

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УСКОРЕНИЮ ИОНОВ В ДИОДЕ ГЕНЕРАТОРА РЭП “КАЛЬМАР”

© 2019 г. О. С. Белозеров^{а,*}, Ю. Л. Бакшаев^а, С. А. Данько^а

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: OSBelozеров@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.11.2018 г.

После доработки 17.12.2018 г.

Принята к публикации 20.12.2018 г.

Эксперименты по ускорению ионов в амбиполярном поле проведены на генераторе РЭП “Кальмар” (напряжение в импульсе ~250 кВ, ток ~40 кА, длительность импульса ~150 нс). С помощью разработанных методик измерены потоки ионов и определены некоторые их свойства. В проведенных экспериментах максимальную энергию 6.1 МэВ приобретали самые тяжелые частицы из присутствующих в тонкой анодной пленке — ионы алюминия. Максимальная энергия, которую набирали протоны, составила ~800 кэВ. Энергия ионов, идущих в направлении 20° к оси, оказалась меньше примерно на 15%, чем энергия осевых ионов. Значение полной энергии, переносимой ионами, изменялось от 0.07 до 0.35 Дж, угловая расходимость пучков составляла от 1.2° до 2.2°.

Ключевые слова: генерация ионов, амбиполярное поле, времяпролетный спектрометр, вакуумный рентгеновский диод, тепловизор

DOI: 10.1134/S0367292119060027

1. ВВЕДЕНИЕ

В импульсных генераторах релятивистских электронных пучков (РЭП), воздействующих на прозрачную для них нагрузку, существует явление ускорения ионов под действием возникающего амбиполярного поля [1, 2]. Ионы ускоряются в направлении виртуального катода, создаваемого прошедшими сквозь анод релятивистскими электронами. В этом режиме амбиполярного ускорения энергия ионов может в несколько раз превышать приложенное напряжение импульсного генератора, умноженное на ионный заряд. Такой способ ускорения позволяет получить энергии ионов, достаточные для проникновения в твердое тело на несколько микрон, что придает ему желаемые свойства, например, увеличивает износостойкость режущего инструмента [3]. Технология амбиполярного ускорения может иметь существенное преимущество перед традиционными методами, такими как циклические ускорители заряженных частиц, за счет невысокой стоимости оборудования и его эксплуатации. В рамках исследований по ускорению ионов были проведены эксперименты на генераторе “Кальмар” (напряжение в импульсе ~250 кВ, ток ~40 кА, длительность импульса ~150 нс).

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента по амбиполярному ускорению ионов в вакуумном диоде импульсного генератора РЭП представлена на рис. 1. Электронный пучок генерировался в высоковольтном диоде 1–2, в котором анодом 2 обычно служила прозрачная для электронов 10-ти микронная лавсановая пленка, покрытая слоем алюминия толщиной 0.1 мкм. Ионный пучок (показан стрелками и символом i на рис. 1) генерировался в направлении движения электронов и попадал преимущественно в осевую пролетную камеру, а также в наклоненные к оси под углами 18°–22.5° патрубки 5 с диагностической аппаратурой. Максимальная длина патрубков и осевой камеры составляли 180 см. Вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $P < 10^{-4}$ Торр. Осевой патрубок был предназначен, в основном, для размещения тепловизора 9, который записывал изображение теплового отпечатка ионного пучка на пластине 7. В ряде опытов на оси располагались вакуумные рентгеновские диоды (ВРД (XRD)), регистрировавшие поток ионов во времяпролетном спектрометре. В боковых патрубках располагались: ВРД 6 и камера-обскура 3 с регистрирующей оптической системой 11–14.

Измерения ионных потоков в эксперименте проводились с помощью следующих основных диагностических методик. Энергия отдельных

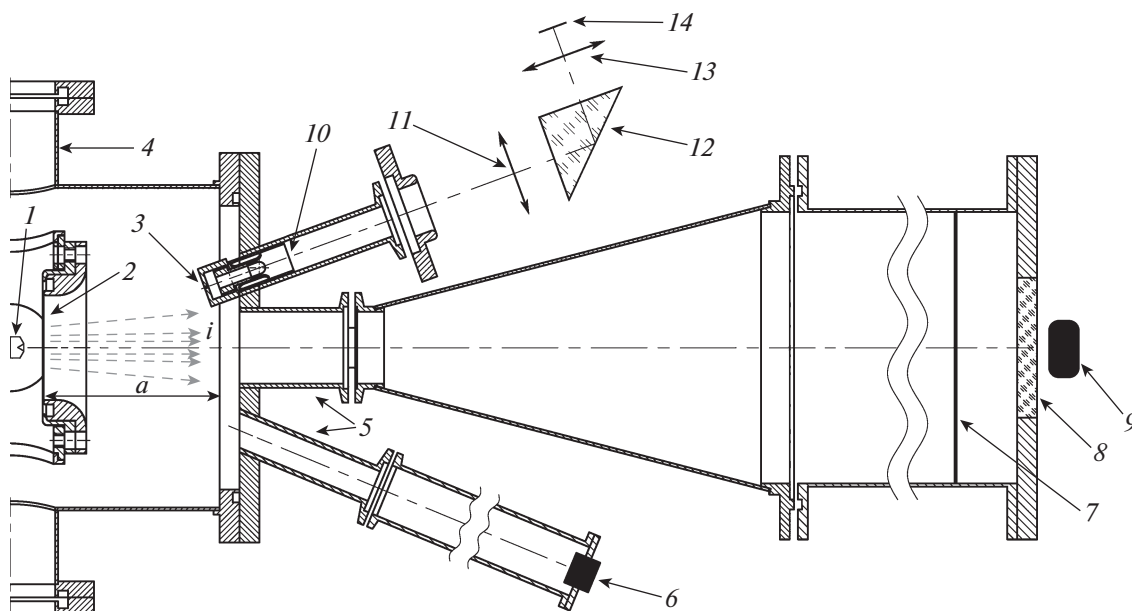


Рис. 1. Схема вакуумной камеры генератора “Кальмар” с диодным узлом: 1 — катод; 2 — анодная фольга; 3 — обскура; 4 — боковые диагностические окна; 5 — патрубки, направленные на фокусное пятно электронного пучка; 6 — вакуумный рентгеновский диод; 7 — мишень; 8 — окно из BaF_2 ; 9 — тепловизор; 10 — сцинтиллятор; 11 — первый объектив; 12 — поворотная призма; 13 — второй объектив; 14 — CMOS-матрица фотоаппарата; a — дистанция от анода до стенки, где происходит ускорение ионов.

ионов определялась времяпролетной методикой по измерению скорости их движения на известной базе. В качестве датчиков использовались ВРД с металлическими (никелевыми) фотокатодами. Катоды ВРД чувствительны не только к вакуумному ультрафиолетовому и мягкому рентгеновскому излучению, но и к попадающим на них быстрым электронам и ионам, которые вызывают вторичную электронную эмиссию. В части экспериментов для отсечки мягкого рентгеновского излучения ($10 \text{ эВ} < h\nu < 5 \text{ кэВ}$) и низкоэнергичных ионов перед ВРД устанавливали фильтры из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм или лавсановой пленки толщиной от 2 до 10 мкм; для предотвращения попадания релятивистских электронов использовались постоянные магниты.

Для измерения полной энергии пучков заряженных частиц и распределения плотности энергии ионов в поперечном сечении применялся калориметрический метод. Этот метод основан на том, что пучок после выхода из диодной области попадает на тонкую пластину-мишень и нагревает ее. Задняя поверхность пластины почернена для увеличения излучательной способности. Пластина рассматривается с тыльной стороны инфракрасной видеокамерой в диапазоне длин волн 7.5–14 мкм через вакуумное окно из BaF_2 (поз. 8 на рис. 1). Тепловизионная камера дает изображение нагретой пучком мишени в условных цветах с высоким температурным разрешением, которое легко преобразуется в плотность

энергии пучка при условии, что мишень не подверглась испарению.

Камера-обскура позволяет измерить плотность тока электронов на анодной фольге, на которую воздействует электронный пучок. Это измерение проводилось в тормозном рентгеновском излучении электронов. Изображение объекта на сцинтилляторе 10, сделанное камерой-обскурой в квантах с энергией $h\nu > 4 \text{ кэВ}$, переносится на CMOS-матрицу фотоаппарата 14 с помощью оптической системы из двух объективов 11, 13 и поворотной стеклянной призмы 12. Осуществленная схема регистрации рентгеновского изображения на цифровом фотоаппарате имеет преимущество оперативного получения информации по сравнению с регистрацией на рентгеновскую фотопленку.

Подробно описание используемых диагностик приведено в работе [4].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим один из наиболее информативных пусков № 1, где в качестве детекторов времяпролетного спектрометра использовались четыре ВРД, три из которых были снабжены фильтрами из лавсана $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ толщиной 4.8 мкм. На оси пролетной камеры на удалении 180 см от анода располагался ВРД 3, под углом 3° на удалении 147 см — ВРД 4. Осциллограммы этих детекторов,

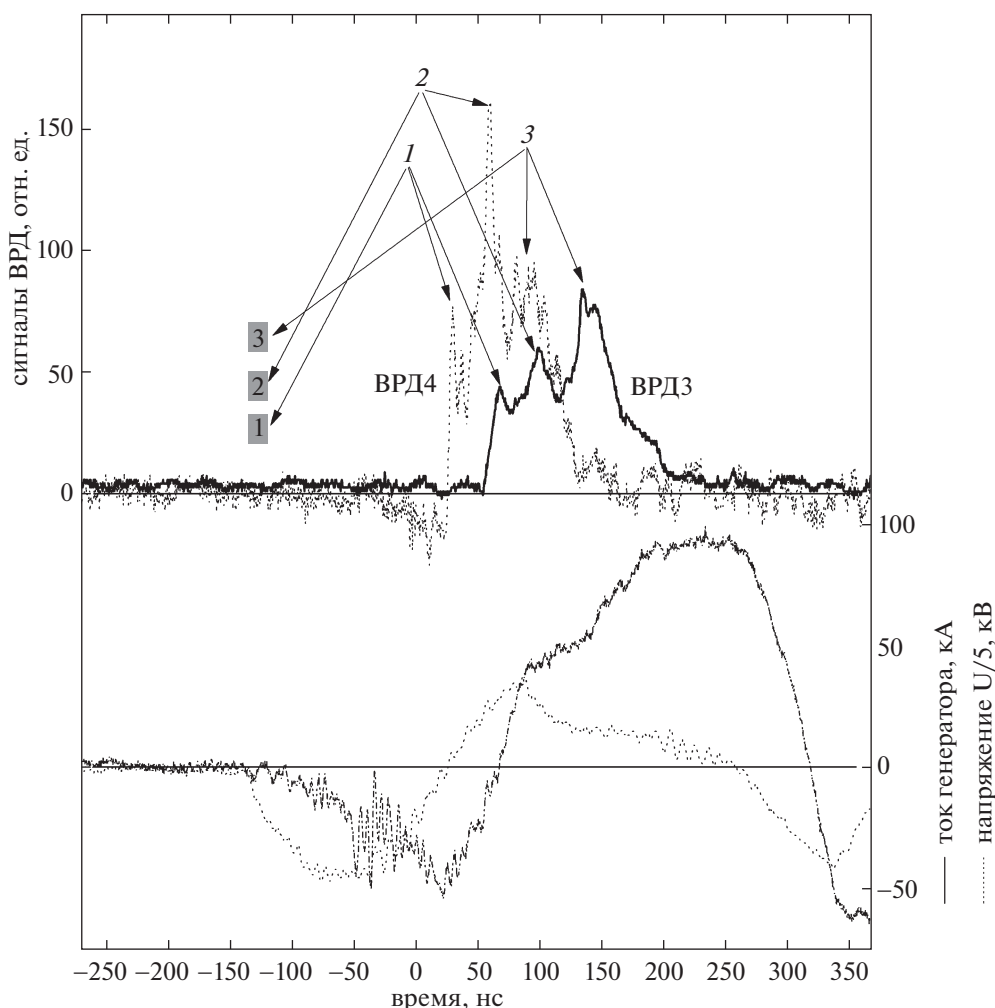


Рис. 2. Осциллограммы осевых детекторов ВРД 3 и ВРД 4, электрического тока и напряжения в высоковольтном диоде генератора “Кальмар” в пуске № 1. Цифрами со стрелками обозначена последовательность пиков, соответствующих различным группам ускоренных ионов. Серые прямоугольники обозначают момент набора каждой из групп ионов конечной скорости.

электрического тока и напряжения генератора представлены на рис. 2.

Продолжительность сигналов, соответствующих пришедшим на детектор быстрым ионам, составляет 100 нс и 135 нс. На сигнале с ВРД 3 отчетливо просматривается три вершины; на более зашумленном сигнале с ВРД 4 они также видны (пики обозначены цифрами на рис. 2). Оценим скорости групп ионов, соответствующих каждому из пиков. Задержка по первым пикам на ВРД составляет $\Delta t = t_{\text{ВРД3}} - t_{\text{ВРД4}} = 67 - 31 = 36$ нс, что соответствует скорости $V_1 = 0.92$ см/нс. Здесь подразумевается, что ионы в двух близких направлениях, в которых расположены ВРД 3 и ВРД 4, ускоряются до одинаковых скоростей. В электрическом поле при одинаковом заряде имеют преимущество в ускорении ионы с меньшей массой. В анодной пленке присутствует четыре вида ато-

мов, и мы идентифицируем первый пик как протоны с энергией $E_{p1} = 440$ кэВ.

Момент набора конечной измеренной скорости соответствует времени на осциллограмме $t_{f1} = t_{\text{ВРД3}} - L/V_1 = 67 - 180/0.92 = -135$ нс, где $L = 180$ см — расстояние от анодной пленки до ВРД 3. Дистанция, на которой может происходить ускорение ионов, ограничена сужением, где к вакуумной камере с высоковольтным диодом генератора “Кальмар” подсоединяется пролетная камера (см. рис. 1) и где большая часть релятивистских электронов генератора уходит на стенку. Эта дистанция составляет $a = 10$ см. Исходя из этого соображения, самый поздний момент, в который ионы могут заканчивать ускорение, соответствуют времени на осциллограмме $t_f = t_{\text{ВРД3}} - (L - a)/V_1 = -118$ нс (в дальнейших оценках этот крайний вариант будет даваться в скобках). В ин-

тервал времени от -135 нс до -118 нс, отмеченный на рис. 2 серым прямоугольником с цифрой 1, значение напряжения по абсолютной величине увеличилось от $U = 20$ кВ до $U = 100$ кВ, и ток не превышал уровень $I = 4$ кА, то есть действие произошло на фронте импульса тока генератора. Отметим, что пленку толщиной 4.8 мкм лавсана уверенно проходят (средний пробег) протоны с энергией более 400 кэВ, углерод с энергией >4 МэВ, кислород с энергией >5.1 МэВ, алюминий с энергией >6 МэВ [5].

Скорость осевых ионов, соответствующих вторым пикам, оказалась равной $V_2 = 33$ см/ 42 нс $= 0.78$ см/нс, и энергия на один нуклон составила $E_{p2} = 320$ кэВ. Момент завершения ускорения соответствует текущему времени $t_{p2} = 100 - 180/0.78 = -130$ нс (-118 нс); практически — это тот же момент, что и для первого импульса. Эта вторая группа ионов не может быть протонами, поскольку они не способны пройти лавсановый фильтр из-за малой энергии. С измеренной скоростью могут двигаться: углерод с энергией 3.9 МэВ, кислород 5.1 МэВ, алюминий 8.7 МэВ. Такие ионы углерода и кислорода уже частично проходят сквозь лавсановый фильтр. Алюминий проходит почти полностью.

Скорость осевых ионов, соответствующих третьим пикам, оказалась равной $V_3 = 33$ см/ 50 нс $= 0.66$ см/нс, и энергия на один нуклон составила $E_{p3} = 226$ кэВ. Момент завершения ускорения соответствует текущему времени $t_{p3} = 139 - 180/0.66 = -134$ нс (-119 нс); практически — это те же моменты, что и для первых двух импульсов. С измеренной скоростью могут двигаться: углерод с энергией 2.7 МэВ и кислород 3.6 МэВ, энергия которых не позволяет пройти фильтр, и алюминий с энергией 6.1 МэВ, $\sim 60\%$ которого уже проникает через фильтр.

В данном эксперименте по измеренной скорости ионов и их проникающей способности установлено, что самые тяжелые из присутствующих, ионы алюминия, приобретают максимальную энергию 6.1 МэВ. Из проделанного анализа следует, что три группы ионов, зарегистрированных времяпролетной методикой в эксперименте, вполне могут принадлежать разным сортам атомов, составляющих анодную пленку.

Ионные сигналы боковых ВРД 1 (22.5° к оси, удаление 151 см) и ВРД 2 (18° , удаление 183 см) не такие четкие, что связано с меньшей плотностью ионов, распространяющихся в направлении $\sim 20^\circ$ и отсутствием фильтра перед ВРД 2 (рис. 3). Сигналы ионов с ВРД 2 располагаются на фоне сигнала от теплового мягкого рентгеновского излучения плазмы. По абсолютной величине сигнал ВРД 1 примерно втрое меньше сигнала ВРД 4, расположенного под углом 3° к оси установки. Самыми большими по амплитуде и отчетливыми

являются последние пики сигналов ВРД, обозначенные цифрой 2 на рис. 3. Задержка для пика 2 составляет 54 нс, что дает скорость ионов $V_2 = 33/54 = 0.61$ см/нс, которая соответствует следующим энергиям ионов: $E_p = 194$ кэВ, $E_C = 2.33$ МэВ, $E_O = 3.1$ МэВ, $E_{Al} = 5.2$ МэВ. Из всех упомянутых ионов только алюминий обладает достаточной энергией и проникающей способностью (рис. 4), чтобы частично преодолеть лавсановый фильтр. То есть пик 2 — это точно алюминий.

Пуск № 1 продемонстрировал, что в распределении ускоренных ионов существует как узкая направленность пучка, составляющая менее 3° , так и заметная анизотропия по энергии. Энергия ионов, идущих в направлении 20° , оказалась меньше примерно на 15% , чем энергия осевых ионов. Как видно из сделанного выше анализа, временной интервал, в течение которого в эксперименте происходит ускорение ионов, соответствует фронту импульса генератора и продолжается $20-30$ нс. Полная электрическая мощность электронного пучка в высоковольтном диоде генератора к моменту окончания ускорения совсем невелика. К.п.д. ускорения ($\sim 10\%$) можно оценить, если проинтегрировать эту мощность от начала импульса до момента окончания ускорения, а полезную энергию ионов взять из измерений тепловизора. Для экспериментов, в которых ускорение ионов происходило не в начале высоковольтного импульса генератора, к.п.д. корректно оценить нельзя, поскольку неизвестен момент начала ускорения.

Рассмотрим пуск № 2, где в качестве детекторов времяпролетного спектрометра также использовались четыре ВРД, из которых только ВРД 2 был снабжен фильтром из алюминия толщиной 10 мкм. На оси пролетной камеры на удалении 180 см от анода располагался ВРД 3, под углом 3° на удалении 147 см — ВРД 2. Осциллограммы сигналов этих детекторов, электрического тока и напряжения генератора представлены на рис. 5.

На сигналах обоих ВРД отчетливо просматривается несколько вершин, пики обозначены цифрами на рис. 5. Ионный сигнал ВРД 3 предваряется пьедесталом длительностью ~ 80 нс, обозначенным на рис. 5 сокращением МР и соответствующим тепловому мягкому рентгеновскому излучению плазмы. Оценим скорости групп ионов для каждого из пиков. Задержка по первым пикам на ВРД составляет $\Delta t_1 = t_{ВРД3} - t_{ВРД2} = 41 - 13 = 28$ нс, что соответствует скорости $V_1 = 1.2$ см/нс. Задержки по остальным пяти пикам отличаются от Δt_1 не более чем на 2 нс, что соответствует скорости $V_i = 1.2 \pm 0.1$ см/нс.

К моментам завершения ускорения для каждой из групп ионов относятся серые прямоуголь-

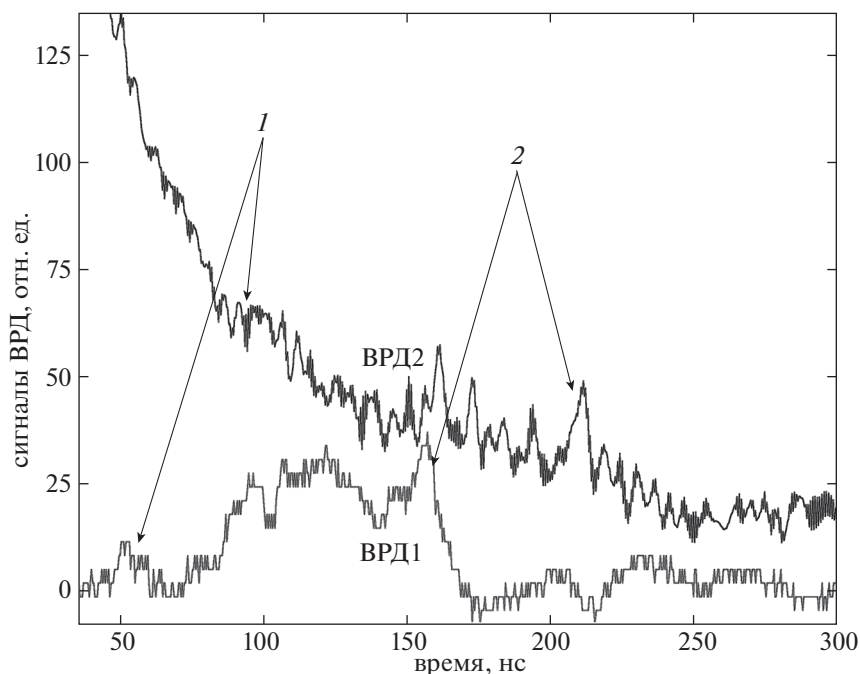


Рис. 3. Осциллограммы боковых детекторов в пуске № 1. ВРД 1 с лавсановым фильтром толщиной 4.8 мкм (22.5° к оси, удаление 151 см) и ВРД 2 без фильтра (18° , удаление 183 см). Стрелками указано положение двух крайних пиков.

ники на рис. 5. Получается, что в течение не менее 40 нс, в которые проходило ускорение, генератор стабильно ускорял ионы до почти одной и той же скорости, несмотря на то, что за это время значения напряжения и тока в диоде увеличились в полтора раза. С увеличением тока и напряжения амплитуда сигналов ВРД возросла, что может указывать на увеличение количества ускоренных ионов (правда, если не сильно изменился коэффициент ион-электронной эмиссии из-за смены сорта ионов или их энергии).

Энергии возможных ионов, соответствующие $V_i = 1.2 \pm 0.1$ см/нс, составляют: $E_p = 730 \pm 100$ кэВ, $E_C = 8.6 \pm 1.2$ МэВ, $E_O = 11.6 \pm 1.7$ МэВ, $E_{Al} = 19.7 \pm 2.8$ МэВ. Средний пробег 10 мкм в алюминиевой фольге имеют: протоны с энергией 760 кэВ, углерод с энергией 12 МэВ, кислород с энергией 16.5 МэВ, алюминий с энергией 27 МэВ. Из всех имеющихся видов ионов только протоны имеют достаточную энергию, чтобы хотя бы частично преодолеть поставленный фильтр.

Пуск № 2 продемонстрировал, что условия для ускорения ионов сохраняются в высоковольтном диоде генератора достаточно продолжительное время вплоть до максимума напряжения. На протяжении всего периода ускорения протоны ускорялись до примерно одной и той же энергии. Отметим, что энергия протонов оказалась выше, чем в экспериментах, где ускорение происходит на фронте высоковольтного импульса при напря-

жении, не достигшем максимального значения, и количество ионов также увеличилось.

В пуске № 3 по сигналам первого и второго ВРД можно определить энергию пучка ионов (рис. 6). Под углом 22.5° к оси пролетной камеры на удалении 151 см от анода располагался ВРД 1, под углом 20° на удалении 183 см — ВРД 2. Продолжительность обоих импульсов примерно одинакова (25 нс), задержка составляет 26–29 нс, что соответствует скорости 1.23–1.1 см/с и энергии на нуклон 790–635 кэВ. Здесь сделано предположение о том, что ионы в двух направлениях, в которых расположены ВРД 1 и 2, ускоряются до одинаковых скоростей. Естественно, такие протоны легко проходят лавсановую пленку 5 мкм перед

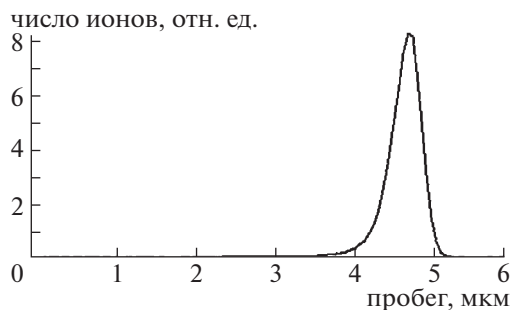


Рис. 4. Пробег ионов алюминия с энергией 5.2 МэВ в лавсане, рассчитанный методом Монте-Карло [5].

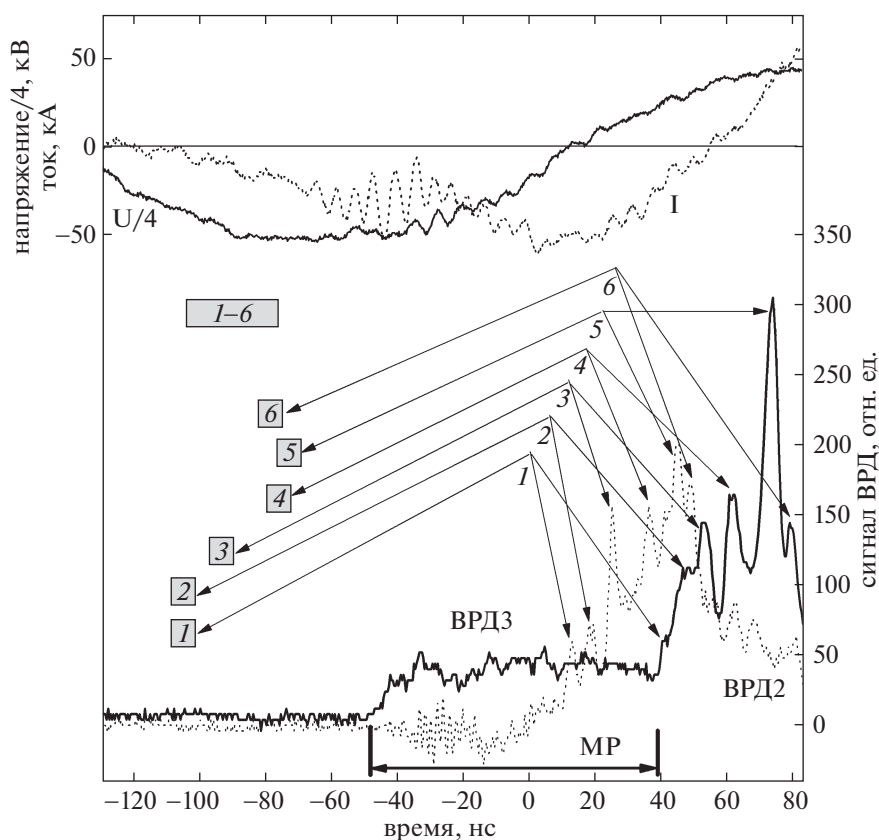


Рис. 5. Осциллограммы детекторов ВРД 2 и ВРД 3, электрического тока I и напряжения U генератора в эксперименте № 2. Цифрами со стрелками обозначена последовательность пиков, соответствующих различным группам ускоренных ионов. Серые прямоугольники обозначают момент набора каждой из групп ионов конечной скорости. Горизонтальной стрелкой показан интервал, соответствующий мягкому рентгеновскому излучению МР.

ВРД (граничная энергия протонов для лавсана 4.8 мкм составляет 400 кэВ).

В соответствии с пролетной базой (длиной трубы 151 см) это ускорение должно происходить до момента времени на осциллограмме $t_{\text{л}} = 118 - 151/1.23 = -5$ нс (3 нс), $t_{\text{з}} = 133 - 151/1.1 = -4$ нс (5 нс), что соответствует началу и концу всего ионного импульса. Примерно в этот момент (14 нс) заканчивается вклад электрической мощности (переполусовка U) в высоковольтном диоде (см. рис. 6). В этом эксперименте продемонстрировано, что условия для ускорения ионов в диоде генератора могут существовать и в самом конце рабочего полупериода напряжения.

В пуске № 4 сравним сигналы с осевого ВРД 2 ($l = 1.47$ м; фильтр — лавсан 2 мкм) и ВРД 3 ($l = 1.8$ м; фильтр — лавсан 2 мкм), расположенного под углом 3° . В отличие от представленных выше экспериментов в пуске № 4 анодом служила 10-микронная алюминиевая фольга. Но поскольку вакуум в камере создается паромасляным насосом, то алюминиевая фольга покрывается тонкой масляной пленкой, что неизбежно приводит

к ускорению содержащихся в ней химических элементов: Н, С, О, Si.

Ввиду того, что сигнал 3 не записался в цифровом виде, рассмотрим осциллограмму, скопированную с экрана осциллографа рис. 7. На ней для синхронизации необходимо сместить сигнал 2 на 5.2 нс влево, тем самым увеличив время задержки между импульсами. Эти два сигнала примечательны тем, что на обоих можно выделить по четыре пика.

Для прохода сквозь лавсан толщиной 2 мкм требуется: $E_{\text{H}} > 200$ кэВ; $E_{\text{C}} > 0.95$ МэВ, $E_{\text{O}} > 1.05$ МэВ, $E_{\text{Al}} > 1.2$ МэВ, $E_{\text{Si}} > 1.6$ МэВ. Согласно сделанным по осциллограммам расчетам значений энергии возможных сортов ионов, первые три пика могут быть обусловлены всеми пятью присутствующими на аноде элементами, а за четвертые пики могут отвечать все ионы за исключением водорода ($E_{\text{C}} = 1$ МэВ). Временная форма всех четырех ионных пиков на ВРД 3 одинаковая: с фронтом в виде полочки. На ВРД 2 такая же форма, только немного зашумлена. Этот факт говорит в пользу того, что профиль плотности ионов формировался при инжекции ионов раз-

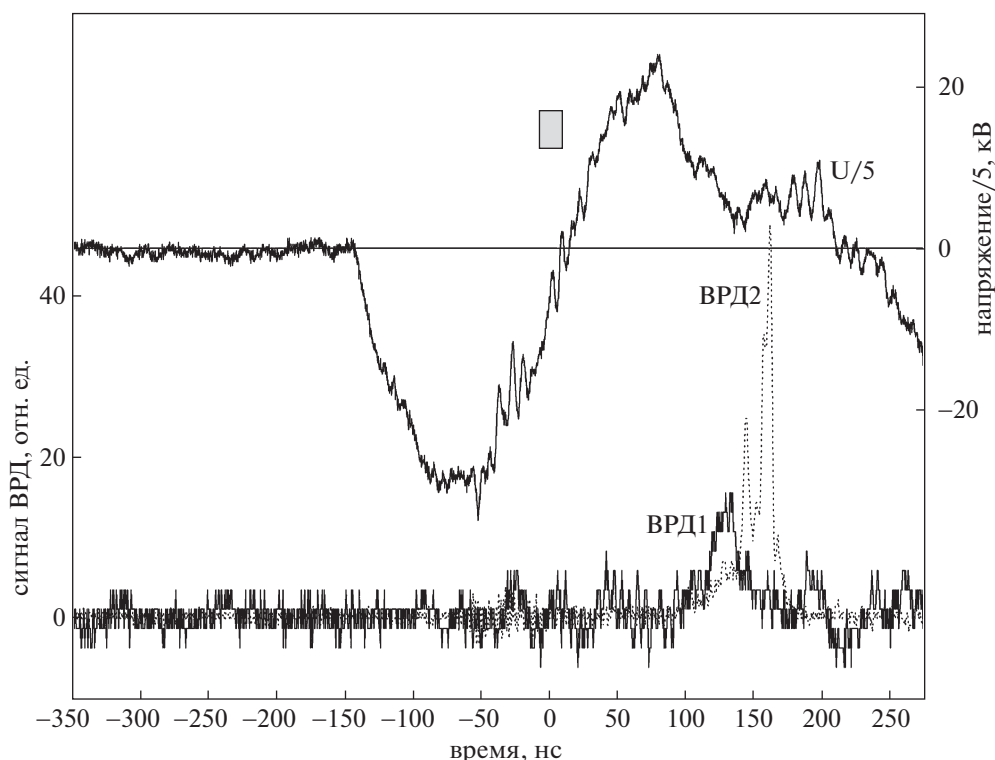


Рис. 6. Осциллограммы детекторов ВРД 1 и ВРД 2 и напряжения U генератора в эксперименте № 3. Серый прямоугольник обозначает момент набора ионами конечной скорости.

ных видов в зону ускорения в одно и то же время, и ускорялись ионы практически синхронно в одинаково изменяющемся поле. Условия для ускорения ионов в данном эксперименте существовали с начала основного импульса напряжения и до его максимума. По-видимому, условия раннего ускорения обусловлены большим предимпульсом генератора, который непосредственно предшествовал основному импульсу электрической мощности (см. рис. 8). В эксперименте № 3 наблюдался более низкий уровень предимпульса, с чем, возможно, и связано запаздывание наработки ионов в диоде и процесса ускорения ионов для первого пика в пуске № 4 закончился не позднее (-123) нс: на рис. 8 это правая сторона серого прямоугольника 1. Если принять во внимание, что для проникновения сквозь 10 мкм алюминиевую анодную фольгу электрону нужно иметь энергию, превышающую 35 кэВ, то по зависимости напряжения от времени можно сделать вывод о начале процесса ускорения и его продолжительности. Для первого пика процесс ускорения начался не ранее (-132) нс и продолжался не более 9 нс.

Применение тепловизионной регистрации воздействия ионного пучка на пластину-мишень дает возможность оценить как абсолютную энер-

гию ионного потока, так и его угловое распределение. Регистрация теплового изображения пластины происходила в телевизионном формате 25 кадров/с. Кроме быстрых сгустков ионов пластину-мишень могут нагревать рентгеновское излучение и потоки медленной плотной плазмы. Но они воздействуют на всю поверхность пластины равномерно в отличие от ионов, узконаправленных вдоль оси, и на их фоне быстрые ионы отчетливо видны. На рис. 9 представлен пример обработки теплового отпечатка ионов в одном из экспериментов. Площадь нагретого пятна на полувысоте распределения температуры составила 4.5 см², удаление пластины от анода — 87 см. Угловая расходимость ионного пучка на полувы-

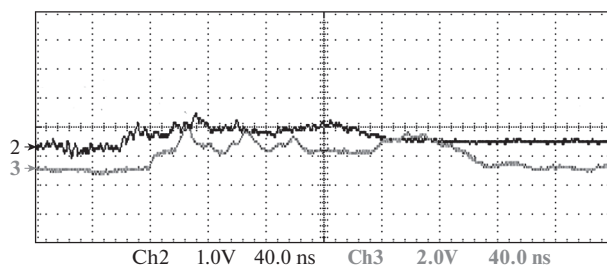


Рис. 7. Осциллограммы ВРД 2 и ВРД 3 в эксперименте № 4.

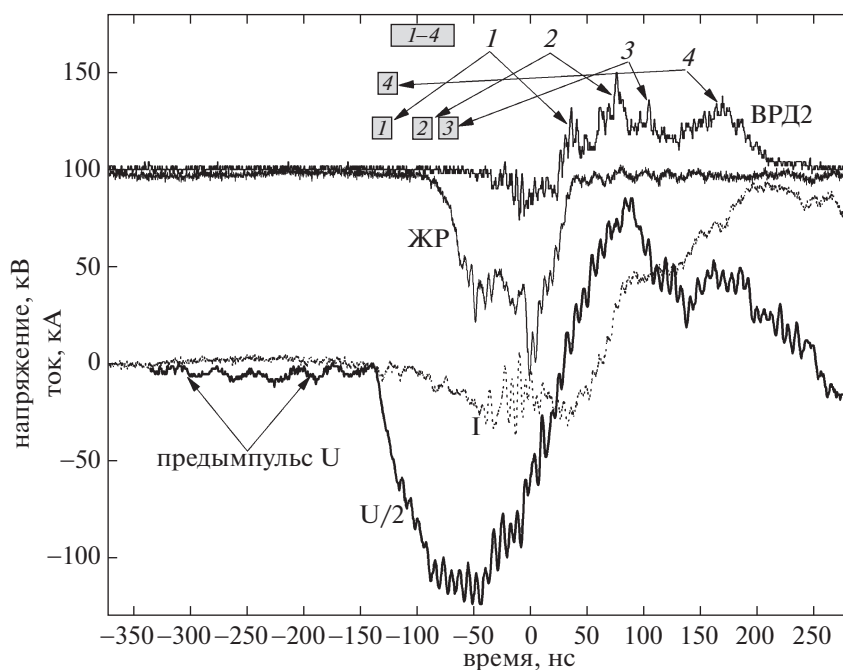


Рис. 8. Осциллограммы детекторов ВРД 2 и жесткого рентгеновского излучения (ЖР), тока I и напряжения U генератора в эксперименте № 4. Цифрами обозначены последовательные пики ионных сигналов, а цифрами в серых прямоугольниках обозначены моменты набора ионами конечной скорости.

соте интенсивности составила 1.6° , а полная энергия, перенесенная ионным пучком, равна 0.1 Дж. В пересчете на количество МэВ-ных ионов получается $\sim 10^{12}$ частиц. Существует статистический разброс параметров ионных пучков в разных пусках. Так, в 10 экспериментах значение энергии изменялось от 0.07 до 0.35 Дж, а угловая расходимость — от 1.2° до 2.2° .

На рис. 10 представлена одна из обскурোগрам, полученных в эксперименте. Измеренная пло-

щадь поперечного сечения электронного пучка на анодной фольге составила 67 мм^2 на полувысоте интенсивности. Как видно на рис. 10, фокусировка электронного пучка плохая, что обуславливалось характеристиками генератора. Регулировка фокусировки на генераторе “Кальмар” осуществляется изменением зазора между като-

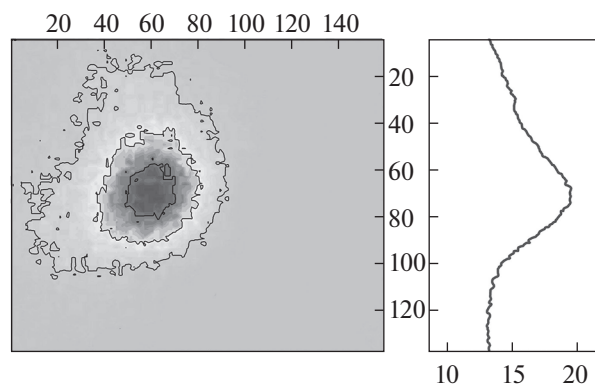


Рис. 9. Теплограмма следа ионов на медной пластине толщиной 0.2 мм (представлена в условной раскраске уровней температуры; линии уровня в координатах, указанных в мм). Справа — профиль распределения ионов в сечении, проходящем через центр нагретого пятна; по ординате — относительная интенсивность.

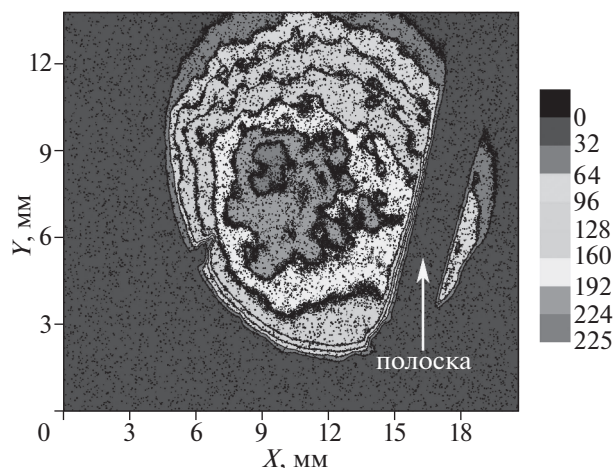


Рис. 10. Обскурোগрама фокусировки пучка электронов на анодной фольге в условных почернениях, полученная в тормозном рентгеновском излучении. Для уточнения масштаба за сцинтиллятором (на рисунке справа) установлена полоска из алюминиевой фольги шириной 1.3 мм. Справа — шкала почернения.

дом и анодом. Однако при величине зазора в 4 мм происходила закоротка высоковольтного диода плазмой, а при зазоре более 6 мм резко уменьшался электрический ток, так что существенного улучшения фокусировки получить не удавалось. Кроме того, генератор работал неустойчиво, спорадически появлялся заметный предимпульс напряжения в высоковольтном диоде, влияющий на всю динамику РЭП и процесс ускорения ионов. К сожалению, регулировать уровень предимпульса в диоде генератора “Кальмар” не было возможности. Его влияние на процесс возникновения плазмы в диоде и ускорение ионов будет специально изучено в ближайших экспериментах на другом генераторе.

4. ВЫВОДЫ

В экспериментах по ускорению ионов в амби-полярном поле на импульсном ускорителе РЭП “Кальмар” (напряжение в импульсе ~250 кВ, ток ~40 кА, длительность импульса ~150 нс) были измерены потоки ионов и определены некоторые их свойства. По скорости ионов и их проникающей способности установлено, что в высоковольтном диоде ускорителя создаются условия для ускорения ионов всех сортов атомов, составляющих анодную нагрузку. Такие условия могут создаваться как на фронте основного импульса мощности генератора при наличии заметного предимпульса, так и в конце рабочего полупериода при низком уровне предимпульса. Установлено, что в эксперименте максимальную энергию 6.1 МэВ приобретали самые тяжелые из присутствующих частиц — ионы алюминия. Протоны

набирали максимальную энергию ~800 кэВ. Энергия отдельных ионов, идущих в направлении ~20°, оказалась меньше примерно на 15%, чем энергия осевых ионов. К.п.д. в фазе ускорения ионов, который можно оценить по измеренной тепловизором энергии ионов, доходит до 10% от электрической энергии в диоде генератора.

Значение энергии, переносимое ионами, было от 0.07 до 0.35 Дж, а угловая расходимость пучков — от 1.2° до 2.2°. Полное количество ускоренных ионов в пересчете на 1 МэВ-ные составило ~10¹² частиц в пуске.

Авторы признательны С.А. Хромову за помощь в проведении экспериментов.

Авторы благодарят РФФИ за частичную поддержку исследований грантами № 17-02-00441а и № 18-32-00199мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. С. 1225. DOI: 10.3367/UF-Nr.0172.200211a.1225
2. Горбулин Ю.М., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Скорюпин В.А., Шестаков Ю.И., Яньков В.В. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. С. 109.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием. М.: Машиностроение, 1993.
4. Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Данько С.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. Вып. 4. С. 99. DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-99-105
5. The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM). URL: www.srim.org (дата обращения 13.07.2018).