

РЕГИСТРАЦИЯ СВЕРХЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ В СИЛЬНОТОЧНОМ ИМПУЛЬСНОМ ГЕНЕРАТОРЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

© 2022 г. С. А. Данько^а, О. С. Белозеров^{а, *}, Ю. Л. Бакшаев^а, С. А. Хромов^а

^а НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: OSBelozerov@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.03.2022 г.

После доработки 15.04.2022 г.

Принята к публикации 16.04.2022 г.

В эксперименте по ускорению ионов на импульсном сильноточном генераторе релятивистского электронного пучка “Катран”, имеющем выходное напряжение $U \leq 250$ кВ и ток $I \approx 50$ кА, получены сверхэнергичные ионы и электроны. Было установлено, что непосредственно в высоковольтном диоде генератора протоны набирают энергию до 1.2 МэВ, а электроны – энергию, превышающую 0.6 МэВ. Появление частиц с такими энергиями связывается с возникновением сильных вихревых полей при пинчевании токового канала в диоде генератора.

Ключевые слова: ускорение электронов, ускорение ионов, вихревое поле, ток Альфвена, пинчевание токового канала

DOI: 10.31857/S036729212210016X

1. ВВЕДЕНИЕ

В последней трети прошлого столетия во множестве теоретических и экспериментальных работ указывалось на влияние плазмы на процессы ускорения электронов и ионов и возникновение перенапряжений в высоковольтном (ВВ) диоде (см., например, [1, 2]). Однако регистрации сверхэнергичных электронов в самом вакуумном диоде были единичными [3], причем, при токах многократно меньших тока Альфвена. Ток Альфвена устанавливает предел, после преодоления которого происходит самосжатие токового канала и появление дополнительных вихревых полей в ВВ-диоде. В процитированной работе механизм появления сверхэнергичных электронов, связан с появлением неустойчивого токоотбора при токах на уровне тока Чайльд–Ленгмюра, устанавливающего ограничения функционирования ВВ-диода объемным зарядом.

В экспериментах на сильноточном импульсном генераторе релятивистского электронного пучка (РЭП) [4], в которых наблюдался пучок ионов за металлической фольгой, образующей анод, происходило ускорение ионов как внутри ВВ-диода, что авторы связали с развитием токовой перетяжки, так и с движением образующегося за тонкой анодной фольгой виртуального катода. В первом случае ток, превосходя ток Альфвена, пинчуется в плазменном канале и начинает

осциллировать, инициируя изменение магнитного потока. В результате этого внутри высоковольтного диода появляется сильное вихревое электрическое поле, которое в одной из фаз ускоряет ионы из прикатодной плазмы в направлении анода до энергий, в ~ 4 раза превосходящих разность потенциалов ВВ-диода U , умноженную на заряд Ze [5]. Возможен механизм ускорения ионов и в противоположной фазе осцилляций, когда плотный сгусток электронов, образовавшийся на оси в процессе пинчевания и движимый сильным вихревым полем, прорывается к аноду, увлекая за собой сгусток ионов. Сами электроны при развитии пинчевания также должны приобретать энергию, многократно превосходящую eU . Целью представленных здесь исследований является измерение энергетического спектра электронов и его сравнение с энергией, которую приобретают ионы в ВВ-диоде сильноточного импульсного генератора с током, превосходящим ток Альфвена.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент проводился на импульсном генераторе РЭП “Катран”, имеющем следующие выходные параметры в высоковольтном диоде: напряжение $U \leq 250$ кВ, ток $I \approx 50$ кА, длительность импульса $t \approx 80$ нс. Схема генератора пред-

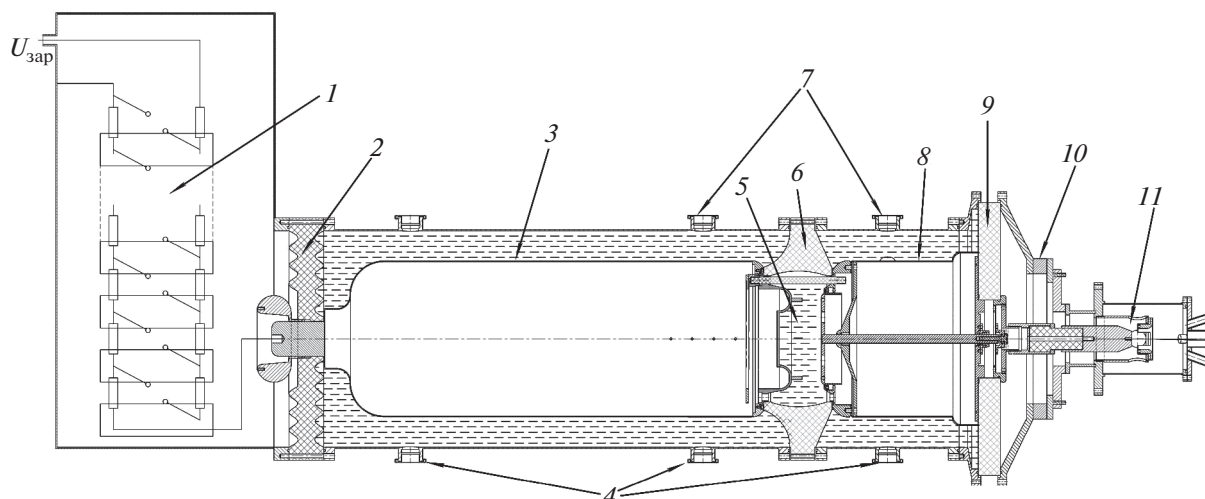


Рис. 1. Схема генератора “Катран”: 1 – генератор импульсного напряжения; 2 – изолятор между трансформаторным маслом и дистиллированной водой; 3 – одиночная формирующая линия; 4 – патрубки для водоочистки; 5 – неуправляемый водяной разрядник; 6 – изолятор разрядника; 7 – датчики с емкостными делителями напряжения; 8 – передающая линия; 9 – изолятор между дистиллированной водой и вакуумом; 10 – шунт; 11 – вакуумный высоковольтный диод.

ставлена на рис. 1. Принцип действия генератора основан на умножении зарядного напряжения в генераторе импульсного напряжения (ГИН) 1, собранного по схеме Аркадьева–Маркса [6]. При срабатывании разрядников ГИНа на выходе появляется напряжение, заряжающее водяную формирующую линию 3 генератора за время 0.7 мкс. При достижении максимального напряжения на формирующей линии срабатывает неуправляемый водяной разрядник 5, и импульс напряжения через передающую линию 8 поступает в вакуумный ВВ-диод генератора 11.

Для контроля работы генератора используется токовый шунт 10 и емкостные делители напряжения 7, установленные на его водяной части. Калибровка емкостного делителя на передающей линии проводилась с помощью кабельного генератора импульсов, подключаемого непосредственно к катоду ВВ-диода. Коэффициент деления был измерен с погрешностью ~5%, и составил 1000.

Электронный пучок генерировался в вакуумном высоковольтном диоде со взрывной эмиссией электронов 1–2, где анодом 2 обычно служила прозрачная для релятивистских электронов алюминиевая фольга толщиной 10 мкм (рис. 2). Ионы появляются при микровзрывах на катоде, а также под воздействием электронов на обеих поверхностях тонкого анода. Соответственно, ускорение ионов может происходить как в катод-анодном промежутке, так и в области за тонким анодом под действием сформированного виртуального катода. Латунный катод имел форму усеченного конуса с углублением и диаметром среза равным

3 мм, межэлектродный зазор составлял ~7.5 мм. За анодной фольгой размещался латунный коллиматор 3 длиной 20 мм и диаметром 30 мм. Цилиндрические отверстия диаметром 2.2 мм в коллиматоре располагались на удалении 3 мм друг от друга. Размеры коллиматора были выбраны таким образом, чтобы исключить распространение электронного пучка за фольгу и устранить, тем самым, образование виртуального катода за фольгой. Таким образом, применение коллиматора позволило в такой постановке эксперимента рассматривать механизм ускорения ионов и электронов исключительно внутри высоковольтного диода генератора. Высокоэнергичные электроны и ускоренные ионы регистрировались детекторами, располагавшимися за анодной фольгой на разном удалении. Малая угловая расходимость ионного пучка ~2° [7], позволяла пропускать сквозь коллиматор заметную часть, примерно равную 10%, ускоренных ионов к детекторам, которыми служили вакуумные рентгеновские диоды (ВРД) 5 [8]. В предыдущей работе авторов [4] был проведен эксперимент, в котором измерялась энергия ускоренных ионов в зависимости от расстояния между заземленным коллиматором и фольгой-анодом. В эксперименте было продемонстрировано, что энергия ионов увеличивалась с 0.85 МэВ, при расположении коллиматора вплотную к аноду, до 3 МэВ при удалении коллиматора от анода на 3 см. Более того, при вариации толщины анодной фольги от 4 до 10 мкм в 20-ти идентичных пусках генератора, когда коллиматор стоял вплотную к анодной фольге, энергия регистрируемых ионов уменьшалась в соот-

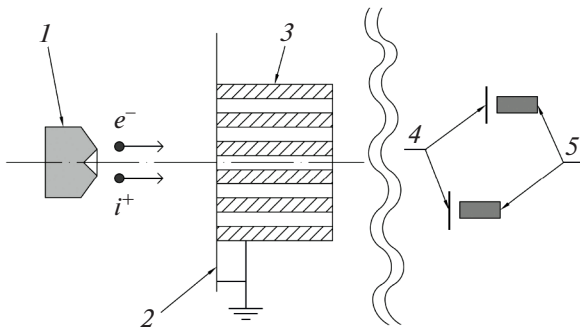


Рис. 2. Схема регистрации высокоэнергичных частиц на генераторе "Катран": 1 – катод, 2 – анод-фольга Al 10 мкм, 3 – коллиматор, 4 – фильтры перед ВРД, 5 – ВРД.

ветствии с их поглощением в фольге. А пересчитанная энергия на входе в анодную фольгу составляла достаточно устойчивое медианное значение 0.85 МэВ. Т.е., было продемонстрировано, что виртуальный катод образовывался исключительно в зазоре между анодной фольгой и коллиматором.

Энергия отдельных сгустков ионов за коллиматором определялась времяпролетной диагностикой по скорости их движения на известной базе. Дополнительно для отсечки мягкого рентгеновского излучения и селекции ионов перед этими ВРД ставились фольги или пленки микронной толщины 4 из различных материалов [7]. Так, протоны с энергией 800 кэВ имеют пробег 10 мкм в Al. Более тяжелые ионы, имеющие такую же скорость, не проникают сквозь Al указанной толщины.

Рассмотрим один из экспериментов, где в качестве анода использовалась алюминиевая фольга толщиной 6.7 мкм с расположенным прямо за ней коллиматором, препятствующем образованию виртуального катода. На рис. 3 представлены осциллограммы с расположенных на удалении 143 и 182 см от анода ВРД с фильтрами из нитроцеллюлозы толщиной 100 нм. На сигналах обоих ВРД просматривается несколько пиков, среди которых для оценки энергии ионов выбран самый высокий на одной из осциллограмм и соответствующий ему на второй осциллограмме; оба отмечены вертикальными штрихами. Задержка составляет $\Delta t = 120.8 - 91.2 = 29.6$ нс, что соответствует скорости $V = 1.32$ см/нс и энергии протонов $E = 900$ кэВ. Если пересчитать [9] энергию ускоренных в ВВ-диоде протонов с учетом потерь в анодной фольге, то в рассматриваемом пуске генератора она составит $E = 1.2$ МэВ. Момент ускорения ионов в пуске соответствует значению напряжения, измеренного емкостным делителем на передающей линии, $U = 145$ кВ.

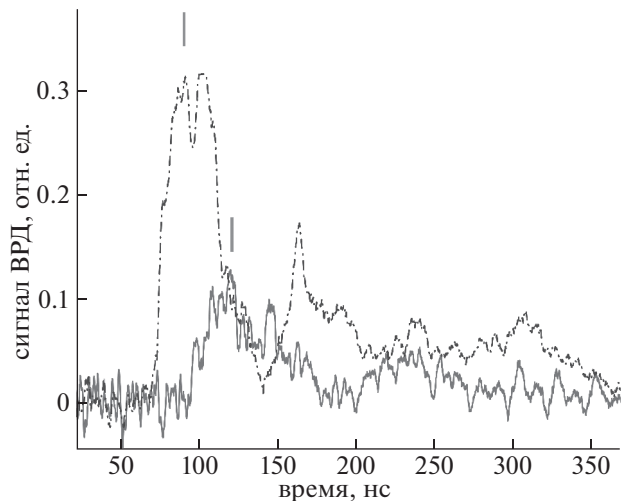


Рис. 3. Ионные пики на сигналах ВРД, расстояние между которыми составляет 39 см, в эксперименте (№ 1) с коллиматором. Вертикальными штрихами отмечен пик, выбранный для расчета.

Энергия электронов в экспериментах измерялась двумя способами:

- 1) по пробегу электронов сквозь разные по толщине фильтры, за которыми их ток регистрируется ВРД;
- 2) по тормозному рентгеновскому излучению электронов, регистрируемому двумя детекторами, один из которых закрыт свинцовым фильтром.

Для первой методики, представленные на рис. 4 зависимости необходимой энергии электронов для прохождения ими через использовавшиеся алюминиевые фильтры брались из National Institute of Standards and Technology [10]. Кроме того, был проведен уточняющий расчет пробегов электронов в алюминии с помощью вычислительной программы на основе метода Монте-Карло с аналоговым прослеживанием траекторий всех частиц [11, 12]. Он показал, что в интересном для нас интервале энергий от 0.2 до 1 МэВ указанный в источнике [10] пробег соответствует доле прошедших сквозь вещество электронов равной $\approx 4 \times 10^{-5}$.

Для второй методики было рассчитано отношение сигналов двух рентгеновских датчиков, один из которых открыт, а входное окно второго закрыто свинцовым фильтром, обрезающим мягкую часть рентгеновского спектра излучения. Это отношение сигналов было рассчитано для полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения СКД1-01 и СКД1-02 для разных толщин свинца в интервале энергий электронов от 0.2 до 0.8 МэВ.

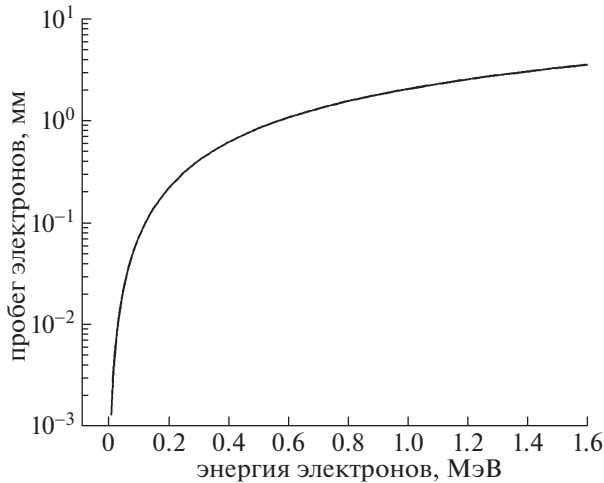


Рис. 4. Пробеги электронов в алюминии.

Расчет проводился по формуле Крамерса [13], которая характеризует спектральную яркость тормозного рентгеновского излучения электрона N_λ :

$$N_\lambda = \frac{13.65 \times 10^{-6}}{4\pi L} \times \times Z \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0 \lambda^2} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{электрон} \cdot \text{стерадиан} \cdot \text{с} \cdot \text{нм}} \right],$$

где $L = \ln(1.166 E_e/J)$, E_e — энергия тормозящихся электронов, λ и λ_0 — текущая и минимальная длина волны рентгеновского излучения, а $J = 11.5Z$ — средняя энергия возбуждения атома с зарядовым числом Z . Электрический ток датчика i от полного числа рентгеновских квантов с учетом функции чувствительности $D(\lambda)$ [электрон/фотон] датчика СКД, составит

$$i = \int_{\lambda_0}^{\lambda_{\max}} N_\lambda D(\lambda) \exp\left(-\sum_k \mu_k(\lambda) \rho_k d_k\right) d\lambda,$$

где экспонента выражает ослабление рентгеновских квантов стенками вакуумной камеры и фильтрами с массовыми коэффициентами ослабления $\mu_k(\lambda)$, плотностями ρ_k и толщинами d_k ; пределы интегрирования выбирались в соответствии со спектром излучения.

Отношения токов i двух одинаковых датчиков в зависимости от энергии электронов и толщины фильтра из свинца перед одним из них даны в таблице 1. Два применявшихся в эксперименте датчика имеют одинаковую зависимость чувствительности от энергии рентгеновских квантов, только СКД1-02 в несколько раз чувствительнее СКД1-01 [14]. Временное разрешение датчиков составляет 5 и 3.5 нс, соответственно, что позволяет зарегистрировать усредненный по времени поток жестких рентгеновских квантов. Датчики были откалиброваны в условиях пуска генератора, когда они закрывались одинаковыми по толщине фильтрами (1 мм Pb) на месте их реального расположения. Отношение чувствительностей СКД1-02 и СКД1-01 к рентгеновскому излучению в диапазоне от 0.1 до 0.8 МэВ составило 11.8.

Типичный пуск генератора, в котором измерялись ток электронов за фильтрами разной толщины после коллиматора и их тормозное рентгеновское излучение, представлен на рис. 5. Появление заметных осцилляций на токе с частотой ~ 0.5 ГГц с момента $t = -50$ нс сопровождается появлением сверхэнергичных электронов.

Оказалось, что при напряжении в $U \approx 210$ кВ, измеренном емкостным делителем на передающей линии, ВРД с алюминиевым фильтром толщиной 0.8 мм в тот же момент времени регистрировал электроны с энергией, превосходящей 500 кэВ. Количество таких электронов составляет $\sim 1.2\%$ от полного тока электронов. Доля электронов с энергией, превосходящей 400 кэВ и регистрируемых ВРД с алюминиевым фильтром толщиной 0.6 мм, ток составляет $\sim 6.9\%$. За 100% тока

Таблица 1. Расчет отношения сигналов двух одинаковых датчиков СКД, вызванных тормозным рентгеновским излучением электронов, в зависимости от толщины свинцового фильтра перед одним из них

Энергия электронов, кэВ	Отношение сигналов				
	открытый / Pb 2 mm	открытый / Pb 3 mm	открытый / Pb 5 mm	открытый / Pb 6 mm	открытый / Pb 7 mm
250	32	106	944	2651	7276
290	18	48	284	647	1428
330	12	26	104	194	350
350	9.8	20	72	126	214
400	7	12.8	36	57	88
500	4.5	7.1	15	22	30
600	3.4	5	9.3	12	16
700	2.9	4	6.7	8.6	11
800	2.53	3.34	5.4	6.6	8

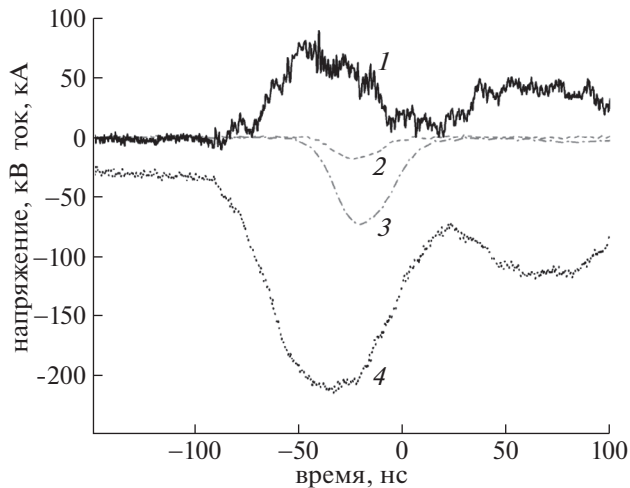


Рис. 5. Типичный пуск генератора: 1 – полный ток ВВ-диода; 2 – ток электронов с энергией, превышающей 400 кэВ, отн. ед.; 3 – рентгеновское излучение с энергией более 370 кэВ, отн. ед.; 4 – напряжение на передающей линии.

принимался сигнал ВРД, регистрирующий электроны с энергией выше 50 кэВ. Погрешность измерения токов с помощью ВРД составляет ~30% и обуславливается стохастическим характером углового разброса электронов в направлении регистрирующих ВРД. В выбранной геометрии ВВ-диода доли сверхэнергичных электронов в указанных интервалах были, в рамках погрешности, стабильными от пуска к пуску генератора. Поскольку доля проникающих сквозь фильтр электронов с номинальной энергией для этого фильтра составляет менее 10^{-4} , а измеренная доля электронов от полного тока, превосходящих номинальную энергию, – около процента, то надежность регистрации сверхэнергичных элект-

тронов очень велика. На рис. 6 представлены осциллограммы ВРД с разными фильтрами, пропускающими сверхэнергичные электроны.

Параллельно в рассматриваемом пуске проводились измерения тормозного спектра излучения электронов. Отношение токов двух рентгеновских датчиков, открытого и закрытого фильтром толщиной 2 мм, составило значение 8.6. Вследствие энергетического баланса продолжительность сверхэнергичного излучения не может составлять всю продолжительность усредненного по времени излучения электронов, и по этой причине соотношение амплитуд импульсов по расчетной таблице 1 дает оценку снизу для значения энергии сверхэнергичных электронов E_e . Она в рассматриваемом эксперименте достигает 370 кэВ, т.е. максимальная энергия E_e не менее чем вдвое превосходит напряжение генератора, умноженное на заряд e .

Измерение тормозного излучения электронов в эксперименте (№ 3) без коллиматора с анодом из дюралюминия толщиной 3 мм, когда один из датчиков СКД закрыт шестимиллиметровым свинцом, представлено на рис. 7 в виде двух осциллограмм датчиков. По соотношению сигналов, равному 39, сверхэнергичные электроны приобретают энергию не менее 430 кэВ. Это измерение является еще одним доказательством генерации сверхэнергичных электронов именно в анод-катодном (А-К) зазоре ВВ-диода генератора.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно работе [2] при пинчевании электронного пучка рост вихревого электрического поля может доходить до уровня E [В/см] $\approx 60I/r_n$, где r_n [см] – радиус пинча, I [А] – ток. Этот меха-

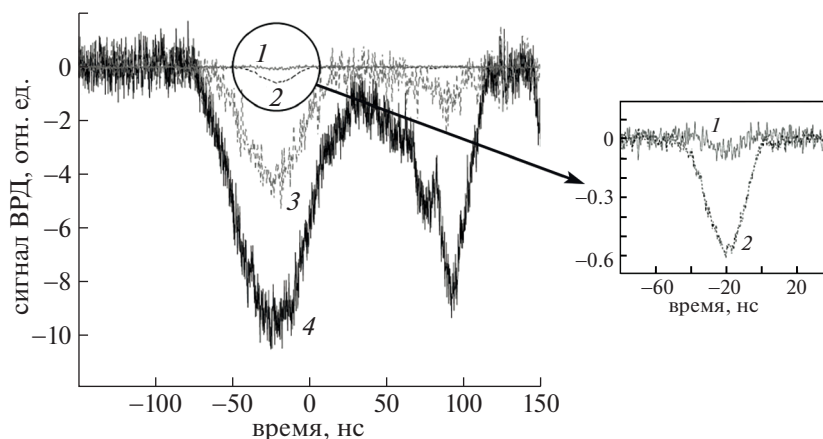


Рис. 6. Пуск № 2. Сигналы электронов разных энергий: 1 – ВРД (за фильтром 800 мкм Al) – $E_e > 500$ кэВ; 2 – ВРД (600 мкм Al) – $E_e > 400$ кэВ; 3 – ВРД (300 мкм Al) – $E_e > 250$ кэВ; 4 – ВРД (50 мкм Al) – $E_e > 80$ кэВ.

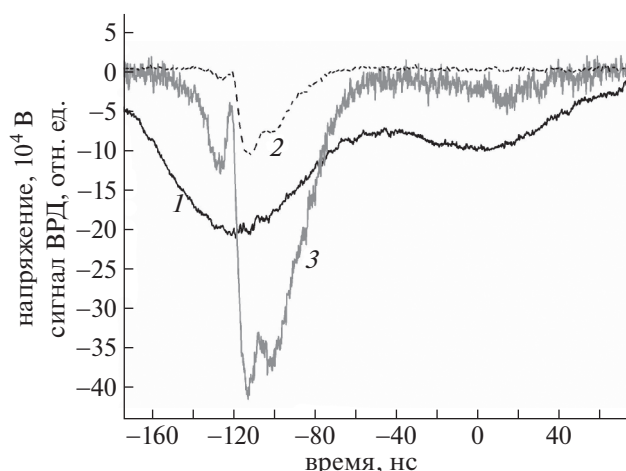


Рис. 7. Регистрация тормозного рентгеновского излучения в эксперименте (№ 3) с Al анодом толщиной 3 мм: 1 – напряжение на передающей линии; 2 – осциллограмма датчика с фильтром из 6 мм свинца; 3 – осциллограмма датчика без фильтра.

низ возникновения дополнительного электрического поля в ВВ-диоде при токах, превышающих ток Альфвена, представляется приоритетным. В условиях эксперимента на “Катране”: $I = 50$ кА, $r_n \approx 0.1$ см, – вихревая э.д.с. в рамках этого механизма способна достигать $U \approx 3$ МВ, чего с запасом хватает для набора электронами наблюдаемых значений энергии $E_e \leq 1$ МэВ (в оценке длина перетяжки положена равной ее радиусу). Оценим время, необходимое электрону для достижения измеренной скорости v_e , соответствующей энергии E_e . $t_e = v_e m_e / eE$, где e и m_e – заряд и масса электрона, $E = U/d$ – среднее ускоряющее электрическое поле на зазоре d . Зазор может быть равен А–К расстоянию (~ 0.5 см) или длине перетяжки при пинчевании. После ускорения электрон приобретает энергию $E_e = eU$ (0.6 МэВ), вследствие чего время набора скорости составит

$$\begin{aligned} t_e &= d \times (2m_e/E_e)^{1/2} = \\ &= d \times (2 \times 9.1 \times 10^{-28} \text{ г} / (0.6 \times 1.6 \times 10^{-6} \text{ эрг}))^{1/2} = \\ &= d \times 4.4 \times 10^{-11} \text{ с}. \end{aligned}$$

При движении электрона в магнитном поле, созданном током пучка, путь и, соответственно, время ускорения удлиняется в несколько раз (примерно в отношении тока генератора к току Альфвена), что в нашем эксперименте составит ≈ 0.1 нс. Таким образом, электрон приобретает энергию 0.6 МэВ при э.д.с. 0.6 МВ за время на порядок меньшее характерного времени модуляции тока генератора в 1 нс, что можно считать мгновенным откликом. Эта оценка означает, что сигнал сверхэнергичных электронов может служить

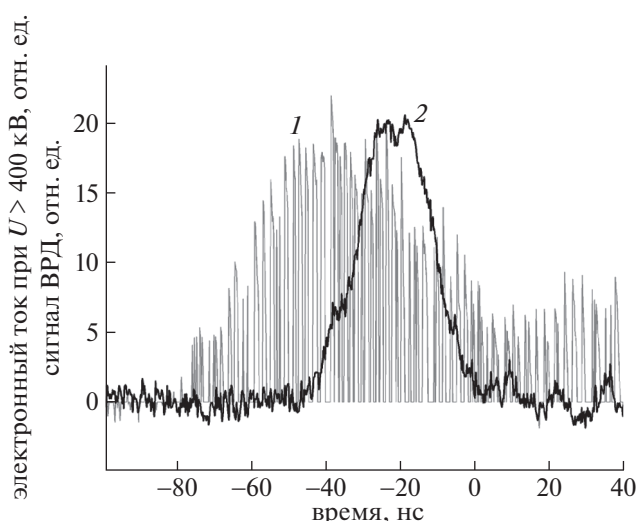


Рис. 8. 1 – ток генератора I , в моменты времени, когда скорректированное напряжение $U = U_{пл} - LdI/dt$ на высоковольтном диоде превосходит 400 кВ. 2 – осциллограмма ВРД, регистрирующего ток электронов с энергией, превышающей 400 кэВ.

монитором соответствующего напряжения с таким временным разрешением.

Оценим значение дополнительного перенапряжения по полученным в эксперименте электротехническим параметрам. В экспериментах ближайшей к ВВ-диоду генератора точкой, в которой возможно было измерить напряжение, была передающая линия. Непосредственно в ВВ-диоде напряжение отличается вследствие возникающих осцилляций тока от измеренного ($U_{пл}$) на производную от магнитного потока: $d(LI)/dt = L \times dI/dt + I \times dL/dt$. Рассмотрим воздействие первого из слагаемых, связанных с изменением магнитного потока, на напряжение в высоковольтном диоде генератора РЭП на примере эксперимента, осциллограммы которого представлены на рис. 5. Для этого имеются знания двух величин: индуктивности L участка цепи между емкостным делителем и ВВ-диодом и производной тока. Для оценки воздействия второго слагаемого, связанного с изменением индуктивности плазменного токового канала, экспериментальных данных нет. Схема генератора “Катран”, из которой вычисляется значение индуктивности, представлена на рис. 1. Оно составляет $L \approx 75$ нГн. На рис. 8 представлен ток I генератора, в моменты времени, когда скорректированное напряжение $U = U_{пл} - L \times dI/dt$ на высоковольтном диоде превосходит 400 кВ. В остальных случаях значение тока приравнивалось нулю. Осциллограмма 2 представляет сигнал ВРД, соответствующий электронам с энергией, превосходящей 400 кэВ.

Поскольку напряжение подправлено неполноценно, то ожидать полного совпадения интервала времени “перенапряжения” на ВВ-диоде и интервала регистрации сверхэнергичных электронов с энергией более 400 кэВ не приходится. Возможно и доминирование слагаемого, связанного с изменением индуктивности. Но даже оценка одного слагаемого, связанного с производной тока, дает значения вихревого электрического поля, достаточные для объяснения наблюдаемой энергии электронов, что и проиллюстрировано рис. 8. Сверхэнергичные электроны возникают не сразу, а с задержкой в ~ 50 нс после начала тока. Отметим, что во всех пусках ускорение ионов в направлении от катода к аноду происходит также не ранее 50 нс после начала тока генератора [7].

Статистика по проведенным 20 пускам генератора в представленной постановке показывает, что по измерениям тормозного излучения средняя энергия электронов превосходит почти вдвое напряжение генератора U , измеренное емкостным делителем и умноженное на заряд e . Здесь необходимо упомянуть, что полученное по отношению двух рентгеновских сигналов значение энергии электронов является заниженным, поскольку перенапряжение в ВВ-диоде существует короткое время в максимальной фазе режима осцилляций.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте по ускорению ионов на импульсном сильноточном генераторе релятивистского электронного пучка “Катран”, имеющем выходные параметры $U \leq 250$ кВ, $I \approx 50$ кА, получены сверхэнергичные ионы и электроны. Установлено, что непосредственно в высоковольтном диоде генератора протоны набирают энергию до 1.2 МэВ, а электроны – энергию, превышающую 0.6 МэВ. Энергия электронов была измерена двумя способами:

1) по пробегу электронов сквозь разные по толщине фильтры, за которыми их ток регистрируется ВРД;

2) по тормозному рентгеновскому излучению электронов, регистрируемому двумя датчикам СКД, один из которых закрыт свинцовым фильтром.

Доказательством того, что электроны получают свою энергию именно в ВВ-диоде генератора, является применение специального коллиматора, располагавшегося непосредственно за тонкой 10-мкм анодной фольгой и препятствующего образованию виртуального катода.

Вторым “устройством”, препятствующим образованию виртуального катода, был толстый

анод (3 мм Al), сквозь который не могут пройти электроны с энергией меньше 1.6 МэВ. В этой постановке эксперимента свидетельством набора электронами избыточной энергии было сверхэнергичное, более 430 кэВ, тормозное рентгеновское излучение.

Появление электронов со сверхвысокими энергиями связано с генерацией сильных вихревых полей при пинчевании токового канала в высоковольтном диоде генератора.

Работа была выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ № 2948 от 18.11.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суладзе К.В., Цхадая Б.А., Плютто А.А. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. С. 282.
2. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1983. Т. 14. № 1. С. 181.
3. Бугаев С.П., Кошелев В.И., Тимофеев М.Н. // ЖТФ. 1974. Т. 44. № 9. С. 1917.
4. Белозеров О.С., Данько С.А., Хромов С.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. № 1. С. 136. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2021-44-1-136-144>
5. Putnam S.D. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 25. № 16. P. 1129.
6. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987.
7. Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Данько С.А. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 538. <https://doi.org/10.1134/S0367292119060027>
8. Idzorek G.C., Coulter W.L., Walsh P.J., Montoya R.R. // 10th IEEE Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM July 10-13, 1995. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc621311>
9. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2010. V. 268, P. 1818. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>
10. Berger M.J., Coursey J.S., Zucker M.A., Chang J. // NIST Standard Reference Database 124. 2022. <https://doi.org/10.18434/T4NC7P>
11. Berger M.J. Methods in Computational Physics / Ed. by B. Alder, S. Fernbach, M. Rotenberg. New York: Academic, 1963. V. 1. P. 135.
12. Аккерман А.Ф., Никитушев Ю.М., Ботвин В.А. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. Алма-Ата: Наука, 1972.
13. Павлинский Г.В. Основы физики рентгеновского излучения. М.: Физматлит, 2007.
14. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2012.