

УДК 621.384.647

ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ НАНОСЕКУНДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С СОГЛАСУЮЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман, В.В. Ежов, Д.В. Гончаров, В.С. Лопатин,
А.В. Степанов, В.А. Макеев, В.И. Гусельников, Цзень Фень Ли

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета
E-mail: stepanov@hvd.tpu.ru

Представлена конструкция наносекундного генератора напряжения с использованием повышающего трансформатора и принудительным размагничиванием сердечника перед формированием импульса напряжения. На базе разработанного генератора создан источник наносекундного электронного пучка с параметрами: кинетическая энергия электронов 450...500 кэВ, ток пучка 6 кА, длительность импульса на полувысоте 60 нс. Генератор использовался также для формирования импульсного ионного пучка с параметрами: плотность ионного тока ~ 600 А/см², плотность энергии ~ 11 Дж/см², потенциал на аноде 300...350 кВ. В работе описана конструкция ионного диода без устройства предварительной наработки плазмы.

Введение

Сильноточные электронные пучки наносекундной длительности, с токами более 5 кА, энергией в сотни кэВ представляют интерес для прикладных исследований в области радиационной химии, плазмохимии, генерации мощного СВЧ-излучения и др. [1]. Импульсные ионные пучки используются для модификации и упрочнения поверхностного слоя режущих инструментов, подготовки поверхности для нанесения износостойких покрытий.

В сильноточных импульсных ускорителях электронов и ионов для формирования ускоряющего напряжения чаще всего используются генераторы наносекундного напряжения с одинарными и двойными формирующими линиями (ДФЛ) на деионизированной воде, трансформаторном масле или сжатом газе [1]. Для генерации пучков с энергией более 100 Дж предпочтительно использование ДФЛ на деионизированной воде. Высокая диэлектрическая проницаемость воды обеспечивает значительное снижение габаритов формирующей линии и ускорителя в целом. Но волновое сопротивление ДФЛ на основе деионизированной воды менее 10 Ом и возникает проблема согласования ДФЛ с диодом, импеданс которого значительно больше волнового сопротивления линии. В работе [2] предложено использовать для согласования повышающий трансформатор. Но авторы отмечают, что на нагрузке трансформатора (диоде) во время зарядки ДФЛ происходит формирование импульса напряжения (предимпульса), достигающего 50 % амплитуды основного импульса. Появление предимпульса напряжения на диоде сильноточного электронного ускорителя приводит к развитию взрывной эмиссии на катоде и заполнению плазмой промежутка анод-катод до начала формирования электронного пучка. При формировании рабочего импульса напряжения на диоде происходит контрагирование электронного пучка и затем возникновение дугового разряда ДФЛ. При этом происходит сильная эрозия материала тонкой анодной фольги, приводящая к ее разрушению, что снижает ресурс работы ускорителя. Для уменьшения амплитуды предимпульса при использовании согласую-

щего (авто)трансформатора в начале цикла формирования ускоряющего импульса напряжения применено принудительное размагничивание ферромагнитного сердечника [3–5].

1. Импульсный сильноточный электронный ускоритель

Ускоритель формирует пучок электронов с энергией в импульсе 150...200 Дж, кинетической энергией электронов 450...500 кэВ и длительностью импульса на полувысоте 60 нс. На рис. 1 приведена схема ускорителя.

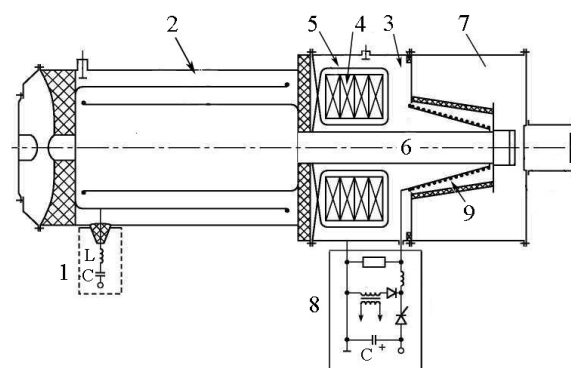


Рис. 1. Схема ускорителя: 1) генератор импульсного напряжения Аркадьева-Маркса, 2) ДФЛ, 3) маслонаполненная камера, 4) согласующий (авто)трансформатор, 5) витки размагничивания, 6) катододержатель, 7) диодная камера, 8) блок размагничивания, 9) защитная индуктивность

Газонаполненный генератор импульсного напряжения (ГИН) – 1 собран по схеме Аркадьева-Маркса и содержит семь ступеней конденсаторов К75–74 (40 кВ, 47 нФ) по два в каждой ступени. Разрядник первой ступени выполнен с тригatronным поджигом. Собственная индуктивность ГИНа 2,4 мкГн, ударная емкость 13,4 нФ. ДФЛ – 2 на основе деионизированной воды имеет электрическую длину 30 нс, емкость каждой линии 6,5 нФ, волновое сопротивление ДФЛ ~ 10 Ом. Суммарная емкость ДФЛ незначительно отличается от ударной емкости ГИНа, что обеспечивает оптимальные условия передачи энергии из ГИНа в ДФЛ.

В камере – 3 с трансформаторным маслом помещен согласующий (авто)трансформатор – 4, который содержит четыре кольцевых сердечника K360×150×25 из пермаллоевой ленты 50НП×0,01. Вокруг сердечников (в поперечном сечении магнитопровода) уложено 12 одиночных витков – 5, которые одним концом равномерно (в плоскости сердечников) распаяны к внутренней формирующей линии. Другой конец витков – 5 электрически соединен с корпусом камеры – 3. К промежутку анода-катод диода дополнительно к виткам трансформатора подключен виток, образованный катододержателем – 6, корпусами камеры – 3 и диодной камерой – 7 ускорителя. Таким образом, диод оказывается включенным по автотрансформаторной схеме с повышением напряжения в 2 раза относительно выходного напряжения ДФЛ. Использование такой трансформаторной схемы обеспечивает увеличение в 4 раза выходного сопротивления наносекундного генератора (ДФЛ+трансформатор) по отношению к волновому сопротивлению ДФЛ. Секционирование сердечника на четыре кольца позволяет снизить напряжение на межвитковой изоляции в сердечнике (MgO, нанесенный методом катодореза), и для лент толщиной 10 мкм обеспечивает коэффициент заполнения 0,72...0,80. Экспериментально измеренные потери при размагничивании пермаллоевой ленты 50НП×0,01 с размахом индукции 2,5 Тл за время 100 нс лежат в пределах 2...3 мДж/см³ и при объеме ферромагнитного сердечника 6 дм³ составляют 12...18 Дж.

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения, формируемого ГИном $U_{\text{гин}}$, и напряжения на нагрузке наносекундного генератора $U_{\text{д}}$.

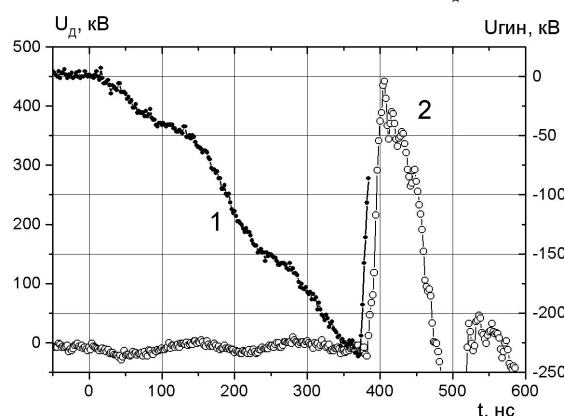


Рис. 2. Осциллограммы напряжения, формируемого: 1) ГИном, 2) наносекундным генератором

Амплитуда предимпульса, формируемого в течение зарядки ДФЛ (интервал времени 0...380 нс на рис. 2), определяется начальным магнитным состоянием сердечника трансформатора. Насыщенное состояние трансформатора задается током, формируемым блоком размагничивания – 8. Ток протекает по цепи: защитная индуктивность – 9, катододержатель – 6 и витки – 5 при разряде конденсатора в блоке размагничивания. Величина энергии, запасаемой в конденсаторе, равна ~23 Дж.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды предимпульса от величины тока размагничивания.

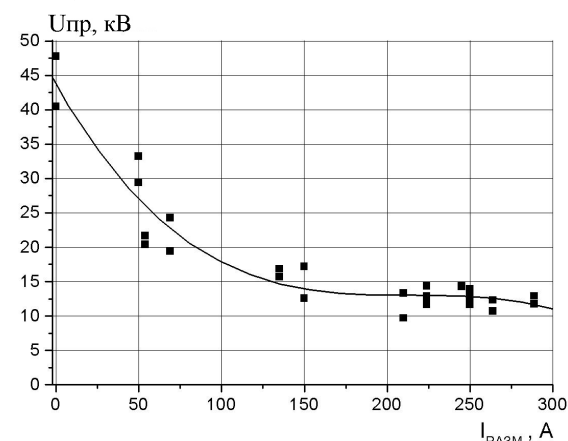


Рис. 3. Зависимость амплитуды предимпульса $U_{\text{пр}}$, формируемого наносекундным генератором, от тока размагничивания

Индуктивность параллельно соединенных витков размагничивания при насыщении сердечника трансформатора составляет ~0,05 мкГн и значительно меньше индуктивности ГИН (2,4 мкГн). Поэтому индуктивное падение напряжения на витках трансформатора с насыщенным сердечником мало и амплитуда предимпульса напряжения на диоде не превышает 2...3 % от амплитуды основного импульса напряжения. Таким образом, предимпульс не приводит к появлению взрывоэмиссионной плазмы в зазоре диода.

Разработанный наносекундный генератор обеспечивал стабильную работу в режиме генерации электронного тока. Были выполнены исследования стабильности работы ускорителя на частоте 5 Гц в течение 1,5 мин. Осциллограммы напряжения, формируемого ГИном и наносекундным генератором, снимали с осциллографа Tetronix TDS5035 на видеокамеру. Затем измеряли максимальное напряжение каждой осциллограммы и заносили в таблицу. На рис. 4 приведены гистограммы напряжения, формируемого ГИном, и напряжения на диоде, имеющие амплитуду: $U_{\text{гин}}=240\pm 1,2\%$ кВ и $U_{\text{д}}=455\pm 5,3\%$ кВ.

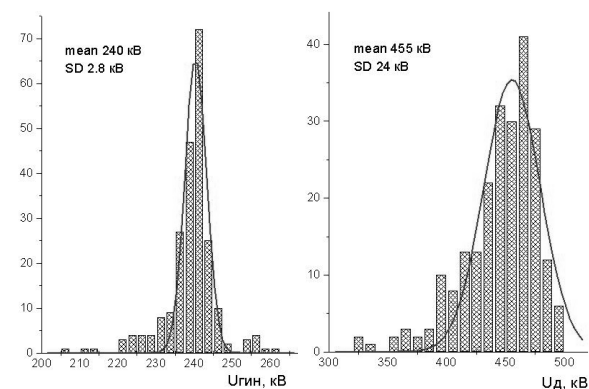


Рис. 4. Гистограммы напряжения, формируемого генератором импульсного напряжения $U_{\text{гин}}$ и напряжения на диоде $U_{\text{д}}$. Частота 5 Гц. Аппроксимация гистограммы законом Гаусса

Для анализа эффективности преобразования энергии в таблице приведены значения энергии в импульсе в различных узлах электронного ускорителя. Здесь НСГ1 соответствует полной выходной энергии наносекундного генератора, а НСГ2 – выходной энергии наносекундного генератора в течение основного импульса. Из таблицы видно, что использование трансформатора позволило значительно повысить эффективность работы наносекундного генератора и ускорителя в целом. При согласовании взрывоэмиссионного диода и формирующей линии с помощью трансформатора с принудительным размагничиванием 90...95 % энергии, подводимой к диоду, выделяется в течение основного импульса. В случае отсутствия принудительного размагничивания на формирование основного импульса расходуется не более 65 % энергии, накопленной в ДФЛ. Дальнейшее снижение потерь энергии и повышение КПД ускорителя (отношение энергозапаса ГИНа к энергии электронного пучка в импульсе) возможно при использовании разрядника формирующей линии с внешним запуском. Это снизит потери энергии из-за срабатывания разрядника не при максимальном напряжении. Применение согласующего трансформатора позволило работать с катодом диаметром 60 мм и зазором анод-катод 15...18 мм без формирования взрывоэмиссионной плазмы предимпульсом напряжения при давлении 0,1...0,01 Па.

Таблица. Распределение энергии в импульсе в узлах электронного ускорителя, Дж

Ускоритель	ГИН	ДФЛ	НСГ1	НСГ2	Электронный пучок
без трансформатора	380±10	290±10	90±5	58±5	15±2
с трансформатором	380±10	290±10	260±5	250±5	180±5

Применение принудительного размагничивания ферромагнитного сердечника позволило повысить стойкость анодной фольги, снизить отрицательное влияние предимпульса, и обеспечить вывод более 10^4 импульсов электронного пучка через алюминиевую фольгу толщиной 130 мкм, лежащую на опорной решетке. Разработанный импульсный электронный ускоритель использовался при проведении исследований по плазмохимическому синтезу нанодисперсных оксидов [6, 7], конверсии галогенидов [8–10], пиролизу метана [11].

2. Импульсный сильноточный ионный ускоритель

Сильноточный ионный ускоритель содержит ионный диод и описанный выше наносекундный генератор напряжения с согласующим (авто)трансформатором. Был использован ионный диод с кольцевым анодом и внешним радиальным магнитным полем, создаваемым двумя концентрическими обмотками [12]. В диоде отсутствует устройство для предварительной наработки плазмы. Кон-

троль за параметрами работы ионного диода осуществлялся измерениями зарядного напряжения ДФЛ, импульсного напряжения с выхода наносекундного генератора и полного тока диода. Для измерения плотности ионного тока, определения энергии ионов методом измерения времени пролёта заданного расстояния, и определения момента времени старта ионов с анода использовались коллимированные цилиндры Фарадея с магнитной отсечкой электронов, устанавливаемые на расстояниях от 5 до 30 см от среза анода. Для измерения полной энергии и плотности энергии ионного пучка использовались два медных калориметра. Первый имел центральное отверстие. Вторым калориметром измерялась энергия ионного пучка, прошедшая сквозь отверстие первого калориметра.

На рис. 5 приведена схема диодного узла ионного ускорителя. Ионный диод содержит кольцевой анод – 1 и два кольцевых конусообразных катода – 2 и 3. Анод подключен к высоковольтному выводу ускорителя через разделительный разрядник на скользящем разряде. Анод изготавливался из алюминия или меди (из материала с высокой проводимостью), внешний радиус кольца $R_1=75$ мм, внутренний $R_2=55$ мм. Рабочая поверхность анода имеет кольцевые канавки, залитые диэлектриком (полиэтилен или эпоксидный компаунд).

Катоды расположены на диэлектрических каркасах – 4 и 5, внутри которых размещены электрические обмотки. Внешняя обмотка последовательно соединена с внутренней и другим выводом подключается к импульсному источнику питания. Катодная система укреплена на диске – 6 с юстировочными устройствами. Внутренний катод – 2 центрируется относительно внешнего катода тремя шпильками, в одной из которых размещен проводник для питания внутренней обмотки. Катоды выполнены из стали 1Х18Н9Т толщиной 0,8 мм. Относительно рабочей поверхности анода кромки внешнего и внутреннего катодов располагались на расстоянии $4,2\pm 0,1$ и $6,5\pm 0,1$ мм соответственно.

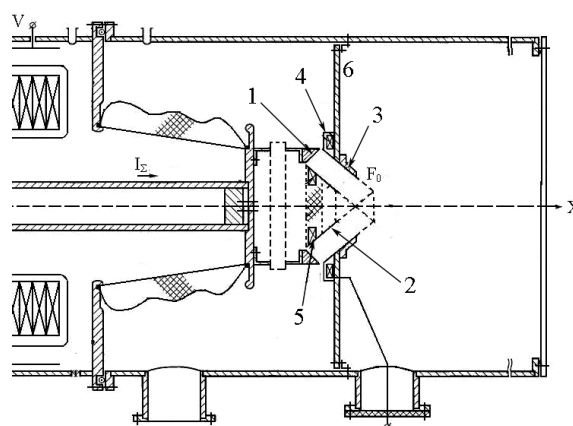


Рис. 5. Функциональная схема диодного узла ускорителя: 1) анод; 2) внутренний и 3) внешний конусообразные катоды; 4) внешний и 5) внутренний каркасы; 6) катодный диск

На рис. 6 приведена геометрия промежутка анод-катод ионного диода.

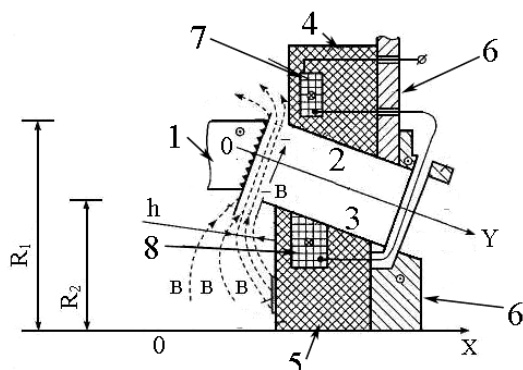


Рис. 6. Конструкция ионного диода: 1–6) обозначения см. рис. 5; 7) внешняя и 8) внутренняя обмотки

Распределение магнитного поля должно быть таким, чтобы для замагниченных электронов поверхности равного потенциала магнитного поля совпадали с эквипотенциальными поверхностями электрического поля при ускорении ионов в диоде. Конфигурация магнитных силовых линий в зазоре анод-катод определяется геометрией обмоток – 7 и 8 (рис. 6) и токами проводимости, наводимыми в проводящем материале анода и металлических частях катодного узла. Магнитное поле требуемой конфигурации в зазоре диода получается, если векторный магнитный потенциал обмоток на оси OX одинаков. Это выполняется, когда число витков W и радиусы центров витков обмоток R связаны соотношением $W_1 \cdot R_1 = W_2 \cdot R_2$. Фланцы катодного диска 6 экранируют магнитный поток в области транспортировки ионного пучка и улучшают условия компенсации объемного заряда ионов медленными электронами.

Перед формированием рабочего импульса в ионном диоде насыщенное состояние сердечника согласующего трансформатора устанавливается импульсом тока блока размагничивания. Одновременно подается импульс напряжения на обмотки – 7 и 8. При достижении максимального значения магнитного поля в зазоре диода запускается наносекундный генератор импульсного напряжения, который формирует рабочий импульс напряжения на аноде. На фронте импульса напряжения происходит взрывная эмиссия электронов с острых кромок катодов – 2 и 3.

Электрическое поле E у кромок катодов имеет перпендикулярную составляющую E_{\perp} к силовым линиям магнитного поля и параллельную E_{\parallel} , причём последняя направлена к оси OY с кромок обоих катодов. Для напряжения ~ 300 кВ, зазора $d \approx 5$ мм средняя напряжённость E_{\perp} равна 60 кВ/мм и при индукции $B \approx 0,8$ Тл средняя скорость дрейфового движения равна $7 \cdot 10^7$ м/с. Электроны в дрейфовом движении за время наработки плазмы ($t_0 \dots t_2$ на рис. 7) могут совершить почти два полных оборота у поверхности анода вокруг оси OX . Траектория движения электронов в анод-катодном зазоре представляет собой трохоиду.

Высота h трохоиды дрейфового движения электронов, направленного по оси OY в сторону поверхности анода, равна $\approx 1,06$ мм. Высота трохоиды пропорциональна E_{\perp} и зависит от продольной составляющей электрического поля E_{\parallel} . Продольная составляющая, действующая на электроны у кромок катодов, сообщает радиальный дрейф электронов к оси OY и начальный разброс направления движения электронов относительно вектора силовых линий магнитного поля. Поэтому величина h может изменяться от нулевого значения до $\sim 4,3$ мм.

До момента времени t_2 ионный ток отсутствует. Напряжение в диоде растёт в режиме холостого хода. Когда напряжённость электрического поля достигает некоторого порогового значения, электроны, дрейфующие по силовым линиям магнитного поля, вершинами трохоид начинают достигать поверхности анода и формировать плазму из диэлектрика и металла анода. При этом электроны достигают поверхности анода, имея максимальную скорость.

Объёмная плотность заряда во вращающемся «электронном диске» определяется потенциалом анода и равна $\rho = 0,1$ Кл/м³. Объёмный заряд снижает напряжённость электрического поля в области дрейфа электронов и усиливает её перед анодом, так что формируется ионный диод с малым расстоянием анод-катод и высоким потенциалом, что и обеспечивает высокие плотности ионного тока.

Косвенно высоту трохоиды h дрейфового движения электронов можно оценить по следу, остающемуся на поверхности внутреннего диэлектрического каркаса – 5, ширина которого составляет $\sim 3,5$ мм. Аппроксимируя радиальный размер этого следа по силовым линиям магнитного поля, можно оценить h в 0,5...0,7 мм, что соответствует напряжённости электрического поля $\sim 20 \dots 30$ кВ/мм в области, занятой дрейфующими электронами. Электроны, попадая на поверхность каркаса – 5, имеют энергию < 30 кэВ, и их заряд стекает по поверхности на катод – 2. Отметим, что взрывная эмиссия идёт в основном с кромок катода – 2, имеющего надёжный токовый контур через диск – 6 и наименьший зазор. Дрейфовое движение ионного пучка проявлялось в следах ионных струй на поверхности катодов, которые имеют винтовую структуру с большим шагом.

Типичные эпюры напряжения наносекундного генератора, полного тока ускорителя и ионного тока в зазоре диода в согласованном режиме, привязанные во времени к напряжению, показаны на рис. 7. Полный ток диода состоит из тока ионного пучка и токов потерь. Токи потерь – это ток эмиссии электронов с кромок катодов – 1 и 2, ионизация остаточного газа, ток эмиссии электронов с фланцев – 8, 9. Доля тока ионного пучка составляет 60 % от полного тока ускорителя.

Для указанной геометрии на рис. 6 требовалось магнитное поле $\sim 0,8$ Тл, которое обеспечивала конденсаторная батарея ёмкостью 20 мкФ при напряжении 6 кВ. При значении магнитного поля в

зазоре анод-катод менее 0,64 Тл ускоритель работал в режиме, близком к короткому замыканию, и импеданс диода в течение импульса резко уменьшался. В свободном от проводящих поверхностей пространстве обмотки 7 и 8 обеспечивали магнитное поле не более 0,4 Тл. Применение сжатия магнитного потока индуцированным током в приповерхностном слое анода увеличивало поле в зазоре у поверхности анода вдвое. Ионный диод удовлетворительно работал, если остаточное давление не превышало $1,5 \cdot 10^{-4}$ Па.

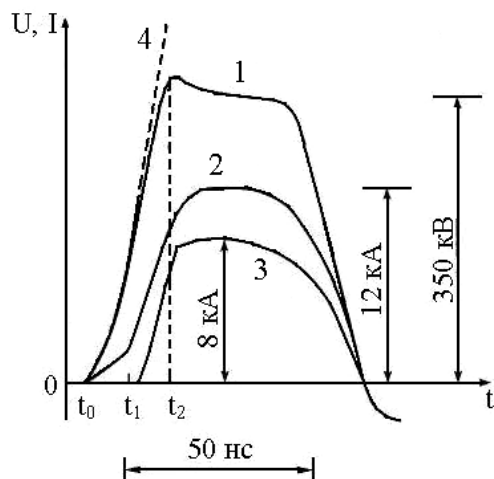


Рис. 7. Эпюры в согласованном режиме: 1) напряжения на выходе наносекундного генератора, 2) полного тока ускорителя, 3) ионного тока, 4) напряжение холостого хода. Магнитная индукция в зазоре 0,8 Тл

При зарядном напряжении ДФЛ 165 кВ энергия, запасаемая в формирующих линиях, составляла ~ 180 Дж. Энергия в импульсе, формируемом наносекундным генератором (интеграл произведения напряжения на полный ток в нагрузке генератора), составляла 150 Дж. Ионный пучок при этом имел энергию 80 ± 5 Дж в импульсе. В плоском варианте плотность тока в кольцевом цилиндрическом пучке составляла ~ 100 А/см². При этом площадь анода равнялась 80 см². В конусном варианте, используя баллистическую фокусировку в фокусе пятна F_0 , рис. 5, диаметром ~ 40 мм получена плотность ион-

ного тока ~ 600 А/см² при плотности энергии ионного пучка ~ 11 Дж/см². Этой плотности тока было достаточно для получения абляционной плазмы и осаждения плёнок на подложках из различных материалов. Для этого распыляемый материал помещался в фокусе F_0 , а подложка укреплялась на торце катодного диска – 6.

Разработанные конструкции ионного диода и наносекундного генератора с (авто)трансформатором при оптимальной величине магнитного поля 0,8 Тл обеспечили согласование волнового сопротивления формирующих линий и импеданса ионного диода. Энергия формирующих линий выделялась в первом импульсе (КПД свыше 95 %), и отсутствовали паразитные импульсные колебания, что и определило ресурс работы ионного диода больше 10^3 импульсов. Использование баллистической фокусировки в сходящемся ионном пучке позволило получить плотность ионного тока в фокусе до 600 А/см² при КПД диода ~ 60 %, потенциале на аноде ~ 330 кВ и длительности импульса напряжения на полувысоте 60 нс.

Заключение

Разработана конструкция наносекундного генератора с согласующим (авто)трансформатором и принудительным размагничиванием сердечника перед формированием импульса напряжения, которая обеспечила оптимальные условия для работы электронного диода с планарным взрывоэмиссионным катодом и кольцевым ионным диодом. Нагрузочная характеристика наносекундного генератора позволила формировать импульсный электронный и ионный пучки с высоким КПД при изменении геометрических размеров диодов.

На базе разработанного генератора создан источник наносекундного электронного пучка с кинетической энергией электронов 450...500 кэВ, током пучка 6 кА, длительностью импульса на полувысоте 60 нс. Генератор использовался также для формирования импульсного ионного пучка с плотностью ионного тока ~ 600 А/см², плотностью энергии ~ 11 Дж/см², потенциалом на аноде 300...350 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Быстрицкий В.М., Иванов И.Б., Красик Я.Е. и др. Исследования работы наносекундного сильноточного ускорителя с индукторной секцией // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 5. – С. 122–128.
3. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 130–134.
4. Remnev G.E., Furman E.G., Pushkarev A.I., Kondratiev N.A., Goncharov D.V. High-current pulsed accelerator with matched transformer: construction and exploitation characteristics // IEEE Transactions on fundamentals and materials. – 2004. – V. 124. – № 6. – P. 491–495.

5. Пат. на ПМ 41951 РФ. МПК⁷ H05H 5/08. Импульсный электронный ускоритель / Д.В. Гончаров, Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман. Заявлено 15.06.2004, Опубл. 10.11.2004, Бюл. № 31.
6. Пат. 2264888 РФ. МПК⁷ B22F 9/28. Способ получения нанодисперсных порошков оксидов / Д.В. Пономарев, А.И. Пушкарев, Г.Е. Ремнев. Заявлено 24.12.2003, Опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.
7. Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И. Синтез наноразмерного диоксида кремния в цепном плазмохимическом процессе // Химия высоких энергий. – 2004. – Т. 37. – № 5. – С. 391–392.
8. Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Власов В.А., Сосновский С.А., Ежов В.В. Плазмохимические процессы, инициируемые импульсным электронным пучком в газовой смеси SF₆ и N₂ // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 59–62.

9. Власов В.А., Пушкарев А.И., Ремнёв Г.Е., Сосновский С.А., Ежов В.В., Гузеева Т.И. Экспериментальное исследование и математическое моделирование восстановления фторидных соединений импульсным электронным пучком // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 5. – С. 89–93.
10. Пат. 2228239 РФ. МПК⁷ C22B 5/00, C21B 13/00. Способ прямого восстановления галогенидов / Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, М.А. Пушкарев, В.А. Красильников, Т.И. Гузеева. Заявлено 04.02.2002, Опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13.
11. Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Ежов В.В. Неравновесная плазмохимическая конверсия метана // Горение и плазмохимия: Сб. трудов III Междунар. Симп. – Алматы, 2005. – С. 157–161.
12. Лопатин В.С., Ремнёв Г.Е., Фурман Э.Г., Макеев В.А., Степанов А.В. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 4. – С. 70–75.

УДК 533.95,538.4

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Д.Ю. Герасимов, А.А. Сивков, А.С. Сайгаш, Р.Р. Шарипов, С.И. Привезенцев

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета

E-mail: SivkovAA@mail.ru

Показана возможность управления величиной электроэрозионного износа поверхности ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя и наработки рабочего материала, для нанесения покрытий. Управление производилось за счет изменения проникания внешнего аксиального магнитного поля во внутрь ускорительного канала. При этом динамические параметры импульсной плазменной струи на срезе ствола ускорителя остаются практически без изменения.

В гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе (КМПУ), рис. 1, использование внешней индукционной системы (индукционной электродинамики) обеспечивает повышение динамических параметров и эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемой массы [1]. В основном это обусловлено повышением пространственно-временной стабильности устойчивого состояния плазменной структуры (ПС) сильноточного разряда типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой за счет дополнительного сжатия аксиальным полем соленоида внешней индукционной системы, повышения плотности тока и, следовательно, увеличения силы Лоренца и эффективности ее работы в коаксиальной магнитоплазменной системе, аналогичной коаксиальному рельсотрону [2]. КМПУ относится к типу эрозионных ускорителей плазмы и является основой разрабатываемой технологии нанесения покрытий [3, 4], посредством воздействия на поверхность подложки гиперзвуковой струи плотной электроэрозионной плазмы. В работах [5, 6] показано, что величина удельного интегрального электроэрозионного износа $\Delta m/W$ (Δm – эродированная масса, W – подведенная к ускорителю энергия) пропорциональна величине удельной подведенной энергии W/V (V – объем ускорительного канала).

Вполне оправдано предположить, что величина аксиального внешнего магнитного поля (ВМП), проникающего в ускорительный канал (УК) в зависимости от степени его экранирования цилиндрической металлической стенкой ствола, должна оказывать влияние не только на динамические характеристики плазменного течения, но и на электроэ-

розионный процесс на поверхности УК в силу изменяющейся плотности тока в ПС и особенностей ее динамики [7].

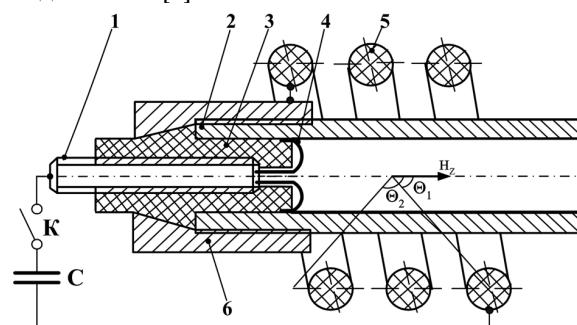


Рис. 1. Конструкция коаксиального магнитоплазменного ускорителя: 1) центральный электрод; 2) электрод-ствол; 3) изолятор центрального электрода; 4) электровзрывающиеся проводники; 5) соленоид; 6) заглушка

По-сути, рассматриваемая схема представляет собой воздушный трансформатор, в котором первичной обмоткой является соленоид, а вторичной – короткозамкнутый виток стенки ствола, в котором наводится поперечный ток пропорциональный производной импульсного рабочего тока $I(t)$ ускорителя, протекающего по соленоиду. Поэтому, проникающее в УК ВМП представляет собой суперпозицию поля соленоида и поля, наведенного в стенке ствола поперечного тока. Характер изменения и величина этого тока определяются не только параметрами импульса первичного тока, геометрии системы, но и постоянной времени поперечника стенки ствола (короткозамкнутого витка) – τ , шириной, равной длине соленоида.