

ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ “АСТРА”

© 2013 г. И. С. Егоров, М. И. Кайканов, Е. И. Луконин, Г. Е. Ремнев, А. В. Степанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

Поступила в редакцию 08.08.2012 г.

Приведены описание и результаты испытаний импульсного электронного ускорителя “Астра”. Высоковольтный импульсный трансформатор с псевдоискровым разрядником в качестве коммутатора емкостного накопителя непосредственно нагружен на вакуумный планарный диод на основе металлокерамического катода с высоким временем запаздывания взрывной эмиссии электронов. Генерируемый электронный пучок инжектируется в атмосферу с частотой 50 Гц. При ускоряющем напряжении 370 ± 10 кВ длительность тока инжектированного пучка составляет 60 нс на полувывсоте. При работе ускорителя на внутреннюю мишень энергия электронного пучка составляет 19 Дж и 4.5 Дж при инжекции электронного пучка в атмосферу с отсечкой низкоэнергичной части пучка разделительной фольгой.

DOI: 10.7868/S0032816213050030

Источники электронных пучков имеют широкий потенциал применения в промышленности, медицине, фармацевтике, защите окружающей среды, в переработке сельскохозяйственной продукции. Разработаны технологии получения нанопорошков [1], радиационного отвержения лаковых покрытий [2], обработке полимерных пленок [3]. Электронные пучки используют для очистки сточных вод [3], радиационной стерилизации объектов медицинского, фармакологического назначения, продуктов питания и питьевой воды [4]. В работах [5–7] описаны ускорители электронов, ориентированные на использование, как в промышленных, так и в научных целях.

Данная статья содержит описание частотного импульсного электронного ускорителя прямого действия “Астра”. Ускоритель разработан для тех-

нологического применения в качестве источника электронного пучка с выводом в атмосферу при длительной работе с частотой следования импульсов до 50 Гц.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Ускоритель прямого действия “Астра” использует ускорение электронов в импульсном электрическом поле промежутка катод–анод. Источник электронов — плазма на поверхности плоского взрывоэмиссионного катода с высоким временем запаздывания [8]. Импульс ускоряющего напряжения формируется генератором [9], высоковольтный тригатронный коммутатор которого заменен псевдоискровым разрядником ТДИ1-100К/45ПД. Принципиальная схема ускорителя приведена на рис. 1. В основе схемы высоковольт-

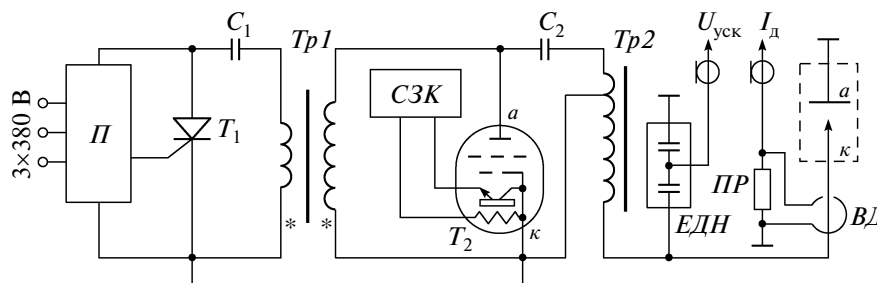


Рис. 1. Принципиальная схема ускорителя “Астра”. П – первичный преобразователь; T_1 – тиристорный коммутатор, T_2 – коммутатор ТДИ1-100К/45ПД; $Tp1$ – повышающий импульсный трансформатор ($K = 16$), $Tp2$ – высоковольтный импульсный трансформатор; $C_1 = 40$ мкФ – первичный накопитель, $C_2 = 95$ нФ – высоковольтный накопитель; СЗК – схема запуска коммутатора, ВД – вакуумный диод (κ – катод, a – анод), ЕДН – емкостный делитель напряжения, ПР – пояс Роговского.

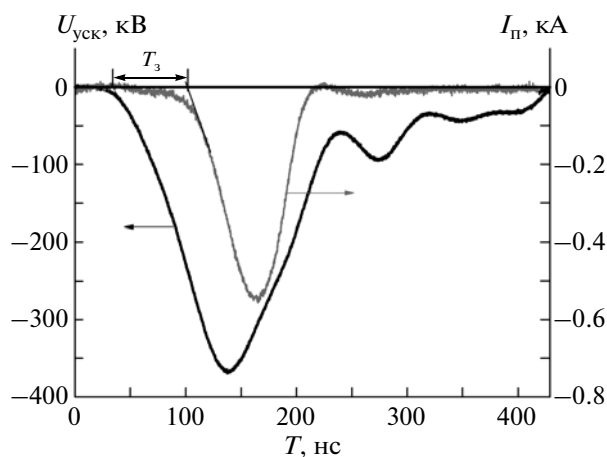


Рис. 2. Характерные осциллограммы ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$ и тока инжектированного пучка $I_{\text{п}}$ при $d = 24$ мм.

ный импульсный трансформатор, нагруженный непосредственно на вакуумный диод планарного типа. Использование металлокерамического катода с повышенным содержанием меди [10], в отличие от [11], обеспечило высокое время запаздывания при более высокой теплопроводности, необходимой для частотной работы ускорителя. Уменьшение фронта тока пучка по сравнению с фронтом ускоряющего напряжения обеспечило возможность исключения из схемы ускорителя обостряющего разрядника.

Первичный накопитель C_1 заряжается от источника постоянного тока Π до заданного значения напряжения. По окончании заряда подается пусковой сигнал на открытие полупроводникового коммутатора T_1 , и энергия, запасенная в C_1 , через повышающий импульсный трансформатор $Tr1$ передается емкостной батарее C_2 . Рассогласование емкостей C_1 и C_2 в сторону увеличения C_2 необходимо для создания обратного напряжения на T_1 и его закрытия.

В момент времени, когда ток заряда C_2 становится равным нулю, система запуска коммутатора (СЗК) формирует импульс поджига на управляющем электроде высоковольтного коммутатора T_2 . При открытии T_2 запасенная в C_2 энергия передается через высоковольтный импульсный трансформатор $Tr2$ в вакуумный электронный диод. Сформированный в катод-анодном промежутке электронный пучок инжектируется в атмосферу через выпускное окно из титановой фольги.

КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Модуль управления размерами (Д × Ш × В) $0.7 \times 0.6 \times 1.1$ м содержит элементы первой ступени сжатия энергии: систему первичного электро-

питания, преобразователь Π и органы управления им, первичный накопитель C_1 , полупроводниковый коммутатор T_1 и импульсный трансформатор $Tr1$. Система запуска коммутатора также размещена в модуле управления.

Остальные элементы схемы рис. 1 расположены в модуле ускорителя. Используется изоляция высоковольтных частей генератора импульсов ускоряющего напряжения трансформаторным маслом. Электрическая прочность высоковольтного изолятора при остаточном давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Торр рассчитана на импульс напряжения субмикросекундной длительности амплитудой до 500 кВ.

Инжекция электронного пучка в атмосферу производится через выпускное окно с самоподдерживающейся [12] разделительной титановой фольгой толщиной 50 мкм. Диаметр сечения инжекции пучка 65 мм. Выбор катод-анодного промежутка и диаметра катода для определенной толщины и материала анодной фольги проводился с целью уменьшения длительности спада импульса и соответственно снижения доли низкоэнергичной части электронов в пучке.

Ускоритель обеспечен следующим диагностическим оборудованием: омический делитель напряжения для измерения зарядного напряжения емкостного накопителя C_2 ; емкостный делитель напряжения $ЕДН$ для измерения величины ускоряющего напряжения; пояс Роговского $ПР$ для измерения полного тока диода; цилиндр Фарадея для измерения тока электронного пучка, инжектированного в атмосферу; калориметр для оценки полной энергии, переносимой электронным пучком за фольгу.

Охлаждение высоковольтных элементов модуля ускорителя осуществляется циркуляцией трансформаторного масла. В зависимости от применения электронного пучка использовались системы охлаждения разделительной фольги выпускного окна ускорителя потоком газа либо потоком водовоздушной смеси. Системы охлаждения также расположены в модуле ускорителя, размеры которого составляют $1.7 \times 0.9 \times 1.8$ м.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

На рис. 2 показаны характерные осциллограммы ускоряющего напряжения и тока ускорителя при величине катод-анодного промежутка $d = 24$ мм. Большое время задержки появления электронного тока в диоде $T_3 = 70$ нс обусловлено применением металлодиэлектрического катода [10].

Согласно [11], увеличение времени образования плазменной эмиссионной поверхности приводит к повышению эффективности вывода электронного пучка через фольгу. Это связано с формированием

более высокого ускоряющего напряжения при работе импульсного автотрансформатора на нагрузку с нелинейным сопротивлением, когда первоначально импеданс превышает выходной импеданс генератора.

Применение металлодиэлектрического катода обеспечило формирование на диоде ускоряющего напряжения амплитудой $U_{\text{уск}} = 370$ кВ при $d = 24$ мм. Фронт тока пучка $(0.1-0.9)I_n$ длительностью 45 нс при этом короче фронта импульса ускоряющего напряжения $(0.1-0.9)U_{\text{уск}}$ длительностью 70 нс. Длительность тока выведенного электронного пучка составляет 60 нс на полувысоте. Калориметрические измерения показали, что за фольгу переносится 4.5 Дж энергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСКОРИТЕЛЯ

Частота генерирования пучка электронов регулировалась в диапазоне от 1 до 100 Гц. Было установлено, что при частоте свыше 50 Гц производительность системы откачки вакуума не достаточна для поддержания остаточного давления на уровне $1 \cdot 10^{-3}$ Торр.

Максимальная частота следования для длительной работы ускорителя зависела также от способа охлаждения разделительной фольги выпускного окна ускорителя.

При газовом охлаждении в данной работе в качестве рабочего газа использовался атмосферный воздух, который подавался нагнетателем по касательной к плоскости фольги таким образом, чтобы охлаждалась вся поверхность фольги на пути прохождения электронного пучка. Высокотемпературный вентилятор 0.8ЭВ-2 при расходе 11.5 м³/ч обеспечивал скорость движения воздуха вдоль поверхности фольги >2 м/с. Непрерывная работа ускорителя при этом обеспечивается до частоты следования 20 Гц без изменения значений регистрируемых параметров ускорителя.

Исследование стабильности параметров работы ускорителя с частотой следования 20 импульсов/с показало, что амплитуда зарядного напряжения накопителя C_1 от импульса к импульсу отличается на $\pm 1\%$. Диаграмма, приведенная на рис. 3, является результатом обработки $1 \cdot 10^3$ измерений ускоряющего напряжения. При этом определялось число импульсов, попадающих в заданный диапазон ускоряющего напряжения, относительно общего числа измерений W_i/W_o . Анализ диаграммы показывает, что для 98% импульсов $U_{\text{уск}} > 360$ кВ. При этом среднее значение ускоряющего напряжения составляет 370 кВ $\pm 2.7\%$.

Охлаждение разделительной фольги выпускного окна ускорителя водовоздушной смесью позволило увеличить частоту следования импульсов то-

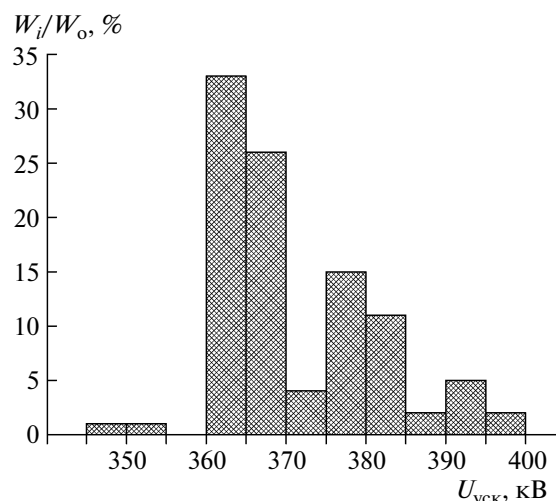


Рис. 3. Гистограмма ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$ при $d = 24$ мм. W – количество импульсов.

ка пучка до 50 Гц. Водовоздушная смесь формировалась с помощью эжектора с коэффициентом эжекции 10. Оценка состояния разделительной фольги после 10^5 импульсов тока пучка показала, что механические свойства фольги остались неизменными. Поверхность фольги со стороны катода покрыта пленкой толщиной 0.5 мкм. Элементный анализ пленки показал, что в ее составе преобладает углерод, предположительным источником которого является вакуумное масло откачной системы диода ВМ-5С. Массовая толщина углеродной пленки составляла менее 1% массовой толщины разделительной фольги. Таким образом, наличие пленки не привело к существенному изменению режима инжектирования электронного пучка в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний ускорителя “Астра” показывают возможность использования ускорителя для генерации импульсного электронного пучка с частотой повторения 50 Гц. Длительность тока инжектированного пучка составляет 60 нс на полувысоте при амплитуде ускоряющего напряжения 370 кВ $\pm 2.7\%$. Средняя мощность инжектированного в атмосферу пучка электронов диаметром 65 мм составляет 225 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К. и др. // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 320.
2. Абдуллин Э.Н., Чмух В.Н. // Химия высоких энергий. 1979. Т. 13. Вып. 2. С. 181.
3. Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К. и др. // Вестник “Радтех-Евразия”. М.–Новосибирск, 2002. № 1(11).

4. *Месяц Г.А., Котов Ю.А., Шпак В.Г., Соковнин С.Ю.* // Урал: наука, экология. Екатеринбург, 1999. С. 241.
5. *Котов Ю.А., Соковнин С.Ю.* // ПТЭ. 1997. № 4. С. 84.
6. *Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е.* // ПТЭ. 2000. № 1. С. 112.
7. *Салимов Р.А.* // УФН. 2000. Т. 170. № 2. С. 197.
8. *Вагнер М.И., Егоров И.С., Кайканов М.И. и др.* // Изв. вузов. Физика. 2011. № 11/3. С. 80.
9. *Канаев Г.Г., Кухта В.Р., Лопатин В.В. и др.* // ПТЭ. 2010. № 1. С. 105.
10. *Савицкий А.П., Прибытков Г.А., Вагнер М.И., Кутенков О.П.* // Изв. Том. политехн. ун-та. 2010. Т. 317. № 2. С. 83.
11. *Котов Ю.Л., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 4. С. 124.
12. *Ремнев Г.Е., Егоров И.С., Кайканов М.И. и др.* // Труды 8 Междунар. конф. "Ядерная и радиационная физика". Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011. С. 549.