

**ОЦЕНКА РАСПЫЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ В МИНИАТЮРНОМ ЛИНЕЙНОМ
УСКОРИТЕЛЕ
ESTIMATION OF THE ELECTRODES SPUTTERING OF THE MINIATURE LINER
ACCELERATOR**

И.А. Каншин¹, Н.В. Мамедов^{1,2}, А.А. Солодовников¹, Н.Е. Ефимов²
I.A. Kanshin¹, N.V. Mamedov^{1,2}, A.A. Solodovnikov¹, N.E. Efimov²

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»
Суцевская ул., 22, Москва, 127055,*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, Россия, NVMamedov@mephi.ru*

In this paper estimation of the electrodes sputtering of the miniature linear accelerator (MLA) are presented. Also, the experimental area of the deposited metal layer on the insulator surface MLA are shown. The experimental dates are in good qualitatively agreement with the simulated ones.

Разработка новых и исследование существующих конструкций миниатюрных линейных ускорителей (или газонаполненных нейтронных трубок), являются актуальной задачей при создании портативных импульсных нейтронных генераторов, применяемых в различных областях науки и техники [1].

Общий вид запаянного миниатюрного линейного ускорителя (МЛУ) представлен на рисунке 1. МЛУ состоит из пеннинговского ионного источника [2], ионно-оптической системы (в нашем случае фокусирующего и ускоряющего электродов) и мишени [3]. Ускоряющий электрод и нейтронобразующая мишень находятся под высоким (~ -100кВ относительно катодов ионного источника) отрицательным потенциалом и гальванически развязаны от ионного источника с помощью высоковольтного изолятора. Под действием потенциала ускоряющего электрода ионы экстрагируются (вытягиваются) из плазмы пеннинговского разряда и далее ускоряются на нейтронобразующую мишень. При столкновении пучка ионов дейтерия и трития с такими же атомами, которые уже находятся в мишени, происходит ядерная реакция $D^+ + T^+ \rightarrow 4He^{++} (3,5МэВ) + n (14,1МэВ)$ с вылетом нейтронов в 4л.

Одна из основных причин снижения электрической прочности МЛУ – это изменение поверхностной проводимости высоковольтного изолятора, в том числе вследствие запыления его внутренней поверхности в процессе длительной работы. При напылении на изоляторе определённой толщины проводящего слоя между ускоряющим электродом и фокусирующими электродами провоцируется высоковольтный пробой, приводящий к выходу из строя МЛУ[4].

В данной работе приводится оценка распыления электродов МЛУ и их влияние на запыляемую область высоковольтного изолятора. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения ресурса МЛУ за счет увеличения электрической прочности высокоплотного изолятора путем снижения скорости запыления изолятора в межэлектродном зазоре.

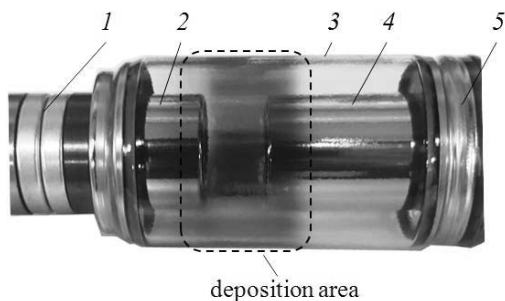


Рис. 1 Общий вид миниатюрного линейного ускорителя с пеннинговским ионным источником.
 1 – Пеннинговский ионный источник,
 2 – Фокусирующий электрод,
 3 – Высоковольтный изолятор,
 4 – Ускоряющий электрод,
 5 – Нейтронообразующая мишень.

В программе «COMSOL Multiphysics» рассчитывались электрические поля для данной конфигурации ионно-оптической системы (ИОС), а затем проводился траекторный анализ корпускулярных потоков, экстрагируемых из источника ионов. В качестве исходных данных моделирования ионного пучка выступал эмиттанс в плоскости выходной апертуры фокусирующего электрода ИОС [5], методика вычисления которого описана в работе [6]. При моделировании учитывалась резонансная перезарядка молекулярного иона на молекулярном нейтрале с образованием быстрого молекулярного нейтрала и медленного молекулярного иона $H_2^+ + H_2^0 = H_2^0 + H_2^+$, а также перезарядка с последующей диссоциацией молекулярного нейтрала на атомы $H_2^+ + H_2^0 = 2H_1^0 + H_2^+$ [7]. В качестве характеристики процессов взаимодействия частиц выступали сечения указанных процессов, аппроксимации зависимостей которых от скорости представлены в [7]. Давление в ИОС ввиду отсутствия откачки принималось равным 5 мТорр, что соответствует рабочему давлению ионного источника [2].

На рисунке 2 представлен результат моделирования траекторий корпускулярных потоков в ИОС. Анализ представленного рисунка позволяет заключить, что формируемый на выходе из фокусирующего электрода ИОС первичный пучок ионов будет проходить через апертуру ускоряющего электрода ИОС практически беспрепятственно, тем самым, не приводя к его распылению. Однако образованные вследствие перезарядки ионов первичного пучка нейтралы бомбардируют кромку и внутреннюю поверхность ускоряющего электрода (см. рисунок 2б), а также внутреннюю поверхность фокусирующего электрода (но с меньшей интенсивностью).

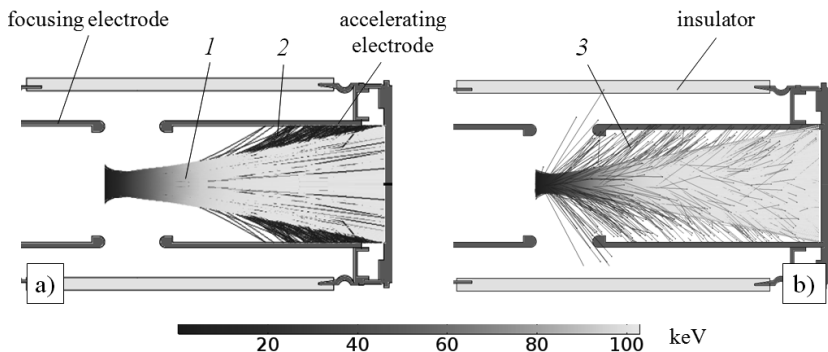


Рисунок 2 – Расчетные траектории ионного пучка (1) и «холодных» ионов (2) в ИОС (а), а также расчетные траектории нейтралов (3) на фоне основного ионного пучка в ИОС (б)

Для различия корпускулярных потоков, падающих на соответствующие поверхности, внутренняя поверхность фокусирующего электрода, кромка и внутренняя поверхность ускоряющего электрода были разбиты на определённые области. Для каждой области построены вычисленные в «COMSOL Multiphysics» угловое и энергетическое распределение падающих нейтралов перезарядки и рассеянных ионов. В качестве примера, на рисунке 3а и 3б показаны данные распределения нейтралов перезарядки, падающих на различные области кромки ускоряющего электрода (рис. 3в).

Для оценки степени распыления электродов МЛУ и определения области напыления проводящего слоя на высоковольтный изолятор проводилось моделирование распыления поверхности нержавеющей стали (материал электродов ИОС МЛУ) атомами дейтерия в программных пакетах SCATTER [8], SRIM [9] и SDTrimSP [10]. В данных программах моделировались энергетические и угловые спектры отраженных и распыленных частиц. При этом для каждой области электродов учитывалось начальные угловые и энергетические распределения падающих ионов и нейтралов дейтерия. Полученные в ходе моделирования данные загружались «обратно» в «COMSOL Multiphysics» для расчета движения распыленных и отраженных частиц в МЛУ.

В качестве примера на рисунке 4 представлены распределения распыленных атомов Fe, попавших на высоковольтный изолятор МЛУ. Показаны области напыления частиц, распыленных с внутренней поверхности фокусирующего электрода (а), внутренней поверхности (б) и кромки ускоряющего электрода (с). На рисунке также представлено экспериментально полученное (путем оцифровки фотоизображения) распределение напыленного слоя после 170 часов работы МЛУ.

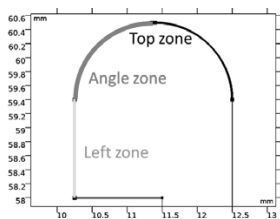
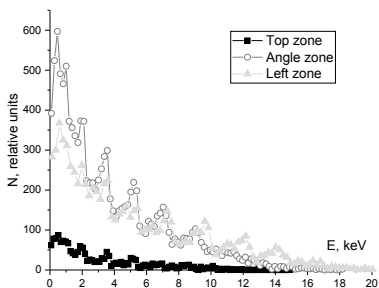
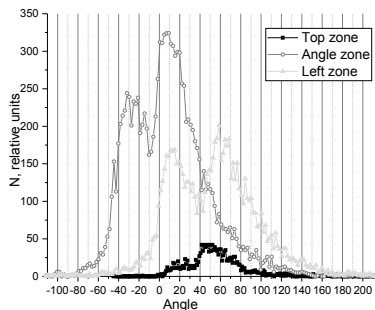


Рисунок 3 Угловое (а) и энергетическое (б) распределения нейтралов перезарядки, падающих на различные области (в) кромки ускоряющего электрода.

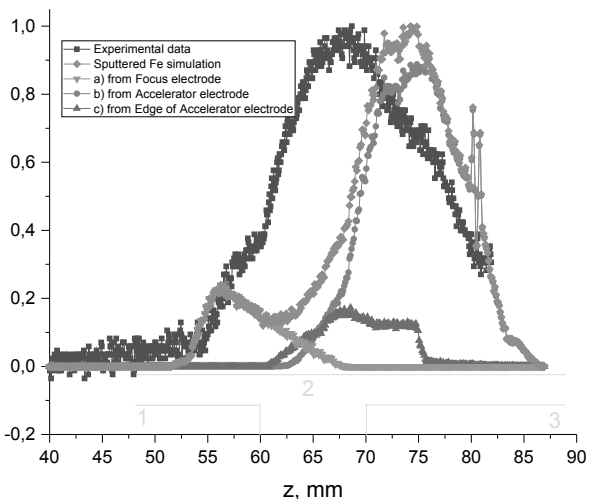


Рисунок 4 Распределения расплывших атомов Fe, попавших на высоковольтный изолятор МЛУ (Эксперимент и моделирование SCATTER).

- 1 – Ускоряющий электрод
- 2 – Высоковольтный изолятор
- 3 – Фокусирующий электрод

Как видно, экспериментальные данные и промоделированное распределение лишь качественно совпадают – точно определена общая площадь напыляемого слоя. Однако максимум промоделированного распределения напыляемых частиц сильнее смещен в

область за фокусирующим электродом. Промоделированное распределение имеет два ярко выраженных пика, в то время как экспериментальное распределение широкое и дополнительные пики слиты с основным. Основной вклад в промоделированное распределение дают частицы, распыленные с середины внутренней поверхности ускоряющего электрода. Частицы, распыленные с кромки ускоряющего электрода, перепыляются в область между фокусирующим и ускоряющим электродом. Распыление внутренней поверхности фокусирующего электрода приводит к образованию напыляемой области за ускоряющим электродом.

Литература

1. VladivojValkovic, *14 MeV Neutrons. Physics and Applications*. CRC Press Taylor&Francis Group, London, New York, 500 p.,2016
2. Mamedov N.V., Gubarev A.V., et al, *Plasma Sources Sci. Technol.* (2020), <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab6758>,
3. Рачков Р.С., Пресняков А.Ю., Юрков Д.И., *Атомная энергия*, т. 126, вып. 6, 2019, с. 334-337,
4. Бутолин, С.Л., Черменский, В.Г., Хасаев, Т.О. *Газонаполненная нейтронная трубка* / Патент РФ 2451433
5. I.A. Kanshin // *Proceeding of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*. 978-1-7281-2685-2/20/\$31.00 2020. IEEE. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241976. pp. 474-478
6. I.A. Kanshin and A.A. Solodovnikov // *Instruments and Experimental Techniques*, 2020, Vol. 63, No. 3, pp. 315–324.
7. Болдасов В.С., Денбновецкий С.В., Кузьмичёв А.И. *Моделирование газоразрядных коммутирующих приборов низкого давления. Электрическая прочность приборов в предразрядный период.* – Киев ИСИО, 1996.- 140 с.
8. N.N. Trifonov, et al. // *Vacuum* 56, (2000), p. 253-255
9. www.srim.org
10. Eckstein, W., Dohmen, R., Mutzke, A., & Schneider, R.(2007). *SDTrimSP: Ein Monte-Carlo Code zur Berechnung von Stossereignissen in ungeordneten Targets = SDTrimSP: A Monte-Carlo Code for Calculating Collision Phenomena in Randomized Targets* (IPP 12/3). Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.