

УДК 539.1.09, 658.562: 621
PACS 29.17.+w, 29.27-a
DOI 10.24144/2415-8038.2019.45.50-60

І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, В.Т. Маслюк, О.І. Лендел, М.І. Романюк,
 І.Г. Мегела, О.М. Турховський

Інститут електронної фізики НАН України, 88017, м. Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна,
 e-mail: igor.profi@gmail.com

ДВОШАРОВІ МІШЕНІ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПУЧКІВ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ФОТОНІВ НА ЕЛЕКТРОННОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ – МІКРОТРОНІ М-30

Проведені експериментальні дослідження поглинання електронів в одно-(С (7 ÷ 46 мм), Al (8 ÷ 48 мм), Ta (0.1 ÷ 1 мм)) та двошарових (Ta (1 мм) + С (7 ÷ 46 мм)) і Ta (1 мм) + Al (8 ÷ 40 мм)) мішенях на електронному прискорювачі – мікротроні М-30 для області енергій електронів 6.5 ÷ 17.75 МеВ. Додатково, проведені дослідження поглинання високоенергетичних фотонів одношаровими мішенями (С (20 мм), Al (20 мм)) з використанням активаційних детекторів. Встановлені оптимальні параметри двошарових мішеней (Ta + С і Ta + Al) для формування «чистих» пучків гальмівного випромінювання у зазначеній області енергій.

Ключові слова: мікротрон, гальмівне випромінювання, залишкові електрони, поглинання електронів, двошарові мішені.

Вступ

Гальмівне випромінювання, отримане на електронних (лінійних) прискорювачах чи мікротронах, широко застосовується для експериментальних досліджень характеристик фотоядерних реакцій (область енергій гігантського дипольного резонансу), а також для вирішення прикладних задач [1–4].

Для отримання пучків гальмівного випромінювання на електронних прискорювачах використовують конвертери (гальмівні мішені) з тугоплавких металів (W, Ta, Pt) з великим зарядовим числом Z [4–8]. Вихід гальмівного випромінювання залежить від енергії електронів, струму електронного пучка, матеріалу мішені та його ефективної товщини. Оптимальна товщина конвертера (коли вихід гальмівного випромінювання є максимальним) становить – 0,3 ÷ 0,5 величини пробігу електронів в речовині, з якої він виготовлений [6–8]. Саме цим обумовлена наявність залишкових електронів у пучках

пучках гальмівного випромінювання [9].

При взаємодії прискорених електронів з гальмівною мішенню, конструкційними матеріалами прискорювача і повітрям відбувається їх розсіяння і перерозподіл енергетичного спектру. Крім того, залишкові електрони, потрапляючи на досліджувані мішені, додатково ініціюють в них електроядерні та фотоядерні реакції [10], які є джерелом систематичних похибок експерименту та призводять до руйнування самих джерел.

У зв'язку з цим, виникає необхідність очистки пучків гальмівного випромінювання від залишкових електронів. Для зменшення числа електронів, які попадають на досліджувану мішень, без значного ослаблення інтенсивності гальмівного випромінювання, використовують матеріали з малим зарядовим числом Z (С, Al) [1, 2, 11, 12]. Тому при дослідженні характеристик фотоядерних реакцій на електронних прискорювачах виникає необхідність формування «чистих» пучків гальмівного випромінювання

в місці розташування досліджуваних мішеней по їх площині. Реалізація вказаної задачі досягається шляхом застосування комбінованих (двошарових) мішеней, які використовуються для генерації пучка гальмівного випромінювання та його очистки від залишкових електронів.

Метою представленої роботи є встановлення оптимальних параметрів двошарових мішеней для формування «чистих» пучків високоенергетичних фотонів на електронному прискорювачі — мікротроні М-30 для області енергій $6.5 \div 17.75$ МеВ.

Експериментальні дослідження поглинання електронів одно- та двошаровими мішенями

Для реалізації вказаної задачі були проведені експериментальні дослідження поглинання прискорених електронів для матеріалів, з яких виготовлялися гальмівна мішень — тантал (Та) і фільтри для очистки пучка від залишкових електронів — вуглець (С, $\rho = 1.73$ г/см³), алюміній (АІ), та їх комбінацій (Та + С і Та + АІ). У якості гальмівної мішені, завдяки його ядерно-фізичним характеристикам, використовувався тантал [13]. Вибір вуглецю (реакторного графіту) [14,15] й алюмінію, як матеріалів фільтрів для поглинання залишкових електронів, обумовлений їх високими енергетичними порогоми і малими перерізами взаємодії з гальмівним випромінюванням по каналах фотоядерних реакцій [10], а також їх високою радіаційною стійкістю та низькою вартістю. Крім того, ці матеріали поглинають низькоенергетичні фотони без суттєвої деформації високоенергетичної частини спектру гальмівного випромінювання [1, 11, 12] та можуть слугувати отриманню однорідних полів випромінювання [10].

Характеристики мішеней

Експериментально коефіцієнт поглинання електронів в досліджуваних мішенях визначався методом пропускання на мікротроні М-30 при енергіях електронів 6.4; 9.75; 12.7; 14.9; 17.75 МеВ. Вимірювання виходів прискорених та залишкових електронів, що про-

йшли шар поглинаючого матеріалу, проводилися за допомогою монітора вторинної емісії (прохідною камерою) та циліндром Фарадея, відповідно. Сигнал монітора вторинної емісії калібрувався по сигналу циліндра Фарадея в процесі вимірів. При проведенні експериментальних досліджень використовувалися диски металічного алюмінію (діаметр — 39 мм, товщина — $8 \div 48$ мм,) і реакторного графіту (діаметр — 39 мм, товщина — $7 \div 46$ мм), та квадратні танталові пластини (ребро — 30 мм, товщина — $0.1 \div 1$ мм). У випадку двошарових мішеней використовувалася комбінація танталу (товщина — 1 мм) та алюмінію (товщина — $8 \div 40$ мм) або вуглецю (товщина — $7 \div 39$ мм). За результатами експериментальних досліджень та моделювання за допомогою сучасних обчислювальних програм [6–8] було визначено, що для формування пучків гальмівного випромінювання для області енергій $6.5 \div 17.75$ МеВ оптимальна товщина Та становить — 1 мм.

Методика експерименту

Експериментально коефіцієнт поглинання електронів в досліджуваних мішенях визначався методом пропускання на мікротроні М-30 при енергіях електронів 6.4; 9.75; 12.7; 14.9; 17.75 МеВ. Вимірювання виходів прискорених та залишкових електронів, що пройшли шар поглинаючого матеріалу, проводилися за допомогою монітора вторинної емісії (прохідною камерою) та циліндром Фарадея, відповідно. Сигнал монітора вторинної емісії калібрувався по сигналу циліндра Фарадея в процесі вимірів.

Коефіцієнти пропускання (T_e) та поглинання (A_e) визначалися за формулами:

$$T_e = I_{CF}/I_{MSE}, \quad (1)$$

$$A_e = (1 - T_e) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де I_{MSE} і I_{CF} — сигнали від монітора вторинної емісії та циліндра Фарадея, відповідно.

На рис. 1 представлено схему вимірів коефіцієнта пропускання електронів одношаровими та двошаровими мішенями на мікротроні М-30, де 1 — мікротрон М-30, 2 — монітор вторинної емісії, 3 — вихідне вікно

вузла виводу, 4 – місце встановлення досліджуваних мішеней, 5 – циліндр Фарадея, 6 – вхідне вікно циліндра Фарадея, 7 і 8 – вимірювальні опори монітора вторинної емісії та циліндра Фарадея, 9,10 – аналогово-цифрові перетворювачі сигналу від монітора вторинної емісії та циліндра Фарадея, 11 – адаптер інтерфейсів, 12 – персональний комп'ютер (віртуальний пульт). На рис. 2 приведено фотографію експериментальної установки.

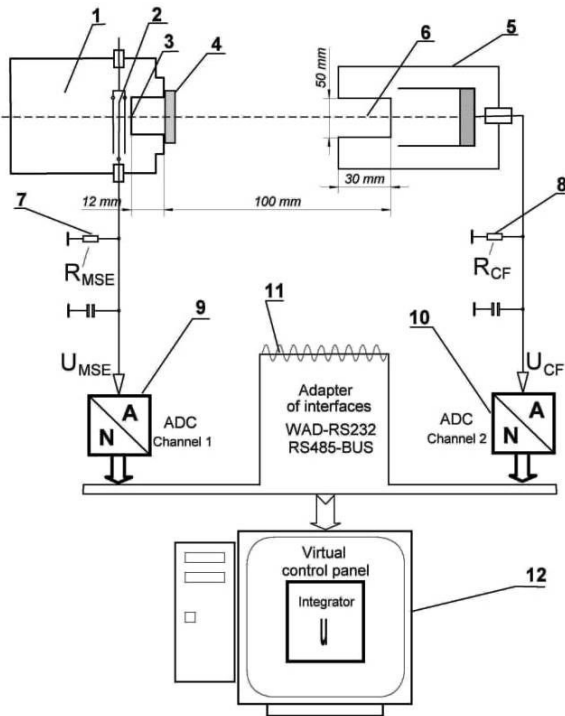


Рис. 1: Схема експериментальних досліджень пропускання (поглинання) електронів одно та двошаровими мішенями на мікротроні М-30 гальмівної мішені з танталу товщиною 1 мм.

Нестабільність енергії електронів в процесі проведення експерименту не перевищувала 0,04 MeV. Ефективність виводу електронів становила – 90 ÷ 95%.

Дослідження проводилися в площині, перпендикулярній до вісі пучка електронів на відстані 112 мм від вихідного вікна вузла виводу прискорених електронів.

Одно- та двошарові мішені встановлювалися впритул до вузла виводу на відстані 12 мм від вихідного титанового вікна (товщиною – 25 мкм) прискорювача. При проходженні через титанове вікно електрони гублять до 30 keV від початкової енергії. Розміри електронного пучка на виході вихідно-

го вікна прискорювача становили 10 ÷ 12 мм по горизонталі та 3 ÷ 4 мм по вертикалі.

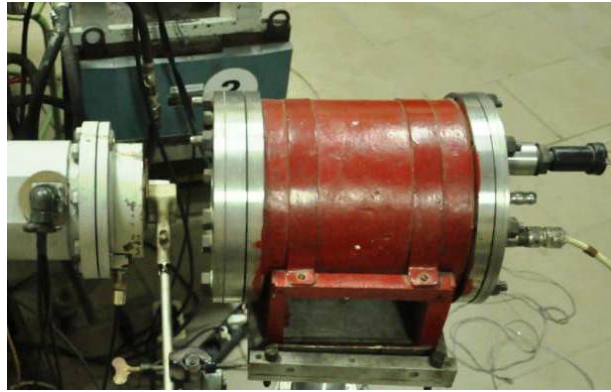


Рис. 2: Фотографія експериментальної установки дослідження пропускання (поглинання) електронів на мікротроні М-30.

Результати досліджень

Коефіцієнти пропускання електронів визначалися згідно формули (1). Для кожної окремої мішені проводилися 3 серії експериментальних вимірів при фіксованих значеннях енергії електронів. Середня статистична похибка для кожної окремої серії вимірів не перевищувала 5%. Значення залежності відносних коефіцієнтів пропускання електронів одно- та двошаровими мішенями від енергії електронів при фіксованих значеннях їх товщини представлені на рис. 3.

Коефіцієнти поглинання електронів визначалися з формули (2).

Експериментально встановлено, що одношарові мішені виготовлені з вуглецю, товщини яких становлять 20 і 39 мм, забезпечують поглинання > 98% електронів з енергіями 6.4 та 12.7 MeV відповідно, а виготовлені з Al, товщини яких становлять 12; 20; 32 і 40 мм, забезпечують таке ж поглинання електронів з енергіями 6.4; 9.75; 14.9 та 17.75 MeV відповідно. Отримані експериментальні дані корелюють з результатами моделювання за пакетами програм «GEANT» [11, 16] для енергій електронів > 10 MeV та «MNCP» [13] для області енергії електронів 5 ÷ 10 MeV. Крім того, значення товщини поглинання електронів для C та Al добре узгоджуються зі значеннями «практичного» [13] пробігу електронів бази даних «ESTAR» [9] для зазначеної області

енергій. Двошарові мішені, які склалися з Та (1 мм) і С (20 і 39 мм) забезпечують поглинання $> 98\%$ електронів з енергіями 9.75 та 17.75 MeV відповідно, а з Та (1 мм) і Al

(12; 20; та 32 мм) забезпечують таке ж поглинання електронів з енергіями 9.75, 14.9 та 17.75 MeV відповідно.

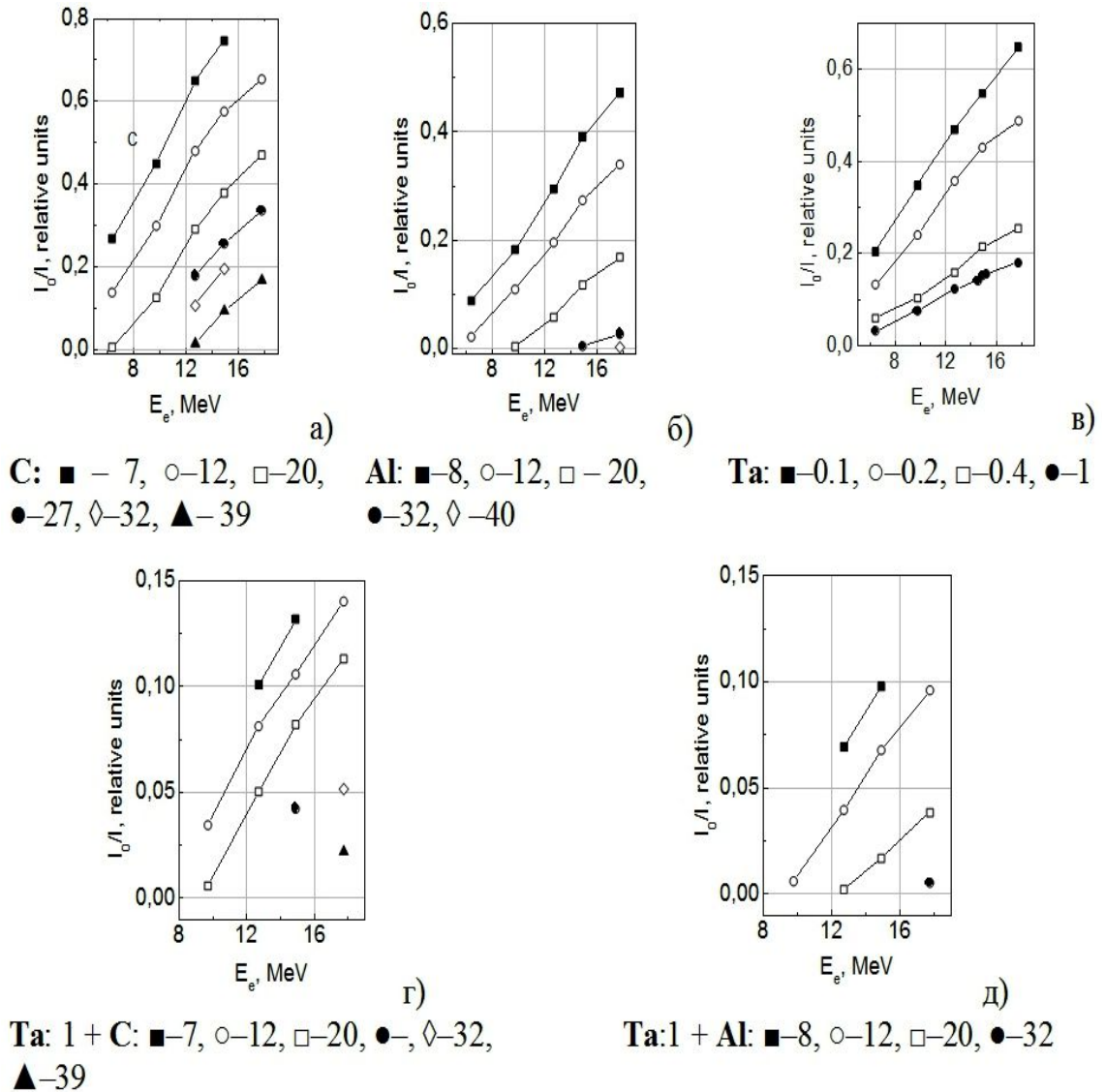


Рис. 3: Відносні коефіцієнти пропускання електронів в одно- та двошарових мішенях (числа – відстань у мм).

Експериментальні дослідження поглинання високоенергетичних фотонів одношаровими мішенями

Для визначення вмісту (густини потоку до одиниці площі) високоенергетичних фотонів у пучках гальмівного випромінювання, отриманих на електронних прискорювачах, використовуються активаційні детектори [17–19]. Їх застосування дозволяє визначати вміст саме тих «корисних» фотонів

у спектрі гальмівного випромінювання, які ініціюють фотоядерні реакції (тобто, коли енергія фотонів більше енергії порогу фотоядерних реакцій). Тому для оцінки поглинання гальмівного випромінювання одношаровими мішенями, виготовленими з алюмінію і реакторного графіту (які мали однакові геометричні розміри: діаметр – 39 мм, товщина – 20 мм), були використані активаційні детектори, що містили ізотопи ^{197}Au і ^{55}Mn . Їх застосування дозволяло визначати

інтегральний вміст високоенергетичних фотонів, енергія (E_{ph}) яких охоплювала енергетичний інтервал від порогу (γ, n)-реакцій (для вказаних ізотопів – 8.01 і 10.23 MeV, відповідно) до максимальної енергій фотонів у спектрі пучка гальмівного випромінювання. Коефіцієнти пропускання гальмівного випромінювання одношаровими мішенями (C і Al) визначалися з відношення інтенсивності гамма-випромінювання від продуктів активації детекторів (^{55}Mn : $E_\gamma = 834.8$ кеВ, $I_\gamma = 99.98\%$ та ^{196}Au : $E_\gamma = 355.7$ кеВ, $I_\gamma = 87\%$ [20]), опромінених з мішенями та без них. Дослідження проводилися у точці площини, для якої визначалися коефіцієнти пропускання електронів одно та двошаровими мішенями (тобто у точці розташування центру площини вхідного вікна циліндра Фарадея).

Експериментальні дослідження проводилися при максимальній енергії гальмівного випромінювання 17.5 MeV. Активаційні детектори встановлювалися вздовж вісі пучка у площині, перпендикулярній до неї на відстані 100 мм від танталового конвертера (1 мм). Час опромінення детекторів при наявності та відсутності фільтрів становив – 15 хв. для ^{197}Au і 30 хв. для ^{55}Mn . Виміри гамма-випромінювання від утворених радіонуклідів ^{54}Mn і ^{196}Au проводилися на спектрометричному комплексі «Ortec» [20, 21] на протязі 200 годин. Час вимірів активаційних детекторів становив 25 хв. Для кожного окремого детектора проводилося не менше 8 вимірів. Статистична похибка спектрометричних вимірів не перевищувала 3%. На рис. 4 приведені залежності відносної інтенсивності гамма-випромінювання утворених радіонуклідів: ^{54}Mn – а.) та ^{196}Au – б.) від часу їх охолодження. Експериментальні значення гамма-інтенсивності активаційних детекторів, опромінених без одношарових мішеней, позначені як ●, з мішенями як ▲ (C) і ■ (Al). Приведені значення інтенсивності були нормовані на дозу опромінення, площу активаційних детекторів та число ядер ізотопів ^{197}Au і ^{55}Mn , які містилися у детекторах. Результати теоретичних розрахунків при заданих умовах проведених експериментальних досліджень представлені суцільними лініями.

Експериментальні результати узгоджуються з розрахунками у межах 3%.

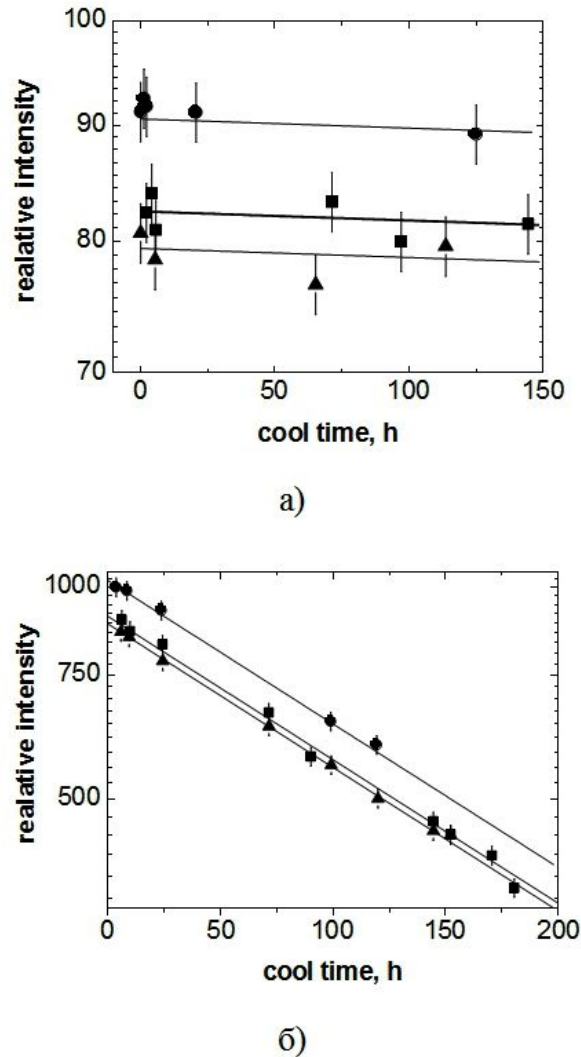


Рис. 4: Залежність відносної інтенсивності гамма-випромінювання утворених радіонуклідів від часу їх охолодження: а.) ^{54}Mn , б.) ^{196}Au .

Значення коефіцієнтів пропускання гальмівного випромінювання одношаровими мішенями, виготовленими з C та Al становили – 0.87 ± 0.09 і 0.89 ± 0.09 ($8.01 < E_{ph} < 17.50$ MeV) та 0.88 ± 0.09 і 0.91 ± 0.09 ($10.23 < E_{ph} < 17.50$ MeV), відповідно. Сумарна похибка вимірів не перевищувала 10%. Основний внесок у похибку давала невизначеність кількості ядер ізотопів – елементів, які входили до складу активаційних детекторів і складав – 7%.

Коефіцієнти поглинання високоенергетичних фотонів одношаровими мішенями визначалися аналогічно електронам, за формулою (2). Експериментально встановлено,

що одношарові мішені, виготовлені з С та Al (товщина – 20 мм) поглинають менше 9 ÷ 13 % високоенергетичних фотонів. Отримані експериментальні дані корелюють з результатами моделювання поглинання фотонів з енергією > 10 MeV, одержаними з використанням пакету програм «GEANT» [11]. В проведених розрахунках поглинання становить – 8 ÷ 12 % для шарів С та Al товщиною – 20 мм. При товщині мішені з С (– 39 мм) й Al (– 40 мм) ослаблення пучка гальмівного випромінювання для енергій більше 10 MeV буде становити – 17 % та – 23 % відповідно [11].

Висновки

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, встановлено оптимальні параметри (товщини) двошарових мішеней (Та (1мм) + С та Та (1 мм) + Al) для формування «чистих» фотонних пучків на електронному

прискорювачі – мікротроні М-30 для області енергій 6.5 ÷ 17.75 MeV. При використанні двошарових мішеней (Та (1 мм) + С (20 мм)) і (Та (1 мм) + Al (20 мм)) для формування пучків високоенергетичних фотонів поглинається 89 % і 96 % залишкових електронів та 9 ÷ 13 % фотонів. При використанні двошарових мішеней (Та (1 мм) + С (39 мм)) і (Та (1 мм) + Al (32 мм)) – поглинається 98 % і 99 % залишкових електронів та 17 % і 19 % фотонів з енергією більше 10 MeV [11].

Використання двошарових мішеней дозволяє здійснювати процедури формування пучків високоенергетичних фотонів з параметрами, необхідними для проведення конкретних експериментальних досліджень на електронних прискорювачах, що підвищить точність та надійність отримуваних результатів.

Автори висловлюють подяку Куштану І.М. за технічне забезпечення експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Starovoitova V. High intensity photon sources for activation analysis / V. Starovoitova, C. Segebade // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2016. – V. 310, Iss. 1. – P. 13–26.
- [2] Shahzad A. Design and development of the 6 – 18 MeV electron beam system for medical and other applications / A. Shahzad, A.B. Phatangare, V.D. Bharud, M.S. Bhadane, C.D. Tahakik, B.J. Patil, S.S. Dahiwalе, S.T. Chavan, S.N. Pethe, S.D. Dhole, V.N. Bhoraska // Radiation effects & Defects in solids — 2017. — V. 172, Is. 11–12. — P. 931–951.
- [3] Versteegen M. Low-energy modification of the γ - strength function of the odd-even nucleus ^{115}In / M. Versteegen, D. Denis-Petit, V. Meot, T. Bonnet, M. Comet, F. Gobet, F. Hannachi, M. Tarisien, P. Morel, M. Martini, S. Peru // Phys. Rev. C – 2016. – V. 94. 044325.– P. 13.
- [4] Ko J. Characteristic analysis of a photon converter in a medical linac using GEANT4 / J. Ko, B.Y. Kim, Y.S. Kim // Vibroengineering Procedia – 2017. – V. 14. – P. 256–259.
- [5] Dixon D.A. Validation of the MCNP6 electron-photon transport algorithm: multiple-scattering of 13 - and 20 - MeV electrons in thin foils / A.D. Dixon, H.G. Hughes // EPJ Web of Conferences – 2017. – V. 153. 06021.– P. 6.
- [6] Kovalev V.P. Dependence of bremsstrahlung yield on target thickness and atomic number for 12 – 22 MeV electrons / V.P. Kovalev, V.P. Kharin, V.V. Gordeev, M.S Borisov // At Energy – 1971. – V. 31, Is. 3. – P. 1028–1031.
- [7] Kim Y.S. Estimation of photoneutron yield in linear accelerator with different collimation systems by Geant4 and MCNPX simulation codes / Y.S. Kim, Z. Khazaei, J. Ko, H. Afarideh, M. Ghergherehchi // Phys. Med. Biol. — 2016. — V. 61. — P. 2762–2779.

- [8] Hai-Bo Xu Monte Carlo simulation for bremsstrahlung and photoneutron yields in high-energy x-ray radiography / Xu Hai-Bo, P. Xian-Ke, C. Chao-Bin // *Chin. Phys. B* – 2010. – V. 19. 062901. – P. 1–8.
- [9] Electron and Photon attenuation [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
- [10] Varlamov A.V. Atlas of giant dipole resonance parameters and graphs of photonuclear reaction cross sections / A.V. Varlamov, V.V. Varlamov, D.S. Rudenko, M.E. Stepanov // INDC(NDS)-399, Int. Atomic Energy Agency, Int. Nuclear Data Committee. – 1999. – P. 321.
- [11] Ishkhanov B.S. Bremsstrahlung target for studying photonuclear reactions in the giant dipole resonance energy region / B.S. Ishkhanov, S.Yu. Troschiev // *Moscow University Physics Bulletin* – 2010. – V. 65, No. 1. – P. 39–42.
- [12] Gil Y.M. Monte Carlo simulation study of bremsstrahlung produced by 9 MeV electron linear accelerator / Y.M. Gil, Y.S. Lee, M.H. Cho, W. Namkung // *KPS Conference Posters in Physics*. Sungkyunkwan University. – April 23-24, 2004. – P. 8.
- [13] Sujoy C., Bandyopadhyay T., Roy A. Study of the variation of photo-neutron spectrum with various moderators generated using electron linac / C. Sujoy, T. Bandyopadhyay, A. Roy // *Proceedings of the seventh DAE-BRNS Indian particle accelerator conference: book of abstracts*. Mumbai (India). – 21-24 Dec 2015. – P. 3.
- [14] Virgil'ev Yu.S. Reactor Graphite / Yu.S. Virgil'ev, I.P. Kalyagina // *Inorganic Materials* – 2003. – V. 39 (1). – P. S46–S58.
- [15] Virgiliev Yu.S. Reactor graphite: development, production and properties / Yu.S. Virgiliev, A.N. Seleznev, A.A. Sviridov, I.P. Kalyagina // *Russian Chemical Journal* – 2006. – T. 50, No 1.– P. 4–12.
- [16] Bakalyarov A.M. Optimization of the extraction facilities of an electron accelerator - bremsstrahlung source for the pulsed photonuclear method / A.M. Bakalyarov, M.D. Karetnikov, V.I. Lebedev, G.V. Yakovlev // *Atomic Energy* – 2009. – V. 106, No. 3. – P. 206–212.
- [17] Парлаг О.О. Визначення вмісту фотонейтронів у гальмівному випромінюванні мікротрона М-30 активаційними детекторами / О.О. Парлаг, О.І. Лендел, В.М. Головей, В.Т. Маслюк, Т.Й. Маринець, М.М. Биров // *Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Серія Фізика* – 2010. – Т. 28. – С. 99–106.
- [18] Thiep T.D. Determination of the total bremsstrahlung photon flux from electron accelerators by simultaneous activation of two monitors / T.D.Thiep, T.T. An, N.T. Khai, N.T. Vinh, P.V. Cuong, Iu.P. Gangrski, A.G. Belov, O.D. Maslo // *Phys. Part. Nuclei Lett.* – 2012. – V. 9. – P. 648–655.
- [19] Skakun Ye. Reaction rates of the $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$ and $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114m}\text{In}$ / Ye. Skakun, I. Semisalov, V. Kasilov, V. Popov, S. Kochetov, V. Maslyuk, V. Mazur, O. Parlag, I. Gajnish// *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – V. 665. 012040 – P. 1–4.
- [20] Decay Radiation database version of 1/3/2018 [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indxdec.jspl>.

- [21] Лендєл О.І. Напівемпіричне описання абсолютної ефективності Ge(Li)-та HPGe-детекторів для фотоподільних експериментів / О.І. Лендєл, О.О. Парлаг, В.Т. Маслюк // Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Серія Фізика. 2009. – Т. 25. – С. 95–99.
- [22] Pylypchynets I. Empirical formula for the HPGe-detector efficiency dependence on energy and distance / I. Pylypchynets, A. Lengyel, O. Parlag, V. Maslyuk, I. Potoki// J Radioanal Nucl Chem – 2019. – V. 319. – P. 1315–1319.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2019

И.В. Пилипчинец, О.А. Парлаг, В.Т. Маслюк, А.И. Лендъел, Н.И. Романюк, И.Г. Мегела, А.Н. Турховский

Институт электронной физики НАН Украины, 88017, г. Ужгород, ул. Университетская, 21, Украина, e-mail: igor.profi@gmail.com

ДВУХСЛОЙНЫЕ МИШЕНИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ФОТОНОВ НА ЭЛЕКТРОННОМ УСКОРИТЕЛЕ – МИКРОТРОНЕ М-30

Проведены экспериментальные исследования поглощения электронов в однослойных (С (7 ÷ 46 мм), Al (8 ÷ 48 мм), Та (0.1 ÷ 1 мм)) и в двухслойных (Та (1 мм) + С (7 ÷ 46 мм)) и Та (1 мм) + Al (8 ÷ 40 мм)) мишенях на электронном ускорителе – микротроне М-30 для области энергий электронов 6.5 ÷ 17.75 МэВ. Дополнительно, проведены исследования поглощения высокоэнергетических фотонов однослойными мишенями (С (20 мм), Al (20 мм)) с использованием активационных детекторов. Установлены оптимальные параметры двухслойных мишеней (Та + С и Та + Al) для формирования «чистых» пучков тормозного излучения в указанной области энергий.

Ключевые слова: микротрон, тормозное излучение, остаточные электроны, поглощение электронов, двухслойные мишени.

I.V. Pylypchynets, O.O. Parlag, V.T. Masluyk, A.I. Lengyel, M.I. Romanyuk,
I.G. Megela, O.M. Tyrchovsky

Institute of Electron Physics, Nat. Acad. Sci. of Ukraine, 88017, Uzhhorod, 21 Universitetska str., Ukraine,
e-mail: igor.profi@gmail.com

DOUBLE-LAYER TARGETS FOR FORMING THE BEAMS OF THE HIGH-ENERGY PHOTONS ON THE ELECTRON ACCELERATOR OF M-30 MICROTRON

Purpose. The bremsstrahlung received at electron accelerators is widely used to study the characteristics of photonuclear reactions and to solve a wide spectrum (series) of applied problems. Basically the output of bremsstrahlung depends on the electron energy, the material of the target converter (Ta) and its effective thickness. The optimum thickness of the converter (when the output of the bremsstrahlung is at its maximum) is significantly less than the electron path in it. This is the reason for the presence of high-energy electrons in bremsstrahlung. Therefore, there is a need to clean the bremsstrahlung beams from residual electrons. The aim of the work is to experimentally determine the optimal parameters (thicknesses) of double-layer targets for obtaining separated bremsstrahlung beams for an energy range of $6.5 \div 17.75$ MeV in electron accelerator M-30 microtron.

Methods. Experimental studies of the relative absorption coefficient of electrons in the investigated materials (C (rector graphite), Al, Ta) were carried out on the M-30 microtron using the transmission method. The measurements of the outputs of the electrons from the accelerator and the residuals that have passed through the layer of absorbing material were carried out using a pass-through chamber and a Faraday cup, respectively. Studies of the absorption of high-energy photons by single-layer targets (C (20 mm), Al (20 mm)) using activation detectors have been carried out.

Results. The electron absorption coefficients in single- (C ($7 \div 46$ mm), Al ($8 \div 48$ mm), Ta ($0.1 \div 1$ mm)) and in double-layer targets (Ta (1 mm) + C ($7 \div 39$ mm) and Ta (1 mm) + Al ($8 \div 40$ mm)) were measured for the electron energy $6.5 \div 17.75$ MeV. The values of the total electron absorption thickness for C, Al, and Ta are in good agreement with the calculated values of the practical electron path (database «ESTAR») for the indicated energy range. The experimentally established values of the thicknesses of materials (C and Al at a thickness of Ta – 1 mm) of double-layer targets, which ensure the complete absorption of electrons for the indicated energy range. The absorption of high-energy photons by single-layer targets (C (20 mm), Al (20 mm)) for bremsstrahlung energy of 17.5 MeV was evaluated.

Conclusions. The optimal parameters (thicknesses) of double-layer targets (Ta (1mm) + C (20 mm) and Ta (1 mm) + Al (20 mm)) or (Ta (1mm) + C (39 mm) and Ta (1 mm) + Al (32 mm)) were established experimentally to form the separated bremsstrahlung beams in the electron accelerator – M-30 microtron for energy region $6.5 \div 17.75$ MeV. The use of two-layer targets allows us to carry out procedures to form of high-energy photon beams with the parameters necessary for performing specific experimental studies on electronic accelerators, which will increase the accuracy and reliability of the results.

Keywords: microtron, bremsstrahlung, residual electrons, electron absorption, double-layer targets.

REFERENCES

- [1] Starovoitova, V., Segebade, C. (2016), «High intensity photon sources for activation analysis», J. Radioanal. Nucl. Chem., V. 310, Iss. 1, pp. 13–26.
- [2] Shahzad A., Phatangare A.B., Bharud V.D., Bhadane M.S., Tahakik C.D., Patil B.J., Dahiwale S.S., Chavan S.T., Pethe S.N., Dhole S.D., Bhoraska V.N. (2017), «Design and development of the 6 – 18 MeV electron beam system for medical and other applications», Radiation effects & Defects in solids., V. 172, Iss. 11-12, pp. 931–951.

- [3] Versteegen M., Denis-Petit D., Meot V., Bonnet T., Comet M., Gobet F., Hannachi F., Tarisien M., Morel P., Martini M., Peru S. (2016), «Low-energy modification of the γ -strength function of the odd-even nucleus ^{115}In », *Phys. Rev. C.*, V. 94. 044325, p. 13
- [4] Ko J., Kim B.Y., Kim Y.S. (2017), «Characteristic analysis of a photon converter in a medical linac using GEANT4», *Vibroengineering Procedia*, V. 14., pp. 256–259.
- [5] Dixon D.A., Hughes H.G.(2017), «Validation of the MCNP6 electron-photon transport algorithm: multiple-scattering of 13 - and 20 - MeV electrons in thin foils», *EPJ Web of Conferences*, V. 153. 06021, p. 6.
- [6] Kovalev V.P., Kharin V.P., Gordeev V.V., Borisov M.S.(1971), «Dependence of bremsstrahlung yield on target thickness and atomic number for 12 – 22 MeV electrons», *At Energy*, V. 31, Is. 3, pp. 1028–1031.
- [7] Kim Y.S., Khazaei Z., Ko J., Afarideh H., Ghergherehchi M. (2016), «Estimation of photon-neutron yield in linear accelerator with different collimation systems by Geant4 and MCNPX simulation codes», *Phys. Med. Biol.*, V. 61, pp. 2762–2779.
- [8] Hai-Bo Xu, Peng Xian-Ke P., Chao-Bin C. (2010), «Monte Carlo simulation for bremsstrahlung and photoneutron yields in high-energy x-ray radiography», *Chin. Phys. B.*, V. 19. 062901, pp. 1–8.
- [9] «Electron and Photon attenuation», available at: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- [10] Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E. (1999), «Atlas of giant dipole resonance parameters and graphs of photonuclear reaction cross sections», NDC(NDS)-399, Int. Atomic Energy Agency, Int. Nuclear Data Committee. Vienna, p. 321.
- [11] Ishkhanov B.S., Troschiev S.Yu. (2010), Bremsstrahlung target for studyin«g photonuclear reactions in the giant dipole resonance energy region» [«Тормозная мишень для исследования фотоядерных реакций в области энергии гигантского дипольного резонанса»], *Moscow University Physics Bulletin*, V. 65, No. 1, pp. 39–42.
- [12] Gil Y.M., Lee Y.S., Cho M.H., Namkung W. (2004)), «Monte Carlo simulation study of bremsstrahlung produced by 9 MeV electron linear accelerator», *KPS Conference Posters in Physics*. Sungkyunkwan University, p. 8.
- [13] Sujoy C., Bandyopadhyay T., Roy A., (2015), «Study of the variation of photo-neutron spectrum with various moderators generated using electron linac», *roceedings of the seventh DAE-BRNS Indian particle accelerator conference: book of abstracts*. Mumbai, India, p. 3.
- [14] Virgil'ev Yu.S., I.P. Kalyagina I.P. (2003), «Reactor Graphite», *Inorganic Material*, V. 39 (1), pp. S46–S58.
- [15] Virgiliev Yu.S., Seleznev A.N., Sviridov A.A., Kalyagina I.P. (2006), «Reactor graphite: development, production and properties» [«Реакторный графит: разработка, производство и свойства»], *Russian Chemical Journal*, V. 50, No 1, pp. 4–12.
- [16] Bakalyarov A.M., Karetnikov M.D., Lebedev V.I., Yakovlev G.V. (2009), «Optimization of the extraction facilities of an electron accelerator - bremsstrahlung source for the pulsed photonuclear metod», *Atomic Energy*, V. 106, No. 3, pp. 206–212.

- [17] Parlag O.O., Lengyel A.I., Holovey V.M., Maslyuk V.T., Marynets T.Y., Byrov M.M. (2010), «Determination of photoneutrons content in microtron M-30 bremsstrahlung by activation detectors», [«Vyznachennya vmistu fotoneutroniv u hal'mivnomu vyprominnyuvanni mikrotrona M-30 aktyvatsiynomy detectoramy»], Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fis], Iss. 28, pp. 99–106.
- [18] Thiep T.D., An T.T., Khai N.T., Vinh N.T., Cuong P.V., Gangrski Iu.P., Belov A.G., Maslo O.D. (2012), «Determination of the total bremsstrahlung photon flux from electron accelerators by simultaneous activation of two monitors», Phys. Part. Nuclei Lett., V. 9, pp. 648–655.
- [19] Skakun Ye., Semisalov I., Kasilov V., Popov V., Kochetov S., Maslyuk V., Mazur V., Parlag O., Gajnish I. (2016), «Reaction rates of the $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$ and $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114m}\text{In}$ », J. Phys.: Conf. Ser., V. 665. 012040, pp.1–4.
- [20] «Decay Radiation database version of 1/3/2018», available at: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indxdec.jspl>
- [21] Lengyel A.I., Parlag O.O., Maslyuk V.T. (2009), «Semiempirical description of Ge(Li) – and HPGe – detectors efficiency for potofission experiments», [«Napivempirychne opysannya absol'yutnoyi efektyvnosti Ge(Li) – ta HPGe – detektoriv dlya fotopodil'nykh eksperymentiv»], Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fis], Iss. 25, pp. 95–99.
- [22] Pylypchynets I., Lengyel A., Parlag O. Maslyuk V., Potoki I. (2019), «Empirical formula for the HPGe-detector efficiency dependence on energy and distance», J Radioanal Nucl Chem, V. 319, pp. 1315–1319.

©Ужгородський національний університет