

12.1

## Ускорение протонов в диоде Люса с тефлоновым анодом

© В.А. Рыжков, М.В. Журавлев, А.А. Бухаркин, Г.Н. Курапов, Г.Е. Ремнев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: ryzhkov@tpu.ru

Поступило в Редакцию 4 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 9 марта 2024 г.

Принято к публикации 11 марта 2024 г.

Число протонов, коллективно ускоряемых в диоде Люса с тефлоновым анодом, определено по активности радионуклида  $^{13}\text{N}$ , образованного в графитовой мишени по ядерной реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ . Показано, что среднее число ускоренных за выстрел протонов при давлении остаточной атмосферы камеры  $3 \cdot 10^{-5}$  и  $2 \cdot 10^{-4}$  Torr в пределах ошибки примерно одинаково, а эффективность прямого захвата протонов в ускорение из остаточной атмосферы не превышает 0.25%. Также показано, что в силу гидрофобности политетрафторэтилена число захваченных в ускорение протонов ( $\sim 4 \cdot 10^{12}$ ) в среднем на порядок меньше, чем при использовании анодов из полиэтилена ( $10^{14}$ ), BN ( $5 \cdot 10^{13}$ ) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $3 \cdot 10^{13}$ ).

**Ключевые слова:** коллективное ускорение ионов, политетрафторэтилен, адсорбция, поверхность.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.12.58060.19824

Коллективное ускорение ионов было обнаружено в экспериментах Плюгто с импульсными вакуумными дугами [1]. Люсом была предложена особая конфигурация вакуумного диода [2] для коллективного ускорения ионов пучком релятивистских электронов, который, проходя через отверстие в диэлектрической анодной вставке, частично испаряет поверхность анода и ионизирует испаренные элементы, а затем захватывает и тянет за собой ионы, ускоряя их до энергий, в 2–3 раза превышающих приложенный к диоду потенциал. Такая конфигурация диода позднее получила общепринятое название „диод Люса“, хотя оно оспаривается некоторыми исследователями [3] из-за большого сходства с конфигурацией, использованной ранее Плюгто. Основная проблема при коллективном ускорении в диоде Люса ионов тяжелее протонов — это неизбежный захват в ускорение в намного больших количествах протонов, образуемых из загрязнений поверхности анода парами воды и углеводородами вакуумных масел. Протоны как самые легкие из ионов наименее инерционны и с намного большей эффективностью вытягиваются из прианодной плазмы и захватываются в коллективное ускорение движителем. Так, в работе [4] было показано, что при использовании анодной вставки из нитрида бора, не содержащего водород, число коллективно ускоренных в диоде Люса протонов было сравнимо с числом протонов, ускоренных с полиэтиленовым анодом, большей частью состоящим из водорода. Поскольку число коллективно ускоренных ионов экспоненциально уменьшается с ростом их энергии в ступке [5], захват в ускорение намного больших количеств протонов приведет к снижению числа и/или энергии более тяжелых ионов. По этой причине при целевом ускорении более тяжелых ионов необходимо максимально снижать вероятность захвата в ускорение протонов. Снижение вклада протонов за счет снижения давления остаточной атмосферы

возможно при применении специальных мер по обезгаживанию поверхности стенок вакуумной камеры и/или использованию безмасляных откачных систем, однако в наших условиях применение таких мер было признано нецелесообразным из-за длительности процесса.

Снижение доли захваченных в коллективное ускорение протонов в 3–4 раза было достигнуто при ускорении ионов гелия из остаточной атмосферы гелия в диоде Люса с использованием керамического анода на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [6]. Политетрафторэтилен (тефлон) обладает очень низкими поверхностным натяжением и адгезией, не смачивается водой и парами масел вакуумной камеры [7,8], что позволяет надеяться на еще большее снижение доли протонов, захваченных в коллективное ускорение. Время формирования монослоя адсорбата на поверхности анода  $t$  обратно пропорционально давлению остаточной атмосферы в рабочей камере  $P$  и при коэффициенте прилипания адсорбата, равном единице, когда каждая молекула, достигающая поверхности, осажается на ней, может быть оценено по известной формуле [9]:

$$t [\text{s}] = 3 \cdot 10^{-4} / P [\text{Pa}]. \quad (1)$$

Согласно формуле (1), для покрытия поверхности, характеризуемой 100% прилипанием к ней адсорбата, при давлении  $3 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$  Torr (4–27 mPa) требуется всего 0.75 и 0.11 s соответственно, что в 7 и 45 раз короче паузы между выстрелами ускорителя на основе диода Люса, обычно составляющей около 5 s [5,6]. О размере молекулы воды можно судить по величине расстояния между ближайшими молекулами во льду, составляющего 0.267 nm. Соответственно молекуле воды можно приписать индивидуальную площадь на поверхности, равную квадрату этого расстояния, т.е. около 0.07 nm<sup>2</sup>. Отсюда число атомов водорода в условном монослое воды на 1 cm<sup>2</sup> поверхности можно оценить как  $3.3 \cdot 10^{15}$ , что для площади анодного отверстия 3 cm<sup>2</sup>

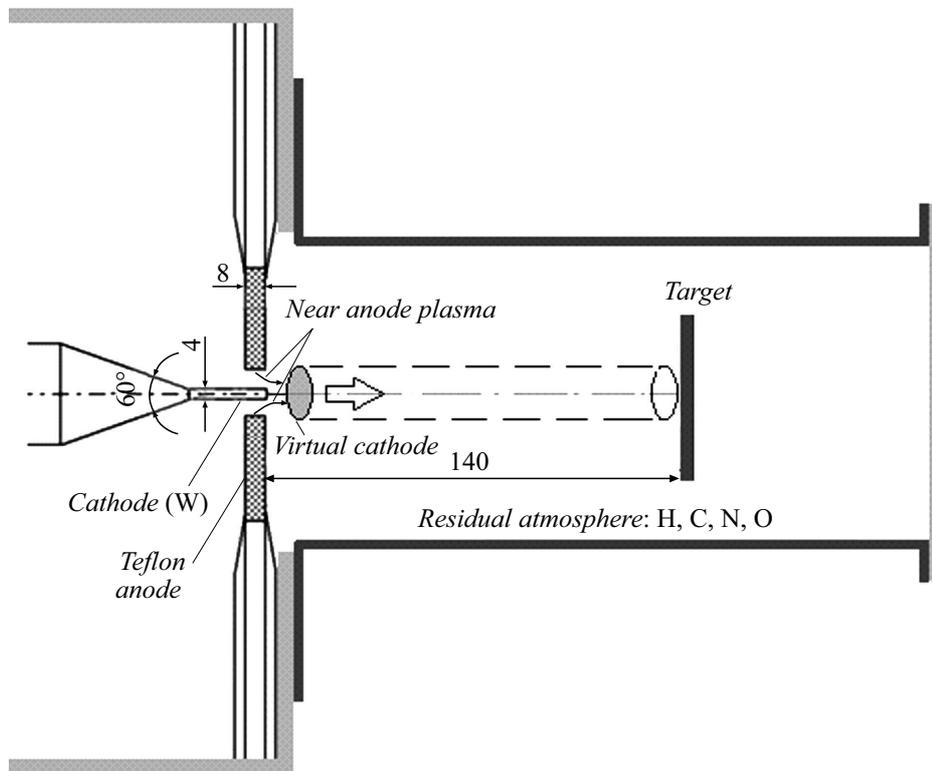


Схема эксперимента: протоны захватываются в ускорение виртуальным катодом из прианодной плазмы и остаточной атмосферы на пути от анода до мишени.

( $\text{Ø}1.2 \times 0.8 \text{ cm}$ ) дает  $10^{16}$  атомов водорода, доступных для захвата в коллективное ускорение. При среднем числе протонов, коллективно ускоренных за один выстрел, равном  $10^{14}$  [6], это означает, что эффективность захвата в ускорение протонов из монослоя воды составляет около 1%, тогда как вероятность захвата протонов в коллективное ускорение напрямую из остаточной атмосферы на пути от анода до мишени, оцениваемая по результатам ускорения дейтронов из остаточной атмосферы дейтерия [10], не превышает 0.1%. Таким образом, использование тефлоновой анодной вставки ввиду ее гидрофобности и, как следствие, вероятно, низкого числа протонов в прианодной плазме может позволить уточнить эффективность захвата протонов в коллективное ускорение напрямую из остаточной атмосферы рабочей камеры. Для этого нужно определить среднее количество протонов, ускоренных за один выстрел с тефлоновой анодной вставкой в одинаковой геометрии эксперимента, но при двух значительно различающихся давлениях остаточной атмосферы рабочей камеры.

Цель настоящей работы заключается в определении среднего числа протонов, захватываемых в коллективное ускорение в диоде Люса с тефлоновым анодом при двухкратно различающихся давлениях остаточной атмосферы.

Экспериментальная установка для коллективного ускорения ионов в диоде Люса на основе ускорителя типа ТЕМП-4М, описанная в [4,6,10], представлена на

рисунке. Анодные вставки из тефлона были выполнены в виде шайб толщиной 10 мм с диаметром отверстия 14 мм. В процессе выполнения серии выстрелов по мишени производили измерение давления остаточной атмосферы рабочей камеры ионизационным сенсором типа ZJ-52T/KF25, сопряженным с контроллером Мератат-ВИТ19ИТ2 (Россия). В качестве рабочей камеры использована труба из нержавеющей стали диаметром 10 см и длиной 22 см (от анода), что позволило осуществлять откачку камеры до минимального давления  $3 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$  за 5 с после каждого выстрела. Верхний уровень давления  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$  был выбран, поскольку при таком давлении среднее число протонов, ускоренных в диоде Люса с полиэтиленовым анодом, было максимальным [11].

Мишени из реакторного графита марки МПГ-6 в виде дисков  $\text{Ø}8 \times 0.8 \text{ cm}$ , установленные на расстоянии 14 см от анода, облучали ускоренными протонами сериями по десять выстрелов ускорителя, после чего камеру вскрывали и облученный образец перемещали на детектор из высокочистого Ge (Canberra) с относительной эффективностью 50%, окруженный свинцовой защитой толщиной 5 см. Измерение наведенной по ядерной реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  активности радионуклида  $^{13}\text{N}$  производилось по 550 с в пике полного поглощения аннигиляционных  $\gamma$ -квантов с энергией 511 keV три раза с интервалами в 10 min для того, чтобы определить вклад радионуклида с периодом полураспада 9.965 min

Среднее число протонов, ускоренных за выстрел ( $n_p$ )

Номер серии	$P$ , mTorr	$n_p$ , $10^{12}$
1	0.2	3.5
2	0.2	4.2
3	0.2	3.9
4	0.03	4.6
5	0.03	2.0
6	0.03	4.3

( $^{13}\text{N}$ ). Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией 511 keV составляла 6%, а интенсивность фона помещения в этом пике — 0.02 counts/s.

В ожидаемом для ускоренных протонов интервале энергии 550–650 keV выход  $^{13}\text{N}$  по реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  увеличивается слабо [12], поэтому для определения числа протонов достаточно определить активность радионуклида на момент конца облучения протонами  $A(^{13}\text{N})$  и по ее значению найти число образованных в мишени ядер радионуклида  $N(^{13}\text{N})$  по следующему выражению:

$$N(^{13}\text{N}) = A(^{13}\text{N})/\lambda(^{13}\text{N}), \quad (2)$$

где величина  $A(^{13}\text{N})$  приведена в Bq, а константа распада  $\lambda(^{13}\text{N}) = 0.6932/T_{1/2} \approx 0.00116 \text{ s}^{-1}$ .

Число протонов  $n_p$  (с предполагаемой энергией в интервале 550–650 keV) определялось как

$$n_p = N(^{13}\text{N})/Y, \quad (3)$$

где  $Y = 0.69 \cdot 10^{-9} \text{ nuclei/proton}$  — выход реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  при энергии протонов 600 keV; выход реакции растет от  $0.66 \cdot 10^{-9}$  при энергии протонов 550 keV до  $0.705 \cdot 10^{-9}$  при 650 keV [12].

В таблице приведены суммарные данные по шести сериям выстрелов, выполненных при давлении остаточной атмосферы  $2 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-5}$  Torr.

Из таблицы видно, что среднее число ускоренных за выстрел протонов в пределах погрешности измерения примерно одинаково для обоих уровней давления остаточной атмосферы и составило  $(3.9 \pm 0.3) \cdot 10^{12}$  и  $(3.6 \pm 1.4) \cdot 10^{12}$  для давлений  $2 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-5}$  Torr соответственно. С невысокой степенью достоверности разницу этих средних величин в  $(0.3 \pm 1.4) \cdot 10^{12}$  протонов за выстрел можно отнести на счет захвата протонов в ускорение напрямую из остаточной атмосферы при ее давлении  $2 \cdot 10^{-4}$  Torr. С учетом того, что на пути виртуального катода от анода до мишени длиной 14 см число протонов при таком давлении может составлять около  $1.2 \cdot 10^{14}$ , как было показано в [11] в предположении, что остаточная атмосфера представлена примерно равным числом атомов водорода и более тяжелых ионов (C, N и O), а сечение сгустков в среднем составляет около  $1 \text{ cm}^2$ , эффективность прямого захвата протонов в ускорение из остаточной атмосферы грубо оценивается

как  $\sim 0.25 \pm 1.2\%$ , что по порядку величины согласуется с приведенной в [6] оценкой эффективности прямого захвата дейтронов в ускорение из остаточной атмосферы дейтерия (0.1%).

С другой стороны, среднее значение числа протонов  $3.6 \cdot 10^{12}$ , ускоренных за выстрел при давлении  $3 \cdot 10^{-5}$  Torr, следует отнести на счет захвата в ускорение из прианодной плазмы, что при средней эффективности такого захвата, оцененной выше для условного монослоя воды как 1%, дает  $3.6 \cdot 10^{14}$  атомов водорода, адсорбированных поверхностью отверстий тефлоновых анодных вставок. Для  $1.45 \cdot 10^{16}$  атомов водорода в условном монослое воды с площадью  $4.4 \text{ cm}^2$  (площадь поверхности отверстий использованных тефлоновых вставок) в итоге можно определить степень покрытия тефлоновых вставок островками условных монослоев воды как 2.5%.

Таким образом, в работе показано, что при коллективном ускорении ионов в диоде Люса с тефлоновым анодом среднее число ускоренных за выстрел протонов при давлении остаточной атмосферы камеры  $3 \cdot 10^{-5}$  и  $2 \cdot 10^{-4}$  Torr в пределах погрешности измерения примерно одинаково, а эффективность прямого захвата протонов в ускорение из остаточной атмосферы не превышает 0.25%. Также показано, что в силу гидрофобности политетрафторэтилена число захваченных в ускорение протонов ( $\sim 4 \cdot 10^{12}$ ) в среднем на порядок меньше, чем при использовании анодов из полиэтилена ( $10^{14}$ ), BN ( $5 \cdot 10^{13}$ ) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $3 \cdot 10^{13}$ ), что указывает на перспективность применения политетрафторэтилена в качестве материала анодных вставок при ускорении ионов тяжелее протонов.

## Финансирование работы

Исследование проведено в рамках госзадания „Наука“ № FSWW-2023-0008 и при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-19-00614).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.A. Plyutto, K.V. Suladze, S.M. Temchin, E.D. Korop, *Atom. Energy*, **27** (5), 1197 (1969). DOI: 10.1007/BF01164972
- [2] J.S. Luce, H. Sahlin, N.R. Crites, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **20** (3), 336 (1973). DOI: 10.1109/TNS.1973.4327115
- [3] П.Е. Беленсов, *УФН*, **174** (2), 221 (2004). DOI: 10.3367/UFNR.0174.200402k.0221 [P.E. Belensov, *Phys. Usp.*, **47** (2), 209 (2004). DOI: 10.1070/PU2004v047n02ABEH001715].
- [4] В.А. Рыжков, Г.Е. Ремнев, И.Н. Пятков, М.В. Журавлев, *Письма в ЖТФ*, **46** (8), 7 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49299.18147 [V.A. Ryzhkov, G.E. Remnev, I.N. Pyatkov, M.V. Zhuravlev, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (4), 361 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020040252].

- [5] *Summary of work on three collective effect accelerators, in Collective accelerators. A study carried out for the US Department of Energy* (Fermi National Accelerator Laboratory, 1982).  
<https://lss.fnal.gov/archive/test-fn/0000/fermilab-fn-0355.pdf>
- [6] V.A. Ryzhkov, M.V. Zhuravlev, G.E. Remnev, *Quantum Beam Sci.*, **7** (4), 33 (2023). DOI: 10.3390/qubs7040033
- [7] J.H. Chessick, F.H. Healey, A.C. Zettlemoyer, *J. Phys. Chem.*, **60** (10), 1345 (1956). DOI: 10.1021/j150544a001
- [8] C. He, F. Mighri, M.D. Guiver, S. Kaliaguine, *Appl. Mater. Interfaces*, **8** (19), 12541 (2016).  
DOI: 10.1021/acsami.6b02543
- [9] L. Ter Minassian-Saraga, *Pure Appl. Chem.*, **66** (8), 1667 (1994). DOI: 10.1351/pac199466081667
- [10] V.A. Ryzhkov, I.N. Pyatkov, G.E. Remnev, *Vacuum*, **202**, 111212 (2022). DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111212
- [11] V.A. Ryzhkov, G.E. Remnev, I.N. Pyatkov, M.V. Zhuravlev, *Vacuum*, **187**, 110081 (2021).  
DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110081
- [12] N.A. Roughton, M.J. Fritts, R.J. Peterson, C.S. Zaidins, C.J. Hansen, *Astrophys. J.*, **188**, 595 (1974).  
DOI: 10.1086/152752