

УДК 621.384.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ФОКАЛЬНОГО ПЯТНА МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ЖЕСТКОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. М. М. Рычков^а, В. В. Каплин^а, В. А. Смолянский^{а,*}

^а *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*

**e-mail: vsmol@tpu.ru*

Поступила в редакцию 03.05.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

Представлен новый подход к определению размера фокусного пятна микрофокусного источника жесткого излучения. Подход основан на анализе рентгенографического изображения танталовой фольги толщиной 13 мкм, ориентированной вдоль оси конуса жесткого излучения микрофокусного источника. Приведены экспериментальные результаты, полученные при использовании нового микрофокусного источника тормозного излучения, созданного на основе 18-мегаэлектронвольтового бетатрона с узкой (13 мкм) танталовой мишенью внутри.

DOI: 10.31857/S0032816219060223

ВВЕДЕНИЕ

Создание микрофокусных источников жесткого излучения, генерируемого пучком релятивистских электронов, важно для высокоразрешающей радиографии и томографии. Измерение размеров фокусного пятна необходимо для экспериментаторов, работающих с микрофокусными источниками излучения. Для рентгеновских трубок созданы эталонные приборы, принцип действия которых основан на измерении увеличенных изображений микрообъектов в пучках излучения. Эти приборы рассчитаны на энергию фотонов до 400 кэВ, в силу того что при более жестком излучении микрообъекты (например, проволока в приборе Duplex IQI EN465–5/ASTM E 2002–98 [1] микронной толщины) становятся прозрачными.

Для микрофокусных источников более жесткого излучения должны быть созданы свои эталоны для измерения размеров фокальных пятен, так как, например, камеры обскуры, используемые для миллиметровых фокусов [2], не применимы для фокусов микронных размеров. Эталонный прибор должен содержать микрообъекты достаточной толщины, чтобы обеспечить удовлетворительный абсорбционный контраст их увеличенных изображений.

Таким микрообъектом может быть ориентированная вдоль пучка излучения фольга, толщина которой примерно равна микрофокусу источника излучения. При этом длина фольги из тяжелого материала должна быть достаточной, чтобы обеспечить эффективное поглощение жесткого

тормозного излучения для получения удовлетворительного абсорбционного контраста ее увеличенного изображения. По ширине увеличенного изображения протяженного вдоль пучка излучения микрообъекта можно оценить размер источника излучения.

Обычные бетатроны, генерирующие вторичное жесткое излучение, вызванное взаимодействием внутреннего электронного пучка с мишенью (обычно толстой), которая по площади больше поперечного сечения пучка миллиметрового размера, давно используются для рентгенографии. В [3] была предложена идея использования внутренней мишени с размером, значительно меньшим диаметра электронного пучка циклического ускорителя, для уменьшения фокального пятна генерируемого тормозного излучения. В [4] экспериментально была показана возможность создания источника микрофокусного тормозного излучения на основе бетатрона с использованием микромишени внутри, а в [5] – на основе компактного синхротрона.

В данной статье представлены экспериментальные результаты, которые обосновывают возможность нового подхода к определению размера фокального пятна источника микрофокусного жесткого излучения. Полученные рентгенографические изображения танталовой фольги толщиной 13 мкм, ориентированной под разными углами относительно оси конуса тормозного излучения, испускаемого микрофокусным источником на основе бетатрона В-18 с узкой тантало-

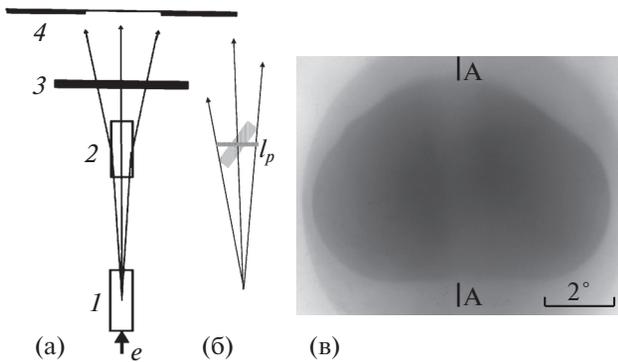


Рис. 1. а – схема эксперимента: e – электронный пучок, 1 – Ta-мишень, 2 – Ta-фольга, 3 – стальная пластина-поглотитель, 4 – схема изображения; б – l_p – проекция Ta-фольги; в – фотография углового распределения излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в Ta-мишени толщиной 13 мкм, ориентированной под углом $\theta = 0^\circ$ по отношению к электронному пучку, А–А – вертикаль, проходящая через ось конуса излучения.

вой (Ta) мишенью, использованы для иллюстрации подхода к определению размера микрофокуса источника.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах, проведенных в данной работе, использовался источник тормозного излучения с линейным микрофокусом, созданный на основе бетатрона с энергией 18 МэВ с тонкой Ta-фольгой-мишенью внутри. Условия эксперимента показаны на рис. 1а. Ta-мишень 1 толщиной $t_m = 13$ мкм, с вертикальным $l_v = 5$ мм и горизонтальным $l_m = 4$ мм (вдоль направления электронного пучка) размерами помещалась на тонкий вертикальный держатель гониометра внутри равновесной орбиты ускоренных электронов на расстоянии около 2.5 см от нее. Фольга-мишень приклеивалась в нижней части на Al-держатель длиной 15 мм и толщиной 0.5 мм. Стойка вставлялась в головку гониометра высотой 5 мм, расположенную на дне камеры бетатрона. Тяги управления гониометром извне располагались по дну камеры. Пятно приклеивания малое, 0.5×0.5 мм, и клей Контактол-А (токопроводящий для стока заряда с мишени), не дающий при затвердевании усадки, не деформировал мишень. Оценка плоскостности мишени проводилась по расплыванию отраженного пучка лазера и показала, что прогиб мишени может составлять 2–3 мкм. Для излучения в направлении “прямо–вперед” из мишени, ориентированной вдоль пучка электронов, размер нашего источника может быть около 15–16 мкм вместо 13 мкм. Дополнительное магнитное поле, создаваемое катушкой сброса в течение 50 мкс,

уменьшало радиус орбиты, и электронный пучок диаметром около 1.5 мм падал на внутреннюю мишень в верхней ее части. Такая конструкция мишени на тонком держателе не мешала ускорению электронов. Генерируемое в мишени 1 излучение выходило через 50-микрометровое майларовое окно экспериментальной камеры, проходило через исследуемый объект 2, расположенный на расстоянии 48 см от мишени, толстый стальной поглотитель 3 и падало на радиографическую пленку AGFA NDT D4 PbVacuPac (4), расположенную на расстоянии 114 см от мишени.

Для эксперимента был изготовлен образец с танталовой фольгой толщиной $t_f = 13$ мкм в пластиковом держателе. Длина фольги вдоль пучка излучения составляла $l_f = 4$ мм. Держатель фольги-образца состоял из двух одинаковых плексигласовых блоков с полированными поверхностями. Вырезанная танталовая фольга помещалась между блоками, которые склеивались друг с другом. В результате получался монолитный блок-держатель с фольгой внутри. Возможный малый изгиб фольги не оказывал влияния на ширину изображения при ее наклоне в пучке излучения. Именно такое изображение использовалось для определения размера источника излучения.

Были получены изображения этого образца с увеличением $k = 2.4$ при различных его ориентациях относительно направления пучка излучения (рис. 1б) и денситограммы почернения на изображениях для определения зависимости ширины изображения Ta-фольги от ее ориентации в пучке излучения. Денситограммы почернения на изображениях позволили определить ширину светлой полосы на половине высоты денситограммы и построить ее ориентационную зависимость.

В эксперименте были также получены изображения фольги и денситограммы изображений при толщинах стальной пластины-поглотителя 40 и 55 мм, помещенной за фольгой. Нужно было определить изменение ширины и контраста изображения Ta-фольги при увеличении толщины пластины-поглотителя, т.е. при увеличении энергии фотонов, которые формируют изображение. При увеличении толщины пластины-поглотителя изображение фольги формирует более жесткое излучение из-за поглощения мягкой части спектра генерированного излучения в пластине-поглотителе.

На рис. 1в приведена фотография углового распределения излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в Ta-мишени толщиной 13 мкм, ориентированной под углом $\theta = 0^\circ$ по отношению к электронному пучку. Угловое распределение излучения отличается от распределения, полученного при использовании Si-мишени толщиной 50 мкм [4]. В [4] фотографии излучения формировались в основном рентгеновскими

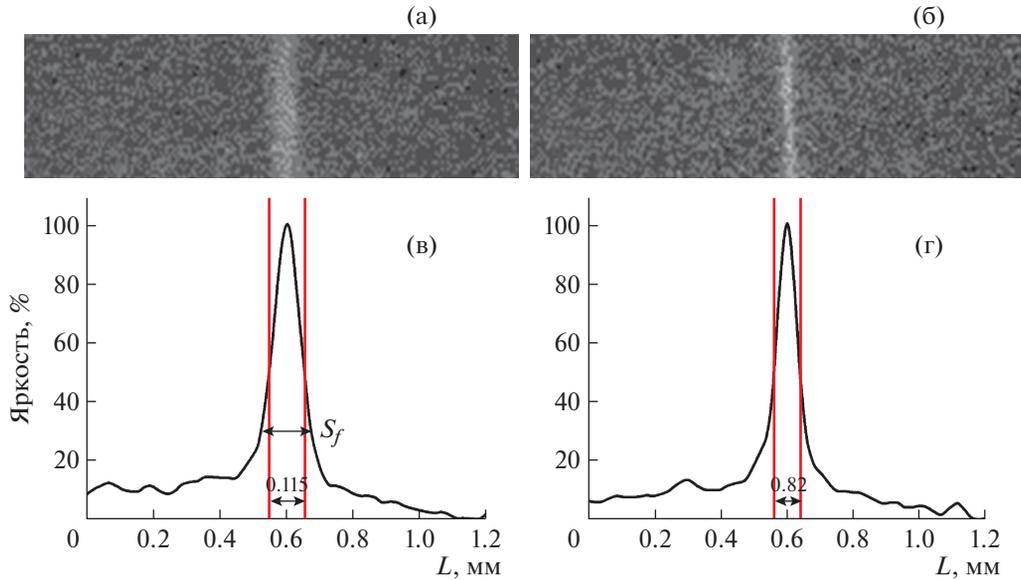


Рис. 2. Изображения Та-фольги толщиной 13 мкм, ориентированной под углом $\theta = 0.6^\circ$ (а) и 0° (б) к оси конуса излучения, и их денситограммы (в, г).

лучами с энергией 5–50 кэВ. Поэтому исследование контраста и размера фокуса источника излучения проводилось с использованием микроструктуры прибора Duplex IQI [1] с тонкими проволоками.

В случае Та-мишени фотография формируется жестким излучением, поскольку мягкая часть генерируемого спектра подавляется поглощением в тяжелом материале мишени. Об этом свидетельствует наличие изображения толстого фланца окна бетатронной камеры, которое не проявлялось в изображениях, представленных в [4].

Фольга в держателе была установлена во внешнем гониометре так, что ее изображение совпадало со светлой полосой А–А на фотографии углового распределения (рис. 1в). Радиографические снимки Та-фольги, полученные с использованием жесткого тормозного излучения, были обработаны на сканере для последующего анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведены изображения Та-фольги, которая ориентирована под углом $\theta = 0.6^\circ$ относительно оси конуса излучения (рис. 2а) и вдоль оси конуса излучения (рис. 2б) с помощью внешнего гониометра. Изображения были получены с увеличением 2.4, после чего дополнительно увеличены для демонстрации. Длина фольги вдоль пучка излучения составляла 4 мм, что обеспечивало достаточно сильное поглощение жесткого излучения и формирование ясного изображения фольги (светлая вертикальная полоса), которое становилось уже при уменьшении угла θ .

Рис. 2в, 2г демонстрируют нормированные на максимум денситограммы, которые были измерены вдоль линий, перпендикулярных изображениям фольги на рис. 2а, 2б. Денситограмма позволяет измерить геометрические параметры изображения объекта исследования.

Приведенные денситограммы показывают, что при наклоне фольги на угол $\theta = 0.6^\circ$ относительно оси конуса излучения ширина ΔL денситограммы на половине ее высоты больше в 1.4 раза, чем в случае $\theta = 0^\circ$.

На рис. 3 представлена измеренная зависимость $\Delta L(\varphi)$ ширины денситограммы изображения на половине ее высоты от угла φ отклонения Та-фольги в пучке излучения от начального положения 0° . Из приведенной зависимости следует, что при угле ориентации $\varphi \approx 0.8^\circ$ относительно начального положения 0° фольга ориентирована вдоль направления излучения, поскольку ширина изображения Та-фольги здесь минимальна.

Ожидалось, что ширина изображения фольги будет изменяться линейно в согласии со штриховыми линиями, показанными на рис. 3. Точка пересечения штриховых линий будет соответствовать точной ориентации фольги вдоль пучка излучения. Однако измеренная ориентационная зависимость $\Delta L(\varphi)$ демонстрирует иное поведение в области $\varphi = 0.6^\circ - 1.0^\circ$.

Возможно, это определяется эффектом преломления излучения на поверхностях фольги, что приводит к уширению изображения фольги, как это показано на рис. 1а (боковые лучи). Отметим, что эффект преломления формирует краевой фа-

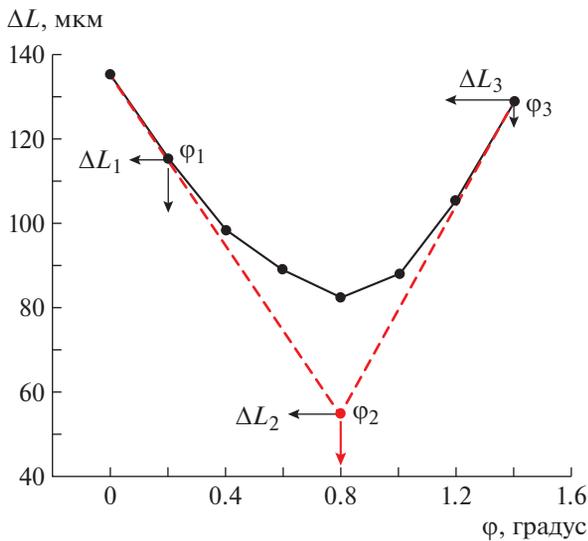


Рис. 3. Зависимость ширины ΔL денситограммы изображения от угла φ отклонения Та-фольги в пучке излучения от начального положения 0° .

зовый контраст в изображениях, образованных полихроматическим излучением [6, 7].

Угол α_2 выхода излучения из фольги связан с углом α_1 падения на поверхность фольги изнутри и углом α_f полного внешнего отражения излучения выражением $\alpha_2 = (\alpha_1^2 + \alpha_f^2)^{0.5}$. Ясно, что при наклоне фольги отношение α_2/α_1 стремится к 1. Эффект преломления становится малым, и значительного уширения изображения фольги не наблюдается (см. рис. 1б). Согласно рис. 3, при $1.2^\circ < \varphi < 0.4^\circ$ экспериментальная зависимость $\Delta L(\varphi)$ согласуется с ожидаемыми линейными зависимостями, показанными штриховыми линиями.

При угле θ наклона Та-фольги относительно направления излучения ширину изображения фольги можно оценить как $S_f = k(t_f + l_p) + t_m(k - 1)$, где $k = l_2/l_1$, l_1 и l_2 — расстояния от Та-мишени до Та-фольги и до рентгеновской пленки соответственно, t_f — толщина Та-фольги, $l_p = \theta l_f$ — проекция Та-фольги (см. рис. 1б) при угле θ наклона фольги относительно оси пучка излучения, l_f — длина Та-фольги вдоль пучка излучения при угле $\theta = 0^\circ$, t_m — толщина Та-мишени бетатрона. Расчетная величина S_f изображения фольги увеличивается линейно при возрастании угла θ и равна 0.15 мм при $\theta = 0.6^\circ$. Это равно ширине нормированной денситограммы на высоте 0.3 (см. рис. 2в).

Измерения ширины S_f изображения Та-фольги могут быть использованы для определения размера источника жесткого излучения в случае, когда не может быть применен, например, прибор Duplex IQI EN465–5/ASTM E 2002–98 [1] в силу его неэффективности для излучения с энер-

гией фотонов более 400 кэВ из-за малого поглощения жесткого излучения в тонких проволоках прибора. Из формулы для S_f следует, что размер источника будет равен $t_m = (S_f - k(t_f + \theta l_f))/(k - 1)$.

На рис. 4 приведены изображения фольги и денситограммы изображений, полученных при $\varphi_1 = 0.2^\circ$ (см. рис. 3) и толщинах стальной пластины, помещенной за фольгой, 40 и 55 мм (рис. 4а, 4в и 4б, 4г соответственно). При увеличении толщины пластины контраст изображения фольги уменьшается, так как все более жесткое излучение формирует изображение фольги из-за поглощения мягкой части спектра генерированного излучения в пластине-поглотителе. Однако ширины изображений Та-фольги по-прежнему составляют 0.115 мм. Изображение фольги при угле ее наклона 0.6° является геометрической тенью фольги в пучке излучения. При таком угле падения излучения на поверхность фольги нет волновых эффектов, которые зависят от длины волны излучения, т.е. от энергии фотонов жесткого тормозного излучения. Эффекты преломления и отражения, уширяющие изображение фольги, проявятся при малых углах наклона фольги. Поэтому ширина изображения фольги не зависит от спектра излучения. Результаты, приведенные на рис. 2а, 2в и 4, показывают, что ширина изображения фольги не меняется при использовании все более жесткого излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения размеров фокальных пятен микрофокусных источников жесткого γ -излучения основан на измерении увеличенного изображения микрообъекта, выполненного из тяжелого материала и имеющего достаточную толщину, чтобы обеспечить удовлетворительный абсорбционный контраст. Таким микрообъектом может быть фольга, ориентированная под малым углом к пучку излучения и имеющая толщину, примерно равную микрофокусу источника излучения. При этом толщина фольги вдоль пучка излучения должна быть достаточной, чтобы обеспечить эффективное поглощение жесткого тормозного излучения для получения удовлетворительного абсорбционного контраста ее увеличенного изображения. По ширине увеличенного изображения такого протяженного вдоль пучка излучения микрообъекта можно оценить размер источника излучения.

В экспериментах при использовании танталовой фольги толщиной $t_f = 13$ мкм и длиной $l_f = 4$ мм, ориентированной вдоль пучка излучения от микрофокусного источника на основе 18-мегаэлектронвольтового бетатрона, получена ориентационная зависимость ширины увеличенного в 2.4 раза радиографического изображения фольги. Согласно ориентационной зависимости, для изме-

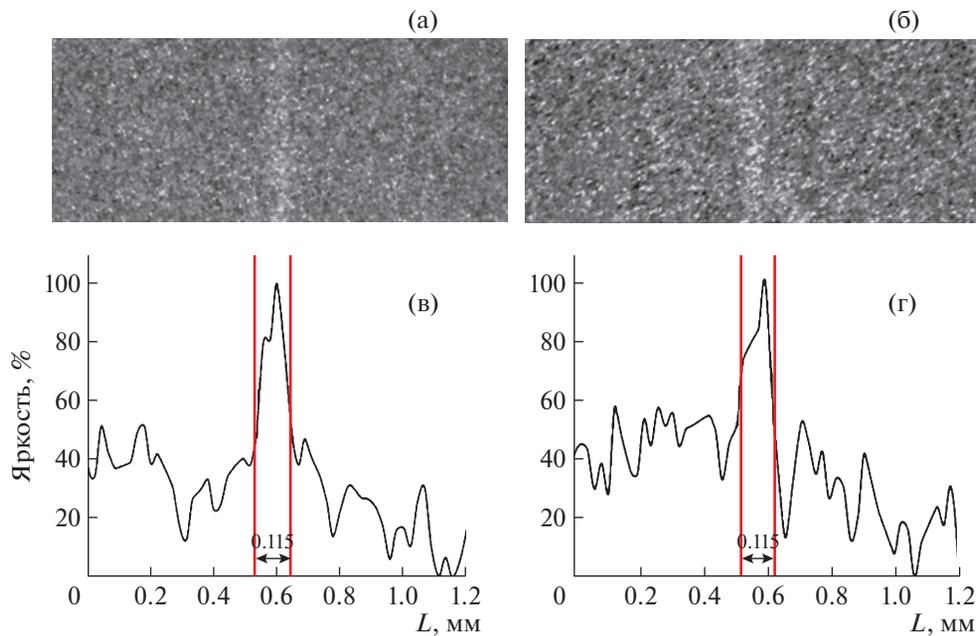


Рис. 4. Изображения фольги (а, б) и их денситограммы (в, г) при $\varphi_1 = 0.2^\circ$ и толщинах стальной пластины 40 (а, в) и 55 мм (б, г).

рения размера источника необходимо использовать изображение фольги, которая слегка наклонена под углом θ относительно направления излучения, чтобы исключить влияние эффектов преломления и отражения излучения от поверхностей фольги.

Для измерения размера фокального пятна следует получить ориентационную зависимость ширины ΔL денситограммы изображения фольги (см. рис. 3), провести линии по склонам зависимости (штриховые линии на рис. 3) для определения угла φ_0 предполагаемой точной ориентации фольги вдоль пучка излучения (φ_2 на рис. 3). Затем следует выбрать денситограмму изображения, полученного при угле φ , соответствующем склону ориентационной зависимости (например, φ_1 или φ_3 на рис. 3). При этом угол θ ориентации фольги относительно пучка излучения будет равен $\theta = |\varphi_0 - \varphi|$ (например, $\theta = (\varphi_2 - \varphi_1)$ или $(\varphi_3 - \varphi_2)$, см. рис. 3). Определив при угле θ ширину $S_{0,3}$ нормированной денситограммы на высоте 0,3, можно найти размер источника t_s по превышению $S_{0,3}$ величины $k(t_f + \theta l_f)$, которая является изображением наклоненной фольги при точечном источнике излучения. Размер источника излучения будет равен $t_s = (S_{0,3} - k(t_f + \theta l_f))/(k - 1)$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17-19-01217.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Computerised Information Technology Ltd: <http://www.cituk-online.com/acatalog/>
2. Gambaccinia M., Cardarellia P., Taibia A., Franconiera A., Di Domenico G., Marziana M., Barnab R.C., Auditoreb L., Morganab E., Loria D., Trifiròb, A. Trimarchib M. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section B. 2011. V. 269. P. 1157. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.02.089>
3. Pushin V.S., Chakhlov V.L. Патент № 2072643 РФ. 1997. <http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html>
4. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Sukharnikov K.V., Vaskovskii I.K. // JETP Letters. 2016. V. 103. № 11. P. 723. <https://doi.org/10.1134/S0021364016110114>
5. Yamada H. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section B. 2003. V. 199. P. 509. <https://doi.org/10.1016/S0168-583X>
6. Wilkins S.V., Gureyev T.E., Gao D., Pogany A., Stevenson A.W. // Nature. 1996. V. 384. P. 335.
7. Hirai T., Yamada H., Sasaki M., Hasegawa D., Morita M., Oda Y., Takaku J., Hanashima T., Nitta N., Takahashid M., Murata K. // J. Synchrotron Radiation. 2006. V. 13. P. 397. <https://doi.org/10.1107/S0909049506027026>