

## ИМПУЛЬСНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ВЗРЫВНЫМ КАТОДОМ

*П. В. Кучинский, В. К. Гончаров, В. В. Макаров*

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Разработан сильноточный диодный плазменный ускоритель электронов, который позволяет получать токи пучка до 10 кА. Импульсный генератор напряжений до 500 кВ реализован по схеме Аркадьева-Маркса. Фокусировка электронного пучка осуществляется магнитной системой, которая позволяет формировать цилиндрические и точечные пучки электронов с энергией до 0.5 МэВ и длительностью около 1 мкс. Цилиндрический пучок сильноточных электронов может быть использован для генерации СВЧ-излучения, которое возникает при взаимодействии пучка со специально разработанным СВЧ-резонатором. Точечный пучок может быть использован для генерации рентгеновского излучения.

### Введение

Проблема создания потоков мощного электромагнитного излучения на основе малогабаритных источников сильноточных релятивистских пучков электронов уже многие десятилетия решается в крупнейших научных центрах, где внимание уделяется как мирным [1] так и военным целям [2]. При этом должны быть решены несколько задач: генерация импульса высокого напряжения [3–4], получение пучка сильноточных электронов и создание магнитной системы сопровождения данного пучка [5–6], расчёт и реализация черенковских генераторов [7], а также обеспечение синхронной работы всех этих узлов при наличии мощных электромагнитных помех.

### Генератор импульсных напряжений

Для получения импульсных напряжений амплитудой до 500 кВ используется классическая схема Аркадьева – Маркса (рис/ 1) [3].

Несколько конденсаторов (в общем случае  $n$ ) с емкостью  $C$  каждый соединяются параллельно и заряжаются от источника выпрямленного напряжения через сопротивления  $R$  до напряжения  $U$ . Если замкнуть одновременно все разрядники  $P$ , то конденсаторы  $C$  соединятся последовательно и на сопротивлении нагрузки  $R_n$  формируется импульс напряжения с амплитудой, близкой к  $nU$ . Сопротивления  $R$  служат также развязкой по импульс-

ному напряжению и выбираются исходя из условий  $RC > t_u$ , где  $t_u$  – длительность импульса напряжения. В свою очередь, длительность импульса  $t_u$  определяется величиной емкости в «ударе»  $C/n$  и сопротивлением нагрузки  $R_n$ .

Разработанный генератор импульсных напряжений (ГИН) по схеме Аркадьева – Маркса, включает 10 отдельных ячеек, состоящих из зарядных сопротивлений типа С5-40В-500 (1 кОм), высоковольтных конденсаторов типа Э13-50-0,25 (50 кВ), тригatronа (управляемого воздушного разрядника) и неуправляемых воздушных разрядников. Тригatron необходим для управляемого запуска ГИН от системы пуска, которая позволяет синхронизировать работу всех систем установки. Общая емкость ячейки составляет 1 мкФ. В этом случае «ёмкость в ударе» составляет 0,1 мкФ. Максимальное зарядное напряжение равно 50 кВ, а время заряда всех ячеек составляет 1 с.

Созданное устройство (рис. 2) позволяет получить максимальные импульсы напряжения с амплитудой 500 кВ и длительностью несколько мкс.

### Диодный ускоритель электронов

Диодный ускоритель сильноточных релятивистских пучков электронов состоит из источника питания, ГИН по схеме Аркадьева – Маркса и непосредственно вакуумного диода. Вакуумный диод представляет собой два расположенных в вакууме (вакуум до  $10^{-4}$  Па) электрода: катод и анод.

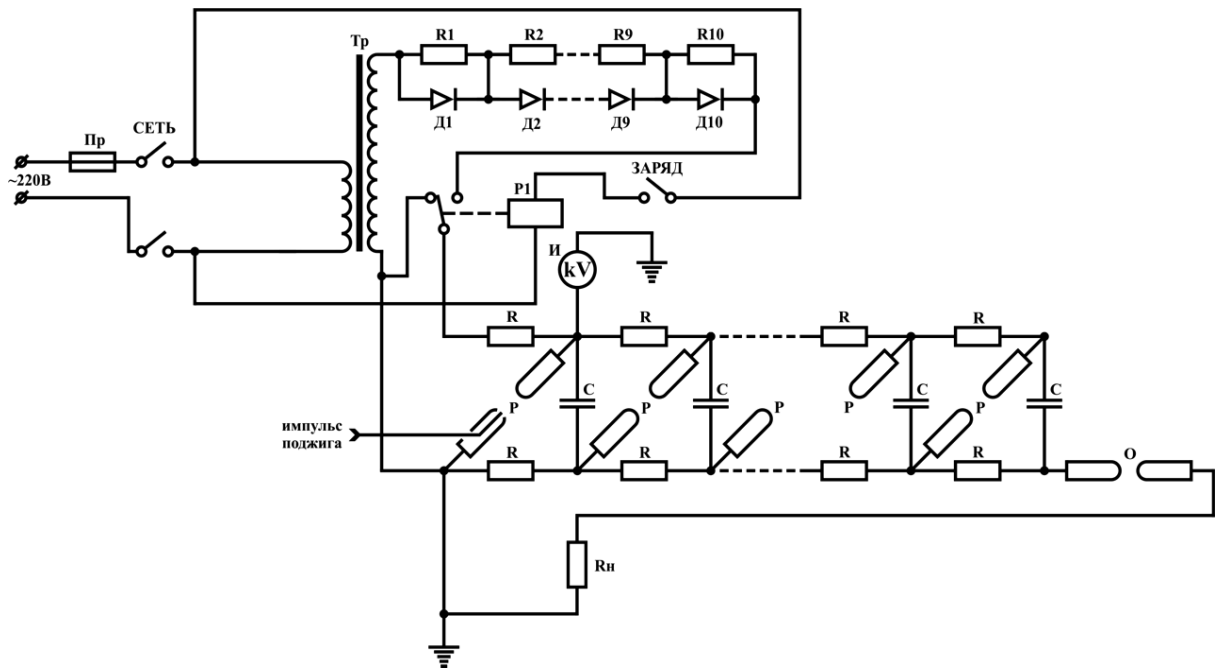


Рис. 1. ГИН по схеме Аркадьева – Маркса

Анод конструктивно заземлён, а катод соединён со вторым электродом обострителя. Анод представляет собой медную сетку или фольгу. Взрывной катод имеет форму либо острия, либо цилиндра, изготовлен из меди (рис. 3).

Принцип работы диодного ускорителя следующий: после зарядки конденсаторов до заданного напряжения в диапазоне 5–50 кВ, на триггер подаётся высоковольтный пусковой

анодному промежутку прикладывается удельное напряжение. После замыкания обострителя на катоде появляется отрицательный потенциал равный  $-10U$ . В виду того, что на краях катода плотность автоэлектронного тока превышает  $10^7$  А/см, это приводит к взрыву микроострий поверхности катода и образованию плазмы, которая и является источником мощного потока электронов. Электроны движутся к аноду под действием приложенного ускоряющего напряжения и могут обладать энергией до 0,5 МэВ. Величина тока в пучке может достигать до 10 кА.

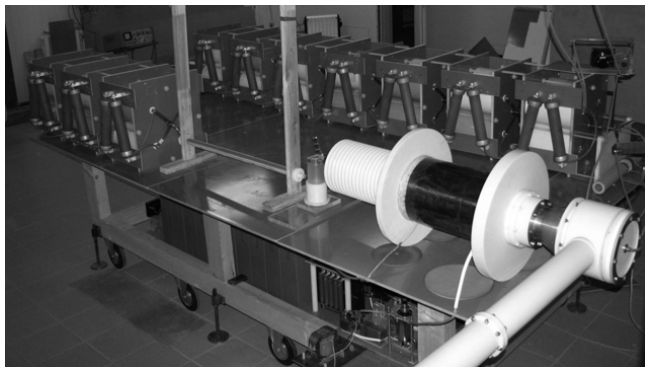


Рис. 2. Фотография ускорителя электронов

импульс с гальванически разделённой помехоустойчивой схемы запуска. В результате замыкания управляемого разрядника к разряднику 2 прикладывается удвоенное напряжение и он тоже замыкается, к 3 также прикладывается утроенное напряжение и т. д. пока не замкнутся все разрядники. В результате к обострителю и катод-

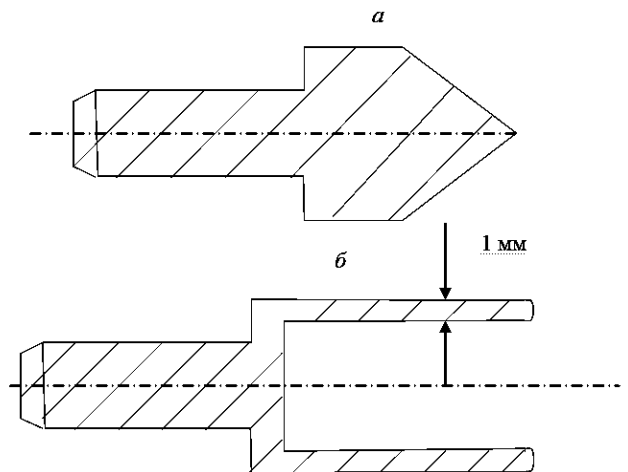


Рис. 3. Схема катодного узла диодного ускорителя

## Магнитная система фокусировки сильноточных пучков релятивистских электронов

Из анализа экспериментальных данных по методам управления сильноточными релятивистскими пучками электронов следует, что для сопровождения пучка электронов с предполагаемыми параметрами необходимо создать магнитное поле с величиной индукции порядка 1 Тл.

Учитывая тот факт, что пучок является осесимметричным и распространяется в катод-анодном пространстве и далее в зоне взаимодействия, которое может быть цилиндрическим, система формирования магнитного поля также должна иметь форму цилиндра. Для формирования магнитного поля использовалась катушка индуктивности, которая перекрывает своей длинной рабочее пространство электронного пучка. Каркас катушки представляет собой цилиндр из капролона. Внутренний диаметр цилиндра равен 210 мм, а толщина его стенок 25 мм, длина 485 мм. На каркас намотан медный провод диаметром 2,5 мм.

Решена задача формирования и сопровождения в вакуумном пространстве, представляющем собой металлический цилиндр (резонатор) с достаточно толстыми стенками, сильноточного пучка электронов в форме полого цилиндра. При этом, если длительность импульса потока заряженных частиц достаточно большая ( $\sim 10^{-5}$  с), то необходимо сформировать внутри цилиндра квазистационарное магнитное поле длительностью порядка 1 мс. Однако когда внутри катушки находится массивный полый цилиндр из проводника, система катушка–цилиндр превращается в трансформатор с коротко замкнутым витком и процесс взаимной индукции не позволяет магнитному полю быстро проникнуть внутрь цилиндра.

Была разработана и создана система формирования мощных магнитных полей [6], состоящая из LC-цепочек, которые включаются последовательно с определёнными задержками. Это реализуется с помощью ключей на мощных тиристорах Т243-400-40. Данные элементы рассчитаны на максимальное импульсное рабочее напряжение 4,2 кВ и ток в импульсе до 8 кА. Также разработана и создана система синхронизации, которая устанавливает задержки включения тиристоров в миллисекундном диапазоне от 0,1 до 10 мс.

Установлено, что для выхода на стационарный участок магнитного поля внутри проводящего толстостенного цилиндра необходимо не менее 7 мс. Разработанная магнитная система позволила получить стационарный участок с однородным

магнитным полем внутри резонатора от 6 мс до 8 мс (рис. 4).

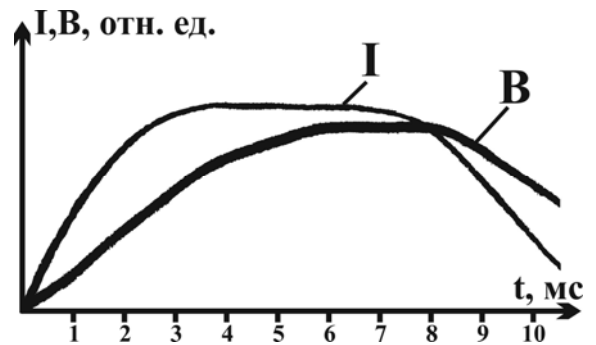
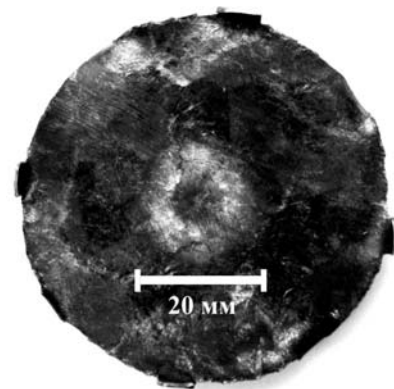


Рис. 4. Осциллограммы формы импульсов тока катушки и индукции магнитного поля внутри проводящего цилиндра в системе с тиристорами: *I* – рабочий ток; *B* – индукция магнитного поля внутри системы катушка-толстостенный цилиндр



а



б

Рис. 5. Свинцовая пластина после воздействия электронным пучком (след от пучка электронов обозначен стрелкой): а – острый катод, б – катод в виде полого цилиндра

На рис. 5 представлено изображения свинцовой пластинки установленной на входе в пространство дрейфа после взаимодействия с пучком

электронов: ток – 1 кА, энергия – 0,22 МэВ, длительность  $\sim 1$  мкс. Пучок сопровождался магнитным полем с индукцией 1 Тл.

### Построение источника мощного импульсного СВЧ-излучения

На рис. 6 схематично изображено взаимное расположение катода, анода и периодической структуры в рабочем вакуумном пространстве.

Обобщённая блок-схема мощного СВЧ-излучателя совместно с внешними устройствами обеспечения его функционирования (системой синхронизации, источниками питания и измерительным оборудованием) приведена на рис. 7.

Генератор синхроимпульсов формирует импульс, поступающий на вход гальванически разделённой помехоустойчивой схемы запуска игнитрона магнитной системы, а задержанный на 7,2 мс импульс включает гальванически разделённую помехоустойчивую схему запуска триггера генератора Аркадьева – Маркса, напряжением не менее 40 В. Открываясь, игнитрон включает маг-

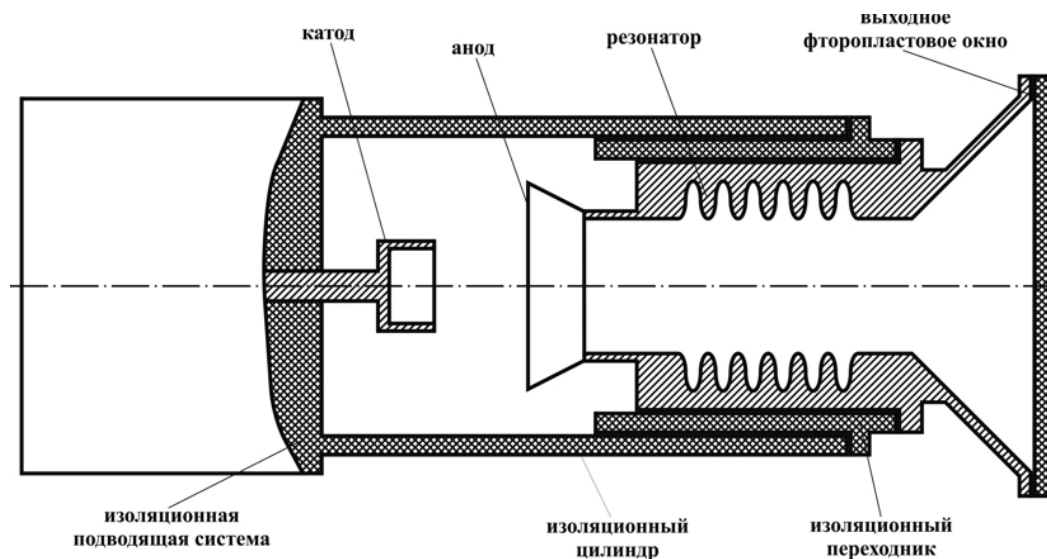


Рис. 6. Рабочее вакуумное пространство

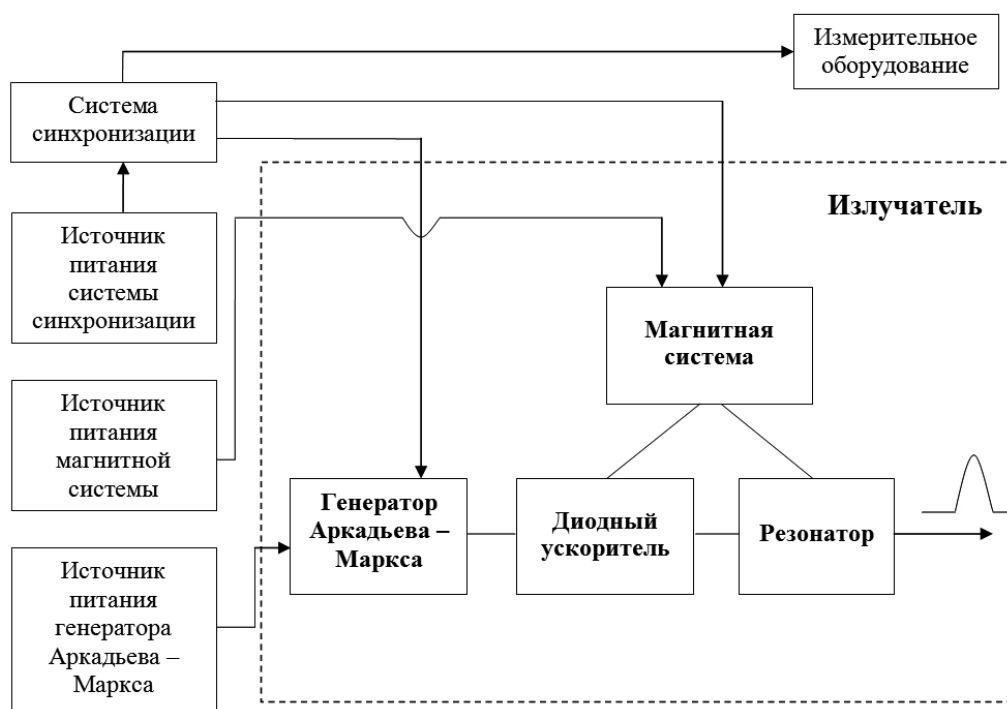


Рис. 7. Блок-схема мощного СВЧ-излучателя

нитную систему формирования и сопровождения сильноточного пучка релятивистских электронов. В момент, когда магнитное поле достигает максимального значения и выходит на квазистационарный участок, триггер запускает генератор Аркадьева – Маркса как источник питания диодного ускорителя электронов. Цилиндрический пучок сильноточных релятивистских электронов, формируемый и сопровождаемый магнитным полем, взаимодействует с резонатором, передавая свою энергию генерируемому электромагнитному импульсу. Импульс выходит из раструба резонатора и попадает в камеру с измерительным оборудованием. В качестве периодических систем (резонатор) можно использовать черенковские генераторы [7].

В силу того что каждый модуль рассматриваемой системы имеет высокую энергетику, реализация их эффективного взаимодействия при построении комплекса мощного СВЧ-излучателя представляется достаточно сложной задачей.

### Заключение

Созданный экспериментальный комплекс генерации сильноточных пучков релятивистских электронов позволяет проводить исследования взаимодействия мощных потоков электронов с веществом; проводить исследования по генерации мощных потоков рентгеновского излучения, а также использоваться для исследований по взаимодействию пучков электронов с периодическими структурами различной конфигурации с целью создания высокоэнергетичных импульсов СВЧ-из-

лучения. В отличие от мощных наносекундных источников излучения разработанный комплекс позволяет получить большую энергию в импульсе.

Одно из достоинств системы – это её модульность. Отдельные части установки могут выступать как самостоятельные устройства для проведения исследований. Также имеется возможность изменять параметры модулей, при этом не изменяя общую геометрию системы, получая новые наперед заданные характеристики для установки в целом.

### Список литературы

1. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. М.: Наука, 2003.
2. Слюсар В. Генераторы супермощных электромагнитных импульсов в информационных войнах // Электроника: НТБ. 2002. № 5. С. 60–67.
3. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. Радио, 1974.
4. Абрамян Е. А., Альтеркоп Б. А., Кулешов Г. Д. Интенсивные электронные пучки. М.: Энергоиздат, 1984.
5. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М: Мир, 1972.
6. Гончаров В. К., Макаров В. В., Чернявский А. Ф. Формирование магнитных полей внутри массивных проводящих цилиндров // ИФЖ. 2007. Т. 80, № 3. С. 177–180.
7. Батура М. П., Кураев А. А., Синицын А. К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Минск: БГУИР, 2007.