части спектра тяжелым Та.

В случае Та мишени толщиной 13 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов, реализуется линейный источник жесткого тормозного излучения, горизонтальный размер которого составляет 13 мкм, если излучение испускается вдоль плоскости пластины, и возрастает при увеличении угла эмиссии. Вертикальный размер источника излучения равен диаметру пучка электронов ~ 1.5 мм. Малые размеры источника излучения обеспечивают высокий контраст изображений деталей исследуемых объектов, если толщина деталей достаточна для обеспечения качественного абсорбционного контраста. Например, на изображении Pt проволок диаметром 50 мкм, полученном с увеличением 2.5, заметен слабый абсорбционный контраст по сравнению с контрастом, полученным в случае Si мишени, когда изображение проволок формировалось за счет

мягкой части спектра излучения. В то же время на изображении образца, состоящего из Si и W пластин толщиной 300 и 5 мкм соответственно и длиной 10 мм, наблюдается удовлетворительный абсорбционный контраст и краевой фазовый контраст вследствие достаточного поглощения излучения в W пластине, ориентированной под скользящими углами относительно излучения из Та мишени, и малого горизонтального размера источника.

Полученные результаты показали, что бетатрон с узкой мишенью внутри может использоваться в качестве лабораторного источника достаточно качественного излучения для исследований, например, в материаловедении и γ -оптике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект № 17-19-01217).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaplin V.V., Sohoreva V.V., Uglov S.R. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2009. V. 267. P. 777.*
2. *Kaplin V.V., Sohoreva V.V., Uglov S.R. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2011. V. 269. P. 1518.*
3. *Kaplin V.V., Uglov S.R. // Proceed. of the 7th Int. Forum on Strategic Technology. Tomsk, 2012. V. 2. P. 422.*
4. *Kaplin V.V., Uglov S.R., Voronin A.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 357. P. 012028.*
5. *Kaplin V.V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015. V. 355. P. 257. doi 10.1016/j.nimb.2015.03.022*
6. *Rychkov M.M., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I. et al. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 3. P. 660.*
7. *Rychkov M.M., Kaplin V.V., Sukharnikov K., Vaskovsky I.K. // J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2016. V. 103. № 11. P. 723.*
8. *Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L. et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engin. 2017. V. 289. P. 012044. doi 10.1088/1757-899X/289/1/012044*
9. *Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 881. P. 012007. http://iopscience.iop.org/1742-6596/881/1/012007*
10. *Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L. et al. // J. Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37. № 1. P. 13.*
11. www.cituk-online.com
12. *Wilkins S.V., Gureyev T.E., Gao D. et al. // Nature. 1996. V. 384. P. 335.*

Generation of Hard Bremsstrahlung at Grazing Incidence of 18 MeV Electrons of Betatron Beam on a Surface of 13 μm Thick Ta Foil

M. M. Rychkov, V. V. Kaplin, S. I. Kuznetsov, V. A. Smolyanskiy, I. K. Vaskovskiy

The properties of hard bremsstrahlung generated at grazing incidence of 18 MeV electrons on a surface of 13 μm thick and 2.5 mm long tantalum foil are studied using the facility based on the B-18 betatron. Tantalum foil is placed in a goniometer inside the betatron chamber to obtain the orientational dependence of generated radiation. A strong dependence of the angular distributions of hard bremsstrahlung on thin target orientation is revealed, which is not observed at normal incidence of electrons on its surface. Using the generated radiation, magnified images of the Duplex IQI standard and an object consisting of thin layers of different materials are obtained. The contribution of absorption and edge phase contrasts to the formation of images of the etalon wire structures and planar interfaces in a complex object is studied. The high-quality images of objects are shown to be obtained due to the small horizontal size of the radiation source, which is 13 μm for radiation emitted along the target and increases with increasing in the emission angle.

Keywords: betatron, relativistic electrons, thin target, electron–surface interaction at grazing incidence, radiation generation, angular distributions, orientation dependence.