

A-576

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

9 - 6786

АЛЬПЕРТ
Владислав Анатольевич

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Специальность 05.260 - приборы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук Е.Д.Донец.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук И.Ф.Мальшев,
кандидат физико-математических наук Д.Л.Новиков.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физико-технический институт АН УССР /г. Харьков/.

Автореферат разослан " " 1972 г.

Защита диссертации состоится " " 1972 г.
в " " часов на заседании Объединенного Ученого совета
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований /г.Дубна/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу:
г.Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных
исследований. Ученому секретарю Объединенного Ученого совета
ЛЯР и ЛНФ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н.Каржавина

9 - 6786

АЛЬПЕРТ
Владислав Анатольевич

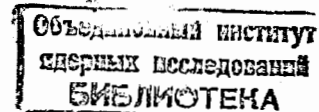
A-576

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Специальность 05.260 - приборы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Прогресс ускорительной техники за последние десять лет привел к созданию машин, сообщаемых элементарным частицам энергии в десятки и сотни Гэв. Однако современная наука требует гораздо большего ассортимента бомбардирующих частиц, ускоренных до высоких энергий.

Ускоренные тяжелые ионы нужны для изучения структуры ядра, механизма ядерных реакций и ряда других задач. Так, эксперименты с ионами урана, ускоренными до энергии 8 - 10 Мэв/нуклон, могли бы внести ясность в решение проблемы синтеза далеких трансурановых элементов с атомным номером 114 или 126, ядра которых по теоретическим предсказаниям могут обладать высокой стабильностью. Экспериментальная биология также испытывает острую необходимость в интенсивных пучках энергичных тяжелых ионов, обладающих высокой ионизирующей способностью, для изучения структуры и методов лечения канцерогенных опухолей.

Ускорение тяжелых многозарядных ионов /МЗИ/ может с успехом осуществляться как на установках с линейной структурой, так и на циклических ускорителях. Энергия частицы с удельным зарядом Z/A / Z - заряд иона, A - массовое число/, находящейся на орбите с магнитной жесткостью HR / H - напряженность магнитного поля на орбите с радиусом R /, пропорциональна отношению Z^2 / A . В линейных ускорителях максимальная энергия ионов пропорциональна их заряду.

Таким образом, конструирование источников ионов с высоким удельным зарядом является одним из способов решения проблемы ускорения тяжелых ионов до высоких и сверхвысоких энергий.

Настоящая диссертация посвящена исследованию источника ионов, который принципиально мог бы позволить получать ионы различных элементов /вплоть до урана/ со сколь угодно высоким зарядом /вплоть до голых ядер элементов/. Ионизация в нем осуществляется интенсивным магнитосфокусированным пучком энергичных электронов, движущихся в сверхвысоковакуумном пространстве дрейфа. Высокая кратность ионизации достигается за счет длительного времени взаимодействия ионов с электронами пучка, пространственный заряд которых образует радиальную электростатическую ловушку для ионов. Аксиальное движение ионов ограничивается положительными потенциалами, создаваемыми на конечных участках пучка.

В диссертации четыре главы. Первая глава представляет собой краткий обзор конструкций и основных параметров существующих ионных источников /1-4, 14-16/ и источников МЗИ, находящихся в стадии разработки /5, 17-20/. Глава заканчивается сравнительной характеристикой источников, основным вывод которой можно сформулировать так: из всех современных источников МЗИ плазменные дуговые источники при минимальных размерах и стоимости обладают максимальной эффективностью и в данный момент являются наиболее совершенными. Однако, поскольку плазма электрически нейтральна, время пребывания ионов в области ионизации τ не превышает 25-30 мсек /6/, что при конечной плотности электронного тока j в плазме /техническое ограничение/ налагает принципиальное ограничение на величину произведения $j \cdot \tau$, а, следовательно, на максимальную кратность ионизации, достижимую в дуговом источнике.

Время τ может быть значительно увеличено, если образование ионов происходит не в зоне плазменного разряда, а в потоке энергичных электронов, пространственный заряд которых остается нескомпенсированным в ходе всего процесса ионизации в условиях сверхвысокого вакуума благодаря импульсной инжекции атомов рабочего вещества. Электрические силы, обусловленные наличием пространственного заряда электронов в пучке, предотвращают возможность ухода ионов в радиальном направлении. Уход ионов вдоль оси потока может быть ограничен путем подачи положительных потенциалов на конечные участки пучка /7/. Именно эти предпосылки легли в основу разработки источника МЗИ нового, так называемого электроннолучевого, типа, теоретические основы и схематическая модель которого рассмотрены во второй главе диссертации.

В процессе последовательной ионизации необходимая зарядность ионов может быть достигнута, если обеспечена заданная величина произведения плотности электронного тока пучка

j /эл/см² хсек/ на время его взаимодействия с ионами τ /сек/. При определенной энергии ионизирующих электронов и заданной плотности пучка полное время взаимодействия, необходимое для достижения кратности ионизации Z , складывается из суммы времен перехода с вероятностью единица ($\tau_{i \rightarrow i+1}$) из низшего зарядового состояния i в последующее $i+1$ и т.д. до состояния с зарядностью Z . Время $\tau_{i \rightarrow i+1}$ /сек/ может быть рассчитано, если известно сечение перехода $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ /см²/, причем для него существует соотношение:

$$\sigma_{i \rightarrow i+1} \times \tau_{i \rightarrow i+1} \times j = 1. \quad /1/$$

Естественно, что для полного времени τ такое соотношение не имеет смысла, хотя τ и есть время перехода с вероятностью 1 из состояния с зарядом 0 в состояние с зарядом Z .

Для приближенного расчета необходимых величин σ можно воспользоваться, например, формулой Бете /21/. На рис. 1 показана зависимость кратности ионизации Z от величины произведения $j \cdot \tau$ для атомов урана при энергии электронов пучка 8 кэВ. Из рис. 1 видно, что кратности ионизации $Z = +38$ соответствует значение $j \cdot \tau = 10^{20}$ см⁻², т.е. при использовании даже таких высоких значений j , как 100 а/см², необходимое время взаимодействия равно ≈ 1 сек. Время пребывания иона в электростатической ловушке, образованной провисанием потенциала в сплошном электронном пучке, с одной стороны, и положительными потенциалами на конечных участках пучка, с другой, определяется скоростью нейтрализации пространственного заряда электронов ионами остаточного газа. Расчет показывает, что при давлении 10^{-10} торр время нейтрализации при энергии электронов 8 кэВ равно ≈ 1 сек. Из рис. 1 следует, что это время достаточно для получения ионов очень высоких зарядностей.

Таким образом, может быть осуществлена следующая методика получения МЗИ. В объеме сверхвысокого вакуума создается протяженный электронный пучок с начальной плотностью $j = j_0$ /рис. 3а/. Распределение потенциала вдоль оси пучка таково, что его конечные участки представляют собой "пробки" для положительных ионов. В момент времени t_0 за короткий промежуток времени Δt в электронный пучок произвольным способом /например, путем кратковременного испарения рабочего материала/ вводится порция атомов рабочего вещества /рис. 3б/. Часть атомов при движении через пучок

будет ионизирована и захвачена ловушкой. В момент времени t_1 , который может следовать непосредственно за $t_0 + \Delta t$, плотность электронного пучка увеличивается до $j = j_1$ /рис. 3а/, что приводит к уменьшению амплитуды радиальных колебаний захваченных ловушкой ионов. В течение времени $\tau = t_2 - t_1$ осуществляется ионизация атомов рабочего вещества до требуемой зарядности Z /рис. 3в/. Образующиеся в процессе ионизации медленные электроны покидают пучок в соответствии с распределением потенциала. При этом положительный пространственный заряд ионов растет, что приводит к увеличению амплитуды радиальных колебаний ионов. Количество атомов рабочего вещества и кратность ионизации выбираются такими, что амплитуды колебаний в момент времени t_2 не превышают начальных амплитуд в момент времени t_0 . В момент времени t_2 потенциал одного из оконечных участков пучка делается отрицательным /рис. 3г/; ионы уходят из пучка и используются для анализа или ускорения. Процесс повторяется многократно.

Производительность такого источника МЗИ определяется выражением:

$$N_i = 10^{13} \frac{I \cdot L}{Z \cdot \sqrt{U} \cdot \tau} \quad \text{ионов/сек,} \quad /2/$$

где: I - полный ток электронного пучка в а, L - длина области ионизации в м, eU - энергия электронов в эв, τ - длительность цикла ионизации в сек.

В соответствии с описанной методикой получения МЗИ может быть реализована модель электроннолучевого источника МЗИ, основными элементами которой являются: электронная пушка, формирующая поток электронов; фокусирующий электроны соленоид; пролетный канал /трубка дрейфа/, состоящий из некоторого числа изолированных друг от друга секций; инжектор атомов рабочего вещества; вакуумная система, обеспечивающая необходимое для работы источника разрежение.

Сущность рабочего цикла электроннолучевого источника МЗИ заключается в чередовании распределений потенциала вдоль оси пространства дрейфа, которое происходит в определенной временной последовательности и синхронизируется во времени с периодическими изменениями плотности тока в электронном пучке. Каждое распределение потенциала создается с помощью комбинации постоянного и импульсного напряжений, подаваемых на определенные участки дрейфовой трубки. Электрическая связь между секциями дрейфовой трубки осуществляется с помощью

элементов резисторного делителя, смонтированных на секциях дрейфовой трубки.

На рис. 2б приведена диаграмма распределений потенциала в различные моменты рабочего цикла источника /схема дрейфовой трубки приведена на рис. 2а/. Рассмотрим последовательность этих моментов. На вторую секцию дрейфовой трубки, состоящей из девятнадцати секций /счет секций ведется со стороны электронной пушки/, подается постоянное положительное смещение. Величины сопротивлений делителя подобраны таким образом, что вдоль оси дрейфовой трубки создается распределение потенциала, показанное штриховой линией на рис. 2б. В это время все ионы, образующиеся в пространстве ионизации, под действием постоянного градиента потенциала покидают объем дрейфовой трубки. Электронный пучок в этом случае работает как ионный насос, готовя объем дрейфовой трубки к циклу ионизации. В определенный момент времени t после подачи импульса напряжения на испаритель атомов рабочего вещества /17 секция/ на 18 секцию трубки дрейфа подается положительный импульс напряжения. Осевое распределение потенциала в пространстве дрейфа, соответствующее этому моменту времени, показано на рис. 2б тонкой сплошной линией. Теперь испаренные атомы рабочего вещества оказываются после ионизации захваченными в электростатическую ловушку, образованную пространственным зарядом электронов пучка и потенциалами на оконечных секциях пространства дрейфа. Время инжекции определяется временным интервалом между передними фронтами импульсов, подаваемых последовательно на 18 и 15 секции трубки дрейфа. Распределение потенциала, устанавливающееся после подачи основного запирающего импульса на 15 секцию трубки дрейфа, показано жирной сплошной линией на рис. 2б. С момента подачи этого импульса эмитируемые испарителем атомы рабочего вещества после ионизации покидают под действием градиента потенциала в области конечных секций дрейфовой трубки полость последней. Длительность основного запирающего импульса равна времени ионизации. По окончании действия основного запирающего импульса в пространстве дрейфа устанавливается исходное распределение потенциала, и ионы рабочего вещества выводятся из источника. Для повышения эффективности источника инжекция ионов рабочего вещества осуществляется в пучок электронов низкой плотности. Последний образуется постоянной составляющей электронного тока, текущего через пространство дрейфа в момент инжекции. По окончании цикла инжекции плотность электронного тока в пространстве дрейфа резко возрастает. Амплитуда радиальных колебаний ионов в электронном пучке нарастающей плотности уменьшается, что позволяет значительно увеличить длительность цикла ионизации.

Во второй главе диссертации рассмотрены также вопросы, касающиеся механизма колебаний ионов в электронном пучке с изменяющейся во времени плотностью, процесса накопления ионов в пучке и нейтрализации пространственного заряда электронов, продольного и радиального распределений потенциалов в магнитосфокусированном электронном пучке цилиндрической формы. Глава заканчивается формулировкой требований к элементам конструкции электроннолучевого источника МЗИ. Поскольку все указанные требования представляют собой проблемы, решение которых требует освоения специальных разделов технологии современного эксперимента, в третьей главе диссертации кратко рассмотрены вопросы получения сверхнизких давлений, высокопереванских электронных потоков и ионных пучков высокого качества.

Для проверки рассмотренного метода ионизации была изготовлена экспериментальная установка ИЭЛ-I /ионизатор электроннолучевой/. Изготовленная позднее модель электроннолучевого источника ИЭЛ-II, которая проектировалась для работы на ускорителе МЗИ /например, циклотроне/, отличается от ИЭЛ-I не только размерами, но и рядом принципиальных конструктивных особенностей. Описанию конструкций установок ИЭЛ-I и ИЭЛ-II /с. 12/ и экспериментальных результатов, полученных с их помощью /9-13/, посвящена четвертая глава диссертации.

Эксперименты с ионным током, выполненные на установке ИЭЛ-I /дрейфовая трубка длиной 14 см состоит из 5 секций/ в режиме непрерывной инжекции атомов остаточного газа, заключались в измерении его величины в зависимости от распределения потенциалов на секциях дрейфовой трубки и давления остаточного газа при различных характеристиках электронного пучка. На рис. 4 показаны типичные осциллограммы импульсов ионного тока, полученные при соответствующих распределениях потенциалов на секциях дрейфовой трубки для следующих параметров: $P = 10^{-7}$ торр, $U = 2$ кв, $I = 70$ ма. Форма импульсов ионного тока, в основном, повторяет форму электронного импульса /рис. 4а, б, в, г/. Некоторые отклонения от подобия вызваны изменением давления при бомбардировке электронами коллектора. Рис. 4а, в, г показывают возможности ограничения движения ионов, а рис. 4б - возможность управления ионным током, генерируемым в объеме электронного пучка. Осциллограммы рис. 4д получены в случае, когда запирающий импульс с регулируемой длительностью подавался на четвертую секцию дрейфовой трубки; импульс был несколько задержан относительно начала электронного импульса и заканчивался раньше него. Из осциллограмм рис. 4а-г, полученных в статическом режиме, видно, что ионный ток в момент действия запирающего импульса уменьшается не до нуля, по-

скольку ионы, возникающие в области последней секции дрейфовой трубки и электронного коллектора, продолжают приходить на коллектор ионов. Ионы, образующиеся во 2 и 3 секциях дрейфовой трубки, аккумулируются в области электронного пучка, и затем синхронно с задним фронтом запирающего импульса весь ионный заряд, накопленный во время ионизации, вылетает на коллектор, заряжая его емкость. Этот всплеск в тексте называется "импульсом ионного заряда". Описываемый быстрый процесс завершается разрядкой емкости ионного коллектора через сопротивление утечки, после чего ионный ток восстанавливается до первоначальной величины. Осциллограммы рис. 4д показывают изменение картины при увеличении длительности запирающего импульса. Видно, что вначале амплитуда импульса ионного заряда растет, достигает насыщения и, наконец, резко падает в случае, когда запирающий импульс заканчивается после импульса электронного тока. На рис. 5 представлена зависимость амплитуды импульса ионного заряда от длительности запирающего импульса.

Измерения показывают, что максимальная амплитуда импульса ионного заряда по абсолютной величине примерно равна напряжению, которое мог бы создать на емкости ионного коллектора пространственный заряд электронов в части пучка, ограниченной по длине 2 и 3 секциями трубки дрейфа. Это означает, что насыщение на кривой рис. 5 наступает в состоянии, близком к полной компенсации пространственного заряда электронов зарядом аккумулированных в этой области ионов. Эффективность ионной ловушки можно определить, сравнивая ионный заряд, вычисленный по соотношению $Q_1 = CxU$, где C - емкость ионного коллектора, U - амплитуда импульса ионного заряда, с величиной $Q = \Delta i x \tau$, где Δi - дефицит ионного тока во время τ действия запирающего импульса. На рис. 6 показано изменение отношения $Q_1/Q_2 = UxC/\Delta i x \tau$ в зависимости от величины τ . В некотором интервале времени эта величина больше единицы, что убедительно свидетельствует как о высокой эффективности ловушки, так и об образовании МЗИ в процессе ионизации.

Анализ деталей рис. 5 и 6 показывает, что рассмотренный во второй главе процесс накопления ионов качественно подтверждается. Из рис. 5 следует, что накопление ионного заряда в области электронного пучка при малых τ происходит быстрее, чем линейно, затем, при увеличении τ , - линейно, после чего происходит постепенный переход к насыщению. Такая картина

соответствует тому, что вначале все ионы, образующиеся при столкновении атомов остаточного газа с быстрыми электронами, накапливаются в пучке, причем происходит их последовательная ионизация. Затем с ростом амплитуды колебаний ионов начинается их утечка, и, наконец, наступает насыщение - состояние равновесия, когда число образующихся ионов становится равным числу ионов, покидающих ловушку. Из рис. 6 видно, что отношение Q_1/Q_2 , которое можно рассматривать как среднюю зарядность ионов, достигает значительной величины /в частности, 3/ уже при малых значениях τ . Если принять во внимание, что ток Δi образован, в основном, однозарядными ионами двухатомных молекул, то цифра 3 означает, что, в среднем, ионный заряд состоит из атомарных ионов с зарядом +1,5, который достигается за малые времена τ . Столь малое время достижения предельной зарядности по сравнению с временем насыщения при данном вакууме можно объяснить тем, что внутри электронного пучка потенциал пространственного заряда нарастает пропорционально r^2 , в то время как вне его - пропорционально $\ln r$. В нашем случае это означает, что достаточно 15-20-процентной компенсации пространственного заряда, чтобы началась утечка ионов на стенки дрейфовой трубки.

С использованием времяпролетного масс-спектрометра было показано, что вид спектра зарядностей существенно зависит от времени запираания ионов в электронном пучке. При увеличении τ в спектре наблюдаются ионы углерода, кислорода и азота все более высоких зарядностей. Это является однозначным свидетельством того, что МЗИ появляются в результате последовательной ионизации, а не в однократном соударении, как это имеет место в работе [22]. Изучение зависимости эффективности ионизации от давления показало, что при фиксированном времени запираания для получения ионов данной максимальной зарядности требуется тем большая плотность электронного тока пучка, чем выше давление остаточного газа в области ионизации. При давлении 2×10^{-8} торр и $j \cdot \tau = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2} / E_e = 2,3 \text{ кэВ}$ уверенно наблюдались ионы C^{+5} , N^{+6} и O^{+7} .

Результаты экспериментов по ионизации атомов золота несут лишь предварительный характер, поскольку они были получены, в основном, при отработке методики инжекции золота в электронный пучок ИЭЛ. В первых экспериментах наблюдались ионы Au с зарядом +6. По мере улучшения вакуумных условий в пространстве ионизации максимальная кратность ионизации возрастала. Ионы Au^{+19} были получены в условиях, когда в спектре остаточного газа наблюдались ионы C , N , O с максимальным зарядом +4.

В ходе экспериментов на установке ИЭЛ-II через дрейфовую трубку длиной 1 м был проведен пучок электронов с током 1,3 а, что позволило получить на выходе источника до 3×10^{11} элементарных положительных зарядов в импульсе. На атомах остаточного газа показана возможность реализации рабочего цикла электроннолучевого источника МЗИ с импульсной инжекцией ионов рабочего вещества /см. рис. 3/. Импульсная инжекция ионов Au не была реализована из-за наличия значительных неоднородностей в магнитном поле соленоида ИЭЛ-II.

Основные результаты диссертации:

1. Экспериментально подтверждена возможность получения МЗИ в процессе последовательной ионизации атомов /ионов/ рабочего вещества в электроннолучевом источнике МЗИ. В ходе экспериментов получены ионы C^{+5} , N^{+6} , O^{+7} и ионы золота с максимальной зарядностью +19. Предельная зарядность генерируемых электроннолучевым источником ионов определяется величиной произведения $j \cdot \tau$. Экспериментально получено значение $j \cdot \tau = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

2. Рассмотрены некоторые теоретические вопросы, лежащие в основе работы электроннолучевого источника МЗИ.

3. Сформулированы основные научно-обоснованные требования к элементам конструкции электроннолучевого источника МЗИ.

4. Исследованы основные характеристики модели электроннолучевого источника МЗИ. Экспериментально показано, что

такой источник способен генерировать каждую секунду $\frac{10^{13} \times l \times L}{L \times \tau \times \sqrt{U}}$

ионов высокой зарядности. При наличии отработанной схемы инжекции атомов рабочего вещества электроннолучевой источник МЗИ позволяет получить узкий спектр зарядностей ионов рабочего вещества, что значительно повышает эффективность его использования на ускорителе МЗИ.

5. Показано, что метод герметизации дрейфовой трубки, использованный в ИЭЛ-II, прост и надежен. Источник с герметичной трубкой дрейфа может работать при относительно высоких давлениях снаружи области ионизации.

6. Предложены меры по совершенствованию конструкции и рабочих характеристик модели электроннолучевого источника МЗИ.

В диссертации 85 страниц текста, 31 рисунок. Список цитированной литературы содержит 101 название.

Содержание диссертации изложено в работах [8-10] и докладах [11-13]. Конструкция электроннолучевого источника МЗИ является предметом заявки на предполагаемое изобретение, на

которую получено положительное решение о выдаче авторского свидетельства, принятое Комитетом по делам открытий и изобретений при Совете Министров СССР 17 января 1972 г.

Литература

1. П.М.Морозов и др. АЭ, 2, 273, 1957.
2. А.С.Пасюк. ОИЯИ, Автореферат диссертации, Дубна, 1969.
3. А.А.Плюпто и др. АЭ, 1, №2, 50, 1956.
4. Л.И.Болотин и др. ПТЭ, №6, 88, 1961.
5. А.А.Быковский и др. ЖЭТФ, 60, в. 4, 1306, 1971.
6. Д.И.Пигаров, П.М.Морозов. ЖЭТФ, 31, в.4, 467, 1961.
7. Е.Д.Донец. Авторское свидетельство №248860, Бюлл. "Открытия, изобретения", №24, 1969.
8. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4124, Дубна, 1968.
9. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4469, Дубна, 1969.
10. В.И.Илющенко, Е.Д.Донец, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4688, Дубна, 1969.
11. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Тезисы докладов IУ Всесоюзной конференции по физике электронных и атомных столкновений, 52, 15-20 сент. 1969 г., Рига, Изд-во "Зинатне", 1969.
12. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт, Е.Д.Воробьев, А.И.Пикин. Сборник материалов международной конференции по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971.
13. E.D.Donets, V.I.Ilushchenko, V.A.Alpert. Premier Conf. Int. sur les sources d'ions, I.N.S.T.N.,
14. M. von Ardenne. Technik, 11, 65 1956.
15. J. Illgen. Premier Conf. sur les Sources d'ions, Saclay, France, 1969, 563.
16. G.E.Anderson, K.W.Ehlers. Rev.Sci.Instr., 27, 809, 1956.
17. J.S.Janes et al. Phys.Rev. 145, 925 1966.
18. H.Postma. Phys.Lett., 31A, No.4, 196, 1970.
19. F.H.Stix. Phys.Rev.Lett., 32, No.19, 1093, 1969.
20. B.C.Fawcetts et al. Proc.Roy.Soc., 88, 1051, 1966.
21. H.Bethe. Ann.Phys., 5, 325, 1930.
22. B.L.Schram et al. Physica, 32, 85, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 октября 1972 года.

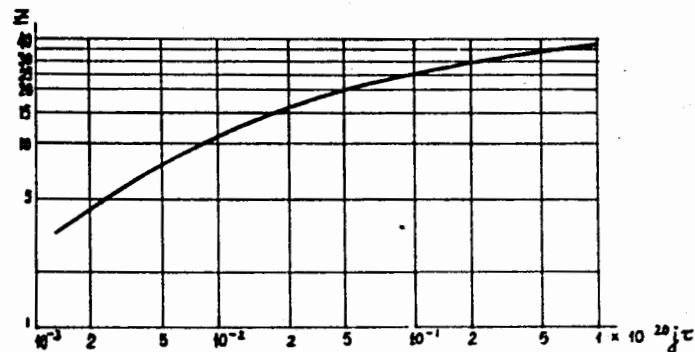


Рис. 1. Зависимость кратности ионизации Z от величины произведения плотности электронного пучка j на время взаимодействия τ .

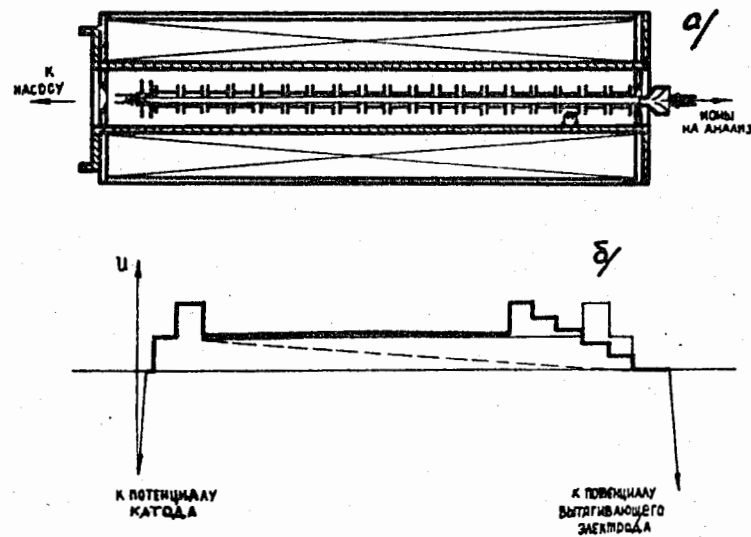


Рис. 2. Диаграмма распределений потенциала вдоль оси дрейфовой трубки в различные моменты рабочего цикла электроннолучевого источника многозарядных ионов.

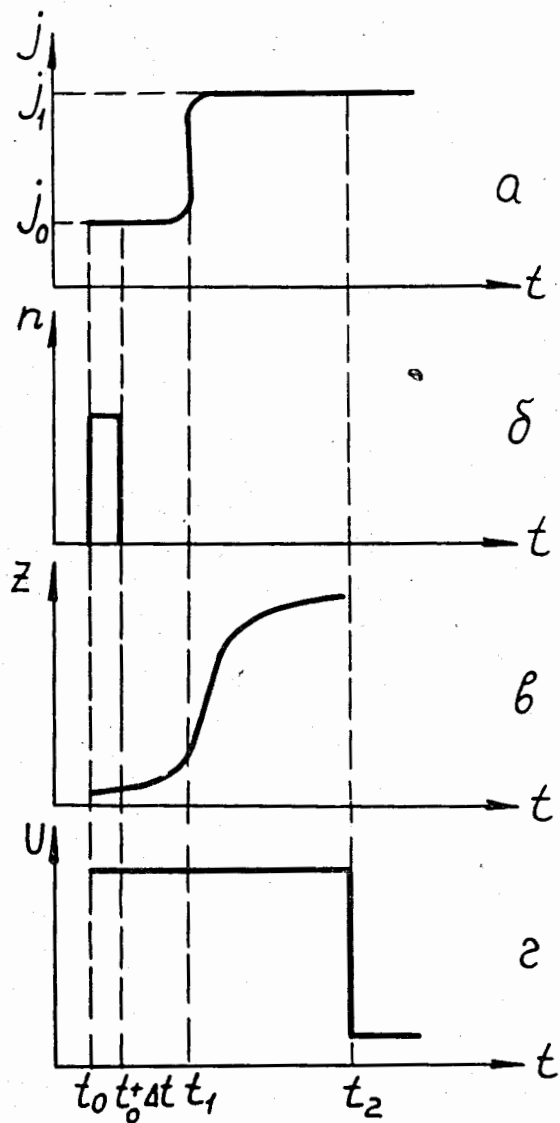


Рис. 3. Временная диаграмма основных процессов, приводящих к многократной ионизации: а/ изменение плотности электронного пучка во времени, б/ ввод однозарядных ионов рабочего вещества, в/ изменение кратности ионизации во времени, г/ изменение напряжения на оконечном участке трубки дрейфа.

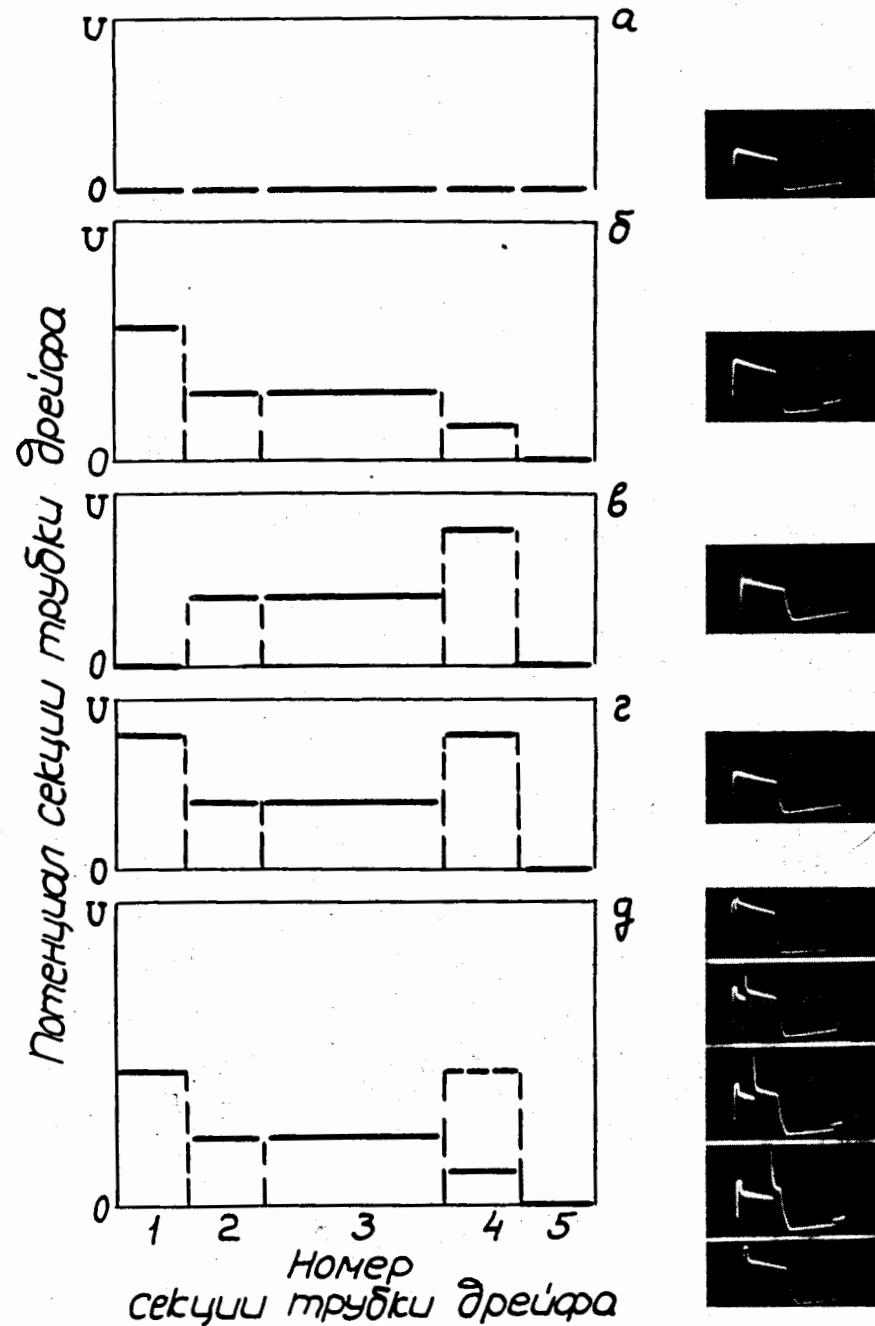


Рис. 4. Осциллограммы импульсов ионного тока и ионного заряда, полученные при соответствующих распределениях потенциалов на секциях трубки дрейфа.

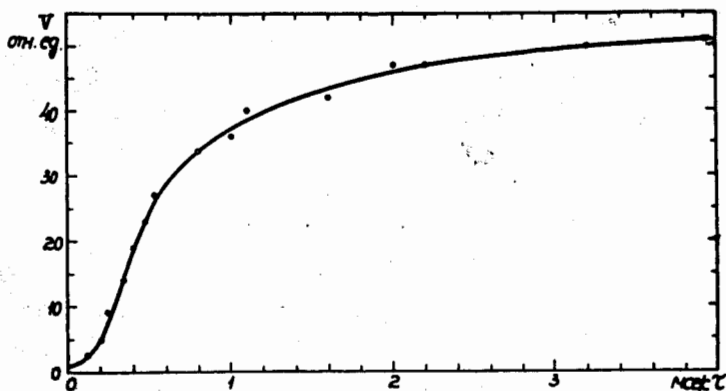


Рис. 5. Зависимость амплитуды импульса ионного заряда от длительности запирающего импульса.

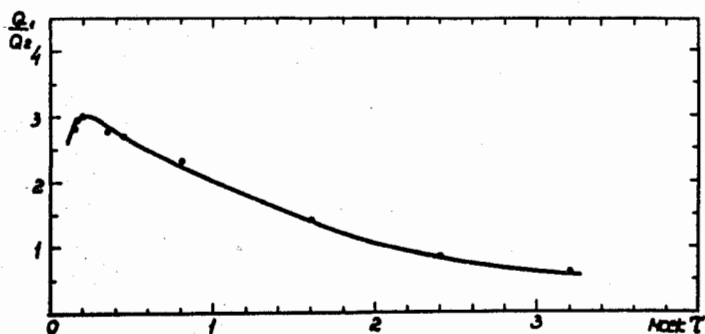


Рис. 6. Зависимость отношения $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U \cdot C}{\Delta i \cdot r}$ от времени запи-
рания t .