

УДК 533.9.08

К МЕХАНИЗМУ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

О.С. Белозеров, С.А. Данько, С.А. Хромов

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Несмотря на длительное время, прошедшее с выхода первых работ по ускорению ионов электронным пучком, инжектируемым в вакуумную камеру, до сих пор нет однозначной теоретической модели этого явления. Это объясняется наличием разнообразных физических процессов и неустойчивостей, возникающих в области пучок—плазма—вакуум и приводящих к различным интерпретациям экспериментов по ускорению ионов. В данной статье приведены результаты экспериментов на генераторе «Катран» ($I \approx 100\text{—}150$ кА, $U \approx 250$ кВ, $t \approx 80$ нс), где анодом служит тонкая фольга, в которых было выявлено, что два разных механизма ускорения ионов ассоциируются с двумя разными областями. В высоковольтном диоде ускорение от катода к аноду инициируется скачками тока проводимости, а другое — за анодной фольгой в сторону виртуального катода. Опираясь на известные теории, объясняющие некоторые особенности ускорения ионов в условиях, близких к нашим экспериментам, и на проведённые в этих экспериментах измерения, были определены наиболее вероятные физические процессы, приводящие к ускорению ионов.

Ключевые слова: релятивистский электронный пучок, генерация ионов, механизмы ускорения ионов.

ON THE MECHANISM OF ION ACCELERATION BY A RELATIVISTIC ELECTRON BEAM

O.S. Belozеров, S.A. Dan'ko, S.A. Chromov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Despite the long time passed since the publication of the first studies on ion acceleration by an electron beam injected into a vacuum chamber, there is still no unambiguous theoretical model of this phenomenon. This is explained by the presence of various physical processes and instabilities that arise in the beam-plasma-vacuum region and lead to different interpretations of ion acceleration experiments. This paper presents the results of experiments on the «Katran» generator ($I \approx 100\text{—}150$ kA, $U \approx 250$ kV, $t \approx 80$ ns), where a thin foil serves as an anode. It was revealed that there are two different mechanisms of ion acceleration associated with two regions of the high-voltage diode. One acceleration process occurs in the high-voltage diode from the cathode to the anode, and another - behind the anode foil towards the virtual cathode. Based on the well-known theories explaining some features of the acceleration of ions under conditions close to our experiments, and on the measurements carried out in these experiments, the most probable physical processes leading to the acceleration of ions were determined.

Key words: relativistic electron beam, ion generation, mechanisms of ion acceleration.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-136-144

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1967 г., появляются работы [1, 2] по ускорению ионов электронным пучком, результаты которых неоднократно воспроизводились и подтверждались в различных лабораториях. Тем не менее, несмотря на длительное время, прошедшее с выхода первых работ, до сих пор нет однозначной теоретической модели ускорения ионов в электронном пучке, инжектируемом в вакуумную камеру. Это объясняется наличием разнообразных физических процессов и неустойчивостей, возникающих в области пучок—плазма—вакуум и приводящих к различным интерпретациям экспериментов по ускорению ионов.

Перечислим те известные модели ускорения ионов, которые соответствуют условиям проведения экспериментов на генераторе «Катран»: $I \approx 100\text{—}150$ кА, $U \approx 250$ кВ, $t \approx 80$ нс, давление остаточного воздуха в высоковольтном диоде и вне его менее 10^{-4} торр. Разобьём их на две группы. В первой ускорение происходит в заанодной области, отделённой от анода прозрачной для электронов фольгой, во второй — в катод-анодном промежутке.

В пространстве вне катод-анодного зазора наблюдается коллективное ускорение ионов релятивистским электронным пучком (РЭП), создающим в вакууме виртуальный катод. Для описания этого явления был предложен ряд физических моделей [3—7].

Согласно модели, предложенной в [3], распространение электронного пучка в вакууме за анодной фольгой выглядит следующим образом. При проходе электронами прозрачного для них анода образуется виртуальный катод, от которого электроны, в основном, отражаются обратно в анодную плазму. От-

рицательная потенциальная яма, связанная с виртуальным катодом, имеет некоторую среднюю глубину порядка напряжения в диоде генератора и колеблется в пространстве и времени с частотой, сравнимой с частотой модуляции плотности электронного «газа». Положительные ионы из плазмы ускоряются этой потенциальной ямой до средней кинетической энергии, приблизительно равной энергии электронов, умноженной на заряд иона. В процессе этого ускорения устанавливается волна ионов, которая, нейтрализуя заряд электронов пучка, перемещает виртуальный катод на некоторое расстояние вперёд. Движение виртуального катода от плоскости инжекции вдоль направления ускорения придаёт ускоряемым ионам существенную долю кинетической энергии. Затем виртуальный катод возвращается в начальное положение около плоскости инжекции, даже когда фронт ионного пучка распространяется дальше по потоку.

Модель, предложенная в [4, 5], называется газодинамической. По этой модели при инжекции электронов в зафольговое пространство РЭП с током, превышающим альфвеновский, формируется виртуальный катод и начинается осцилляция электронов в области катод—виртуальный катод. Поток ионов, ускоряющихся в сторону виртуального катода, приводит к расширению плазменного облака, в котором осциллируют электроны. Процесс ускорения выражается в терминах электронного газа, который при расширении отдаёт свою энергию ионам. Максимальная энергия ионов растёт, ограничиваясь в релятивистском случае значением $5E_e Z_i$, где E_e — энергия электронов; Z_i — заряд ионов.

По сценарию модели нестационарной глубокой потенциальной ямы с малым временем жизни, предложенной в [6, с. 190], после бомбардировки анодной фольги при достижении зарядовой нейтрализации пучок электронов начинает стягиваться собственным магнитным полем к оси и формирует виртуальный катод. Ввиду отражения от него части тока к аноду происходят уменьшение полного тока в области анод—виртуальный катод, генерация вихревой э.д.с. и ускорение электронов до больших энергий, за которыми тянутся ионы.

В катод-анодном зазоре ускорение ионных сгустков может быть описано моделью Баренгольца и др. [8, 9] или моделью Патнема о перетяжке [10].

Модель, предложенная в [8, 9], является продолжением работ [2] по исследованию ускорения ионов в вакуумном разряде. Согласно этой теории катодное пятно состоит из отдельных ячеек — взрывоэмиссионных центров, испускающих порцию электронов, названную эктонами. Функционирование эктона сопровождается разрушением участка поверхности катода, образованием на его месте кратера, появлением струй и капель жидкого металла, потоков ионов и электронов. Длительность эктонного процесса — это единицы—десятки наносекунд. Эктонный механизм генерации катодной плазмы в искровой стадии вакуумного разряда приводит к колебаниям тока и росту потенциала на границе плазменного слоя катодного факела до значений, сравнимых с приложенным напряжением. В связи с этим возникают условия для образования глубокой потенциальной ямы во взрывоэмиссионном диоде и появления высокоэнергичных ионов, движущихся за катодным факелом — от катода к аноду. Процесс образования и разрушения глубокой ямы может повторяться, приводя к многократным всплескам тока и импульсным потокам ускоренных ионов. В разных фазах разрушения ямы ионы движутся как в сторону анода, так и к катоду. Такая ситуация очень близка к полному разрыву плазмы и возникновению больших падений потенциала на коротких расстояниях [11]. Особенность рассматриваемого процесса состоит в том, что разрыв плазмы означает «вырывание» электронов из граничной области факела и образование на короткое время заряженной плазмы — плотного ионного сгустка на его границе. Высокий потенциал в приграничной к фронту области обеспечивает ток электронов, значительно превышающий ленгмюровский предел промежутка фронт факел—анод.

Модель [10] связана с движением локальной перетяжки электронного пучка вдоль оси. Она заключается в том, что из-за неравномерного заполнения межэлектродного зазора плазмой вместе с малой концентрацией ионов образуется перетяжка — область сжатия электронов. Из-за этого в данной области возрастает плотность электронов и возникает продольное электростатическое поле, которое ускоряет ионные сгустки в направлении движения электронов. В результате изменения индуктивности при сжатии пучка появляется дополнительное продольное индукционное поле. Это поле действует на электроны в продольном направлении, что приводит к перемещению перетяжки по направлению движения электронного пучка и дальнейшему ускорению ионов.

Обе модели сходятся в том, что ускорение ионов в высоковольтном диоде происходит в режиме коротких импульсов в моменты возникновения перетяжки или разрыва тока проводимости, приводящих к появлению вихревого электрического поля, значение которого может многократно превышать поле, развиваемое генератором.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках исследований по ускорению ионов были проведены эксперименты на сильноточном генераторе «Катран». На рис. 1 показана схема диодного узла эксперимента.

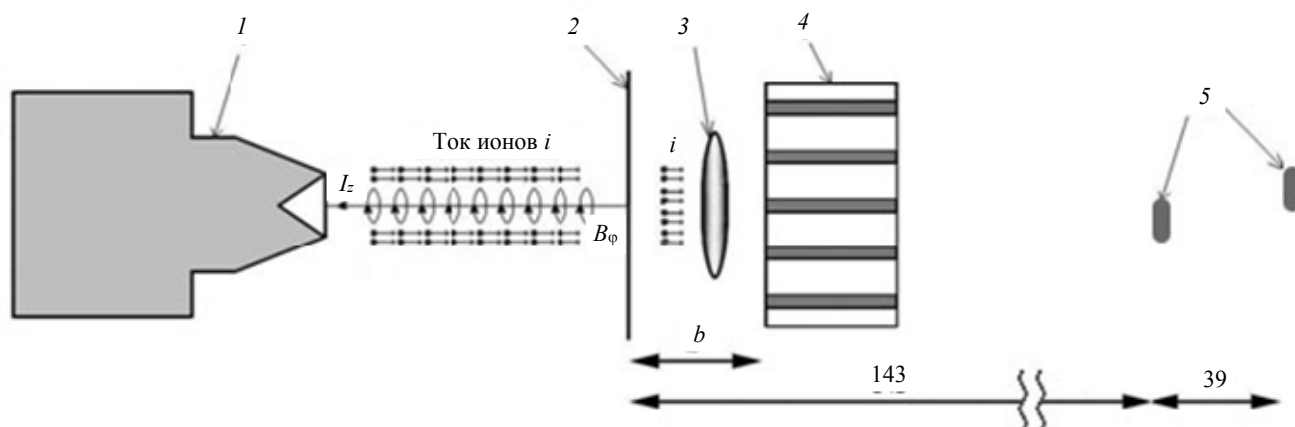


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод; 2 — анодная фольга; 3 — виртуальный катод; 4 — коллиматор; 5 — ВРД; числа над размерными линиями указывают расстояние в см

Электронный пучок генерировался в вакуумном высоковольтном диоде с электронной автоэмиссией 1—2, в котором анодом 2 обычно служила прозрачная для релятивистских электронов алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Латунный катод имел форму усеченного конуса с углублением и диаметром среза, равным 3 мм, межэлектродный зазор составлял $\sim 7,5$ мм. На удалении b от анодной фольги размещался латунный коллиматор 4 длиной 8—16 мм. Цилиндрические отверстия диаметром 2,2 мм в коллиматоре располагались на удалении 3 мм друг от друга по обеим прямоугольным координатам. Размеры коллиматора выбраны таким образом, чтобы помешать распространению электронного пучка за фольгу и тем самым либо устранить образование виртуального катода за фольгой, либо ограничить дистанцию, на которой виртуальный катод мог ускорять ионы. Поскольку ранее проведенные эксперименты [12—14] показали, что угловая расходимость ионного пучка составляет $\sim 2^\circ$, то коллиматор данной геометрии позволяет пропускать узконаправленные ускоренные ионы к детекторам, которыми служили вакуумные рентгеновские диоды (ВРД) 5. Энергия отдельных сгустков ионов за коллиматором определялась время-пролётной диагностикой по измерению скорости их движения на известной базе.

Ещё одна пара ВРД использовалась для измерения температуры плотной плазмы, полученной при нагреве анодной фольги сфокусированным электронным пучком, по интенсивности вакуумного ультрафиолетового излучения [15, 16]. Предполагая температуру всей поверхности излучателя постоянной, её можно вычислить по отношению сигналов двух датчиков: без фильтра и с фильтром, ток которых описывается формулой

$$I(T) = Ge \iint F(\lambda, T) \chi(\lambda) \exp(-\Pi(\lambda)d) d\lambda,$$

где $F(\lambda, T)$ — спектр фотонов чернотельного излучения; e — заряд электрона; $G = \frac{S_{\text{ист}} S_{\text{дат}}}{2\pi l^2}$ — геометрический фактор; $S_{\text{ист}}$ — площадь излучающей поверхности; $S_{\text{дат}}$ — площадь датчика; l — расстояние от излучателя до датчика; χ — квантовый выход фотокатода; d — толщина фильтра. В качестве фильтров использовались тонкие 100 нм плёнки из нитроцеллюлозы ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_9$), получающиеся при высыхании растекшейся на поверхности воды капли цапонлака. Поглощение излучения соответствует экспоненте с показателем

$$\Pi(\lambda) = \sum_i n_i \mu_i(\lambda),$$

в котором множители n_i учитывают погонную плотность атомов различных элементов в веществе фильтра, μ_i — коэффициент поглощения. На генераторе «Катран» измеренная температура плазмы составляла 2—3 эВ, что в рамках ударно-излучательной модели позволяло узнать заряд ускоряемых тяжёлых ионов, отличных от протонов. Расчёты проводились с помощью кода FLYCHK [17].

Подробное описание всех используемых в экспериментах диагностик приведено в работах [12—14].

В наших предыдущих экспериментах были установлены следующие основные свойства коллективного ускорения ионов под воздействием РЭП [12]:

— максимальная энергия, переносимая ионами за один пуск генератора, составляет 0,1—0,35 Дж; измерялась тепловизором;

— количество последовательно ускоренных сгустков ионов за один пуск доходит до десятка, и это при отрезании низкоэнергичных ионов от детекторов времяпролётной диагностики фильтрами. Угловая расходимость ионного пучка составляет $\sim 2^\circ$;

— максимальная скорость сгустков ионов достигает ~ 3 см/нс (протоны с энергией 522 кэВ движутся со скоростью 1 см/нс);

— в случаях, когда оказывалось возможным определить сорт ионов по их проникающей способности сквозь фильтр, была установлена энергия таких ионов. Максимальная энергия протонов составляла 6 МэВ, ионов алюминия 27 МэВ;

— заряд ионов алюминия составлял 2—3, что было определено по измеренной температуре фольги в момент набора скорости;

— установлено с помощью времяпролётной методики с фильтрами, что в экспериментах создавались условия для ускорения всех сортов атомов, присутствовавших в анодной нагрузке;

— количество ионов в отдельных сгустках составляло $N_i \approx 5 \cdot 10^{10}$. Оно измерялось по выходу ион-электронной эмиссии с металлической поверхности катода ВРД;

— полное количество ускоренных ионов за один пуск генератора доходило до $N_i \approx 5 \cdot 10^{11}$. Оно вычислялось по полной энергии ускоренных ионов (тепловизионная диагностика) и их средней скорости;

— генерация наиболее энергичных ионов, проходящих сквозь толстые фильтры, сопровождается локальным увеличением плотности РЭП на анодной фольге, что было установлено с помощью времяразрешающей щелевой развёртки;

— ионы набирали свою конечную скорость за время, не превосходящее несколько нс, пока существует локальная повышенная плотность тока РЭП на анодной фольге.

Проведённые эксперименты в рамках данной работы можно разделить на две части. В первой коллиматор располагался вплотную к аноду ($b = 0$), тем самым не давая образовываться виртуальному катоду в заанодном пространстве, и ускорение ионов было возможно только в зазоре высоковольтного диода. Во второй части исследовалось влияние удаления коллиматора от анодной фольги на энергию ионов за счёт ускорения вне катод-анодного зазора. Характерные осциллограммы (осциллографы TDS 3054, LeCroy-2ГГц) времяпролётных измерений показаны на рис. 2.

15 пусков, проведённых без зазора b , имели в качестве анода различные алюминиевые фольги толщиной 10 и 5—7 мкм. Во всех пусках уверенно наблюдались ускоренные ионы. Медианные значения E_{median} зарегистрированной датчиками энергии

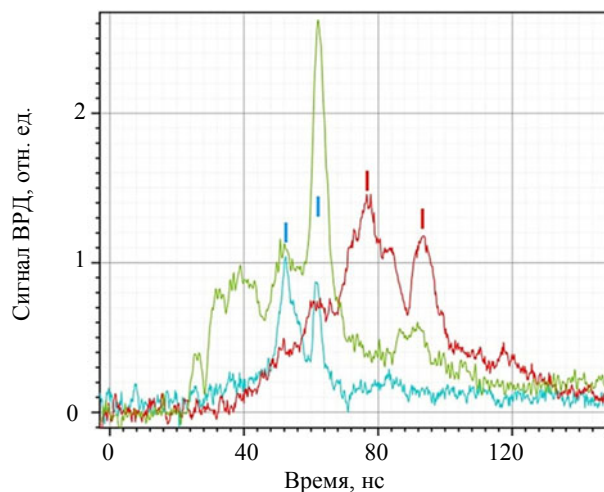


Рис. 2. Сигналы датчиков (вакуумных рентгеновских диодов) времяпролётных измерений, удалённых на 142 см (— и —) и на 181 см (—). Перед датчиком, сигнал которого имеет зелёный цвет, стоит фильтр из нитроцеллюлозы толщиной 0,1 мкм. Перед двумя другими стоит лавсановый фильтр толщиной 3 мкм. Самые энергичные ионные сгустки на ближних датчиках отмечены голубыми штрихами, на дальнем — красными

ионов в серии шести последовательных пусков с фольгой толщиной 10 мкм и серии из девяти пусков с фольгой меньшей толщины составляют 200 и 470 кэВ/нуклон соответственно. Средние значения энергии равны соответственно 460 и 970 кэВ/нуклон. Обе представленные характеристики для пусков с фольгой толщиной менее 10 мкм существенно больше, что свидетельствует о том, что ускорение происходит исключительно в зазоре высоковольтного диода, а в фольге происходит торможение ионов. В этих двух сериях медианные значения пересчитанной энергии ускоренных ионов, ещё не прошедших сквозь анодную фольгу, составляют 860 и 850 кэВ/нуклон [18] соответственно. Эти значения практически одинаковые, т.е. параметры пусков были достаточно стабильными, и сравнение двух серий было корректным.

Измеренная энергия ионов после прохождения анодной фольги указывает на то, что в пусках наблюдались ускоренные протоны. Это наблюдалось в экспериментах, когда перед одной из пар вакуумных рентгеновских диодов устанавливались лавсановые фильтры толщиной 2 мкм, которые имеют следующие нижние границы энергии для пропускания разных атомов: $E_H = 180$ кэВ, $E_{Al} = 1,2$ МэВ, а перед другой парой лавсановых фильтров толщиной 5 мкм с границей энергии: $E_H = 400$ кэВ, $E_{Al} = 5,3$ МэВ. При измеренных скоростях алюминиевый ионный сгусток должен проходить через оба фильтра и фиксироваться всеми датчиками, однако в части пусков сигналы фиксировались только на датчиках с тонким фильтром, что возможно только для протонов с энергиями от 180 до 400 кэВ, обладающих меньшей проникающей способностью. Водород в эксперименте появляется из адсорбированного стенками воздуха или молекулярных слоёв масла, которое покрывает поверхность всей вакуумной камеры за время откачки паромасляным насосом. По указанным причинам набор ускоряемых ионов может состоять из следующих химических элементов: H, C, N, O, Al, Si, Cu, Zn. Пробеги в лавсане более тяжёлых, чем протоны, атомов близки к пробегу алюминия. Следует отметить, что сигналы вакуумных рентгеновских диодов, служащих датчиками времяпролётной диагностики, имели значения, более чем на порядок меньшие по сравнению с сигналами в экспериментах без коллиматора. Этот факт просто объясняется, вдобавок к прозрачности коллиматора, большим угловым разбросом скоростей ионов после взаимодействия с веществом анодной фольги, который не позволяет ионам пройти сквозь узкие отверстия коллиматора.

Рентгеновские изображения, получаемые с помощью камеры-обскуры и щелевой развёртки, позволяют оценить размер пинча. Камера-обскура даёт усреднённую по времени площадь анодной фольги, на которую воздействует электронный пучок. Щелевая развёртка позволяет наблюдать за поперечным размером пинча с временным разрешением ≈ 5 нс, определяемым сцинтиллятором, и пространственным разрешением $\approx 0,2$ мм [14].

На рис. 3 показаны сориентированные друг относительно друга изображения, полученные камерой-обскурой и щелевой развёрткой в характерном пуске без коллиматора.

На рисунке видно, что фокусировка электронного пучка происходила приблизительно в одном месте в двух временных интервалах, соответствующих двум полупериодам генерации РЭП. Ширина фокусного пятна на полувысоте освещённости, полученная по интегральному по времени изображению с камеры-обскуры, составляет $d \approx 11$ мм. Поперечный размер первого фокусного пятна, представленный на изображении развёртки, составляет $d_1 \approx 4,5$ мм, второго — $d_2 \approx 7,5$ мм.

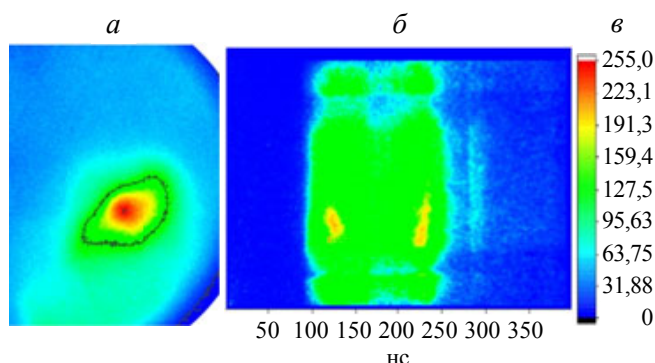


Рис. 3. Линейная щелевая развёртка (б); рентгеновское изображение, полученное камерой-обскурой, которое масштабировано и сориентировано вдоль щелевой развёртки (а); цветовая шкала освещённости на обоих изображениях (в)

При отодвигании коллиматора от анодной фольги ускорение ионов продолжается: энергия сгустков ионов монотонно возрастает. На рис. 4 показаны зависимость средней энергии E_{mean} и медианного значения E_{median} энергии ускоренных ионов от удаления коллиматора от анодной фольги.

Как видно на графике, при удалении коллиматора на 30 мм энергия полученных протонов достигала $E_p = 1,5\text{—}3,5$ МэВ, что соответствует энергиям, полученным в экспериментах без использования коллиматора [12]. Исходя из перечисленного, видно, что вне высоковольтного диода за анодной фольгой к ускорению ионов подключается один из механизмов, упомянутых во введении.

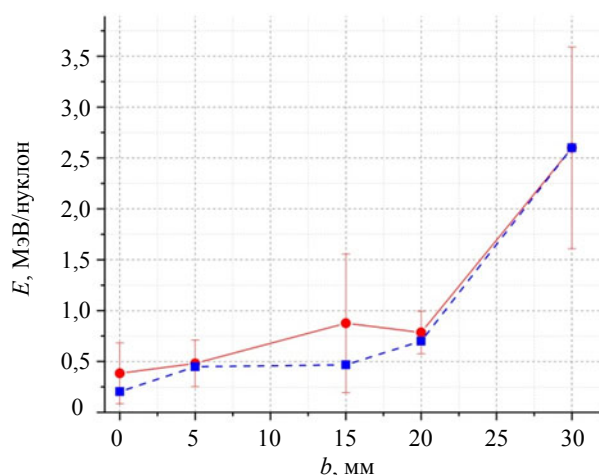


Рис. 4. Зависимость средней энергии E_{mean} (—) и медианного значения E_{median} (---) энергии ускоренных ионов от удаления b коллиматора от анодной фольги

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Механизм ускорения ионов самым непосредственным образом связан с характером протекания электрического тока в высоковольтном диоде. Характерными во всех пусках являются показанные на рис. 5, б колебания на осциллограмме тока, текущего через диод при генерации РЭП. Данные колебания свидетельствуют о развитии неустойчивости тока и появляются в высоковольтном диоде вне зависимости от того, используется ли в качестве анода трёхмиллиметровая стальная пластина, или пятимикронная алюминиевая фольга. Эти колебания не являются какими-то дефектами регистрации сигналов, что понятно по осциллограмме на рис. 5, а, которая записана в эксперименте на короткозамкнутую нагрузку. Объяснением появления осцилляций тока может служить резкое изменение импеданса высоковольтного диода, что, наиболее вероятно, связано с развитием перетяжки или разрывом токового канала [8, 10]. Период этих колебаний составляет $T \approx 2$ нс. На рис. 5, б показан сигнал черенковского детектора, регистрирующего жёсткое рентгеновское излучение с $h\nu > 200$ кэВ, который промодулирован с той же частотой на $\sim 20\%$ по амплитуде. На рис. 3 из-за недостаточного временного разрешения развёртки этой динамики сжатия не видно, а наблюдаются более яркие области на широком фоне рентгеновской засветки от рассыпанного по фольге электронного пучка.

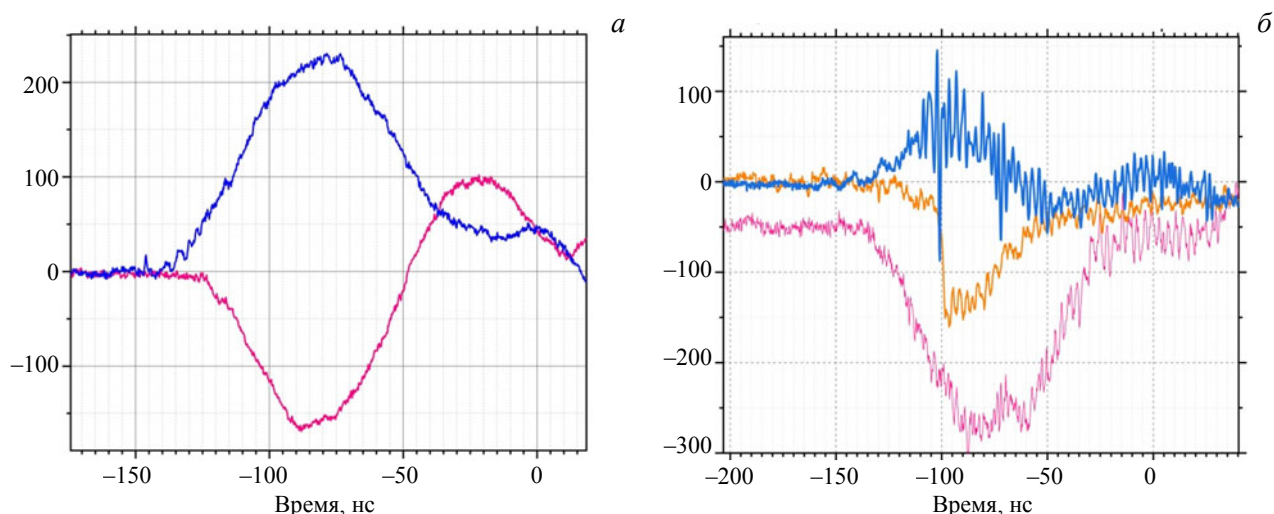


Рис. 5. Типичные осциллограммы тока высоковольтного диода (—, кА), напряжения на передающей линии генератора (—, кВ) и сигнала черенковского детектора (ЧД) (—, отн. ед.) рентгеновского излучения ($h\nu > 200$ кэВ) в пуске с короткозамкнутым диодом (а) и в рабочем пуске с РЭП (б)

Оценим сверху характерное напряжение на перетяжке, предполагая полное вытеснение плазмы из неё и обрыв тока проводимости. В этом случае энергия магнитного поля превращается в энергию электромагнитной волны, что соответствует в гауссовой системе равенству электрического и магнитного полей $E_t \approx B$ [11]. В практических единицах E_t [В/см] = $300 \cdot B$ [Гс] = $60I$ [А]/ r [см] $\approx 6 \cdot 10^7$ [В/см] получим $U \approx rE_t \approx 6$ МВ при полном токе $I = 100$ кА и $r = 0,1$ см, где характерные ток и радиус сфокусированного пучка взяты из нашего эксперимента. В этой оценке длина разрыва полагается равной радиусу пучка.

Хватает ли такого электрического поля для достижения протонами скорости $v = 3,4 \cdot 10^7$ м/с, соответствующей энергии 6 МэВ, при времени ускорения $t \approx 1$ нс, равном половине периода колебания тока в экспериментах на «Катране», узнаем из оценки: $E_s \geq mv/(et) = 1,67 \cdot 10^{-27}(3,4 \cdot 10^7)/(1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-9}) = 3,5 \cdot 10^8$ [В/м], где m и e — масса и заряд протона. Значение поля E_s значительно меньше E_t , что свидетельствует в пользу моделей, предложенных Баренгольцем [8] и Патнемом [10] и связанных с развитием перетяжки в плазме между катодом и анодом. Как видно из этих оценок, для достижения наблюдаемых энергий ионов достаточно на порядок меньшего времени ускорения при развиваемом токе генератора.

При анализе ускорения ионов в электрическом поле виртуального катода за высоковольтным диодом будем опираться на измерения плотности тока на анодной фольге, сделанные с помощью линейной развёртки в рентгеновском излучении [14]. Эти измерения позволяют связать плотность тока с поверхностной плотностью заряда и сделать оценку зазора между анодом и ВК. Модель расчёта основана на том, что электронный пучок наращивает слой ρ_0 заряда виртуального катода до толщины, доводящей значение потенциала $U_{\text{вк}}$ до значения, примерно равного напряжению в высоковольтном диоде генератора U_0 [6, с. 187]. Рассмотрим плоский случай ускорения ионов для оценки напряжённости электрического поля, что в СИ записывается как E [В/м] = $\Sigma/2\epsilon\epsilon_0$, где Σ — поверхностная плотность заряда, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — абсолютная диэлектрическая

проницаемость. Если p — координата по нормали к поверхности анода, то $U_{\text{вк}} = - \int_0^{p_0} E dp$.

Поверхностную плотность заряда виртуального катода оценим, исходя из измеренной плотности тока РЭП i [А/см²] и обозначая как $n_{\text{РЭП}}$ среднее значение плотности электронов в пучке за анодной фольгой на какой-то дистанции p . На этой дистанции сфокусированный на фольге электронный пучок тормозится и отражается от ВК назад. Плотность пучка за этой дистанцией резко падает, соответственно и электрическое поле перестаёт увеличиваться: $\Sigma = n_{\text{РЭП}} e p$. Итак, $i = n_{\text{РЭП}} e c/2$, где e — заряд электрона, $c/2 = v$ — скорость электронов, которую положили равной половине скорости света в вакууме. Напомним, что разность потенциалов в высоковольтном диоде генератора «Катран» составляет $U_0 \approx 250$ кВ и электроны там разгоняются до $v \approx 0,75c$. Получаем в СИ на удалении от анодной фольги, равном p : $E_{\text{вк}}$ [В/м] = $ip/(c\epsilon\epsilon_0) = 377i$ [А/м²]· p [м] и

$$U_{\text{вк}} = U_0 = 1/(c\epsilon\epsilon_0) \int_0^{p_0} i p dp = 188i$$
 [А/м²]· p^2 [м].

По измеренной плотности тока РЭП, равной $i \sim 10$ кА/см² = 10^8 А/м², и известному напряжению U_0 находим $p_i \approx 0,36$ см.

Можно сделать и классическую оценку расстояния виртуального катода от анода $p = c/\omega_{\text{pe}}$ [6, с. 187], где ω_{pe} — плазменная частота, которая даёт при известной плотности остаточного ионизованного газа значение $p \approx 0,25$ см.

Зазор между анодом и виртуальным катодом ещё оценим по U_0 и измеренным значениям энергии ионов в зависимости от расстояния коллиматора до анодной фольги. Как видно из эксперимента, при $b = 3$ см энергия ионов достигает 2,5 МэВ, что в 10 раз больше eU_0 . Получается, что вследствие движения виртуального катода ионы 10 раз ускоряются в виртуальном диоде с разностью потенциалов U_0 , имеющем эффективный зазор $p_s \approx b/10 = 0,3$ см.

Сделанные оценки довольно близки друг к другу, что свидетельствует в пользу модели ускорения ионов движущимся виртуальным катодом.

ВЫВОДЫ

В проведённых экспериментах было установлено, что ускорение ионов происходит в двух местах: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой. Опираясь на известные теории, объясняющие ускорение ионов в условиях, близких к нашим экспериментам, и на проведённые в этих экспериментах измерения, были определены наиболее вероятные физические процессы, приводящие к ускорению ионов.

В катод-анодном зазоре диода генератора при электрическом токе, превосходящем альфвеновский, происходит пинчевание или разрыв токового канала. Это приводит к практическому прерыванию тока проводимости и появлению сильного вихревого электрического поля, попутного осевому движению электронов и многократно превосходящего первоначальное поле генератора. Далее могут осуществляться два механизма ускорения ионов. В первом плотный сгусток электронов, образовавшийся на оси в процессе пинчевания и движимый сильным вихревым полем, прорывается к аноду, увлекая за собой сгусток ионов. Во втором ионы ускоряются к аноду в следующей фазе нарастания тока электронов, когда вихревое поле изменяет свой знак. Процесс ускорения повторяется многократно в течение одного пуска генератора.

В заанодной области проявляется другой механизм ускорения ионов. За границей анодной плазмы в вакууме образуется виртуальный катод, и в области катод—анод—виртуальный катод возникают осциллирующие электроны. Сгустки ионов из анодной плазмы ускоряются в сторону виртуального катода. Этот вытягиваемый из анода нейтрализующий ионный поток приводит к расширению облака осциллирующих электронов и перемещению виртуального катода, в свою очередь увлекающего за собой ионы в процессе непрерывного ускорения. Ускорение ионов до высоких энергий связано с более длительным, чем процессы ускорения в катод-анодном промежутке, движением виртуального катода на длину порядка нескольких межэлектродных зазоров. Это подтверждается полученными экспериментальными данными о возрастании энергии ионов при удалении коллиматора от анодной фольги.

Авторы благодарят за поддержку НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 2073 от 09.10.2020) и выражают признательность К.В. Чукбару и Ю.Г. Калинину за обсуждение результатов работы и полезные консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luce J.S., Sahlin H.L., Crites T.R. Collective acceleration of intense ion beams in vacuum. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1973, vol. 20, № 3, p. 336—341.
2. Плюто А.А. и др. Ускорение ионов в электронном пучке. — Атомная энергия, 1969, т. 27, вып. 5, с. 418—423.
3. Chang C.R., Reiser M. Computer-simulation studies of electron-beam propagation through plasma into vacuum. — J. Appl. Phys., 1987, vol. 61, № 3, p. 899—906; doi: 10.1063/1.338953.
4. Рютов Д.Д., Ступаков Г.В. О влиянии ионного фона на накопление электронов в сильноточном диоде. — Физика плазмы, 1976, т. 2, вып. 5, с. 767.
5. Ступаков Г.В. Автомодельное решение в теории газодинамического ускорения ионов. — Физика плазмы, 1980, т. 6, вып. 6, с. 1322—1332.
6. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Коллективное ускорение ионов в прямых релятивистских электронных пучках. — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1983, т. 14, вып. 1, с. 181—226.
7. Горбулин Ю.М. и др. О механизме ускорения ионов анодной фольги, облучаемой РЭП. — Физика плазмы, 1980, т. 6, вып. 1, с. 109—113.
8. Barengolts S.A., Mesyats G.A., Perepshtein E.A. Model of collective ion acceleration in a vacuum discharge based on the concept of a deep potential well. — J. Exp. Theor. Phys., 2000, vol. 91, № 6, p. 1176—1182; doi: 10.1134/1.1342883.
9. Баренгольц С.А. Эктонные процессы в вакуумном разряде. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, 2005. 55 с.
10. Putnam S.D. Model of energetic ion production by intense electron beams. — Phys. Rev. Lett., 1970, vol. 25, № 16, p. 1129—1132; doi: 10.1103/PhysRevLett.25.1129.
11. Яньков В.В. Z-пинчи. — Физика плазмы, 1991, т. 17, вып. 5, с. 521—530.
12. Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Данько С.А. Эксперименты по ускорению ионов в диоде генератора РЭП «Кальмар». — Физика плазмы, 2019, т. 45, вып. 6, с. 538—546; doi: 10.1134/S0367292119060027.

13. Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Данько С.А. Диагностические методики в эксперименте по ускорению ионов в генераторах РЭП. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 4, с. 99—105; doi: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-99-105.
14. Белозеров О.С., Данько С.А., Ананьев С.С. Методика наблюдения за динамикой фокусировки электронного пучка в эксперименте по ускорению ионов на генераторе РЭП. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 2, с. 80—86; doi: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-80-86.
15. Бабыкин М.В. и др. Использование вакуумного ультрафиолетового излучения для исследования нагрева фольг сфокусированным электронным пучком. — Физика плазмы, 1982, т. 8, вып. 2, с. 415—421.
16. Bakshaev Yu.L. et al. Diagnostic arrangement on S-300 facility. — Review of Scientific Instruments, 2001, vol. 72, № 1, p. 1210—1213; doi: 10.1063/1.1322623.
17. FLYCHK. URL: <https://nlte.nist.gov/FLY/> (дата обращения 04.01.2021).
18. The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM). URL: www.srim.org (дата обращения 25.12.2020).



Олег Сергеевич Белозеров,
лаборант-исследователь; НИЦ
«Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. Академика
Курчатова 1, Россия
OSBelozеров@yandex.ru



Сергей Александрович Данько,
д.ф.-м.н., начальник лабора-
тории; НИЦ «Курчатовский
институт», 123182 Москва, пл.
Академика Курчатова 1, Рос-
сия
Danko_SA@nrcki.ru



Сергей Алексеевич Хромов,
инженер; НИЦ «Курчатов-
ский институт», 123182
Москва, пл. Академика Кур-
чатова 1, Россия
chromov_sa@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

После доработки 12 января 2021 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 136—144.