

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 53.082.79

ЭФФЕКТИВНЫЙ ГАЗОВЫЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК  
С ОБЪЕМНЫМ ЗАРЯДОМ

© 2023 г. Ю. И. Гусев<sup>a</sup>, Ю. В. Нечипоренко<sup>a</sup>, Ю. Н. Новиков<sup>a</sup>,  
А. В. Попов<sup>a,\*</sup>, Д. Е. Соснов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"  
Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина мкр. Орлова роща, 1

\*E-mail: popov\_av@npi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 22.08.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 06.10.2023 г.

Характеристики ионного источника с газовым наполнением и инъекцией электронов были изучены в рамках разработки генератора ионов изомерного состояния  $^{229m}\text{Th}$ . Проведены расчеты распределения электрического потенциала и плотности электронов в среде гелия. Измерена эффективность эвакуации ионов. Созданная методика отличается высокими эффективностью и быстродействием в сочетании с возможностью формирования интенсивного пучка ионов продуктов радиоактивного распада и ядерных реакций.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ионные источники, совмещенные с газовым объемом, давно и успешно используются для получения пучков ионов продуктов ядерных реакций. Продукты реакции тормозятся в среде инертного газа и в форме иона эвакуируются из газового объема для дальнейшей фильтрации и изучения [1]. Эффективность и время извлечения радиоактивных ионов критически важно для изучения короткоживущих нуклидов с малыми сечениями образования. В то же время извлечения ионов из газового объема

определяется его объемом и размером выходного отверстия газовой ячейки и ограничивается параметрами откачки вакуумной системы.

Попытки использовать электростатическое поле для ускорения эвакуации ионов сталкиваются с проблемой формирования собирающего потенциала – необходимостью большого градиента потенциала вблизи выходного отверстия, что приводит к разряду между электродами и значительному разбросу по энергиям извлекаемых ионов. Кроме того, был зафиксирован факт, что наличие электрического поля в присутствии ионизирующего излучения приводит к формированию объемного заряда и падению эффективности [2, 3]. Использование комбинации электростатического и радиочастотного потенциалов при условии тщательной сепарации первичного пучка [4, 5] позволило решить проблему ускорения эвакуации ионов при небольших интенсивностях ионизации и давлении более чем десятки Торр, что определяется ограничением на извлекаемый ионный ток. Предельный ток ограничивается мобильностью ионов в потенциале объемного заряда эвакуируемых ионов, а значит, размером выходного отверстия (0.5–1.5 мм), скоростью газовой струи и плотностью газа.

В данной работе описана методика формирования электрического поля с помощью инжекции электронов в газовый объем. Расталкивающий потенциал объемного заряда ионов компенсируется потенциалом индуцированным электронами, что снимает вышеупомянутое ограничение на ток ионов.

Изомер  $^{229\text{m}}\text{Th}$  представляется наиболее перспективным кандидатом на роль стандарта частоты нового поколения [6]. Данные о влиянии электронной оболочки на процессы заселения и гашения изомера играют определяющую роль в изучении свойств изомерного состояния [7, 8]. В качестве объекта для изучения этих процессов предлагается однозарядный ион изомера  $^{229\text{m}}\text{Th}$ , что определяется большой плотностью электронных состояний вблизи энергии изомерного состояния 8.2 эВ [9]. Для оценки роли резонансной конверсии и реализации механизма электронного моста для разрядки и возбуждения изомерного состояния необходима методика с минимальной задержкой между событиями формирования иона и его регистрации.

Для получения изомера  $^{229\text{m}}\text{Th}$  используется его заселение в альфа-распаде  $^{233}\text{U}$  [10, 11]. Ион в результате отдачи после альфа-распада вылетает с поверхности и тормозится в среде гелия, преимущественно в двух- и трехзарядном состояниях. Для его извлечения ранее применялись ионные источники с электростатическим полем [2] с комбинацией статического и радиочастотного полей [10, 11] и с использованием электрического поля,

генерируемого объемным зарядом электронов [2, 10]. Ключевой для данного эксперимента является возможность формирования однозарядного иона и максимально быстрая его доставка к детектору. На данный момент ограничение на время жизни изомера в однозарядном ионе составляет 10 мс [12]. Дополнительным параметром является давление газа, которое определяет величину уширения электронных состояний из-за столкновения ионов с молекулами газа и, соответственно, может существенно влиять на вероятность гашения изомера [13]. В работе [10] наблюдался эффект частичной нейтрализации исходных двух- и трехзарядных ионов тория электронами, инжектируемыми в области выходного отверстия газовой ячейки. Использование такой нейтрализации существенно уменьшает промежуток времени между образованием однозарядного иона и его эвакуацией из газовой ячейки. Это позволяет надеяться на то, что изомерное состояние не успеет разрядиться за время транспортировки, что даст возможность измерить его время жизни в однозарядном ионе.

Конструкция ионного источника, предназначенного для получения изомерного состояния в форме однозарядного иона, обсуждается в данной работе.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И РАБОТА ИСТОЧНИКА

Ионный источник представляет собой камеру из нержавеющей стали диаметром 50 или 100 мм [10], наполняемую гелием при давлении от 1 до 500 Торр, с количеством примесей на уровне  $10^{-7}$  по кислороду [14] (рис. 1). Внутри газовой ячейки размещены фольги из нержавеющей стали с нанесенным слоем  $^{233}\text{U}$  толщиной примерно  $2 \text{ мкг/см}^2$ . Площадь фольг составляет около  $600 \text{ см}^2$ . Градиент потенциала задается небольшим статическим напряжением на электродах вблизи выходного отверстия и фольгах с нанесенным  $^{233}\text{U}$ . Электронный эмиттер диаметром 2 мм представляет собой виток вольфрамовой проволоки диаметром 0.5 мм, легированной торием, нагреваемой прямым током до 2000 К. Эмиттер фиксируется на пластине катода вокруг выходного отверстия ячейки. Напряжение между электродами, прикладываемое для нагрева эмиттера (около 10 В), создает дополнительное поле, направленное к катоду. Ион, находящийся в газовой ячейке источника, под действием потока газа и электрического поля перемещается к катоду источника, где извлекается через выходное отверстие в область дифференциальной откачки. Дальнейшая транспортировка в область высокого вакуума осуществляется либо электростатическим полем, либо удерживающим радиочастотным потенциалом [10].

Для формирования объемного заряда электронов около выходного отверстия в катоду размещается эмиттер электронов. При работе эмиттера создается повышенная

Рис. 1

концентрация электронов, что приводит к ряду эффектов, из которых наиболее значимыми являются:

- создание объемного заряда электронов и, как следствие, существенное изменение электрического поля внутри источника;
- полная или частичная нейтрализации ионов при столкновении с электронами;
- ионизация примесных молекул за счет столкновения с электронами.

Рис. 2, 3

Распределение потенциала показано на рис. 2. Результирующее электрическое поле и распределение плотности электронов для различных токов эмиттера и приложенных потенциалах (рис. 3) было смоделировано путем итеративного решения уравнения Пуассона с использованием метода "частица в ячейке" в газовой среде [15].

Тестирование ионного источника было проведено на электромагнитном сепараторе установки IGISOL [10] и на стенде, предназначенном для получения ионов изомера  $^{229m}\text{Th}$  [16]. В качестве источника ионов использовались продукты альфа-распада, вылетающие в результате отдачи с поверхности источника  $^{233}\text{U}$  и  $^{223}\text{Ra}$  и тормозящиеся в среде гелия. Для определения абсолютной эффективности источника использовались ионы  $^{219}\text{Rn}$ , образующиеся из распада  $^{223}\text{Ra}$ . Источник  $^{223}\text{Ra}$  был нанесен на торец алюминиевого стержня, который расположен в газовой ячейке и находится под потенциалом корпуса ячейки. Эффективность определялась как отношение абсолютной активности в режиме насыщения  $^{215}\text{Po}$ , дочернего ядра после распада  $^{219}\text{Rn}$ , высаживаемого на фольгу в коллекторе масс-сепаратора, к числу вылетевших из фольги атомов отдачи. Поскольку при этом не учитывалась вероятность остановки иона в газе и вероятность формирования однозарядного иона, то эту величину можно принять за нижний предел для эффективности эвакуации ионов из газовой ячейки.

Рис. 4

На рис. 4 приведена зависимость эффективности извлечения ионов  $^{219}\text{Rn}$  из газовой ячейки в зависимости от тока эмиттера. Для удобства учета мобильности электронов, по шкале абсцисс приведено значение произведения давления газа на ток эмиттера, что пропорционально концентрации электронов. Видимое падение эффективности при понижении давления объясняется как уменьшением числа ионов, остановившихся в гелии, так и увеличением эффекта диффузии вблизи выходного отверстия. Для оценки влияния транспортировки ионов внутри и вне камеры на полную эффективность, небольшое количество хлорида калия было нанесено на эмиттер и допущена небольшая (около 100 ppm) примесь ксенона. Ионы калия формируются на поверхности эмиттера и характеризуют относительную эффективность транспортировки ионов, покинувших

ячейку. Ионы ксенона при низких напряжениях катода (до 30 В) образуются за счет альфа-излучения, приводящего к ионизации атомов ксенона. При повышении напряжения катода выше 35 В наблюдается значительное увеличение тока ксенона (рис. 5), что определяется дополнительной ионизацией за счет столкновений с электронами и метастабильными атомами гелия. При этом заметно падает эффективность извлечения ионов  $^{219}\text{Rn}$ , полученных в результате альфа-распада. В то же время эффективность транспорта ионов далее по тракту, характеризуемая счетом ионов калия, меняется слабо вплоть до потенциала катода 60 В. Дальнейшее падение эффективности определяется увеличением объемного заряда в области промежуточной откачки для больших извлекаемых ионных токов. Аналогичный эффект наблюдался и для молекул оксида вольфрама и тория, испаряемых с поверхности эмиттера электронов (рис. 6). Ток ионов оксидов стабильных изотопов вольфрама и тория  $\text{WO}$ ,  $\text{WO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ThO}$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{ThO}_3$  увеличивался при повышении потенциала катода выше 35 В. Эффект многократного увеличения тока однозарядных ионов при одновременном уменьшении числа двухзарядных ионов  $^{229}\text{Th}$  наблюдался при увеличении величины тока электронов (рис. 7), что трудно объяснить только увеличением эффективности. Этот эффект был интерпретирован как частичная нейтрализация двух- и трехзарядных ионов эмитируемыми электронами [10].

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить несколько факторов, затрудняющих применение данной методики:

- высокая эффективность извлечения ионов приводит к тому, что при высокой степени ионизации газовой среды первичным пучком или продуктами ядерных реакций возникают проблемы с транспортировкой большого извлеченного тока ионов;
- дополнительные сложности накладывает необходимость транспортировки ионов через область промежуточной откачки, поскольку относительно высокое давление газа исключает использование высокого напряжения для формирования интенсивного пучка;
- присутствуют фоновые ионы, генерируемые электронным эмиттером. В рассматриваемой схеме наблюдался ток ионов стабильных изотопов тория и вольфрама;
- нагрев эмиттера затрудняет использование ячейки в криогенном режиме для увеличения плотности среды и уменьшения вероятности химических реакций ионов с примесями.

К положительным характеристикам данной методики можно отнести следующие:

- при небольших уровнях ионизации транспортировка извлеченных ионов через область промежуточной откачки может осуществляться как с использованием удержания в радиочастотном мультипольном потенциале, так и с помощью электростатической транспортировки. При этом полная эффективность эвакуации иона из газового объема достигает десятков процентов в широком диапазоне давлений [17];

- эффект частичной нейтрализации двух- и трехзарядных ионов, помимо увеличения интенсивности пучка однозарядных ионов, дает надежду на то, что формирование иона произойдет вблизи выходного отверстия газовой ячейки и, как следствие, время его эвакуации будет в субмиллисекундном диапазоне, что много меньше типового для подобных устройств времени эвакуации ионов – десятков миллисекунд;

- формирование собирающего потенциала за счет объемного заряда электронов позволяет избежать необходимости конструкции с большим числом электродов. Получаемый таким образом потенциал автоматически адаптируется при работе в широком диапазоне давлений и в соответствии с размерами ячейки;

- присутствие объемного заряда электронов эффективно компенсирует объемный заряд ионов, генерируемых при ионизации газа как первичным пучком, так и продуктами реакции, и создает дополнительное поле, существенно повышающее скорость и эффективность эвакуации ионов [2, 10, 17];

- большой объем позволяет уменьшить плотность газа, необходимого для остановки ионов, вылетающих из источника после альфа-распада, что увеличивает мобильность ионов и, соответственно, скорость эвакуации. Кроме того, увеличение объема позволяет увеличить область эффективной остановки исследуемых нуклидов и в частном случае изучения  $^{229\text{m}}\text{Th}$  дает возможность увеличить площадь размещенных фольг с нанесенным слоем  $^{233}\text{U}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и создан высокоэффективный быстродействующий ионный источник для изучения свойств высокоинтенсивных пучков ионов – продуктов радиоактивного распада и ядерных реакций.

Использование данной методики представляется оптимальным для получения пучка однозарядных ионов низкоэнергетического изомера  $^{229\text{m}}\text{Th}$ .

Возможность эффективного использования большого объема (до 1000 см<sup>3</sup>) позволяет использовать источники <sup>233</sup>U большой площади, что приводит к возможности получения пучков ионов <sup>229m</sup>Th большей интенсивности.

Наиболее интересными в этом плане представляется формирование однозарядного иона вблизи выходного отверстия ионизатора и возможность использования низкого давления, что позволит варьировать эффект ускорения гашения изомера за счет уширения электронных уровней [13].

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00090).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны О.Л. Федину за интерес и поддержку работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moore I.D., Dendooven P., Arje J.* // *Hyperfine Interact.* 2014. V. 223. P. 17. <https://doi.org/10.1007/s10751-013-0871-0>
2. *Tordoff B., Eronen T., Elomaa V.V., Gulick S., Hager U., Karvonen P., Kessler T., Lee J., Moore I., Popov A., Rahaman S., Rinta-Antila S., Sonoda T., Aysto J.* // *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* 2006. V. 252. P. 347. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2006.08.015>
3. *Beraud R., Canchel G., Emsallem A., Dendooven P., Huikari J., Huang W., Wang Y., Perajarvi K., Rinta-Antila S., Jokinen A., Kolhinen V.S., Niemenen A., Penttila H., Szeripo J., Aysto J., Bruyneel B., Popov A.* // *Hyperfine Interactions.* 2001. V. 132. P. 485. <https://doi.org/10.1023/A:1011979029056>
4. *Takamine A., Wada M., Ishida Y., Nakamura T., Okada K., Yamazaki Y., Kambara T., Kanai Y., Kojima T.M., Nakai Y., Oshima N., Yoshida A., Kubo T., Ohtani S., Noda K., Katayama I., Hostain P., Varentsov V., Wollnik H.* // *Rev. Sci. Instr.* 2005. V. 76. P. 103503. <https://doi.org/10.1063/1.2090290>
5. *Ringle R., Bollen G., Lund K., Nicoloff C., Schwarz S., Sumithrarachchi C.S., Villari A.C.C.* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* 2021. V. 496. P. 61. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.03.020>
6. *Peik E., Tamm Chr.* // *Europhys. Lett.* 2003. V. 61. P. 181. <https://doi.org/10.1209/epl/i2003-00210-x>
7. *Karpeshin F.F., Trzhaskovskaya M.B.* // *Nucl. Phys.* 2018. V 969. P. 173. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2017.10.003>
8. *Карпешин Ф.Ф.* // *ЭЧАЯ* 2006. Т.37 Вып.2. С. 522
9. *Витушкин Л.Ф., Гусев Ю.И., Карпешин Ф.Ф., Новиков Ю.Н., Орлов О., Охалкин М.В., Попов А.В., Тржасковская М.Б.* // *Законодательная и прикладная метрология.* 2022. № 3(177). С. 9.
10. *Sonnenschein V., Moore I.D., Raeder S., Hakimi A., Popov A., Wendt K.* // *Eur. Phys. J. A.* 2012. V. 48(4). P. 52. <https://doi.org/10.1140/epja/i2012-12052-3>
11. *Von der Wense L., Seiferle B., Laatiaoui M., Neumayr J.B., Maier H.-J., Wirth H.-F., Mokry C., Runke J., Eberhardt K., Düllmann C.E., Trautmann N.G., Thirolf P.G.* // *Nature.* 2016. V. 47. P. 533. <https://doi.org/10.1038/nature17669>



12. *Von der Wense L., Seiferle B.* // Eur. Phys. J. 2020. V. 56. P. 277.  
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00263-0>
13. *Karpeshin F.F., Trzhaskovskaya M.B.* // Nucl. Phys. 2021. V. 1010. P. 122173.  
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2021.122173>
14. *Moore I.D., Kessler T., Sonoda T., Kudryavstev Y., Perajarvi K., Popov A., Wendt K.D.A., Aysto J.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2010. V. 268(6). P. 657.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.12.001>
15. *Попов А.В.* Свидетельство о гос. регистрации программ 2018617922 (2018).
16. *Гусев Ю.И., Новиков Ю.Н., Попов А.В., Тихонов В.И.* // Изв. РАН. серия физическая. 2016. Т. 80(8). С. 962. <https://doi.org/10.7868/S0367676516080184>
17. *Huikari J., Dendooven P., Jokinen A., Nieminen A., Penttila H., Perajarvi K., Popov A., Rinta-Antila S., Aysto J.* // Nucl. Instr. and Meth. Phys Res. B. 2004. V. 222(3-4). P. 632.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.04.164>

## СПИСОК РИСУНКОВ

- Рис. 1.** Ионный источник, сочлененный со схемой формирования ионного пучка: 1 – фольги с  $^{233}\text{U}$  в газовой ячейке, 2 – электронный эмиттер, 3 – катод, 4 – дополнительный электрод, 5 – керамические изоляторы, 6 – газовая ячейка, 7 – транспортные электроды со статическим потенциалом, 8 – электроды с радиочастотным квадрупольным потенциалом.
- Рис. 2.** Распределение потенциала внутри ионного источника, рассчитанное для различных токов эмиттера при давлении 50 Торр. Числами показаны значения потенциала для эквипотенциальных линий.
- Рис. 3.** Напряженность электрического поля (а) и плотность электронов (б) внутри ионного источника при давлении 25 Торр и токе эмиттера 1 мкА. Сплошная линия – распределение при нулевом потенциале на фольгах с нанесенным ураном. Штриховая линия – к фольгам приложен потенциал, возрастающий от 0 до 20 В по мере удаления от катода. По оси абсцисс указано расстояние до катода
- Рис. 4.** Эффективность эвакуации ионов  $^{219}\text{Rn}$  при напряжении катода -20 В для различных значений тока эмиттера и давления гелия.
- Рис. 5.** Зависимости количества ионов  $^{39}\text{K}$ , счета ионов  $^{129}\text{Xe}$  и альфа-частиц из распада  $^{215}\text{Po}$  от напряжения на катоде ячейки. Данные получены при давлении 50 Торр.
- Рис. 6.** Спектр масс, измеренный при различных потенциалах катода и постоянной температуре эмиттера.
- Рис. 7.** Отношение скоростей счета двух- и однозарядных ионов  $^{229}\text{Th}$  в зависимости от тока эмиттера.

цифры - курсив

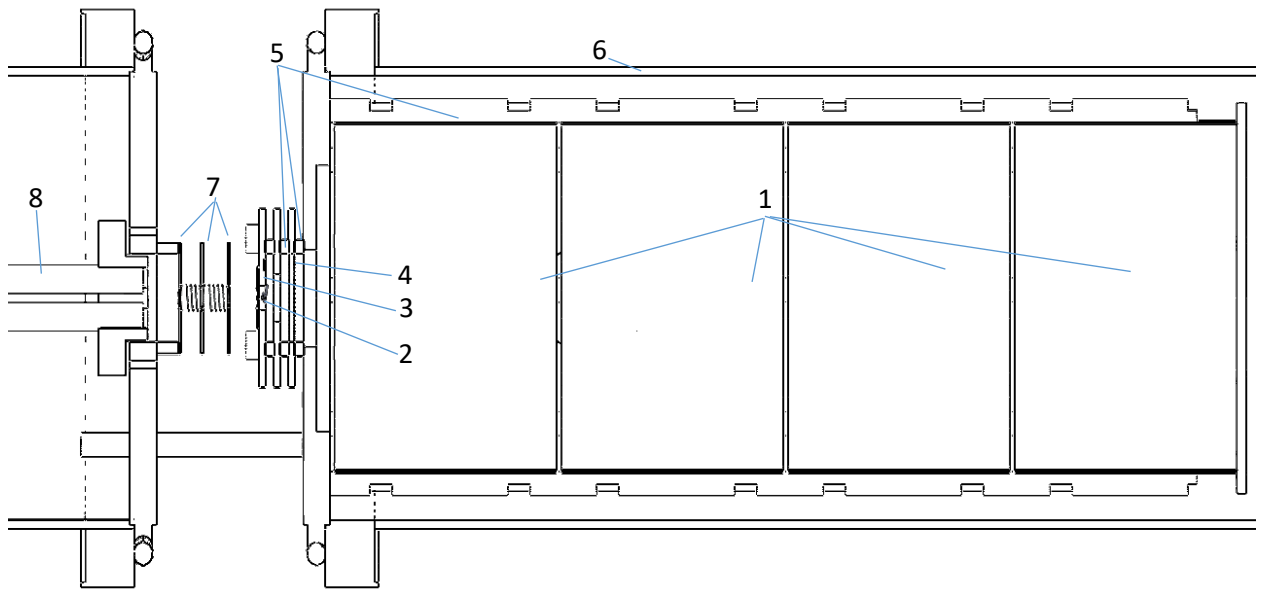


Рис. 1.

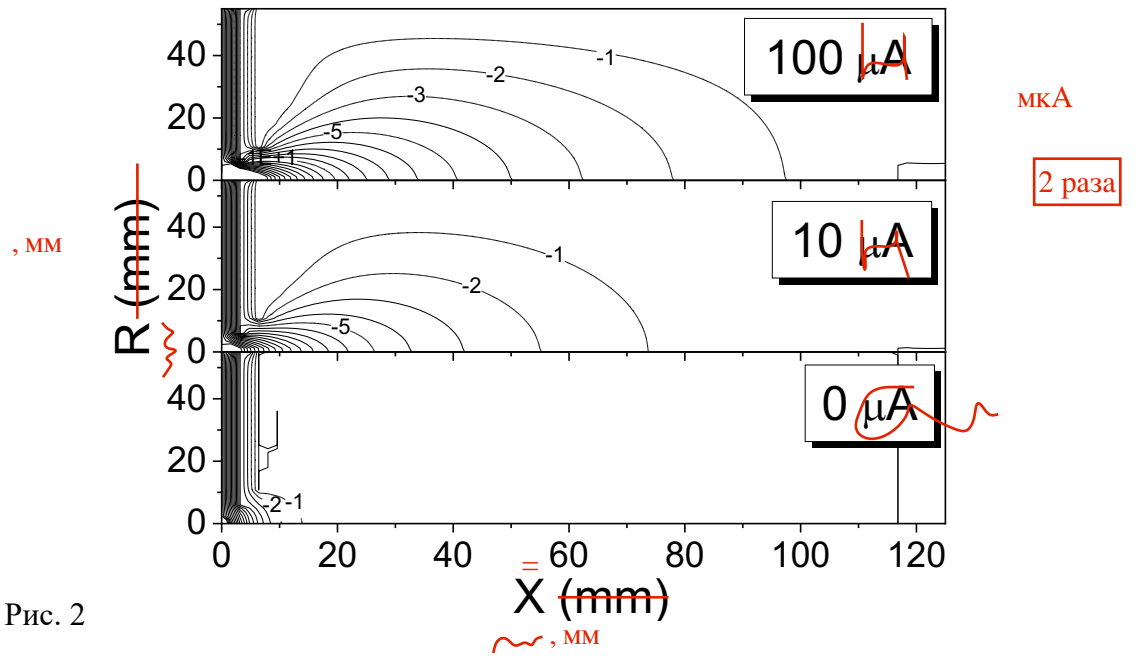


Рис. 2

десятичн запятые заменить на точки

В 2 раза

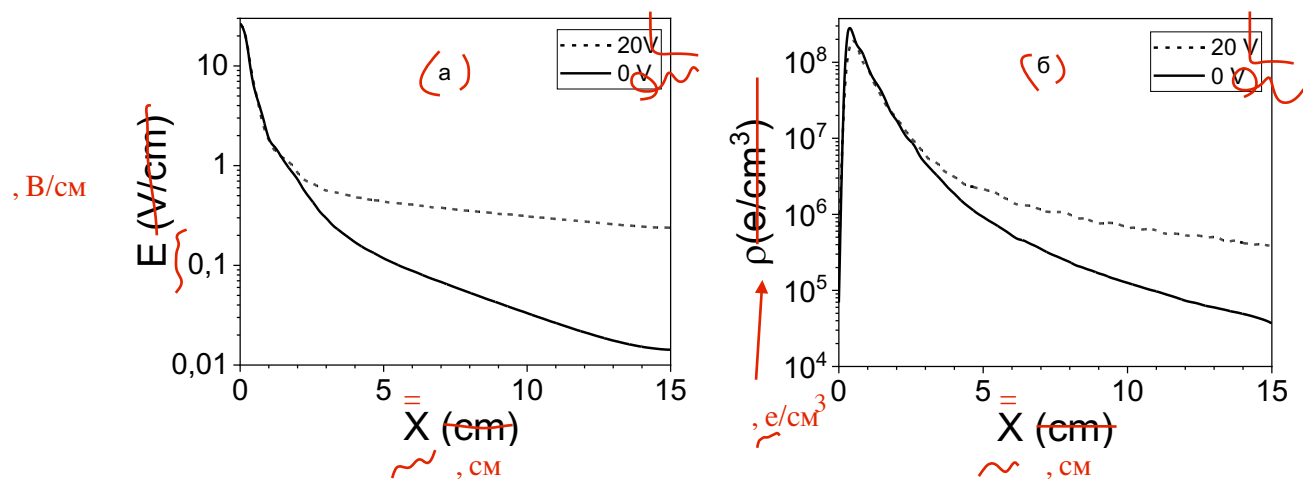


Рис. 3

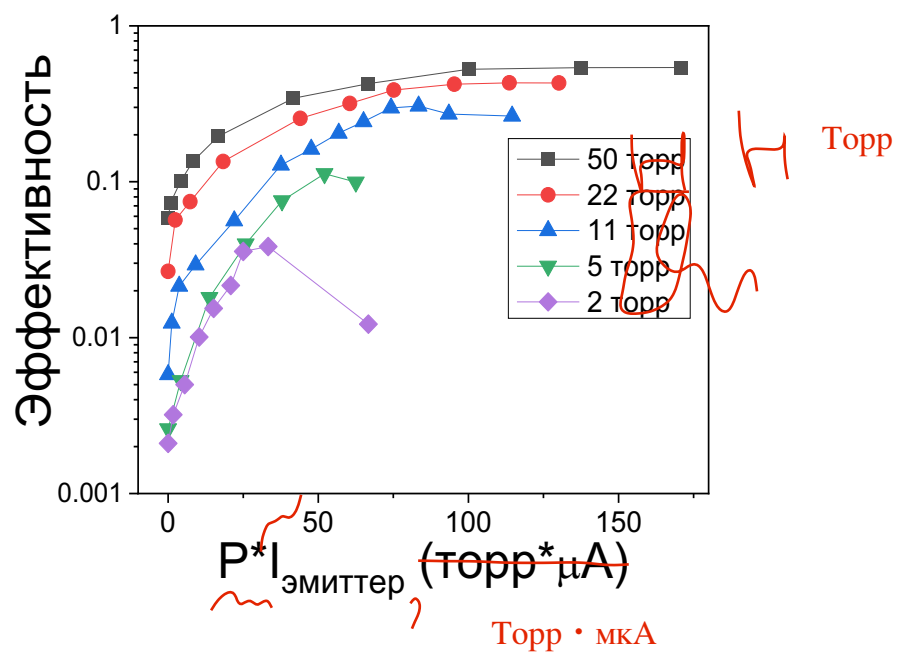


Рис. 4

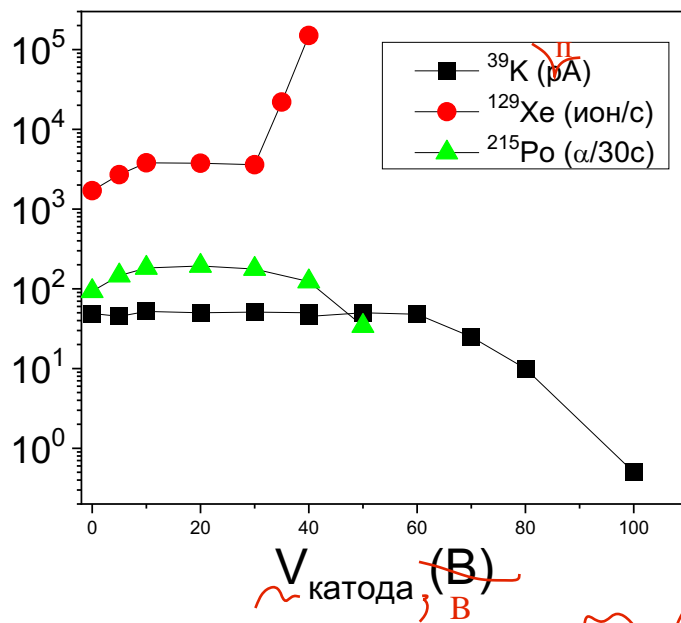


Рис. 5.

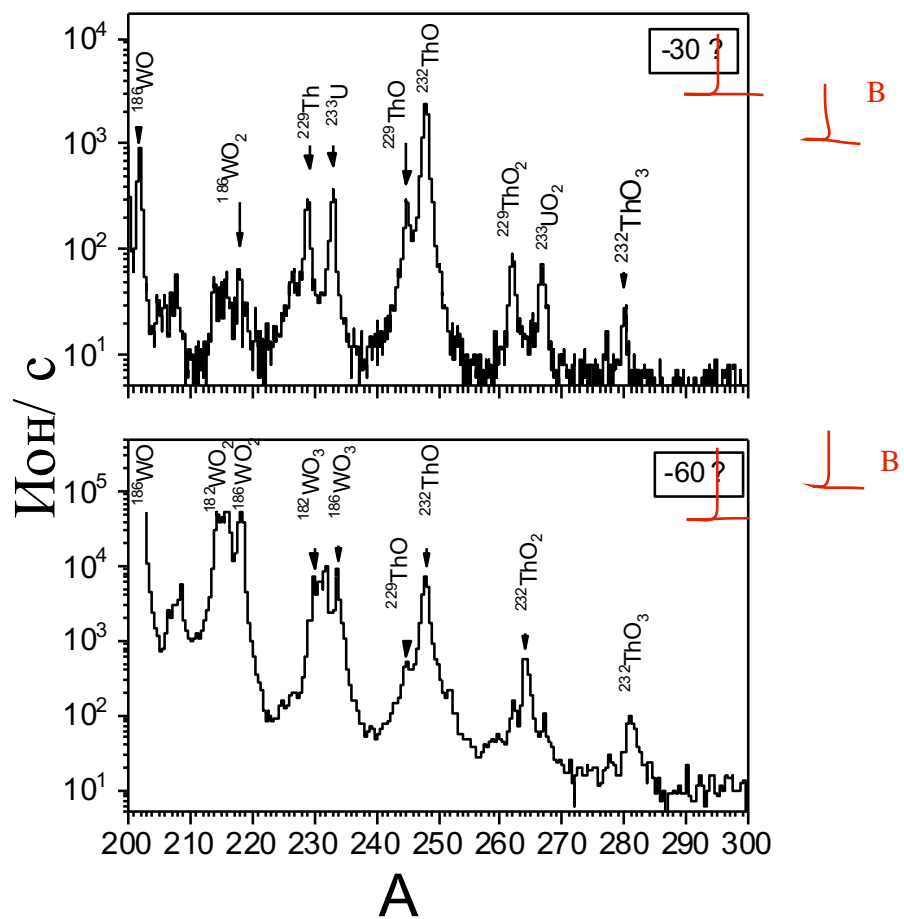


Рис. 6



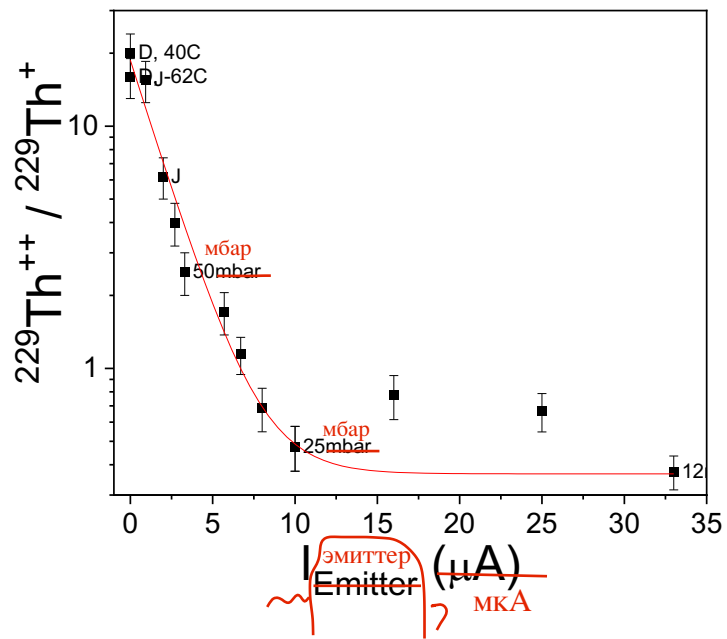


Рис. 7.

**Попов Андрей Вальтерович**

**E-mail: [popov\\_av@pnpi.nrcki.ru](mailto:popov_av@pnpi.nrcki.ru)**

**Тел.: 8-911-991-10-69 (моб.)**

Гусев Юрий Иванович

E-mail: [gusev\\_yi@pnpi.nrcki.ru](mailto:gusev_yi@pnpi.nrcki.ru)

Нечипоренко Юрий Владимирович

E-mail: [yurichnt@bk.ru](mailto:yurichnt@bk.ru)

Новиков Юрий Николаевич

E-mail: [novikov\\_yn@pnpi.nrcki.ru](mailto:novikov_yn@pnpi.nrcki.ru)

Соснов Дмитрий Евгеньевич

E-mail: [sosnov\\_de@pnpi.nrcki.ru](mailto:sosnov_de@pnpi.nrcki.ru)

**Для переводчика:**

Efficient gas ion source with space charge

Аннотация:

The characteristics of an ion source with gas filling and electron injection were studied as part of the development of the  $^{229m}\text{Th}$  isomeric state ion generator. Calculations of the distribution of the electric potential and electron density in the helium media are carried out. The efficiency of ion evacuation was measured. The created technique is characterized by high efficiency and speed in combination with the possibility of forming an intense ion beam of radioactive decay products and nuclear reactions.

Информация о финансировании

Russian Science Foundation, grant № 22-22-00090