

УДК 539.1

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2026 г. Б. Как^{а, b, *}, Е. Е. Барминова^{а, с, **}

^аРоссийский университет дружбы народов РУДН, Москва, 117198 Россия

^бМосковский технический университет связи и информатики, Москва, 111024 Россия

^сНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: bushra1992k@gmail.com

**E-mail: eebarmnova@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.05.2025 г.

После доработки 16.05.2025 г.

Принята к публикации 20.05.2025 г.

Для ионных источников с электронным пучком (ИИЭП) исследована двухпотоковая неустойчивость. Определена зависимость инкремента неустойчивости от коэффициента зарядовой компенсации и от коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при разных энергиях электронного пучка. Изучено влияние зарядового состояния ионов золота и кадмия на сечение радиационной рекомбинации для различных энергий электронного пучка. Приведены результаты наших расчетов в MATLAB.

Ключевые слова: плазменная неустойчивость, инкремент неустойчивости, коэффициент зарядовой компенсации, коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков, зарядовое состояние иона, радиационная рекомбинация

DOI: 10.56304/S2079562925060107

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионные источники с электронным пучком (ИИЭП), работающие на принципе ионизации электронным ударом, являются перспективными источниками для генерации пучков ионов с высокой зарядностью [1]. Источники ИИЭП различных модификаций используются в фундаментальных и прикладных исследованиях в ускорительных центрах CERN (LHC), BNL (RHIC), ОИЯИ (NICA), где служат для получения ядер золота, свинца, урана и других химических элементов [2]. ИИЭП представляют собой важный инструмент исследований в области физики плазмы и материаловедения, а также имеют перспективу для применения в медицине и в технологии обработки материалов. Ионные источники с электронным пучком функционируют на основе взаимодействия высокоэнергетичных электронов с нейтральными атомами или молекулами газа. Процесс начинается с генерации первичного электронного пучка, который затем инжектируется в камеру с рабочим веществом (например, инертным газом, таким как аргон или ксенон). При столкновении электронов с атомами газа происходит ионизация, в результате чего образуются положительно заряженные ионы, которые затем формируются в пучок и выводятся через специальную систему ионной

оптики. Экстрагированный пучок может быть далее использован в различных приложениях, включая ионную имплантацию, анализ материалов и создание плазмы, либо для фундаментальных исследований в ускорительных комплексах.

Несмотря на высокий потенциал их применения, ИИЭП сталкиваются с рядом проблем, которые могут ограничивать их базовые рабочие параметры, их эффективность и надежность. В этой работе мы рассмотрим две из этих проблем: характерная для этого типа источников плазменная неустойчивость и радиационная рекомбинация ионов.

2. ПЛАЗМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

При создании и эксплуатации ионных источников с электронным пучком одной из проблем, влияющих на номинальные параметры и стабильность работы источника являются плазменные неустойчивости. Одной из таких неустойчивостей является двухпотоковая неустойчивость или неустойчивость Бунемана, которая способна привести к развалу электронного пучка, нарушению стабильности и эффективности генерации ионов, росту эмиттанса и модуляции тока экстрагируемого ионного пучка [3–6].

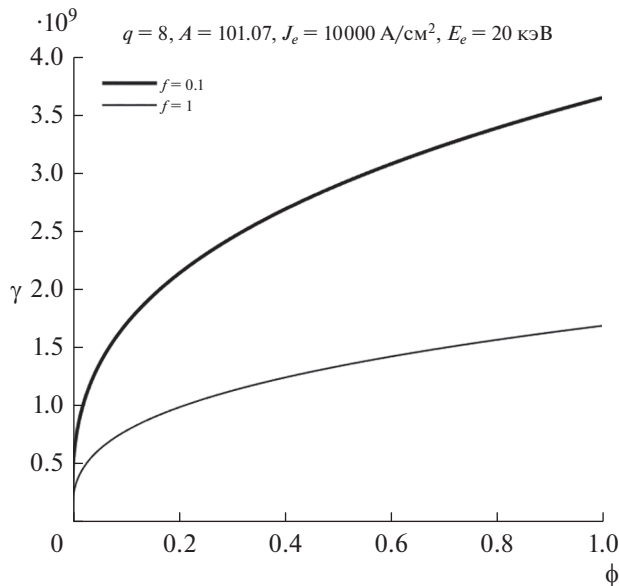


Рис. 1. Зависимость инкремента неустойчивости от коэффициента зарядовой компенсации и коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при энергии электронного пучка 20 кэВ для ядер Ru^{8+} .

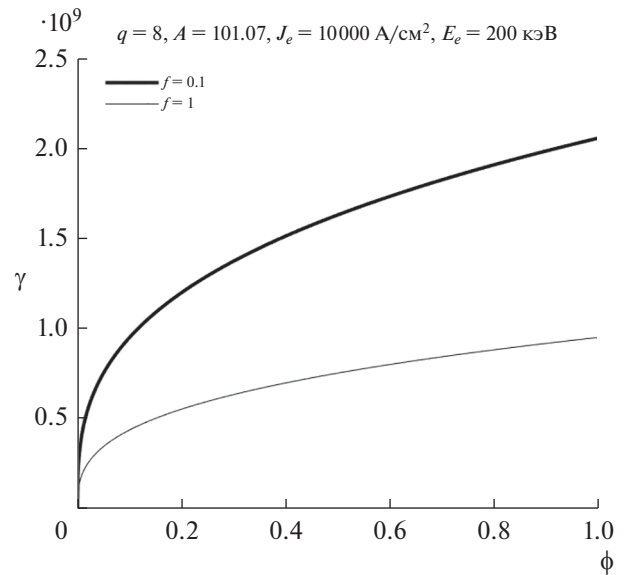


Рис. 2. Зависимость инкремента неустойчивости от коэффициента зарядовой компенсации и коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при энергии электронного пучка 200 кэВ для ядер Ru^{8+} .

Плазма ИИЭП является многокомпонентной, что осложняет установление областей стабильности, которые в первую очередь определяются геометрией источника, типом ионизируемого газа (рабочего вещества), энергией инжектируемого электронного пучка. В настоящей работе изучены зависимости инкремента неустойчивости, который является количественной мерой скорости нарастания неустойчивости и определяет стабильность и качество ионного пучка, для ряда параметров пучково-плазменной системы источника типа ИИЭП. Используя дисперсионное соотношение для системы с фиксированным зарядовым состоянием иона, легко найти инкремент двухпоточковой неустойчивости, который удобно использовать в следующем виде [4]:

$$\gamma = 1.8 \cdot 10^8 \left[f \phi \frac{q}{A} \right]^{1/3} \frac{J_e^{1/2}}{E_e^{1/4}}. \quad (1)$$

Здесь f — коэффициент компенсации собственного пространственного заряда пучка, ϕ — коэффициент перекрытия электронного и ионного пучка, q — фиксированное зарядовое состояние иона, A — массовое число иона (рабочего вещества), J_e — плотность эквивалентного тока электронного пучка [А/см^2], E_e — энергия электронов инжектируемого пучка [кэВ].

Для оценки влияния коэффициента компенсации пространственного заряда на скорость роста неустойчивости в MATLAB проведены расчеты инкремента с использованием инженерной

формулы (1) для плазмы с ионами рутения Ru^{8+} и энергии электронного пучка 20 кэВ (рис. 1) и 200 кэВ (рис. 2), и с ионами криптона Kr^{36+} и энергии электронного пучка 20 кэВ (рис. 3) и 200 кэВ (рис. 4). Выбор величин энергии электронного пучка для расчета обусловлен технологическими и конструктивными особенностями источников такого типа. Диапазоны изменения коэффициента компенсации и коэффициента перекрытия выбраны от 0.1 до 1.0. Для оценки величин инкремента плотность тока электронного пучка принята равной 10^4 А/см^2 , что соответствует наиболее распространенной величине тока в источниках этого типа. В практически значимых случаях коэффициент ϕ часто близок к единице, однако использованный в расчетах диапазон имеет важное иллюстративное значение для оценки влияния смещения начального положения пучка.

Из рис. 1–4 видно, что инкремент неустойчивости растет с увеличением степени перекрытия ионного и электронного пучков, с увеличением коэффициента компенсации собственного пространственного заряда пучка и уменьшается с ростом энергии инжектированного электронного пучка. Двухпоточковая неустойчивость имеет конвективный характер, ее характерное время развития связано с временем пролета, поэтому конструктивные особенности источника ИИЭП, в частности, его длина, определяются максимальным инкрементом неустойчивости этого типа для плазменной системы с ионами различного зарядового состояния.

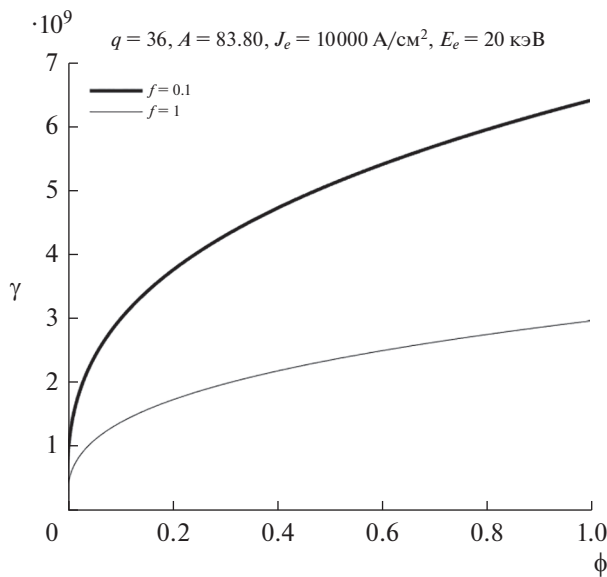


Рис. 3. Зависимость инкремента неустойчивости от коэффициента зарядовой компенсации и коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при энергии электронного пучка 20 кэВ для ядер Kr^{36+} .

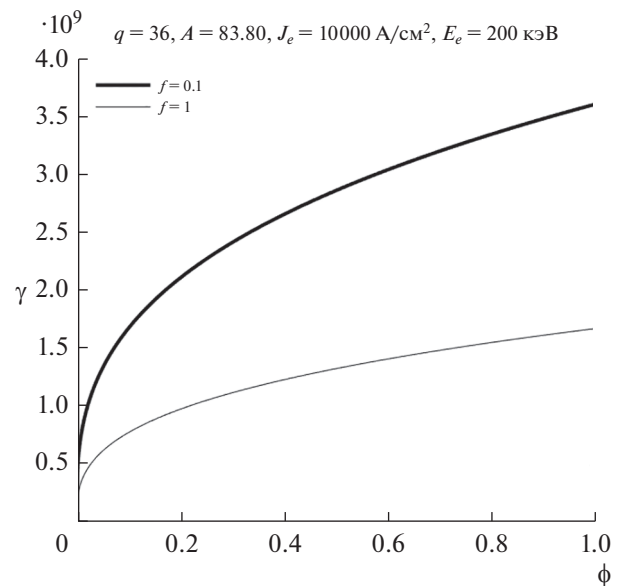


Рис. 4. Зависимость инкремента неустойчивости от коэффициента зарядовой компенсации и коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при энергии электронного пучка 200 кэВ для ядер Kr^{36+} .

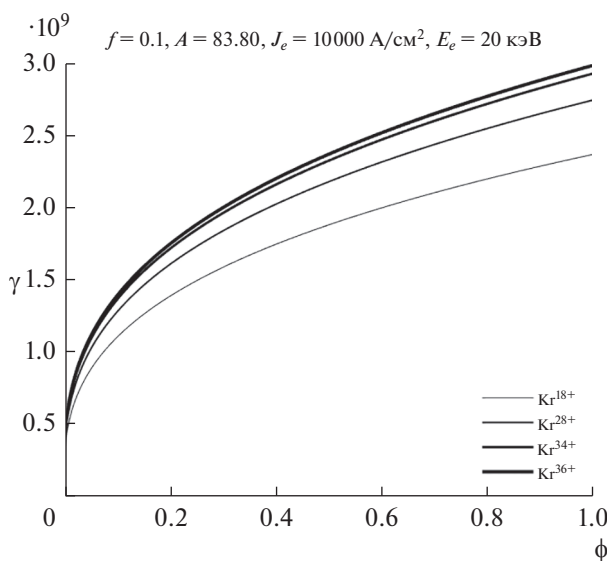


Рис. 5. Зависимость инкремента неустойчивости от зарядового состояния иона и коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при энергии электронного пучка 20 кэВ.

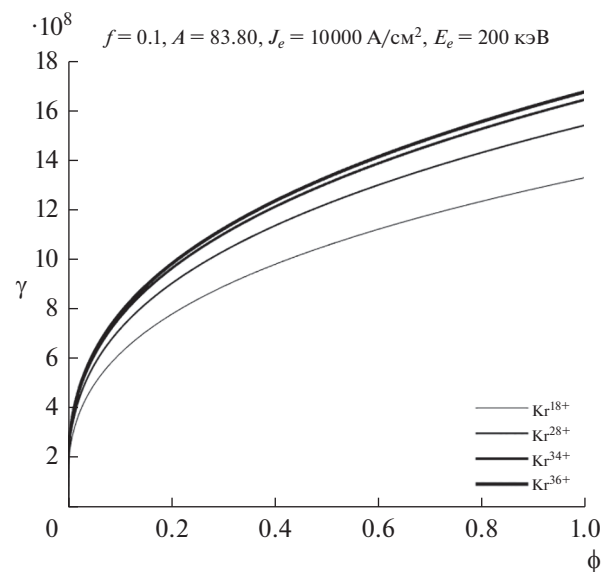


Рис. 6. Зависимость инкремента неустойчивости от зарядового состояния иона и коэффициента перекрытия электронного и ионного пучков при энергии электронного пучка 200 кэВ.

Далее была проведена сравнительная оценка влияния зарядового состояния ионов на скорость роста двухпотоковой неустойчивости для криптоновой плазмы с ионами следующих зарядностей: Kr^{18+} , Kr^{28+} , Kr^{34+} , Kr^{36+} при двух разных величинах энергии электронного пучка — 20 кэВ (рис. 5) и 200 кэВ (рис. 6). Для расчета коэффициент компенсации был принят равным 0.1, и диапазон ко-

эффициента перекрытия выбран от 0.1 до 1.0, который, как и в предыдущих вычислениях используется для оценки влияния смещения начального положения электронного пучка. Плотность тока электронного пучка принята равной 10^4 А/см^2 .

На рис. 5 и 6, видно, что инкремент двухпотоковой неустойчивости растет с увеличением степени перекрытия ионного и электронного пуч-

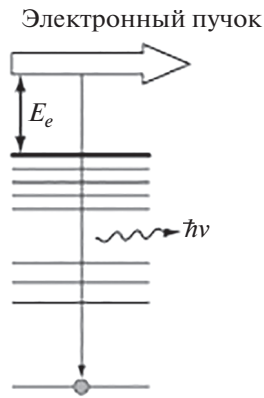


Рис. 7. Схема процесса радиационной рекомбинации.

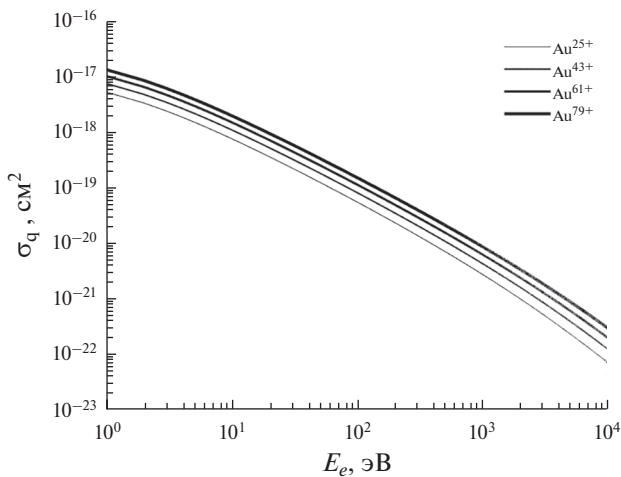


Рис. 8. Сечения радиационной рекомбинации на ионах золота ($Z = 79$) различной зарядности.

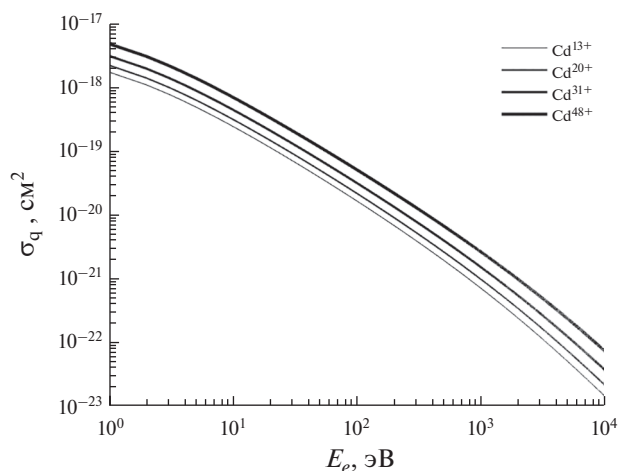
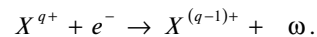


Рис. 9. Сечения радиационной рекомбинации на ионах кадмия ($Z = 48$) различной зарядности.

ков, и уменьшается с увеличением зарядового состояния иона рабочего газа. При увеличении энергии инжектируемого электронного пучка в 10 раз инкремент неустойчивости уменьшается более, чем на порядок при коэффициенте компенсации собственного пространственного заряда пучка, равном $f = 0.1$.

3. РЕКОМБИНАЦИЯ

В ИИЭП электронный пучок проходит через захваченное ионное облако, где из-за столкновений с ионами происходят различные атомные процессы [7]. В настоящей работе из атомных процессов, характерных для плазмы источника, была исследована радиационная рекомбинация (RR) [8], которая схематично изображена на рис. 7:



В настоящей работе было исследовано влияние зарядового состояния иона золота и кадмия на сечение радиационной рекомбинации. Для оценки сечения процесса была использована формула Кима–Пратта [9]:

$$\sigma_q^{RR}(E_e) = \frac{8\pi}{3\sqrt{3}} \alpha \lambda_e^2 \chi_q(E_e) \ln \left(1 + \frac{\chi_q(E_e)}{2\hat{n}} \right).$$

Здесь α — постоянная тонкой структуры, $\lambda_e = \frac{h}{mc} = 3.861 \cdot 10^{-11}$ см — Комптоновская длина волны электрона. Для ионов с зарядовым состоянием q при полной величине заряда ядра Z , соотношение $\chi_q(E_e) = (Z + q)^2 \frac{I_H}{4E_e}$, где $I_H = 13.6$ эВ — потенциал ионизации атома водорода, E_e — энергия электронного пучка.

Для оценки величин сечения радиационной рекомбинации в диапазоне энергий пучка электронов, представляющих технологический интерес, проведены расчеты с использованием среды MATLAB для различных зарядовых состояний ионов Au (золото, $Z = 79$) и Cd (кадмий, $Z = 48$). Результаты вычислений представлены на рис. 8 и 9.

Очевидно, что сечение радиационной рекомбинации растет с повышением зарядового состояния иона. С увеличением энергии электронного пучка сечение предсказуемо падает, при этом разница в величинах сечений радиационной рекомбинации для различных зарядовых состояний иона резко снижается.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы в многокомпонентной плазме ионных источников с электронным пучком (ИИЭП) влияют на функционирование и эффективность их работы. В настоящей статье приведены резуль-

таты изучения двух процессов: развития двухпоточковой неустойчивости и радиационной рекомбинации в многокомпонентной плазме источника, содержащей многозарядные ионы. Инкремент двухпоточковой неустойчивости зависит от энергии инжектируемого электронного пучка, от зарядности ионов плазмы, от степени нейтрализации собственного пространственного заряда пучка, и от степени перекрытия электронного и ионного пучков. Показано, что инкремент неустойчивости растет при увеличении степени перекрытия ионного и электронного пучков, при увеличении коэффициента компенсации собственного пространственного заряда пучка и уменьшается с ростом энергии инжектированного пучка электронов. Развитие двухпоточковой неустойчивости приводит к развалу пучка за время порядка пролетного, поэтому параметры источника (энергия инжекции пучка электронов, габариты рабочей камеры, тип рабочего газа), а также методы стабилизации положения электронного пучка должны быть выбраны с условием минимизации инкремента неустойчивости.

В работе были определены характерные значения сечения радиационной рекомбинации в диапазоне параметров ионно-плазменной системы источника, представляющем практический интерес. Сечение радиационной рекомбинации растет с увеличением зарядового состояния иона. Сечение растет также с уменьшением заряда атомного ядра и при относительно небольших энергиях электронного пучка может достигать сотых долей барна. С увеличением энергии электронного пучка сечение предсказуемо падает, при этом разница в сечении рекомбинации для различных зарядовых

состояний иона практически нивелируется. Явление радиационной рекомбинации необходимо принимать во внимание при разработке источника ИИЭП, поскольку номинальные параметры источника определяются для ионного пучка с фиксированным зарядовым спектром. Сбалансированный выбор параметров ионного источника с электронным пучком, позволяющий работать вне области развития двухпоточковой неустойчивости и минимизирующий потери ионов за счет радиационной рекомбинации, будет способствовать эффективной и стабильной работе ИИЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Zschornack G. et al. Electron Beam Ion Sources // arXiv: 1410.8014v1. 2014.
2. Kak B., Barminova H.Y. // Тр. 65-й Всеросс. науч. конф. МФТИ в честь 115-летия Л. Д. Ландау. Электроника, фотоника и молекулярная физика. Москва, 2023. С. 72–74.
3. Cap F.F. Handbook on Plasma Instabilities. 1978. New York: Academic.
4. Shornikov A. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. B. 2016. V. 376. P. 361–363.
5. Barminova H.Y., Chikhachev A.S. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87 (2). P. 02A508.
6. Барминова Е.Е. Дисс. к. ф.-м. н. 2001. Москва: МИФИ.
7. Как Б., Барминова Е.Е. // XI междунар. конф. “Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз-2025”. Москва, 2025. С. 158.
8. Xiaojun Lu, Currell F.J. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2009. V. 12. P. 014401.
9. Kim Y.S., Pratt R.H. // Phys. Rev. A. 1983. V. 27. P. 2913.

On Some Problems of Electron Beam Ion Sources

B. Kak^{1, 2, *} and H. Y. Barminova^{1, 3, **}

¹Peoples' Friendship University of Russia RUDN, Moscow, 117198 Russia

²Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, 111024 Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*E-mail: bushra1992k@gmail.com

**E-mail: eebarmnova@mephi.ru

Received May 14, 2025; revised May 16, 2025; accepted May 20, 2025

Abstract—A two-stream instability for electron beam ion sources (EBIS) is investigated. The dependence of the instability increment on the charge compensation coefficient and on the overlap coefficient of the electron and ion beams at different electron beam energies is determined. An influence of the charge state of Gold and Cadmium ions on the radiative recombination cross section for different electron beam energies is studied. The results of our calculations in MATLAB are given.

Keywords: plasma instability, instability increment, ion charge state, charge compensation coefficient, electron and ion beam overlap coefficient, radiative recombination