

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-20-24>

УДК 539.106

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ

И. Д. Горлачев, А. В. Киреев, А. В. Платов*

РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: platon@inp.kz

В настоящей статье представлены результаты, полученные при измерении сечений выхода характеристического рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии ускоренных протонов с атомами мишеней (PIXE). Были получены данные по выходам PIXE при возбуждении K-, L- и M-оболочек атомов мишеней в диапазоне масс от Mg до Bi протонами с энергией 1 МэВ. При этом использовался подход, основанный на расчете сечений выхода рентгеновского излучения через сечения резерфордского обратного рассеяния, которые могут быть рассчитаны из формулы Резерфорда с высокой точностью. Такой подход позволяет уменьшить ошибки расчета сечений выхода PIXE и, таким образом, повысить точность получаемых данных. В дальнейшем предполагается расширить область исследований на протоны других энергий и тяжелые заряженные частицы в диапазоне энергий 0,5–1,7 МэВ/нуклон.

Ключевые слова: ускоритель, заряженные частицы, сечение выхода рентгеновского излучения, внутренние электронные оболочки.

ВВЕДЕНИЕ

Определение точности количественного анализа элементного состава образцов методом рентгеновской флуоресценции с ионным возбуждением (PIXE) требует получения максимально надежных данных, используемых в качестве фундаментальных параметров метода, таких как сечение выхода характеристического излучения, возникающего при взаимодействии ускоренных частиц с атомами мишеней [1]. В настоящее время существует несколько теоретических моделей с разной степенью надежности описывающих процессы, происходящих при взаимодействии ускоренных ионов с внутренними электронными оболочками атомов мишени. Так как испускание характеристического рентгеновского излучения является следствием нескольких процессов, происходящих на атомарном уровне, таких как первичная ионизация внутренних оболочек атома заряженными частицами, последующее заполнение вакансий электронами внешних оболочек с различными способами вывода освободившейся энергии, при теоретических расчетах необходимо все это аккуратно описывать. Наиболее удовлетворительное описание сечений выхода PIXE для диапазона энергий протонов 0,5–1,7 МэВ и отношения зарядов атомов налетающей частицы и атомов мишени $0,03 < Z_1/Z_2 < 0,3$ позволяет получить приближение возмущенного стационарного состояния (ЕСРССР теория) [2–4]. ЕСРССР модель является следствием усовершенствования борновского приближения плоских волн (PWBA) учитывающая энергетические потери налетающей частицы, Кулоновское отклонение иона, поляризацию и изменение энергии связи электронов в атомах (способом метода возмущенных стационарных состояний), а также релятивистскую коррекцию массы электро-

нов. Используя ЕСРССР теорию, были получены удовлетворительные данные по сечениям ионизации K-оболочек атомов мишеней [5]. Из-за большей сложности менее надежные рассчитанные значения сечений ионизации для L-оболочек представлены в работах [2, 6]. В то же время, учитывая значимость повышения точности определения сечений выхода флуоресценции, до настоящего времени в разных аналитических лабораториях продолжают работы по получению экспериментальных данных с использованием ускорителей заряженных частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для получения ускоренного протонного пучка в экспериментах использовался ускоритель тандемного типа [7] с возможностью вариации энергии в диапазоне от 300 кэВ до 1,7 МэВ. Мишень в экспериментах располагалась перпендикулярно к пучку.

Образцы были подготовлены в виде металлических пленок, напыленных методом магнетронного плазменного осаждения на органическую подложку. Толщина используемых пленок варьировалась в диапазоне от 29 до 200 мкг/см². Расчет сечений выхода PIXE производился через сечение Резерфордского обратного рассеяния, поэтому в экспериментах при облучении мишеней одновременно регистрировались и рентгеновские кванты, и обратно рассеянные частицы. Детектирование рентгеновского излучения осуществлялось Si(Li) детектором площадью 12 мм² и разрешением 145 эВ на линии 6,4 кэВ, расположенного под углом 135° к направлению движения пучка. Детектор оснащен защитным бериллиевым окном толщиной 8 мкм. При регистрации K-линий Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb и L-линий Ta, W, Pb, Bi перед детектором располагался Al поглотитель толщиной 25 мкм для уменьшения вклада в регистрируемый

спектр низкоэнергетичного рентгеновского излучения. Для измерения эффективности системы регистрации PIXE использовались калибровочные источники Fe-55 и Am-241 с известными активностями. Для калибровки использовались линии MnK_{α} , MnK_{β} , NpL_{α} , NpL_{β} , $^{241}Am\gamma_1$, $NpL_{\beta+\eta}$, NpL_{γ} , $^{241}Am\gamma_2$, $^{241}Am\gamma_3$. При калибровке измерительной системы источник помещался в точку расположения измеряемого образца, в целях повторения геометрии измерений. Для регистрации обратно рассеянных частиц использовался поверхностно барьерный детектор площадью 20 мм^2 , ось которого располагалась под углом 142° к направлению движения пучка. Угол, стягиваемый детектором, в экспериментах составлял $9,1$ мсрад.

Расчет сечений выхода характеристического рентгеновского излучения производился по формуле:

$$\sigma_X = \frac{N_X D_X \Omega_R \sigma_R}{\varepsilon_X N_R D_R} \left[\frac{\mu_t t}{1 - e^{-\mu_t t}} \right]. \quad (1)$$

В выражении (1) N_X и N_R – число зарегистрированных рентгеновских квантов и обратно рассеянных частиц соответственно; D_X и D_R – коэффициенты, учитывающие мертвое время при наборе рентгеновского спектра и спектра обратно рассеянных частиц соответственно; Ω_R – телесный угол, стягиваемый поверхностно барьерным детектором; ε_X – эффективность Si(Li) детектора, зависящая от энергии рентгеновских квантов; μ_t – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения в облучаемом образце, зависящий от энергии рентгеновских квантов; t – толщина напыленной пленки и σ_R – сечение обратного рассеяния для заданного угла и энергии первичного пучка. Член в квадратных скобках в выражении (1) учитывает самопоглощение рентгеновского излучения в мишени. В случае использования фильтра выражение (1) принимает вид:

$$\sigma_X = \frac{N_X D_X \Omega_R \sigma_R}{\varepsilon_X N_R D_R e^{-\mu_f \rho_f x}} \left[\frac{\mu_t t}{1 - e^{-\mu_t t}} \right],$$

где μ_f – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения в фильтре, зависящий от энергии рентгеновских квантов, ρ_f – плотность материала фильтра и x – толщина фильтра.

Предварительные измерения по ослаблению рентгеновского излучения алюминиевым фильтром, с помощью калибровочных образцов, показали хорошее совпадение с расчетной оценкой, поэтому при измерении сечений использовалась расчетная величина ослабления. (рисунок 1). Использование фильтра обусловлено тем, что при совпадении основного и низкоэнергетических квантов появляется суммарный пик, за счет чего снижается интенсивность основного пика, внося плохо учитываемую погрешность в результат измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения погрешности отношения количества зарегистрированных рентгеновских квантов к количеству обратно рассеянных частиц, используемых в выражении (1), была проведена серия из пяти измерений, выполненных при разных интегралах тока пучка на мишени и разных условиях обработки спектров рентгеновского излучения и обратно рассеянных частиц. В результате проведенных исследований были получены средние значения сечений выхода флуоресценции для 12 серий К-линий, 14 серий L-линий и 4 М-линий при возбуждении атомов мишени протонным пучком с энергией 1 МэВ.

В таблицах 1 (К-линии), 2 (L-линии) и 3 (М-линии) представлены выходы флуоресценции, как для отдельных линий, так и суммарные выходы серий (соответственно K_{tot} , L_{tot} и M_{tot}), являющиеся суммой отдельных линий. Погрешности, приведенные в таблицах 1–3, включают помимо погрешности отношения N_X к N_R также погрешности определения телесного угла детектора заряженных частиц, эффективности регистрации рентгеновского излучения и сечений обратного рассеяния. На рисунке 2 показаны в графическом виде сводные результаты зависимости сечений выхода PIXE для K_{tot} , L_{tot} и M_{tot} от атомного номера ядра мишени.

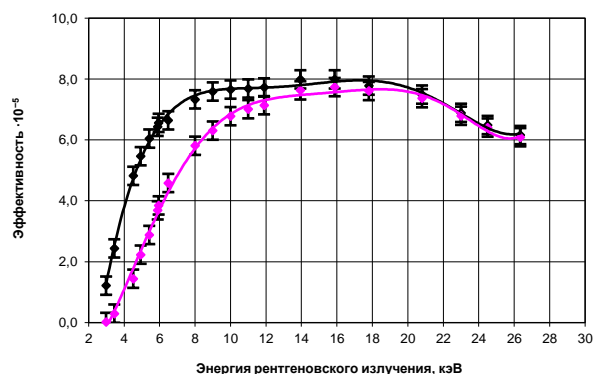


Рисунок 1. Эффективность регистрации PIXE без фильтра и с 25 мкм Al фильтром (расчетная) для рентгеновских квантов разной энергии

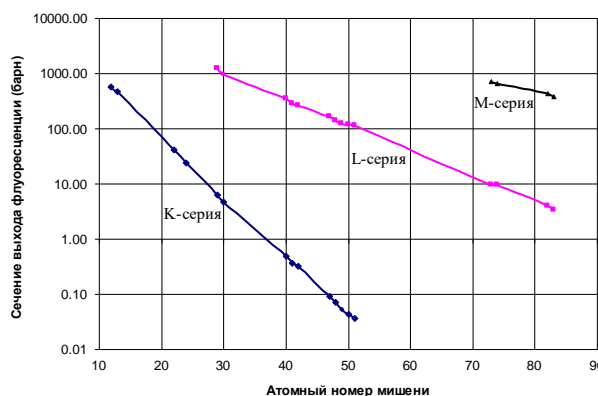


Рисунок 2. Зависимости сечений выхода PIXE для K_{tot} , L_{tot} и M_{tot} от атомного номера ядра мишени

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ**

*Таблица 1. Рассчитанные сечения выхода флуоресценции
для K-оболочек атомов мишеней (в барнах)*

Элемент	K_{α}	K_{β}	K_{tot}	K_{tot} , литературные данные ([ссылки])
Mg			525±37	641 [8]
Al			463±33	546 [8] 446 [9] 446 [10] 478 [11] 667 [12] 478 [13] 605 [14] 480 [55]
Ti	37,2±3,5	4,8±0,4	42,0±3,9	37 [15] 64 [16] 61 [17] 41,4 [18] 54,5 [19] 57 [20] 48,9 [21] 52,8 [22] 51,5 [23] 48,8 [24] 48,8 [25] 49,4 [26] 50 [55]
Cr	21,6±1,8	2,6±0,2	24,2±2,0	36 [16] 21,5 [18] 28 [21] 28,5 [24] 26,7 [25] 25 [27] 28,3 [28] 29 [55]
Cu	5,6±0,7	0,80±0,09	6,4±0,7	6,01 [13] 6,9 [14] 5,4 [15] 8,7 [16] 7,17 [19] 7,25 [22] 7,12 [23] 7,25 [24] 6,9 [25] 7,89 [27] 8,6 [29] 4,36 [30] 6,3 [31] 8,8 [32] 6 [33] 7,3 [34] 7,48 [35] 7,16 [36] 5,7 [37] 8,6 [48] 7,0 [55]
Zn	4,2±0,5	0,52±0,05	4,7±0,5	5,46 [24] 5,27 [25] 5,31 [28] 5,13 [35] 6,42 [38] 5,6 [39] 5,4 [55]
Zr	0,41±0,05	0,080±0,014	0,49±0,06	0,31 [15] 0,377 [23] 0,324 [40] 0,36 [55]
Nb	0,30±0,03	0,062±0,009	0,36±0,03	0,29 [55]

Элемент	K_{α}	K_{β}	K_{tot}	K_{tot} , литературные данные ([ссылки])
Mo	0,27±0,02	0,049±0,010	0,32±0,02	0,23 [29] 0,29 [31] 0,22 [37] 0,218 [41] 0,23 [42] 0,239 [43] 0,23 [49] 0,22 [55]
Ag	0,079±0,007	0,014±0,003	0,094±0,009	0,065 [15] 0,0706 [19] 0,078 [23] 0,0358 [30] 0,08 [32] 0,073 [36] 0,076 [37] 0,063 [42] 0,064 [44] 0,079 [45] 0,0618 [46] 0,087 [50] 0,067 [55]
Cd	0,059±0,005	0,012±0,002	0,071±0,006	0,046 [39] 0,0346 [40] 0,049 [44]
In	0,044±0,003	0,0082±0,0013	0,053±0,003	0,0612 [27] 0,036 [39] 0,0264 [40] 0,05 [45] 0,0377 [47]
Sn	0,037±0,002	0,0068±0,0014	0,043±0,004	0,032 [15] 0,059 [31] 0,034 [37] 0,026 [39] 0,0167 [40] 0,029 [42] 0,037 [43] 0,032 [44] 0,051 [49]
Sb	0,030±0,003	0,0064±0,0005	0,036±0,004	0,026 [15] 0,026 [44] 0,0257 [47]

*Таблица 2. Рассчитанные сечения выхода флуоресценции
для L-оболочек атомов мишеней (в барнах)*

Элемент	$L_{\alpha}+L_{\beta}$	L_{β}	L_{γ}	L_{tot}	L_{tot} , литературные данные ([ссылки])
Cu				1260±58	900 [51]
Zn				967±40	
Zr				350±25	
Nb				288±17	
Mo				266±17	
Ag				164±11	310 [55]
Cd				140±11	260 [55]
In				123±11	240 [55]
Sn				117±10	145 [34] 210 [55]
Sb				113±9	180 [55]
Ta	6,1±0,6	3,2±0,4	0,40±0,07	9,7±1,1	9,3 [52] 12,42 [54] 10 [55]

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ**

Элемент	$L_{\alpha}+L_{\beta}$	L_{β}	L_{γ}	L_{tot}	L_{tot} , литературные данные (ссылки)
W	$6,0 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,3$	$0,40 \pm 0,07$	$9,5 \pm 0,5$	11,11 [54] 9,5 [55]
Pb	$2,4 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,1$	$0,20 \pm 0,04$	$3,9 \pm 0,2$	3,94 [53] 3,46 [54] 4 [55]
Bi	$2,1 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$	$0,20 \pm 0,04$	$3,4 \pm 0,4$	2,38 [52] 3,37 [54] 3,6 [55]

Таблица 3. Рассчитанные сечения выхода флуоресценции для М-оболочек атомов мишеней (в барнах)

Элемент	M_{tot}	M_{tot} , литературные данные (ссылка)
Ta	705 ± 58	1026 [54]
W	647 ± 53	858 [54]
Pb	438 ± 50	503 [54]
Bi	384 ± 30	458 [54]

В таблицах 1–3 представлены также доступные данные по сечениям выхода PIXE, полученные экспериментальным путем в других лабораториях. Из таблиц 1–3 следует, что существует достаточно большое количество данных для ионизации К-оболочки. В то же время в этом случае наблюдается большой разброс в полученных значениях сечений выхода флуоресценции, что подтверждает важность получения новых данных. В случае L-оболочки и М-оболочки доступные экспериментальные данные очень ограничены. Важен также тот факт, что в наших экспериментах получены сечения для большого количества элементов при одинаковых условиях, что позволяет соотносить сечения возбуждений PIXE для разных линий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-технической программы #BR09158499 Министерства энергетики Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Johansson S.A.E., Campbell J.L. PIXE: A novel technique for element analysis. Chichester: John Wiley, 1988.
- Brandt W., Lapicki G. // Phys. Rev. 1981. A 23. p. 1717.
- Lapicki G., Goldstein M., Brandt W. // Phys. Rev. 1981. A 23. p. 2727.
- Lapicki G. // X-ray spectrometry. 2005. № 34. p. 269.
- Paul H., Sacher J. // Atom. Data Nucl. Data Tables. 1989. vol. 42. p. 105.
- Brandt W., Lapicki G. // Phys. Rev. 1979. A 20. p. 465.
- Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М. 1990. с. 139. [Trudy XII Vsesoyuznogo soveshchaniya po uskoritelyam zaryazhennykh chastits. Moscow. 1990. p. 139.] (in rus.)
- Khan J.M., Potter D.L., and Worley R.D. Phys. Rev. 1965. A 139. p. 1735.
- Proceedings of the Third International Conference on Atomic Physics. New York. Plenum Press. 1973. p. 155.

- Basbas G., Brandt W., and Laubert R. // Phys. Rev. 1973. A7. p. 983.
- Tawara H., Hachiya Y., Ishii K., and Morita S. // Phys. Rev. 1976. A13. p. 572.
- Lennard W. N. and Phillips D. // Nucl. Instr. Methods. 1979. 166. p. 521.
- Sera K., Ishii K., Kamiya M., Kuwako A., and Morita S. // Phys. Rev. 1980. A21. p. 1412.
- Geretschlaeger M., and Benka O. // Phys. Rev. 1986. A34. 866.
- Bearse R.C., Close D.A., Malanify J.J., and Umbarger C.J. // Phys. Rev. 1973. A7. p. 1269.
- Bodart F., Wilk S., Deconnik G. // X Ray Spectrometry. 1975. № 4. p. 161.
- Beam-foil spectroscopy. Collisional and radiative processes / Plenum Press; edited by I.A. Sellin and D.J. Pegg. New York. 1976. Vol. 2. p. 519.
- 9-th International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions. University of Washington. 1976. p. 419.
- Khan M.R., Crumpton D., and Francols P.E. // J. Phys. 1976. B9. p. 455.
- Knaf B., Presaer G., and Stahler J. // Z. Phys. 1977. A282. p. 25.
- Lopes J.S., Jevus A.P., Ferrelra G.P., and Gil F.B. // J. Phys. 1978. B11. p. 2181.
- Barfoot K.M., Mitchell I.V., Gilboy W. B., and Eschbach H. L. // Nucl. Instr. Methods. 1980. № 168. p. 131.
- Laegsgaard E., Andersen J.U., and Hogedal F. // Nucl. Instr. Methods. 1980. № 169. p. 293.
- Brown M.D., Simons D.G., Land D.J., and Brennan J.G. // Phys. Rev. 1982. A25. p. 2935.
- Brown M.D., Simons D.G., Land D.J., and Brennan J.G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. № 30. p. 957.
- Geretschlaeger M., and Benks O. // Phys. Rev. 1986. A34. p. 866.
- Kolatay E., Berenyl D., Kiss I., Riez S., Hock G., and Basco J. // Z. Phys. 1976. A278. p. 299.
- Olabanji S.O., and Calvert J.M. // Nucl. Instr. Methods. 1986. № 251. p. 354.
- Hansteen J.M., and Messelt S. // Nucl. Phys. 1957. № 2. p. 526.
- Singh D. // Phys. Rev. 1957. № 107. p. 711.
- Messelt S. // Nucl. Phys. 1958. № 5. p. 435.
- Proceedings of International Conference on Inner Shell Ionization Phenomena. U.S. AES, Oak Ridge. 1973. p. 1019.
- Lear R.D., and Gray T.J. // Phys. Rev. 1973. A8. p. 2409.
- Hopkins F., Brenn R., Whittemore A.R., Karp J., and Blattacherjce S.K. // Phys. Rev. 1975. A11. p. 916.
- Lopes J.S., Jesus A.P., and Ramos S.C. // Nucl. Instr. Methods. 1980. № 169. p. 311.
- Andersen J.U., Laegsgaard E., and Lund M. // Nucl. Instr. Methods. 1982. № 192. p. 79.
- Bhattacharya D., Mitra S.K. // Pramana. 1982. № 19. p. 399.
- Tawara H., Ishii K., Morita S., Kaji H., Hsu C.N., and Shiokawa T. // Phys. Rev. 1974. A9. p. 1617.
- Khan M.R., Hopkins A.G., Crumpton D., and Francois P.E. // X-ray Spectrometry. 1977. № 6. p. 140.
- Magno C., Milazzo M., Pizzi C., Pomo F., Rota A., and Riecobono G. // Nuovo Cimento. 1979. A54. p. 277.
- Criswell T.L., and Gray T.J. // Phys. Rev. 1974. A10. p. 1145.

42. Anholt R. // Phys. Rev. 1978. A17. p. 983.
43. Divous S., Raith B., and Gonslor // Nucl. Instr. Methods. 1984. B3. p. 27.
44. Kheld N.A., Gray T.J. // Phys. Rev. 1975. A11. p. 893.
45. Wilson S.R., McDanel F.D., Rowe J.R., and Duggan J.I. // Phys. Rev. 1977. A16. p. 903.
46. Inner-shell and x-ray physics of atoms and solids / Plenum; edited by D.J. Fabian, H. Kleinpoppen, and L.M. Watson. New-York. 1981. p. 21.
47. Jesus A.P., and Lopes J.S. // Instr. Methods. 1982. 192. p. 25.
48. Hansteen J.M., and Messelt S. // Nucl. Phys. 1957. № 2. p. 526.
49. Messelt S. // Nucl. Phys. 1958. № 5. p. 435.
50. Bissinger G.A., Shafroth S.M., and Waltner A.W. // Phys. Rev. 1972. A5. p. 2046.
51. Khan J.M., Potter D.L., and Worley R.D. // Phys. Rev. 1966. 145. p. 23.
52. Chang C.N., Morgan J.F., and Blatt S.L. // Phys. Rev. 1975. A11. p. 607.
53. Busch C.E., Baskin A.B., Nettles P.H., and Shafroth S.M. // Phys. Rev. 1973. A7. p. 1601.
54. Goudarzi M., Shokouhi F., Lamehi-Rachti M., and Olialy P. // Nucl. Instr. Methods. 2006. B247. p. 217.
55. Ключников А.А., Пучеров Н.Н., Чеснокова Т.Д., Щербин В.Н. Методы анализа на пучках заряженных частиц. Киев. Наукова Думка. 1987. [Klyuchnikov A.A., Pucherov N.N., Chesnokova T.D., Shcherbin V.N. Metody analiza na puchkakh zaryazhennykh chastits. Kiev. Naukova Dumka. 1987.] (in rus.)

1-МэВ ПРОТОНДАРДАН СИПАТТАЛҒАН РЕНТГЕН СӘУЛЕУЛЕРІНІҢ ШЫҒЫМЫНА КӨЛДІК ҚЫМДАРДЫ ӨЛШЕУ

И. Д. Горлачев, А. В. Киреев, А. В. Платов*

ҚР МЭ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: platov@inp.kz*

Бұл мақалада жеделдетілген протондардың нысана атомдарымен әрекеттесуінен туындайтын тән рентгендік сәулеленудің шығымы үшін көлденең қималарды өлшеуге бағытталған жұмыс берілген (PIXE). PIXE кірістілік деректері Mg-ден Bi-ге дейінгі массалық диапазондағы мақсатты атомдардың K-, L- және M-қабықшаларының энергиясы 1 МэВ протондармен козуы кезінде өлшенді. Бұл жағдайда жоғары дәлдікпен Резерфорд формуласынан есептеуге болатын Резерфордтың кері шашырау қимасы арқылы PIXE шығыс қималарын есептеуге негізделген тәсіл қолданылды. Бұл тәсіл PIXE шығуының көлденең қималарын өлшеудегі қателерді азайтуға және осылайша алынған деректердің дәлдігін жақсартуға мүмкіндік береді. Болашақта 0,5–1,7 МэВ/нуклон энергетикалық диапазонындағы басқа энергиялардың протондары мен ауыр зарядталған бөлшектерді қамту үшін зерттеу аймағын кеңейту жоспарлануда.

Түйін сөздер: үдеткіш, зарядталған бөлшектер, рентген сәулелерінің шығыс қимасы, ішкі электронды қабаттар.

MEASUREMENT OF THE CROSS SECTIONS FOR THE YIELD OF CHARACTERISTIC X-RAY RADIATION FROM 1-MeV PROTONS

I. D. Gorlachev, A. V. Kireev, A. V. Platov*

RSE “Institute of Nuclear Physics” ME RK, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: platov@inp.kz*

This article presents the results obtained by measuring the characteristic x-ray production cross sections arising from the interaction of accelerated protons with the target atoms (PIXE). The PIXE production data were measured at the excitation of the K-, L-, and M-shells of target atoms in the mass range from Mg to Bi by 1 MeV protons. We use the approach based on the calculation of the PIXE production cross sections through the Rutherford backscattering cross section, which can be calculated from the Rutherford formula with high accuracy. This approach makes it possible to reduce the errors in measuring of the PIXE production cross sections and, thus, to improve the accuracy of the data obtained. Further, it is planned to expand the research area including protons of other energies and heavy charged particles in the energy range of 0.5–1.7 MeV/nucleon.

Keywords: accelerator, charged particles, x-ray production cross section, internal electron shells.