

Минимизация вторичных процессов, включая ионное распыление в объеме МЛУ

М.С. Лобов^{1,}, Н.В. Мамедов^{1,2}, А.С. Рохманенков¹, Н.Е. Ефимов²*

¹ ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

² НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

*lobovms@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования динамики пучка заряженных частиц в электродной системе миниатюрного линейного ускорителя с учетом вторичных процессов. Оценивалась возможность минимизации негативных эффектов, связанных с вторичными процессами, таких как распыление электродов и вторичная электронная эмиссия. Расчеты проводились при различных комбинациях рабочего давления и ускоряющего напряжения в диапазоне давлений 2–8 мТорр и ускоряющих напряжений 60–100 кВ.

Ключевые слова: ионный пучок, ионизация, вторичная электронная эмиссия.

1. Введение

Значительное влияние на функционирование миниатюрных линейных ускорителей оказывают вторичные процессы, являющиеся результатом взаимодействия первичного пучка ионов с нейтральным рабочим газом и электродами миниатюрного линейного ускорителя (МЛУ) [1]. Представляется необходимым математическое моделирование влияния рабочих параметров МЛУ (ускоряющего напряжения и давления) на негативные эффекты этих процессов. Таким образом, целью работы является изучение возможности минимизации вторичных процессов в ионно-оптической системе (ИОС) МЛУ путем снижения рабочего давления и повышения ускоряющего напряжения.

2. Описание методики моделирования

Моделирование проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics с использованием модулей «Electrostatics» для моделирования электрических полей и «Charge Particle Tracing» для моделирования траекторий заряженных частиц и вторичных процессов. Начальные данные для координат и скоростей молекулярных ионов водорода были взяты из результатов моделирования газового разряда в Пеннинговском ионном источнике (ПИИ) методом частиц в ячейке (PIC) [2, 3]. При этом для моделирования потока ионов ИОС отбирались частицы, обладающие возможностью покинуть источник ионов (приблизительно $5 \cdot 10^5$ частиц), регистрируются их положения и скорости, формируя входные для ИОС распределения. Подробное описание импорта данных представлено в [1].

Ускоряющее напряжение варьировалось в диапазоне от 60 до 100 кВ с шагом 5 кВ, рабочее давление принималось равным 2, 4, 5, 6, 8 мТорр.

При моделировании движения заряженных частиц в ИОС МЛУ учитывались такие вторичные процессы, как резонансная перезарядка ионов водорода на молекулярном водороде, ионизация молекулярного водорода ионами и электронами, возбуждение ионов водорода, упругое рассеяние ионов и нейтральных молекул водорода. В качестве количественных характеристик процессов взаимодействия частиц выступали сечения указанных процессов, аппроксимации зависимостей которых от скорости представлены в [4–6].

По результатам попадания ионов на внутреннюю поверхность электродов МЛУ по данным [7] рассчитывалось количество вторичных электронов, и моделировалось их движение в электростатическом поле с учетом магнитного подавления вблизи поверхности мишени.

3. Результаты моделирования

3.1. Ослабление энергии первичного пучка

Исходя из данных [8, 9], в первом приближении можно полагать, что ионы и молекулы водорода с энергией менее 30 кэВ практически не генерируют нейтроны в мишени МЛЮ. Поэтому по результатам моделирования была рассчитана доля (в процентах) частиц, прилетевших на мишень, и энергия которых составляет более 30 кэВ, от общего числа частиц в первоначальном пучке в зависимости от давления. Результаты представлены на Рис. 1. Можно наблюдать резкое снижение количества генерирующих нейтроны, частиц (с 88 до 66 %), с повышением давления с 2 до 8 мТорр (для ускоряющего напряжения 95 кВ). По результатам моделирования также установлено, что снижение ускоряющего напряжения оказывает большее влияние при больших значениях давления. Так, при давлении 2 мТорр понижение ускоряющего напряжения с 95 до 60 кВ понижает долю генерирующих нейтроны частиц всего на 1%, с 87% до 86%, в то время как аналогичное снижение ускоряющего напряжения при давлении 8 мТорр понижает долю генерирующих нейтроны частиц уже на 17%, с 66% до 59%. Можно отметить, что при давлении 2 мТорр снижение ускоряющего напряжения практически не оказывает влияния на количество не генерирующих нейтроны частиц. В связи с чем представляется необходимым в первую очередь понижать рабочее давление источника ионов до 1–2 мТорр, а при невозможности понижения давления – использовать максимально возможные ускоряющие напряжения (95–100 кВ).

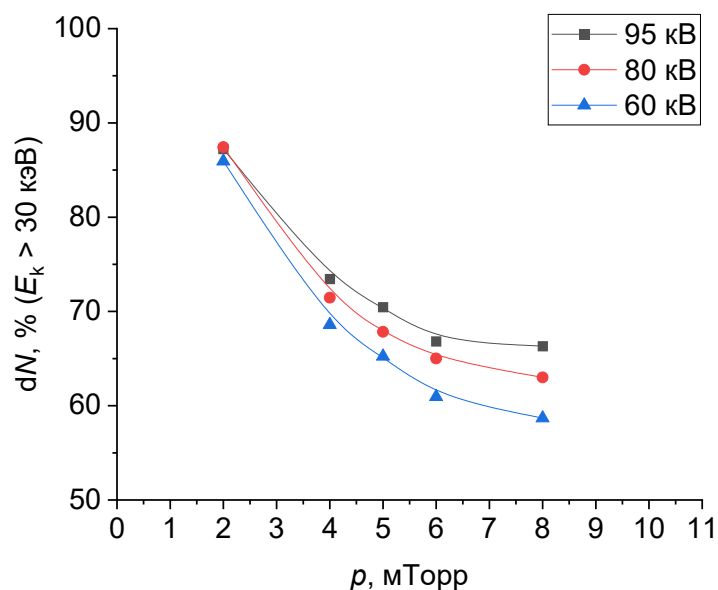


Рис. 1. Зависимость числа частиц с энергией более 30 кэВ от давления. Ускоряющее напряжение 60, 80 и 95 кВ.

3.2. Доля тока вторичных электронов

Автоматическое управление работой МЛЮ организовано в предположении, что основную часть тока ускорителя составляет прямой ток пучка ионов, однако результаты моделирования показывают, что отношение количества вторичных электронов к количеству ионов исходного пучка составляет от ~ 0.15 при рабочем давлении 2 мТорр до ~ 0.52 при рабочем давлении 8 мТорр. Таким образом, ток вторичных электронов может составлять от 13 до 30 % общего тока трубки, что может приводить к ошибочным входным данным для автоматики устройства. При этом, как видно из Рис. 2, доля электронов сильно зависит от давления, а зависимость от ускоряющего напряжения появляется лишь при давлениях выше 8 мТорр.

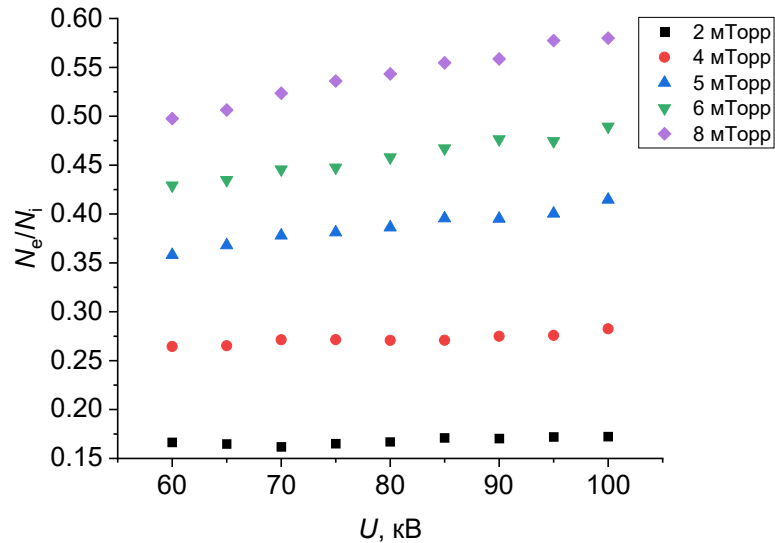


Рис. 2. Зависимость числа вторичных электронов от давления и ускоряющего напряжения.

4. Заключение

Исходя из приведенных результатов моделирования, можно наблюдать, что снижение рабочего давления МЛУ в диапазоне 2–8 мТорр оказывает большее влияние на подавление вторичных процессов, чем повышение ускоряющего напряжения в диапазоне 60–100 кВ, в связи с чем представляется перспективным разработка новых конструкций источников ионов, обеспечивающих необходимые для функционирования МЛУ токовые характеристики при давлениях 1–2 мТорр.

5. Список литературы

- [1] I. Kanshin, N. Mamedov, A. Solodovnikov, and N. Efimov, Estimation of the electrodes sputtering of the miniature linear accelerator, *Vacuum*, vol. **202**, p. 111194, 2022, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111194
- [2] N.V. Mamedov, A.S. Rohmanenkov, et al., Characteristics of miniature pulsed penning ion source: Experiment and PIC simulation, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **90**, 123310, 2019, doi: 10.1063/1.5127921
- [3] S. Rokhmanenkov, S.E. Kuratov, Numerical Simulation of Penning Gas Discharge in 2D/3D Setting, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, vol. **1250**, 012036, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1250/1/012036
- [4] H. Tawara, T. Itikawa, H. Nishimura, and M. Yoshino, Cross Sections and Related Data for Electron Collisions with Hydrogen Molecules and Molecular Ions, *Journal of physical and chemical reference data. Reprint. American Chemical Society*, 1990.
- [5] J.S. Yoon, Cross Sections for Electron Collisions with Hydrogen Molecules, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. **37**, 913, 2008, doi: 10.1063/1.2838023
- [6] L. Bylkin, L.A. Palkina, B.M. Smirnov, Resonance charge exchange between a molecular ion and a diatomic molecule, *JETP*, vol. **32**, 540, 1971.
- [7] В.С. Болдасов, С.В. Денбновецкий, А.И. Кузьмичёв, *Моделирование газоразрядных коммутирующих приборов низкого давления. Электрическая прочность приборов в предразрядный период*. Киев ИСИО, 1996.
- [8] С.В. Сыромуков, Энергетические характеристики нейтронов генераторов с запаянными трубками, *Атомная энергия*, том **123**, 220, 2017.
- [9] Е.С. Гришняев, С.В. Полосаткин, Определение выхода титановой нейтронообразующей мишени, *Атомная энергия*, том **113**, 276, 2012.