

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПУЧКА

Интерес к разработке и исследованию сильноточных релятивистских ускорителей вызван многими причинами: электронные пучки при взаимодействии с плазмой генерируют широкий спектр высокочастотных колебаний; энергия электронных пучков может быть применена для создания активных сред лазера коротковолнового излучения, для осуществления инерционного нагрева дейтериево-тритиевой мишени до термоядерных температур и т.п. Широкое распространение получили методы создания низкоиндуктивных генераторов высоковольтных импульсных напряжений для ускорения многоамперных электронных пучков [1- 6].

Нами проведены разработка, расчет и исследование импульсного сильноточного ускорителя релятивистских электронных пучков (СРЭП) с целью их использования для решения ряда проблем в области сильноточной электроники и технологии.

Ускоритель СРЭП предназначен для формирования и транспортировки электронных пучков с энергией электронов до 500 кэВ при силе тока до 20 кА с длительностью импульса до 80 нс. Ускоритель импульсных СРЭП представляет собой коаксиальную водяную линию, заряжаемую от генератора импульсных напряжений (ГИН). Нагрузкой линии служит электронная пушка с холодным катодом, подключаемая к линии с помощью водяного разрядника. Основными функциональными узлами и системами ускорителя являются: высоковольтный выпрямитель; зарядное устройство линии; формирующая линия; система вакуумирования; высоковольтные и рентгеновские системы защиты; пульт управления ускорителем; система очистки воды.

Высоковольтный выпрямитель, предназначенный для зарядки емкостных накопителей ГИН, выполнен на базе высоковольтного трансформатора ТВО - 140 - 50, цепочки диодов Д 1000, собранной по однополупериодной схеме. Основные параметры выпрямителя: номинальное напряжение 50 кВ; максимальное напряжение 140 кВ; номинальная потребляемая мощность 2 кВт.

цепь ГИН при большом числе последовательно соединенных конденсаторов C после срабатывания искровых разрядников можно рассматривать, в соответствии с [5], как линию с равномерно распределенными вдоль нее источниками напряжения, индуктивностью и паразитными емкостями относительно земли и между элементами линий.

В данном генераторе используется десять ступеней, которые обеспечивают ГИН следующие параметры: номинальное напряжение 300 ... 500 кВ; максимальное напряжение 800 кВ; запасаемую энергию 500 ... 1500 Дж.

Зарядка ГИН реализуется через индуктивность 5 мкГн. Так как емкость формирующей линии в три раза меньше ударной емкости ГИН, напряжение на линии в 1,5 раза превышает выходное.

Все разрядники ГИН воздушные, управление моментом поджига разрядника производится с помощью блока поджига, формирующего однополярные импульсы напряжения длительностью 10 мкс с передним фронтом 2 мкс и амплитудой 18 кВ. Запуск блока поджига может быть осуществлен от внешнего источника синхроимпульсов. Амплитуда внешнего запускающего импульса достаточна для срабатывания тиратрона и находится в пределах 50 ... 100 В при длительности 3 ... 5 мкс. Для получения коротких низкоимпедансных пучков с быстрым нарастанием тока применялась схема, в которой ГИН служит для зарядки формирующей линии.

Формирующей является одинарная коаксиальная линия; в качестве диэлектрика использована дистиллированная вода. Электрические параметры формирующей линии определяются ее геометрией и свойствами выбранного диэлектрика. Для данной формирующей линии импеданс описывается выражением

$$z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right),$$

где b , a — радиусы внешнего и внутреннего электродов, а длительность импульса 2τ — выражением

$$\tau_p = 2l\sqrt{\epsilon}/c,$$

где l — длина коаксиальной линии; ϵ — диэлектрическая проницаемость; c — скорость света.

Радиусы a и b выбираются в зависимости от желаемого импеданса линии, зарядного напряжения и ограничений, связанных с воз-

никновением электрического пробоя. Напряженность пробоя электрического поля для воды можно выразить соотношением

$$E_{np} = K / t_{эф}^{1/3} A^{1/10},$$

Здесь K — постоянная, $K = 0,3 \dots 0,6$ в зависимости от полярности напряжения; $t_{эф}$ — время, за которое напряженность электрического поля изменяется от $0,65$ до E_{np} ; A — площадь электрода, на которой изменение электрического поля не превышает 10% максимального значения, $см^2$.

Для эффективной отдачи энергии формирующей линии в электронный пучок вакуумный диод соединяется с линией через водяной разрядник. Формирующая линия имеет следующие параметры: длину 1300 мм; диаметр внешней обкладки 150 мм; диаметр внутренней обкладки 50 мм; запасаемую энергию $250 \dots 700$ Дж; диапазон срабатывания коммутатора $300 \dots 500$ кВ.

Все элементы линии, соприкасающиеся с водой, выполнены из нержавеющей стали и отполированы. Коммутация энергии линии в нагрузку осуществляется с помощью водяного неуправляемого разрядника, длина разрядного канала которого может плавно регулироваться в пределах $10 \dots 35$ мм, что позволяет изменять напряжение на нагрузке в диапазоне $200 \dots 500$ кВ.

Для предотвращения загрязнения всего объема воды из-за эрозии электродов коммутирующего разрядника зарядная камера отделена шайбой из оргстекла, которая, кроме того, является центрирующей. Шайба расположена в кармане, образованном фланцами формирующей линии и пушки. Такая конструкция может обеспечить высокую электрическую прочность, поскольку напряженность электрического поля внутри кармана уменьшается в несколько раз.

Импульс ускоряющего напряжения, полученный от формирующей линии, подается на электронную пушку ускорителя. Разработанная электронная пушка содержит два основных элемента: изолятор и высоковольтный вакуумный диод, предназначенный для преобразования мощных коротких импульсов напряжения, создаваемых на выходе формирующей линии, в полезные пучки частиц. Вакуумный изолятор состоит из набора диэлектрических, выполненных из оргстекла изоляционных колец, чередующихся с кольцами из алюминия. Металлические кольца позволяют более равномерно распределить напряжение в диоде по длине изолятора и тем самым затрудняют развитие поверхностного пробоя.

Для случая коротких импульсов средняя по поверхности изолятора напряженность электрического поля, при которой возникает поверхностный пробой в вакууме, описывается эмпирическим выражением [5]

$$\langle E_{np} \rangle = 175 / t^{1/6} A^{1/10},$$

где E_{np} — напряженность пробоя, кВ/см; t — время, в течение которого $0,9 < E_{np}$; A — площадь изолятора, см².

Высоковольтный диод электронной пушки определяет ресурс непрерывной работы всего ускорителя, так как подвержен сильному разрушению в процессе эксплуатации. Экспериментальные исследования показывают, что на автоэлектронном эмиттере диода при предельной плотности тока происходит взрывное разрушение острия собственными токами автоэлектронной эмиссии. Явление сопровождается возрастанием силы тока на два-три порядка, разлетом образованной плазмы и усилением эмиссии электронов с фронта плазмы. Соотношение между плотностью тока J (в присутствии объемного заряда в плоском диоде), электродным расстоянием d и ускоряющим напряжением U находится из закона Чайлда — Ленгмюра [6; 7]:

$$J = 2,33 * 10^{-6} U^{3/2} d^{-2}.$$

Оно справедливо для нерелятивистских скоростей электронов. Отклонение от закона из-за релятивистских эффектов в нашем случае составило около 10 %.

Применение многоострийных катодов обеспечивает возможность согласования импедантов электронной пушки и формирующей линии, что важно для передачи максимальной энергии в электронный пучок.

Конструкция электронной пушки позволяет менять в процессе эксперимента расстояние анод-катод в пределах 10 ... 35 мм и использовать электроды различной формы. Возможность регулировки межэлектродного расстояния позволяет в достаточно широких пределах варьировать импеданс пушки. В качестве эмиттера были применены плоские, конусообразные, острийные и многоострийные катоды. Конструкция анодного узла предусматривает возможность использо-

вания в качестве анода плоских поверхностей, выполненных из титановых, алюминиевых фольг; применялись также алюминированная майларовая пленка и другие мембраны, предназначенные для вывода электронного пучка в область его использования.

Напряжение на электронной пушке диодного типа, измеряется двухступенчатым резистивным делителем напряжения, подключенным непосредственно к катодному электроду, а сила тока пучка измеряется с помощью цилиндра Фарадея, установленного в анодном блоке, а также с помощью низкоиндуктивного шунта.

Основные параметры электронной пушки, работающей в режиме взрывной эмиссии, следующие: геометрия пучка цилиндрическая; диаметр выходного окна 43 мм; толщина выходной мембраны 45 мм; рабочее давление в пушке 0,4 мПа; частота импульсов 1/350 с.

В процессе эксплуатации ускорителя периодически возникает необходимость очистки воды, используемой в качестве диэлектрика. Система очистки позволяет получить воду с удельным сопротивлением порядка 10^7 Ом/см. Глубокая очистка воды осуществляется пропуском ее через ионитные смолы амберлита Варион АД, обладающие высокими скоростями обмена.

Вакуумная система для откачки электронной пушки состоит из механического и диффузионного паромасляного насосов, азотно-водяной ловушки, запорной арматуры и вакуумно-измерительной аппаратуры.

В пульте управления генератором СРЭП размещены: блок управления выпрямителем; унифицированные блоки задержки; блок питания; приборы контроля и диагностики.

При создании экспериментального комплекса предусмотрена возможность управления генератором СРЭП из диагностического помещения с помощью панели дистанционного управления, на которой расположены прибор установки и контроля напряжения накопителя ГИН, кнопки управления выпрямителем и кнопка "Пуск". Посредством данных кнопок подается команда запуска блока поджига, а также осуществляется запуск регистрирующей аппаратуры с требуемой задержкой. Значение задержки можно изменить как дискретно, так и плавно в пределах 0,1 мкс ... 0,1 с благодаря использованию унифицированных блоков задержки.

В заключение следует отметить: опыт эксплуатации описанного сложного экспериментального стенда показал, что с его помощью можно решать широкий круг научных и технических задач.

Список литературы: 1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 277 с. 2. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 432 с. 3. Смирнов С.М.,

Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. М.: Энергия, 1964. 240 с.
4. *Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков* / Под ред. Г. А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1976. 192 с. 5. *Кремнев Р.В., Месяц Г.А., Насибов А.С.* Формирующие наносекундных импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1970. 152 с. 6. *Месяц Г.А., Литвинов Е.А.* О вольтамперной характеристике диода с острым катодом в режиме автоэмиссии // Изв. вузов. Физика. Томск, 1972. № 8. С. 158 - 160. 7. *Месяц Г.А., Литвинов Е.А., Шубин А.Ф.* Расчет термоэмиссии, предшествующей взрыву микроэммиттеров под действием импульсов автоэлектронного тока // Там же. 1970. № 4. С. 147 - 152.

*Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 17.04.97