

УДК 621.384.663

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ПРОВОЛОЧНОГО СКАНЕРА

© 2022 г. Р. М. Нажмудинов^{a, b, *}, А. А. Кубанкина^a, И. А. Кищин^{a, b},
А. С. Кубанкин^{a, b}, Е. В. Болотов^a

^aБелгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, 308015 Россия

^bФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: Nazhmutdinov@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 18.11.2021 г.

После доработки 22.01.2022 г.

Принята к публикации 22.01.2022 г.

Представлена конструкция проволочного сканера, предназначенного для измерения пространственных характеристик пучков релятивистских и нерелятивистских заряженных частиц, а также пучков рентгеновского и гамма-излучения. Предлагаемый сканер содержит множество проволочек, выполненных из разных материалов, расположенных вдоль оси пучка и способных перемещаться в поперечном направлении. В процессе сканирования в проволочках под действием пучка образуется характеристическое рентгеновское излучение, спектры которого регистрируются энергодисперсионным рентгеновским детектором. Определение поперечных профилей исследуемого пучка заключается в измерении зависимости интенсивности излучения от прицельного параметра проволочек. Измеренные профили сопоставляют с конкретными проволочками по значению энергии характеристического рентгеновского излучения. На основе данных, полученных в процессе сканирования, определяют поперечные размеры, форму, траекторию, расходимость и эмиттанс пучка.

Ключевые слова: проволочный сканер, характеристическое рентгеновское излучение, диагностика пучков, поперечный профиль, расходимость, эмиттанс, траектория, рентгеновский детектор, энергодисперсионный детектор, спектр излучения.

DOI: 10.31857/S1028096022090126

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных частей ускорительных комплексов является система диагностики, предназначенная для определения пространственных и временных характеристик пучков частиц. В настоящее время известно множество способов диагностики пучков, основанных на использовании разных физических явлений [1–4]. Например, для определения положения, размеров, формы и поперечных профилей пучков ионизирующих излучений могут применяться люминофорные экраны [5, 6], а также экраны на основе переходного [7, 8] и параметрического рентгеновского [9, 10] излучений, несущих информацию также о расходимости пучков заряженных частиц. Для предотвращения разрушающего воздействия на диагностируемые пучки твердотельные экраны могут быть заменены на газовые завесы (струи) [11–13]. В некоторых ускорительных комплексах высоких

энергий неразрушающий мониторинг пространственных параметров пучка осуществляют с помощью синхротронного [14–16] или ондуляторного [17, 18] видов излучения.

В качестве универсального средства диагностики поперечных размеров и формы пучков низких и высоких энергий, отличающегося простой конструкцией и низкой стоимостью, широкое распространение получили проволочные сканеры, которые могут быть выполнены в виде статичных проволочных сеток [19] или включать в конструкцию подвижные проволочки [20–22]. При работе таких сканеров регистрируют интенсивность тормозного излучения или ток вторичной эмиссии, образующихся при взаимодействии частиц пучка с проволочками. Для минимизации деструктивного воздействия на пучки высоких

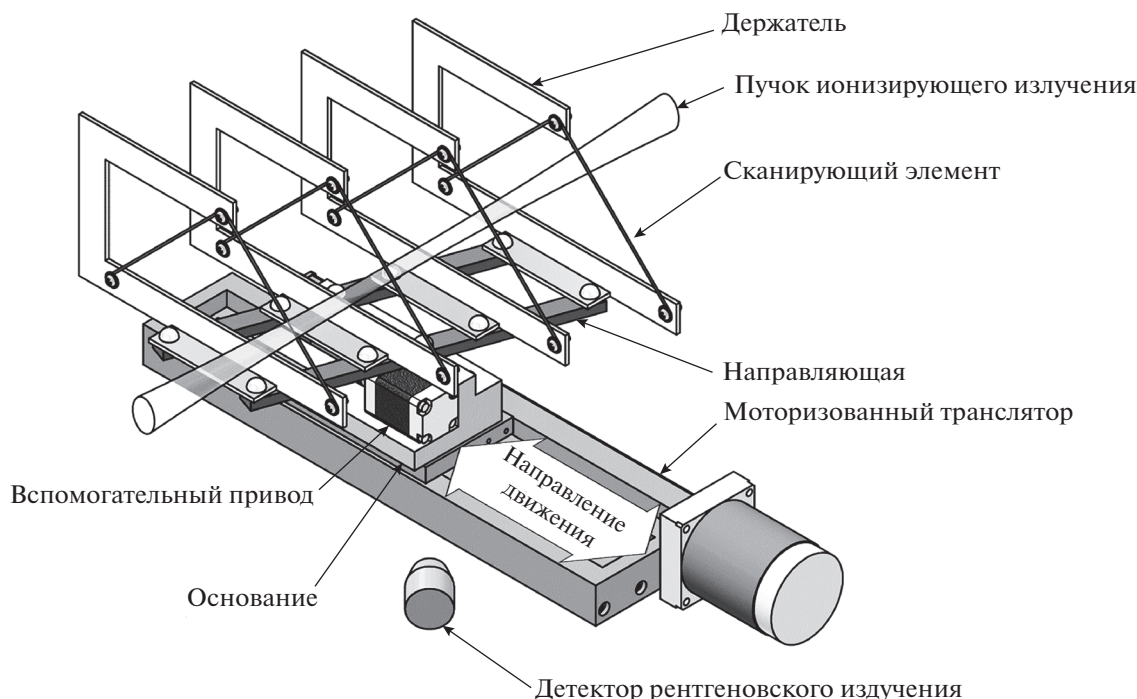


Рис. 1. Внешний вид проволочного сканера.

энергий вместо классического проволочного сканера возможно использовать его лазерный аналог [23, 24].

В настоящей работе приводится конструкция проволочного сканера, предназначенного для определения пространственных характеристик (положения, поперечных размеров и профилей, расходимости, эмиттанса) пучков релятивистских и нерелятивистских заряженных частиц, а также пучков фотонов. Для получения поперечных профилей предлагается измерять зависимость интенсивности характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) от расстояния между осью пучка и сканирующим элементом, представляющим собой тонкую проволочку. Для регистрации спектров ХРИ используется энергодисперсионный детектор, позволяющий разделить сигналы от разных сканирующих элементов по энергии излучения.

КОНСТРУКЦИЯ

Устройство и внешний вид предлагаемого проволочного сканера, представленного на рис. 1, является результатом продолжения работ [25–27], посвященных системам диагностики пучков частиц. Сканер содержит четыре сканирующих элемента, выполненных в виде проволочек диамет-

ром около 0.1 мм, изогнутых в форме буквы “Г”. Проволочки изготовлены из разных материалов (титана, меди, молибдена и вольфрама) и закреплены в вилкообразные алюминиевые держатели, плоскости которых посредством двух направляющих всегда ориентированы перпендикулярно предполагаемой оси пучка. Для регистрации ХРИ, образующегося в проволочках под воздействием быстрых частиц, используется полупроводниковый энергодисперсионный кремниевый детектор Amptek XR100SDD, позволяющий измерять рентгеновские спектры с эффективностью, близкой к 100% в диапазоне энергии 2–10 кэВ. Поскольку ХРИ распространяется изотропно, детектор может быть установлен под любым углом к оси пучка, обеспечивающим наблюдение всех сканирующих элементов в процессе работы. Одновременное перемещение всех сканирующих элементов в перпендикулярном оси пучка направлении осуществляется при помощи моторизованного транслятора Standa 8MT175 с минимальным шагом около 2.5 мкм. Расстояние между сканирующими элементами, отсчитываемое вдоль оси пучка, зависит от угла между осью пучка и направляющими, который может изменяться посредством предусмотренного в конструкции вспомогательного моторизованного привода.

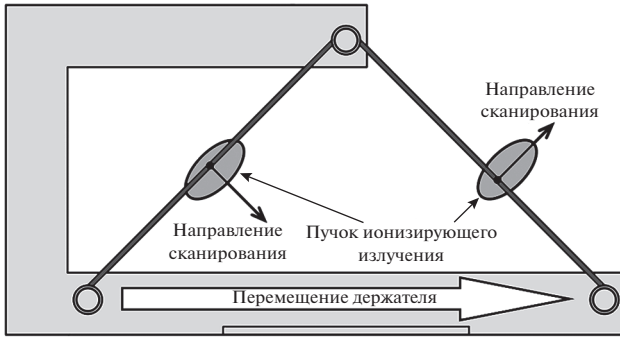


Рис. 2. Схема измерения поперечных профилей пучка частиц.

В процессе сканирования держатели двигаются перпендикулярно пучку, каждая проволочка пересекает пучок дважды (рис. 2). Благодаря форме проволочек, традиционно используемой в подобных устройствах [28, 29], пересечение пучка происходит в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет измерить сразу два поперечных профиля.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Взаимодействие частиц пучка с проволочками сопровождается образованием ХРИ, интенсивность которого пропорциональна плотности потока частиц пучка, а спектр содержит узкие пики, или линии, энергия которых определяется строением атомов проволочки. На рис. 3 представлены спектры ХРИ материалов, используемых для изготовления проволочек. Из рисунка видно, что, измерив энергию пика в спектре, можно однозначно определить, какой проволочке этот пик соответствует.

Для получения информации о поперечных профилях пучка частиц в месте расположения конкретной проволочки необходимо измерить зависимость интенсивности соответствующей линии ХРИ от величины смещения сканера в целом. В общем случае такая зависимость (рис. 4) будет иметь два пика, формы которых соответствуют вертикальному и горизонтальному профилям пучка и содержат информацию о его размерах σ_x и σ_y , а положения пиков l_x и l_y позволяют вычислить координаты пучка: $x = l_x/2^{1/2} + x_0$, $y = l_y/2^{1/2} + y_0$ (где x_0 и y_0 – константы, определяемые при калибровке сканера).

На основе поперечных профилей, измеренных в местах расположения проволочек, можно определить, как зависят поперечные размеры пучка от

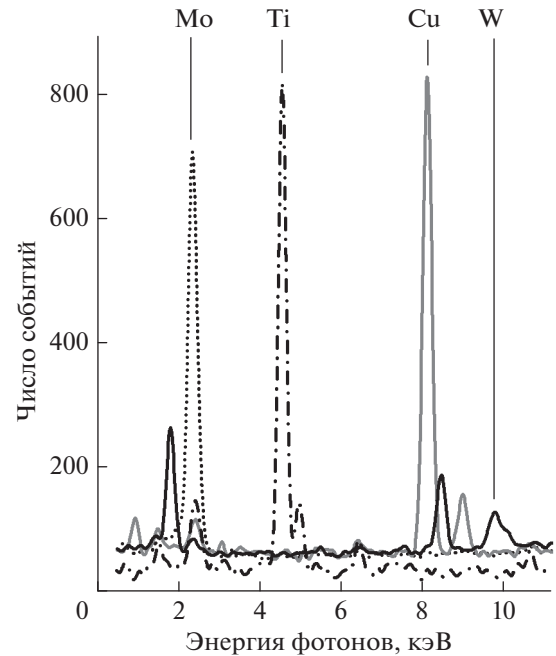


Рис. 3. Спектры характеристического рентгеновского излучения, регистрируемые во время работы сканера.

координаты вдоль оси z : $(\sigma_i)^2 = A_i(z - z_0)^2 + (\sigma_{i, \min})^2$, где $\sigma_{i, \min}$ – минимальные размеры пучка, A_i и z_0 – параметры фитирования, $i = x, y$ (рис. 5). Исходя из результатов фитирования можно оценить соответствующие значения эмиттанса $\epsilon_i = \sigma_{i, \min}(A_i)^{1/2}$ и расходимости $\theta_i = 2 \arctg(\epsilon_i/\sigma_{i, \min})$.

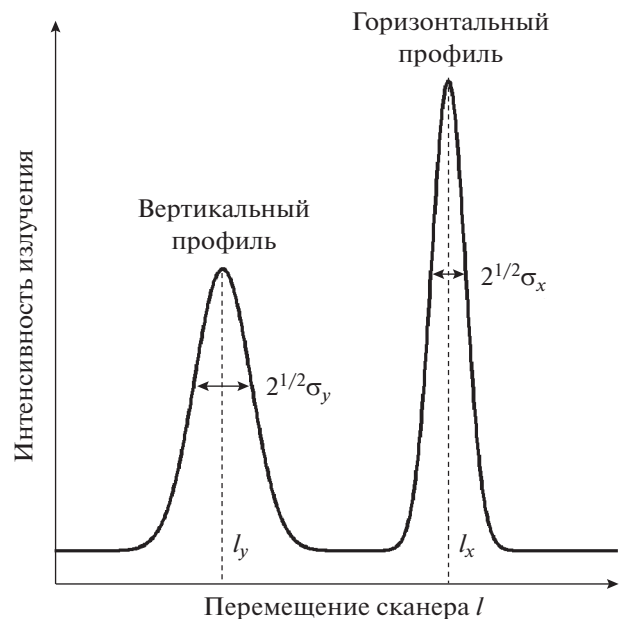


Рис. 4. Пример измеренных поперечных профилей.

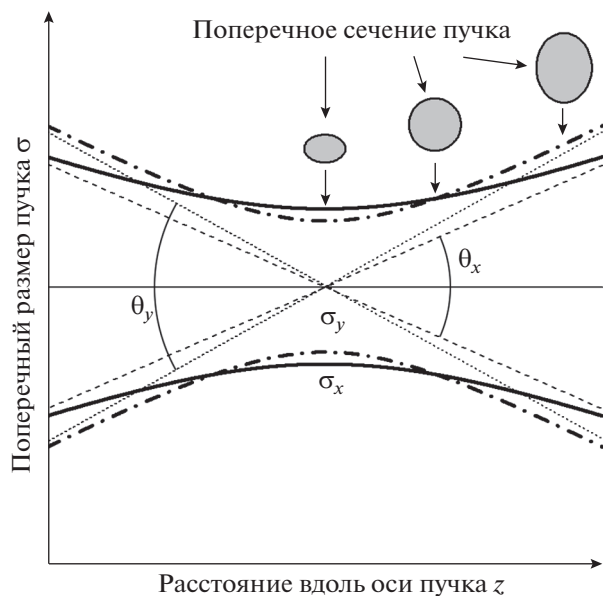


Рис. 5. Пространственные характеристики пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проволочный сканер описанной конструкции использовался на экспериментальной установке НИУ “БелГУ” для определения пространственных характеристик пучков электронов с энергией от 10 до 50 кэВ, током около 1 мкА и размером около 1 мм. Нужно отметить, что с ростом энергии заряженных частиц сечение ионизации атомных оболочек [30] существенно не меняется, что делает возможным применение разработанного сканера в том числе для диагностики пучков ультрарелятивистских частиц как при атмосферном давлении, так и в условиях глубокого вакуума.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках конкурсной части государственного задания по созданию и развитию лабораторий (проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheymol B. Development of Beam Transverse Profile and Emittance Monitors for the CERN LINAC4. Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II, 2011, 194 p. NNT: 2011CLF22201. HAL ID: tel-00877031
2. Jaster-Merz S., Assmann R.W., Burkart F., Dorda U., Dreyling-Eschweiler J., Huuth L., Kramer U., Stanitzki M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1596. 012047 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1596/1/012047>
3. Razuvaev G.P., Bae S., Choi H., Choi S., Ko H.S., Kim B., Kitamura R., Mibe T., Otani M. // J. Instrum. 2017. V. 12. P. C09001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/09/C09001>
4. Bravin E. arXiv:2005.07400 [physics.acc-ph]. 2020. 37 p.
5. Walasek-Hohne B., Andre C., Forck P., Gutlich E., Kube G., Lecoq P., Reiter A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2012. V. 59. № 5. P. 2307. <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2200696>
6. Harasimowicz J., Cosentino L., Finocchiaro P., Pappalardo A., Welsch C.P. // R. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 103302. <https://doi.org/10.1063/1.3488123>
7. Ogawa Y., Choi J.-Y., Suwada T., Kamitani T., Urano T., Furukawa K., Ohsawa S., Enomoto A., Sato I. Beam Monitor Utilizing Transition Radiation // Proc. Int. Conf. on Particle Accelerators. Washington, 1993. V. 3. P. 2516. <https://doi.org/10.1109/PAC.1993.309374>
8. Bhadra S., Cadabeschi M., de Perio P., Galymov V., Hartz M., Kirby B., Konaka A., Marino A.D., Martin J.F., Morris D., Stawnyczy L. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2012. V. 703. P. 45. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.11.044>
9. Kube G., Behrens C., Gogolev A.S., Popov Yu.P., Potylitsyn A.P., Lauth W., Weisse S. Investigation of the Applicability of Parametric X-ray Radiation for Transverse Beam Profile Diagnostics // Proc. 4th Int. Particle Accelerator Conf. Shanghai, 2013. P. 491.
10. Takabayashi Y. // Phys. Lett. A. 2012. V. 376. P. 2408. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2012.06.001>
11. Tsang T., Bellavia S., Connolly R., Gassner D., Makdisi Y., Russo T., Thieberger P., Trbojevic D., Zelensk A. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 105103. <https://doi.org/10.1063/1.2999905>
12. Tzoganis V., Welsch C.P. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 204104. <https://doi.org/10.1063/1.4879285>
13. Kumar N., Salehilashkajani A., Zhang H.D., Ady M., Forck P., Glutting J., Jones O.R., Kersevan R., Marriott-Doddington T., Mazzoni S., Rossi A., Schneider G., Udrea S., Veness R., Welsch C.P. // Phys. Medica. 2008. V. 73. P. 173. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.04.023>
14. Hofmann A. // IEEE Transac. Nucl. Sci. 1981. V. 28. № 3. P. 2131. <https://doi.org/10.1109/TNS.1981.4331614>
15. Bossart R., Bossert J., Burnod L., d'Amico E., Ferioli G., Mann J., Meot F., Coisson R. Proton Beam Profile Monitor Using Synchrotron Light // 11th Int. Conf. on High-Energy Accelerators. Experientia Supplementum. Geneva, 1980. V. 40. P. 470. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5540-2_60
16. Thurman-Keup R., Cheung H.W.K., Hahn A., Hurh P., Lorman E., Lundberg C., Meyer T., Miller D., Pordes S., Valishev A. // J. Instrum. 2011. V. 6. P. T09003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/09/T09003>
17. Castellano M. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1997. V. 391. № 2. P. 375. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00323-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00323-9)
18. Jeff A., Welsch C.P. Off-Axis Undulator Radiation for CLIC Drive Beam Diagnostics // Proc. 2nd Int. Beam Instrumentation Conf. Oxford, 2013. P. 228.
19. Vignet J.L., Delannoy A., Guéroult E., Gangant P., Foy J.C., Cuzon S., Houarner C., Blaizot M. The Beam Profile Monitors for SPIRAL 2 // Proc. 9th Eur. Work-

- shop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. Basel, 2009. P. 176.
20. Seely D.G., Bruhns H., Savin D.W., Kvale T.J., Galuschek E., Aliabadi H., Havener C.C. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2008. V. 585. P. 69. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.10.041>
 21. Gelbart W., Johnson R.R., Abeysekera B. // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1509. P. 38. <https://doi.org/10.1063/1.4773936>
 22. Moore T., Agladze N.I., Bazarov I.V., Bartnik A., Dobbins J., Dunham B., Full S., Li Y., Liu X., Savino J., Smolenski K. // Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams. 2014. V. 17. P. 022801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.17.022801>
 23. Bosco A., Price M.T., Blair G.A., Boogert S.T., Boorman G., Malton S., Driouchi C., Kamps T., Poirier F., Balewski K., Elsen E., Gharibyan V., Lewin H.-C., Schreiber S., Walker N., Wittenburg K. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2008. V. 592. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.04.012>
 24. Honda Y., Sasao N., Araki S., Higashi Y., Okugi T., Taniguchi T., Urakawa J., Yamazaki Y., Hirano K., Nomura M., Takano M., Sakai H. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2005. V. 538. P. 100. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.122>
 25. Nazhmudinov R.M., Kubankin A.S., Karataev P.V., Kishin I.A., Vukolov A.V., Potylitsyn A.P., Zhukova P.N., Nasonova V.A. // J. Instrum. 2018. V. 13. P. P12012. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/12/P12012>
 26. Патент 182076 (РФ). Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер профилей пучков ионизирующих излучений. / НИУ “БелГУ”. Назмудинов Р.М., Каратаев П.В., Кубанкин А.С., Каплий А.А. // 2018. Бюл. № 22.
 27. Патент 204393 (РФ). Устройство для измерения пространственных характеристик пучков ионизирующих излучений. / НИУ “БелГУ”. Назмудинов Р.М., Каплий А.А., Кубанкин А.С., Кишин И.А., Болотов Е.В. // 2021. Бюл. № 15.
 28. Ross M.C., Seeman J.T., Bong E., Hendrickson L., McCormick D., Sanchez-Chopitea L. Wire Scanners for Beam Size and Emittance Measurements at the SLC // Conf. Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conf. San Francisco, 1991. V. 2. P. 1201. <https://doi.org/10.1109/PAC.1991.164580>
 29. Cutler R.I., Mohr D.L., Whittaker J.K., Yoder N.R. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. V. 30. № 4. P. 2213. <https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4332765>
 30. Llovet X., Powell C.J., Salvat F., Jablonski A. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2014. V. 43. P. 013102. <https://doi.org/10.1063/1.4832851>

A System for Measuring the Spatial Characteristics of Ionizing Radiation Beams Based on X-Ray Fluorescent Wire Scanner

R. M. Nazhmudinov^{1, 2, *}, A. A. Kubankina¹, I. A. Kishin^{1, 2}, A. S. Kubankin^{1, 2}, E. V. Bolotov¹

¹Belgorod National Research University, Belgorod, 308015 Russia

²Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: Nazhmudinov@bsu.edu.ru

A wire scanner designed to measure the spatial characteristics of beams of relativistic and nonrelativistic charged particles, as well as beams of X-ray and gamma radiation, is proposed. The scanner contains several wires of different materials located along the beam axis and capable of moving across the beam. During scanning, characteristic X-ray radiation is generated in the wires under the action of the beam, the spectra of which are recorded by an energy-dispersive X-ray detector. Determination of the transverse profiles of the investigated beam consists in measuring the radiation intensity dependence on the wires impact parameter. The matching of the obtained profiles with specific wires is performed according to the energy of the characteristic X-ray radiation. The data obtained during the scanning allows determining the transverse dimensions, shape, trajectory, divergence and emittance of the beam.

Keywords: wire scanner, characteristic X-ray, beam diagnostics, transverse profile, divergence, emittance, trajectory, X-ray detector, energy dispersive detector, radiation spectrum.