

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ КОММУТАТОР И ЕГО ПЛАЗМЕННО-ВАКУУМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Е.И.Скибенко, В.Б.Юферов, В.Г.Артюх, И.Н.Онищенко
 ННЦ ХФТИ ИПЭНМУ, ул. Академическая 1, г. Харьков 61108, Украина

Приведены параметры и результаты испытаний малогабаритного ускорителя электронов “ДИ” с высокоэффективным плазменным размыкателем тока.

I. Введение

Несмотря на очевидные достижения в получении и исследовании сильноточных импульсов электронного тока и выяснении физических принципов работы электронных ускорителей прямого действия с плазменными коммутаторами токов, представляется целесообразным и необходимым исследование физических и технических особенностей создания и эксплуатации подобных устройств с тем, чтобы стала возможной реализация расчетных режимов их работы. В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования некоторых особенностей работы электронного ускорителя ДИ с плазменным размыкателем тока (ПКТ), в частности заполнения разрядного промежутка плазмой и определения эффективности работы ПКТ.

II. Оборудование. Техника эксперимента

Схематический вид малогабаритной ускорительной установки ДИ [1] с плазменным коммутатором тока приведен на рис. 1. Она состоит из вакуумной камеры $\varnothing 200$ мм и высотой 350 мм с системой электродов, плазменных пушек и магнитных обмоток, генератора импульсного тока (ГИТа), источников питания плазменных пушек и магнитного поля, блоков запуска и синхронизации, помехозащитных средств, диагностической инфраструктуры, а также откачного поста. Фактор малогабаритности ускорителя ДИ иллюстрируется тем, что поэлементно его полная масса складывается из следующих составляющих: вакуумная камера с комплектующими – 15 кг, ГИТ – 200 кг (140 кг), питание плазменных пушек – 46 кг (2 кг), питание магнитного поля – 12 кг (3 кг), блоки запуска и синхронизации 5 кг, помехозащитные и диагностические средства – 7 кг, откачной пост – 30 кг, измерительная аппаратура – 28 кг, монтажная рама – 17 кг. Итого, 360 кг, что делает ускоритель ДИ удобно транспортируемым устройством. Переход к импульсным преобразователям напряжения позволяет существенно уменьшить массу питающих устройств (смотри цифры в скобках) и в конечном итоге полную массу ускорительной установки до $200 \div 230$ кг. Его габаритные размеры: $180 \times 120 \times 60$ см.

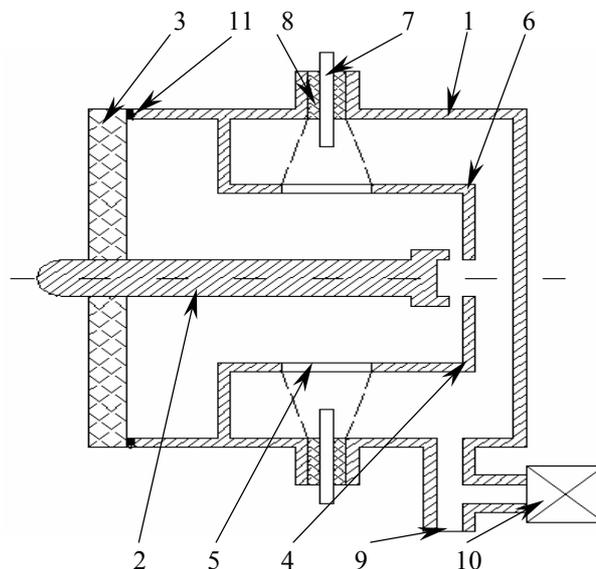


Рис. 1. Схематический вид ускорителя ДИ: 1 – вакуумная камера; 2 – катод; 3 – изолятор; 4 – анод; 5 – щелевидные прорезы; 6 – диафрагма; 7 – центральный электрод плазменной пушки; 8 – изолятор плазменной пушки; 9 – откачной патрубок; 10 – датчики давления; 11 – уплотнительное кольцо.

Основные электрические параметры ускорителя ДИ по первичным цепям следующие: напряжение на центральном электроде – катоде до 50 кВ, емкость накопительного конденсатора – 3 мкФ, его индуктивность – 40 нГн, индуктивность плазменного коммутатора тока – 122 нГн, индуктивность нагрузки (диода) – 25 нГн, напряжение питания плазменных пушек – до 15 кВ. Заполнение разрядного промежутка плазмой проводилось с помощью 12 плазменных пушек [2] планарного типа, располагавшихся равномерно в экваториальной плоскости вакуумной камеры. Установка ДИ снабжена следующими средствами диагностики: поясами Роговского для измерения тока ГИТа и тока нагрузки – ускорительного диода, емкостным делителем для измерения напряжения на катоде, рентгеновскими датчиками интегрального и сцинтилляционного типов, СВЧ – интерферометрами на частоте 35 ГГц для измерения плотности плазмы, инжектируемой в разрядный промежуток с помощью плазменных пушек и её пространственного распределения, датчиками для импульсного измерения давления в период

коммутации тока и после этого. На рис. 2 представлена геометрия и схема СВЧ – зондирования плазмы, инжектируемой снаружи в прикатодную область, для измерения её поперечных размеров по отражению микроволн, где

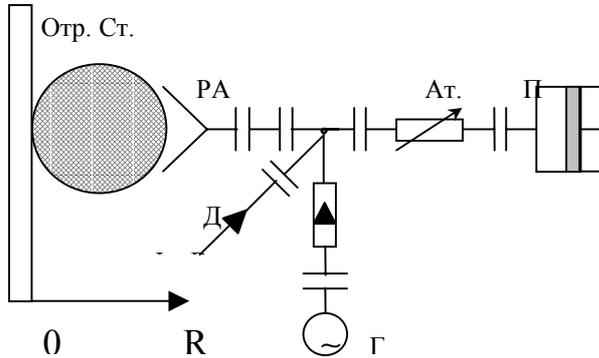


Рис. 2

Г – генератор, П – поршень, Д – детектор, РА – рупорная антенна, Пл – плазма, Отр. ст. – отражающая стенка, Ат – аттенуатор, Фр В – ферритовый вентиль. Поскольку плазменные пушки расположены у стенки вакуумной камеры и заполнение разрядного промежутка плазмой происходит от периферии к центру, то и отсчет поперечного размера производится от отражающей стенки к центру (см. координатную ось R на рис. 2).

III. Результаты эксперимента

Измерение параметров инжектируемой плазмы, таких как ход плотности и линейных размеров при $n \geq n_{кр}$ во времени, может иметь важное значение для определения момента включения ГИТа относительно импульса плазменных пушек, а также для оценки общего количества плазмы в разрядном промежутке и, соответственно, величины коммутируемого тока. На рис. 3а представлена зависимость поперечного размера (радиуса)

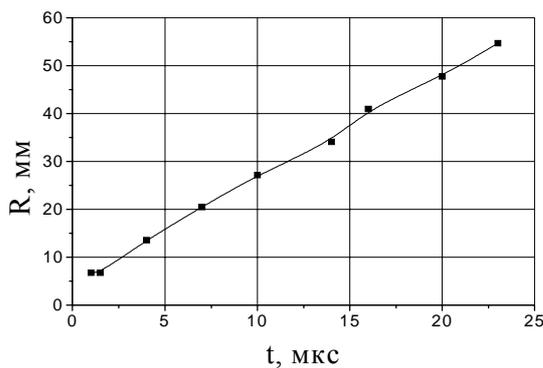


Рис. 3а

плазменного образования (фронта) с критической плотностью $n_{кр} \geq 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ от времени. Полученные данные позволяют оценить скорость движения плазменного фронта с критической плотностью (отражающего слоя) в разрядном промежутке. В начальной стадии инжекции плазмы скорость распространения отражающего слоя максимальна и составляет $7.2 \cdot 10^5 \text{ см/с}$. По мере

расширения отражающего слоя (смещения плазменного фронта) падает его температура и, соответственно, скорость движения до величины $3.4 \cdot 10^5 \text{ см/с}$. Исходя из средней величины скорости распространения плазменного фронта $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$, получаем время заполнения разрядного промежутка плазмой с $n_{кр} \geq 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ равное $\sim 15 \text{ мкс}$, что приблизительно соответствует величине временной задержки между включением ГИТа и плазменными пушками, определенной экспериментально. Этот вывод подтверждается также радиальным распределением плотности плазмы (рис. 3б) в разрядном промежутке в момент времени $t = 2 \div 4 \text{ мкс}$ после включения импульса плазменных пушек

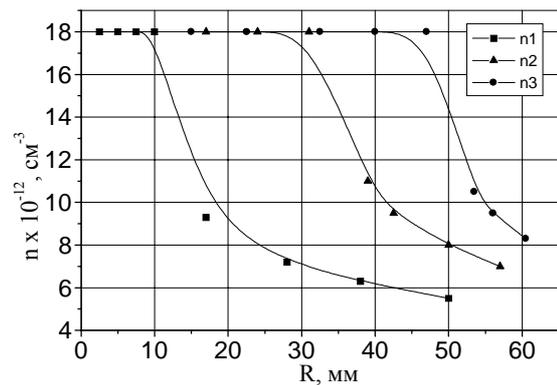


Рис. 3б

(кривая 1), $t = 12 \text{ мкс}$ (кривая 2) и $t = 20 \text{ мкс}$ (кривая 3). Помимо этого установлена зависимость времени существования плазмы с критической плотностью $n_{кр} \geq 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ от напряжения на плазменных пушках. Это время составляет $\sim 25 \text{ мкс}$ при работе четырёх пушек и $\sim 50 \text{ мкс}$ для 12 пушек. Помимо всего прочего зависимость $n = f(R)$ четко указывает на то, что сгусток плазмы, инжектированный пушкой, состоит из двух частей: быстрой, малоплотной с $n \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и медленной, плотной с $n \geq 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Быстрая и малоплотная плазма заполняет разрядный промежуток в течение нескольких мкс после срабатывания плазменных пушек; плотная плазма заполняет его спустя $10 \div 15 \text{ мкс}$. По-видимому, именно быстрая часть сгустка ионизирует нейтральный газ, заполняющий разрядный промежуток и камеру ПКТ.

На рис. 4 показано распределение n – числа импульсов по k – кратности умножения напряжения в серии из 55 импульсов для различного количества работающих плазменных пушек (4 и 12). Как видно, увеличение числа плазменных пушек от 4 до 12 приводит к заметному возрастанию усредненного коэффициента умножения напряжения, а также к уменьшению его разброса от импульса к импульсу. Максимальная величина напряжения в данной серии импульсов составила 378 кВ при напряжении ГИТа 37 кВ.

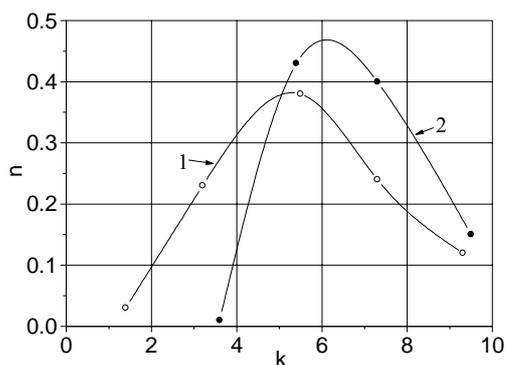


Рис. 4

Максимальное значение мощности на нагрузке (электронном диоде) составило $4.92 \cdot 10^{10}$ Вт ($U_{\max} = 360$ кВ, $I_{\max} = 136.7$ кА, $\tau = 30$ нс). На рис. 5 приведена зависимость доли α максимального тока ГИТа, коммутируемого в нагрузку, т.е. в электронный диод, от энергосодержания

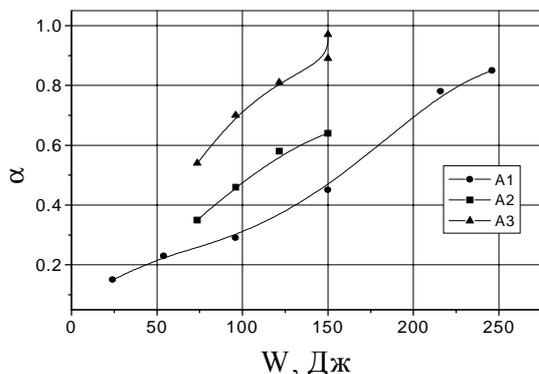


Рис. 5

плазменных пушек. В данной серии импульсов максимальная величина тока ГИТа составила 129 кА. Видно, что увеличение количества плазменных пушек с 4 (кривая 1) до 12 (кривая 2) привело к заметному (на $25 \div 30\%$) росту величины коммутируемого тока, что, по-видимому, связано с увеличением количества и плотности плазмы в разрядном промежутке, а также изменением её пространственного распределения вдоль зазора в сторону равномерного. Ещё более значительное (на 50%) увеличение коммутируемого тока происходит при введении в камеру ПКТ аргона при давлении $1.5 \cdot 10^{-3}$ тор (кривая 3). Напуск аргона, по-видимому, приводит к увеличению плотности и времени существования плазмы за счёт более высоких значений сечения ионизации в области энергий $20 \div 30$ эВ, т.е. вблизи ионизационных потенциалов и, как следствие, к росту величины коммутируемого тока. Кроме того, наличие аргона, возможно, снижает скорость рекомбинации первичной плазмы, инжектированной извне, и, как следствие этого, увеличивается время существования плазмы в разрядном промежутке. Т.о. более эффективным средством для наращивания величины коммутируемого тока по сравнению с увеличением

числа плазменных пушек является напуск аргона, что в большей степени влияет на равномерность заполнения разрядного промежутка плазмой посредством его (Ar) ионизации электронами плазменных сгустков. Аналогичный эффект наблюдался также при наличии в камере ПКТ углеродосодержащей атмосферы (CO_2 , CO , $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_2$). На рис. 6 приведены результаты экспериментов по исследованию влияния плотности остаточных газов в камере ПКТ на величину коммутируемого тока (в единицах α). Видно, что зависимость $\alpha = f(n_0)$ носит пороговый характер. Коммутация тока начинается при $n_0 \geq 3.5 \cdot 10^{12}$ см^{-3} , при $n_0 \geq 1 \cdot 10^{13}$ см^{-3} величина α – доля максимального тока ГИТа, коммутируемого в нагрузку, растет незначительно (в пределах 10%).

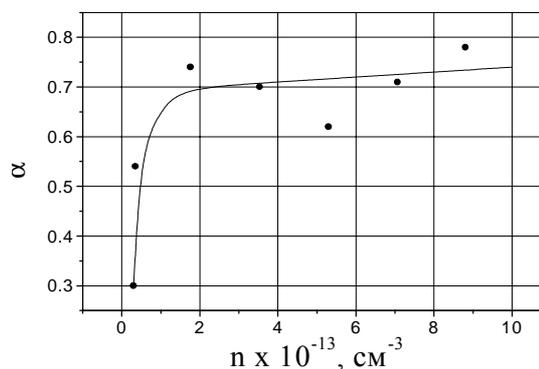


Рис. 6

IV. Выводы

Из зависимостей на рис. 5 и 6 следует однозначный вывод о том, что решающее значение для наращивания величины коммутируемого тока имеет создание и достижение условий равномерного распределения плотности плазмы в разрядном промежутке, к чему приводит увеличение количества плазменных пушек ($4 \rightarrow 12$), т.е. количества инжектируемой извне плазмы (кривые 1 и 2 рис. 4), напуск аргона в камеру ПКТ (кривые 3 и 2, 3 и 1 рис. 4) или увеличение плотности остаточных газов в разрядном зазоре (рис. 5).

V. Список литературы

1. В.Г.Артюх, Е.И.Скибенко, Ю.В.Ткач, В.Б.Юферов. Исследования сильноточного плазменного коммутатора. Препринт ХФТИ 89 – 28, Харьков, 1989, с. 12.
2. В.Г.Артюх, Е.И.Скибенко, Ю.В.Ткач, В.Б.Юферов. Плазменно-вакуумные характеристики быстродействующего коммутатора тока. Препринт ХФТИ 94 - 12, Харьков, 1994, с. 8.