

У - 76



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 12387

УСОВ
Юрий Петрович

**ПОЛУЧЕНИЕ И АВТОПРЕОБРАЗОВАНИЕ
СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики при Томском ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте имени С.М.Кирова.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.П.САРАНЦЕВ,
доктор физико-математических наук А.А.ГЛАЗКОВ,
доктор физико-математических наук Ю.В.ТКАЧ.

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, Ленинград.

Защита состоится "___" _____ 1979 г. в "___" часов на заседании Специализированного Совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области, ЛЯП ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "___" _____ 1979 г.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А.БАТУСОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Широкие возможности использования интенсивных пучков частиц в ядерной физике и смежных с ней областях определяют интерес исследователей к проблемам получения таких пучков. Типичными представителями физики высоких интенсивностей наряду с лазерными пучками и мезонными фабриками являются пучки сильноточных электронных ускорителей (СЭУ). Мощность сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП), получаемых с помощью СЭУ, достигает 10^{13} Вт, СРЭП не имеют себе равных по энергии, переносимой в пучке. Этим объясняется быстрое расширение областей науки и техники, в которых перспективно применение СРЭП. В первую очередь - это создание высоких давлений, температур и мощных радиационных полей для изучения поведения вещества в экстремальных условиях, в частности, для исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза. Применение СРЭП перспективно также при решении задач генерирования и усиления мощного электромагнитного излучения СВЧ, оптического и рентгеновского диапазонов, разработки коллективных методов ускорения заряженных частиц, регистрации быстропротекающих процессов в плотных средах, транспортировки энергии, изучения процессов микромира, характеризующихся малыми сечениями взаимодействия и т.д. Каждому применению соответствует диапазон оптимальных параметров СРЭП, который, однако, в большинстве случаев еще не может быть обеспечен существующим уровнем техники СЭУ.

СЭУ - ускорители прямого действия, состоящие из генератора импульсов ускоряющего напряжения и электронной пушки с ненакапливаемым катодом. Научно-технические проблемы при разработке, сооружении и эксплуатации СЭУ, предназначенного для длительного применения в физических экспериментах и технике, чрезвычайно сложны. Они связаны с разработкой и сооружением накопителей энергии, форсированным режимом работы диэлектрических и проводящих материалов, из которых выполняются элементы СЭУ, с быстрой коммутацией больших токов, с разработкой устройств для формирования СРЭП.

Особенностью СРЭП, в отличие от пучков заряженных частиц обычных (несильноточных) ускорителей, является доминирующее влияние собственных электромагнитных полей на динамику пучка, ярко выраженные коллективные свойства пучка. Эта особенность откры-

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

вадет большие возможности для разработки методов автопреобразования параметров СРЭП, сформированного в электронной пушке СЭУ, направленных на расширение функциональных возможностей СЭУ, увеличение эффективности использования ускорителей.

Разработка генераторов высоковольтных наносекундных импульсов, являющихся основой для создания генераторов импульсов ускоряющего напряжения СЭУ, была начата автором в 1959 г. Именно к этому времени относится возникновение и развитие высоковольтной импульсной техники наносекундного диапазона и быстрого ее внедрения в физические исследования и технику: в 60-х годах – исследования по физике диэлектриков, разработка и применение искровых камер, физика быстропротекающих процессов и квантовая электроника, в 70-х годах – техника СЭУ, физика СРЭП и сильноточных ионных пучков (СИП). Работы, проведенные в этих направлениях, обобщены в представляемой диссертации.

В проведении исследований под руководством автора принимали участие сотрудники Лаборатории сильноточных ускорителей НИИ ЯЭ ТПИ В.М.Быстрицкий, И.З.Глейзер, А.Г.Жерлицын, Г.И.Котляревский, Б.В.Окулов, Г.Е.Ремнев, Н.С.Руденко, В.И.Сметанин, А.Г.Стерлигов, В.А.Тузоз, В.И.Цветков.

Цель работы. Целью настоящей диссертации является анализ элементов СЭУ, разработка и сооружение ускорителей с энергией до 1–1,5 МэВ, током в несколько десятков килоампер нано- и микросекундного диапазонов, обеспечение возможности увеличения амплитуды тока наносекундной длительности до мегаамперного диапазона, разработка аппаратуры и методики исследования режимов работы СЭУ, параметров СРЭП и СИП, изучение вопросов формирования СРЭП и исследование закономерностей их транспортировки в различных условиях для разработки методов автопреобразования таких параметров пучков, как максимальная энергия электронов, ток СРЭП и распределение тока по сечению пучка, длительность импульса тока, энергетический спектр электронов и структура пучка во времени, направление распространения пучка, исследование возможности получения с помощью СЭУ сильноточных ионных пучков. Особое внимание уделялось надежности сооружаемых ускорителей, возможности их многоцелевого применения, доступности разрабатываемых методов автопреобразования параметров СРЭП для практического использования.

Метод исследования. В работе проводится экспериментальное исследование и опытная проверка выдвигаемых теоретических положений и расчетных данных.

Научная новизна. В основу диссертации положены работы /1–58/, выполненные автором в 1959–1978 годах. Результатами диссертации, имеющими научную новизну, являются следующие. Развита принципиальная генерация мощных высоковольтных импульсов применительно к генераторам импульсов ускоряющего напряжения СЭУ, выполненных по схеме: зарядное устройство, первичный накопитель энергии – генератор импульсного напряжения (ГИИ) по схеме Аркадьева–Маркса, промежуточный накопитель энергии, коммутатор промежуточного накопителя. В процессе выполнения этой работы сконструированы и сооружены ГИИ с воздушной и масляной изоляцией, исследована работа коаксиальных и полосковых линий с масляной и водной изоляцией – промежуточных накопителей энергии генераторов импульсов ускоряющего напряжения СЭУ. Разработаны сильноточные многоканальные коммутаторы с внутренним запуском, впервые экспериментально показана практически неограниченная возможность многоканальной коммутации в газовых искровых зазорах, на основе которых строятся коммутаторы СЭУ. Предложена схема низкоомного промежуточного накопителя энергии СЭУ на дисковых или радиальных формирующих линиях. Разработан многоцелевой СЭУ, обеспечивающий получение СРЭП нано- и микросекундного диапазонов длительностей. Разработаны конструкции элементов электронных пушек СЭУ нано- и микросекундного диапазонов; научная новизна представлена отсутствующими ранее результатами изучения характеристик коаксиальной комбинированной и самоизолирующей, включая пространственно-временные характеристики плазмы в диоде электронной пушки микросекундного диапазона. Впервые экспериментально исследована транспортировка плотных СРЭП микросекундной длительности в отсутствие внешних фокусирующих полей в нейтральном газе низкого давления и в вакуумных каналах с диэлектрическими стенками. Экспериментально исследована работа трехэлектродной пушки с плазменным анодом при получении СИП с помощью СЭУ в реверсированном режиме. Проведен комплекс исследований, направленных на разработку методов автопреобразования параметров СРЭП в процессе транспортировки. При выполнении этой работы экспериментально исследованы

спектральный состав и временная энергетическая структура СРЭП, транспортируемого в нейтральном газе различного давления. Предложено использовать явление срыва тока и полученные зависимости длительности импульса тока от давления газа для формирования пучков регулируемой длительности меньшей, чем та, которая определена электрическими характеристиками СЭУ. Экспериментально показана возможность такого способа формирования и дальнейшей транспортировки СРЭП длительностью до 10 нс и менее. Предложено использовать процесс транспортировки для улучшения спектральной однородности СРЭП за счет выбора давления газа, обеспечивающего нейтрализацию собственных электромагнитных полей пучка в момент прохождения электронов с максимальной энергией. Достигнуто сотворакратное увеличение максимальной энергии 10-15% электронов СРЭП при инжекции пучка в вакуумное пространство дрейфа, предельный ток для которого меньше тока пучка. Эти эксперименты явились первым экспериментальным подтверждением эффекта индукционного самоускорения СРЭП. Осуществлено увеличение до 10^4 - 10^5 А/см² плотности тока выведенного из ускорителя пучка за счет самофокусировки в диоде электронной пушки. Достигнуто десятикратное увеличение плотности тока при конусной фокусировке СРЭП в остаточном газе низкого давления. Проведено исследование поведения самофокусирующегося СРЭП при распространении вдоль поверхности металла, диэлектрика. Впервые наблюдалось притяжение СРЭП к поверхности ферромагнетика. На основе отталкивающего действия металла и притягивающего ферромагнетика предложены пассивные устройства для управления траекторией пучка. Впервые осуществлен захват самофокусирующегося СРЭП на замкнутую орбиту под действием металлического отражающего экрана. Экспериментально исследована эффективность транспортировки самофокусирующегося СРЭП через поперечное магнитное поле в нейтральном газе и предварительно синтезированной плазме низкого давления. Показано, что коллективное ускорение ионов в нейтральном газе низкого давления происходит за счет преобразования запасенной в прианодной области ускорителя магнитной энергии СРЭП в энергию электростатического поля при отражении от виртуального катода избыточного над предельным значением тока инжекции.

Практическая ценность. Разработанный автором комплекс сильноточных ускорителей НИИ ЯФ ТПИ, методы автопреобразования пара-

метров СРЭП прошли длительную проверку в различных практических приложениях, позволили развернуть в НИИ ЯФ ТПИ исследования по генерации СВЧ-колебаний нано- и микросекундной длительности на высоком уровне мощности (до 5 ГВт в 10-см диапазоне), исследования по формированию плотных электронных колец для разработки коллективного метода ускорения ионов, осуществить коллективное ускорение ионов в системе с изолированными анодами, а также выполнить ряд научно-исследовательских работ для ВПИИ ОФН, ИИИ "Пульсар", ВПИИ ЭМ. Экономический эффект от внедрения полученных результатов составил 500 тыс. руб.

Апробация работы. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались и обсуждались на IV Межвузовской конференции по пробам диэлектриков в Томске в 1964 г., на IV и VI Межвузовских конференциях по электронным ускорителям в Томске в 1964 и 1968 гг., на Совещании по бесфольмовым искровым и стримерным камерам в Дубне в 1969 г., на IV, V и VI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц в Москве в 1974 г. и в Дубне в 1976 и 1978 гг., на Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" в Томске в 1975 г., на II и III Всесоюзных симпозиумах по сильноточной импульсной электронике в Томске в 1975 и 1978 гг., на секции "Теоретические проблемы электрофизики высоких напряжений" Отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР в Караганде в 1976 г., на Всесоюзном симпозиуме по ненакаливаемым катодам в Томске в 1977 г., на VII Международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме в Новосибирске в 1976 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликованы самостоятельно и в соавторстве одна монография, изданная в 1977 г. в Атомиздате, сорок две статьи в журналах ИТФ, ИТЭ, "Атомная энергия", "Физика плазмы", "Письма в ИТФ", "Известия вузов (Физика, Энергетика, Радиотехника и электроника)". Материалы диссертации опубликованы в изданиях в Атомиздате Трудах НИИ ЯФ ТПИ, вып.2, 1972 г., вып.3, 1973 г., вып.4, 1974 г., в Трудах Международной конференции по явлениям в ионизованных газах в Праге в 1973 г., в Трудах VI Международного симпозиума по разрядам и электрической изоляции в вакууме в Свансеп (Англия) в 1974 г., в Трудах Международной конференции по исследованию и технологии электронных пучков в Альбукерке (США) в

1975 г. Предложенные способы и устройства защищены авторскими свидетельствами.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 266 страницах машинописного текста, содержит таблицы на 7 страницах и иллюстрируется рисунками на 71 странице. Работа состоит из введения, пяти глав, трех приложений, заключения, списка используемых литературных источников из 432 наименований, и оглавления.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первые теоретические исследования СРЭП были проведены Беннетом и Альфвенем еще в 30-х годах. Однако интенсивное и последовательное изучение свойств таких пучков началось 8-10 лет назад, когда в США и СССР были построены и стали применяться в физических экспериментах и в технике сильноточные ускорители электронов. Появление такого типа ускорителей во многом обусловлено развитием техники высоких постоянных и импульсных напряжений, особенно высоковольтной наносекундной техники, разработкой накопителей энергии и решением проблем коммутации больших импульсных токов, развитием техники генерирования мощных импульсов рентгеновского излучения [1]. Существенные результаты в этих областях были достигнуты в Томском политехническом институте, где исследования в области высоковольтной наносекундной техники были начаты Г.А.Воробьевым и Г.А.Месяцем по инициативе А.А.Воробьева. В 1959-1964 гг. автором был разработан ряд наносекундных генераторов на напряжение в несколько десятков киловольт, включая средства осциллографической регистрации генерируемых импульсов. Эти генераторы применялись для исследования развития разряда в газообразных, жидких и твердых диэлектриках, для питания оптических затворов оптических квантовых генераторов [2-10]. В дальнейшем был существенно расширен диапазон параметров импульсов: амплитуда возросла до нескольких сотен киловольт, длительность фронта импульса была уменьшена в некоторых случаях до долей наносекунды. Генераторы применялись для питания искровых камер различного типа в экспериментах по фоторождению мезонов на электронном синхротроне "Сириус" НИИ ЯФ ТПИ и являлись прототипом генераторов импульсов ускоряющего напряжения СЭУ [11-16]. Прогресс в получении СРЭП связан также с изучением процесса электрическо-

го пробоя коротких вакуумных промежутков в наносекундном диапазоне, начатого тоже в Томске по инициативе Г.А.Месяца, идентификацией явления взрывной эмиссии электронов и разработкой на этой основе мощных безнакальных источников электронов.

Как уже указано в разделе "Актуальность проблемы", особенностью СРЭП является доминирующее влияние собственных электромагнитных полей на динамику пучка. Основным препятствием на пути получения СРЭП является объемный заряд, который в отсутствие фокусирующих сил вызывает быстрый распад пучка в радиальном направлении, а при наличии фокусировки - для каждой геометрии системы транспортировки существует определенный предельный ток, при котором в некоторой точке пространства образуется виртуальный катод; ток на выходе канала транспортировки перестает быть линейно связанным с током инжекции. Влияние пространственного заряда можно уменьшить путем его нейтрализации ионным фоном, характеризуемой коэффициентом $f_e = z n_i / n_0$, где n_i и n_0 - концентрация ионов и электронов, z - зарядовое число ионов. Аналитическое выражение для максимально возможного значения тока I_A пучка при $f_e = 1$ было получено Альфвенем (см. [1]). Силы токового сжатия ограничивают ток пучка величиной $I_A = I_7 \beta \gamma$, кА, где β - относительная скорость электронов, γ - релятивистский фактор. Физически это ограничение определяется тем, что собственное азимутальное магнитное поле СРЭП $H = 0,2 I / r$, (H - Э, I - А, радиус пучка r - см) искривляет траектории частиц вплоть до изменения направления вектора скорости на обратное. Силы токового сжатия оказывают фокусирующее действие на движение электронов в пучке, уменьшая в γ^2 раз электростатические силы расталкивания. При $f_e = 1/\gamma^2$ (критерий Буджера) силы расталкивания уравновешиваются силами токового стягивания, частицы движутся по инерции, СРЭП находится в состоянии самофокусировки. Уменьшение собственного азимутального магнитного поля тока пучка происходит за счет токовой нейтрализации обратным током $I_{обр}$ плазменных электронов, индуцируемого под действием вихревой э.д.с. на переднем фронте пучка. Уменьшение суммарного магнитного поля характеризуется коэффициентом $f_m = I_{обр} / I$.

Необходимо отметить важность процессов электрического разряда в технике СЭУ и физике СРЭП. В первом случае эти процессы лежат в основе работы мощных высоковольтных коммутаторов генерато-

ра импульсов ускоряющего напряжения СЭУ, во втором – определяют динамику зарядовой и токовой нейтрализации при инжекции СРЭП в нейтральный газ, транспортировку и фокусировку таких пучков.

Таким образом, проблема получения СРЭП является комплексной, включающей как вопросы генерирования импульса ускоряющего напряжения и формирования СРЭП в электронной пушке СЭУ, так и задачи транспортировки СРЭП; коллективные свойства СРЭП проявляются на всех этапах получения таких пучков. Проявлениями таких свойств являются ускорение ионов при инжекции СРЭП в нейтральный газ, обнаруженное С.Е.Грэйбиллом, отражение самофокусирующегося СРЭП от проводящей поверхности, впервые зафиксированное В.Т.Линком. На основе последнего эффекта К.В.Ходатаевым обоснована возможность "зеркального захвата" СРЭП на замкнутую орбиту. Коллективные свойства лежат в основе механизма индукционного самоускорения СРЭП, выдвинутого Г.А.Аскарьяном, и метода автоускорения электронов, теоретически обоснованного Казанским Л.Н., Кислицо-вым А.В. и Лебедевым А.Н. Ряд важных применений СРЭП также основан на коллективных свойствах пучка: аномальное поглощение энергии СРЭП в оболочке термоядерной мишени в предложенной Л.И.Рудак-овым схеме импульсного УТС с инерционным удержанием; выдвинутый Г.И.Будкером и Д.Д.Рятовым механизм нагрева плазмы в магнитных ловушках за счет многопоточкового режима СРЭП; генерация мощных СВЧ-импульсов при взаимодействии СРЭП с вакуумными и плазменными волноводами; получение предельной концентрации энергии за счет самофокусировки СРЭП в диоде СЭУ и т.д. (см. /1/).

Круг применений СЭУ в физических экспериментах и в технике широк. Разнообразны и возникающие в связи с этим требования к параметрам СРЭП. Неизбежная в этой ситуации дифференциация СЭУ по областям их применения не должна, на наш взгляд, ослаблять стремления к достижению разумной универсальности ускорителей, способствующей эффективному их использованию. Поиск и исследование методов преобразования параметров СРЭП на основе специфических свойств самих пучков существенно расширяет возможности многопланового применения СЭУ.

Основные научные и технические задачи, решаемые в диссертации, можно сформулировать следующим образом:

1. Анализ элементов СЭУ и условий транспортировки СРЭП, их влияния на параметры пучка, изучение возможностей регулировки и преобразования параметров СРЭП.

2. Разработка аппаратуры и методики исследования режимов работы СЭУ, параметров СРЭП и СИП.

3. Разработка, сооружение и исследование комплекса СЭУ с энергией до 1,5 МэВ, током в несколько десятков килоампер нано- и микросекундного диапазонов длительности импульсов, увеличение амплитуды генерируемых токов до мегаамперного диапазона, исследование возможности получения с помощью СЭУ сильноточных ионных пучков.

4. Исследование закономерностей транспортировки СРЭП с целью разработки методов преобразования параметров пучков на основе действия их собственных электромагнитных полей. Речь идет о таких параметрах пучка, как максимальная энергия электронов, плотность тока СРЭП, длительность импульса тока, энергетический спектр электронов и структура пучка во времени, направление распространения СРЭП, вид ускоренных частиц.

К защите представлены следующие тезисы:

1. Газовые искровые зазоры с управляемым запуском, на основе которых строятся коммутирующие искровые разрядники промежуточных накопителей энергии СЭУ, имеют наносекундную стабильность запуска и практически неограниченную возможность многоканальной коммутации.

2. Перспективным типом низкоомного промежуточного накопителя энергии СЭУ с изменяемой полярностью импульса ускоряющего напряжения являются дисковые или радиальные полосковые линии.

3. Применение в электронной пушке с магнитной изоляцией СЭУ микросекундного диапазона градиентных колец с экранами, защищающими изоляционные секции от электронной бомбардировки, позволяет значительно увеличить длительность и амплитуду ускоряющего напряжения на диоде.

4. В условиях технического вакуума и отсутствии внешних фокусирующих магнитных полей осуществляется самофокусировка и транспортировка СРЭП микросекундной длительности.

5. Облицовка канала дрейфа диэлектриком существенно увеличивает эффективность транспортировки СРЭП микросекундной длительности в отсутствие внешних фокусирующих магнитных полей.

6. Параметры выведенного из ускорителя СРЭП определяются не только техническими характеристиками СЭУ, но и условиями транспортировки пучка; СРЭП является активным элементом блок-схемы

формирования пучка с требуемыми параметрами. На основе действия собственных электромагнитных полей пучка, выбором условий транспортировки автопреобразование параметров СРЭП достигается следующим образом:

а) увеличение (до полуторакратного) максимальной энергии 10–15% общего числа электронов СРЭП – при инжекции в вакуумное пространство дрейфа СРЭП с током, существенно превышающим предельный вакуумный ток;

б) увеличение (до десятикратного) плотности тока – за счет фокусировки пучка в диоде электронной пушки или конусной фокусировки в пространстве дрейфа;

в) сужение (на несколько десятков кэВ) энергетического спектра СРЭП – на основе особенностей транспортировки самофокусирующегося СРЭП при давлении остаточного газа, отличного от оптимального, равного 0,6–1 мм рт.ст.;

г) укорочение (до 10 нс и менее, со скоростью среза до 10^{13} А/с) длительности импульса тока СРЭП – в результате срыва тока при транспортировке СРЭП в плотном газе.

7. Управление траекторией СРЭП вплоть до захвата пучка на замкнутую орбиту осуществляется за счет взаимодействия самофокусированного СРЭП с поверхностями металла, ферромагнетика, диэлектрика.

8. Изменение в процессе транспортировки СРЭП вида ускоряемых частиц – коллективное ускорение ионов может осуществляться за счет преобразования запасенной в прианодной области магнитной энергии СРЭП в энергию электростатического поля при отражении от виртуального катода избыточного над предельным значением тока инжекции.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В основу диссертации положены результаты разработки и исследования комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ и изучения особенностей транспортировки СРЭП, направленных на разработку методов автопреобразования СРЭП, существенно расширяющих функциональные возможности ускорителей.

Во введении дан краткий обзор областей применения СРЭП и возникающих в связи с этим специфических требований к параметрам СЭУ, кратко излагается материал диссертации и дается обоснование важности рассматриваемых проблем для развития техники СЭУ и их внедрения в практику физического эксперимента и технику.

В первой главе, написанной на основе работы /1/, рассмотрен вопрос о современном состоянии проблемы получения и транспортировки СРЭП. Глава состоит из шести параграфов.

В § 1.1 указано, что несмотря на разнообразие инженерных решений и параметров, в блок-схему СЭУ входит источник зарядного напряжения, первичный накопитель энергии, промежуточный накопитель – "уплотнитель" энергии, коммутатор, электронная пушка.

В § 1.2 проведено сравнение конденсаторов, индуктивных накопителей, ударных генераторов, аккумуляторов, химических взрывчатых веществ по удельным плотностям энергии, току короткого замыкания, максимальной мощности, а также по минимальной длительности формируемых импульсов, из которого следует, что конденсаторы, несмотря на малое удельное энергосодержание, обеспечивают максимальные импульсные токи и мощности. Это объясняет почти повсеместное применение в качестве первичных накопителей энергии генераторов импульсов ускоряющего напряжения СЭУ емкостных накопителей, выходное напряжение которых повышается с помощью схем умножения напряжения или импульсных трансформаторов. Высокая удельная плотность энергии индуктивных, особенно сверхпроводящих накопителей стимулирует поиск и исследование систем вывода энергии из этих накопителей, приемлемых для техники СЭУ.

В § 1.3 показано, что необходимым элементом СЭУ наносекундного диапазона является промежуточный накопитель энергии на основе длинных линий, с помощью которого формируется мощный импульс ускоряющего напряжения фиксированной длительности. Паразитные параметры разрядного контура первичного накопителя, как правило, не позволяют сформировать такой импульс. В этом параграфе рассмотрены также проблемы электрической изоляции накопителей энергии СЭУ и показано, что большой статистический разброс в электрической прочности жидких и твердых диэлектриков, ее зависимость от времени воздействия напряжения, эффект полярности, неоднородности и дефекты в изоляции существенно снижают эффективность применения аналитических методов расчета элементов высоковольтных конструкций, оставляя значительное место моделированию и экспериментальной проверке.

Эмпирический подход преобладает при разработке коммутаторов промежуточных накопителей энергии СЭУ, анализу которых посвящен

§ 1.4. Коммутатор вместе с промежуточным накопителем обеспечивает формирование импульса ускоряющего напряжения СЭУ. В качестве коммутаторов применяются искровые разрядники, работающие в атмосфере сжатого газа, а также жидкостные и твердотельные разрядники. Многообразие явлений, протекающих при электрическом пробое, не позволяет аналитически рассчитать основные параметры разрядника: время формирования разряда и его стабильность, время коммутации, падение напряжения на разряднике. Особенно сложны проблемы многоканальной коммутации и синхронного запуска большого числа разрядников, формирующих импульс ускоряющего напряжения в низкоомном генераторе, или обеспечивающих параллельную работу нескольких генераторов.

В § 1.5 рассмотрены проблемы высоковольтной изоляции электронных пушек СЭУ и процессы в диоде, обеспечивающие формирование СРЭП. Для эффективной передачи энергии необходимо согласование импедансов пушки и промежуточного накопителя энергии. Связанное с этим сокращение линейных размеров пушки определяет повышение требований к электрической прочности изолятора пушки. Основные факторы, обеспечивающие необходимую электрическую прочность изолятора, — это выравнивание градиента напряжения вдоль поверхности изолятора, выбор материала и технологии обработки, уменьшение вероятности образования электронных лавин на поверхности изолятора.

Источником электронов в пушках СЭУ является плазма, образующаяся при взрыве микроострий на катоде, отстоящем от анода на расстоянии порядка сантиметра; предельная длительность импульса тока СРЭП ограничена временем перемещения плазмы со скоростью несколько сантиметров в микросекунду промежутка катод-анод. Поэтому длительность электронных пучков в пушках с планарными электродами не превышает 10^{-7} с. В этих условиях при $v/\gamma = I/I_A \leq 1$, где v — "погонный электрон", закон Чайлда-Ленгмюра выполняется с точностью до множителя 2 для сплошных, многоострийных, инкрустированных металлических и графитовых катодов. Однако с возрастанием v/γ начинает проявляться самофокусировка пучка в диоде; при $I = 0,5 I_A r_c/d$, где r_c — радиус катода, d — расстояние катод-анод, электроны достигают анода, двигаясь по касательной к его поверхности. В этом случае достигается максимальная концентрация энергии СРЭП.

В последние годы получили развитие исследования магнитной изоляции коаксиальных вакуумных промежутков, направленные на разработку передающих линий, формирование трубчатых нано- и микросекундных СРЭП, получение СИП. Действие поперечного по отношению к электрическому полю магнитного поля проявляется по аналогии с плазменными установками с магнитным удержанием в торможении катодной плазмы.

Сведения о СЭУ, включающие характеристики первичных и промежуточных накопителей энергии, коммутаторов и параметры генерируемых СРЭП, вынесены в Приложение I.

В § 1.6 рассмотрены некоторые процессы в дрейфующих СРЭП, из которых вытекает возможность преобразования параметров при транспортировке, как результата взаимодействия пучка со стенками дрейфовой камеры, с нейтральным и ионизованным пучком газом. К таким процессам относятся образование виртуального катода за анодом СЭУ при превышении тока СРЭП величины $I_{пред.ток} = mc^3(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2} / e(1 + 2\ln R/r)$, где m , e — масса и заряд электрона, c — скорость света, R — радиус трубы дрейфа; ограничение транспортируемого в вакууме тока этой величиной, существенное влияние условий транспортировки на динамику зарядово-нейтрализационных процессов и коллективное ускорение ионов при инжекции СРЭП в нейтральный газ, зарядовое и токовое взаимодействие СРЭП со стенками дрейфовой камеры.

Во второй главе описаны устройства для контроля за параметрами комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ (§ 2.2)^{/18,19/}, а также устройства и методики измерения таких характеристик пучков, как ток и распределение тока по сечению СРЭП, транспортируемого в вакууме и газе (§ 2.3)^{/38,53/}, энергетический спектр электронных (§ 2.4)^{/48,56/}, ионных (§ 2.8)^{/39/} и рентгеновских (§ 2.5)^{/29/} пучков, геометрические размеры пучков (§ 2.6). Приводится также описание аппаратуры на основе ЭОПа для исследования динамики оптических процессов в диоде пушки СЭУ (§ 2.7)^{/41/}, и ядерно-физических методов, используемых для диагностики ионных пучков (§ 2.8)^{/47/}. Так, в СЭУ "Тонус" (аббревиатура: "Томский наносекундный ускоритель"), схема которого приведена на рис. I, предусмотрена возможность наблюдения и регистрации зарядного напряжения промежуточного накопителя энергии — двойной формирующей линии, импульса напряжения на выходе ДФЛ и на диоде пушки — с помощью емкостных

Третья глава посвящена описанию результатов разработки генераторов импульсов ускоряющего напряжения комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ. Глава состоит из пяти параграфов.

В § 3.1 указано, что проектирование и сооружение СЭУ представляет собой достаточно сложную задачу: наряду с общими соображениями о выборе блок-схемы и отдельных элементов СЭУ при реальном проектировании и сооружении ускорителя необходимо учитывать стоимость и доступность конструкционных материалов и комплектующих изделий, технологичность конструкции, удобство монтажа и эксплуатации, надежность и регламент работы, сроки сооружения, характер помещений, где устанавливается СЭУ.

В §§ 3.2–3.5 приводится описание основных элементов генераторов импульсов ускоряющего напряжения комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ – первичных и промежуточных накопителей энергии, коммутаторов промежуточных накопителей и результатов исследования режимов их работы. Первым СЭУ НИИ ЯФ ТПИ был запущенный в сентябре 1972 г. ускоритель "Тонус" /18,19/. ДФЛ, коммутатор и пушка этого СЭУ (рис.1) размещены в стальном корпусе – трубе 15, заполненном трансформаторным маслом. Средний 7 и центральный 8 электроды ДФЛ выполнены из алюминия. Напряженность электрического поля в ДФЛ не превышает 0,1 МВ/см за исключением торца среднего электрода, обращенного к пушке. Электрическая прочность этого узла ограничивает максимальное ускоряющее напряжение СЭУ величиной 1,5 МэВ. Коммутатор "Тонуса" состоит из 4-х трехэлектродных разрядников 5, импульс на запускающий электрод 1 которых подается от запускающего разрядника 3, работающего на самопробое /24,40/. Время запаздывания срабатывания трехэлектродных разрядников относительно запускающего составляет 24 нс при среднеквадратичном разбросе 2,3 нс. В экспериментах с ливневыми искровыми камерами показано, что при управляемом запуске в искровых зазорах, на основе которых строятся газовые коммутаторы СЭУ, формируется до 200 параллельных искровых каналов /16,26/. На рис.1 обозначены также: 2 – разделительные сопротивления, 6 – делители напряжения, 10 – высоковольтный ввод от первичного накопителя энергии, 11 – проходной изолятор, 12 – изоляторы, 13 – подвеска, 14 – зарядная индуктивность, 17 – электронная пушка, 19 – катод.

Характеристики генераторов импульсов ускоряющего напряжения комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ приведены в таблице 1.

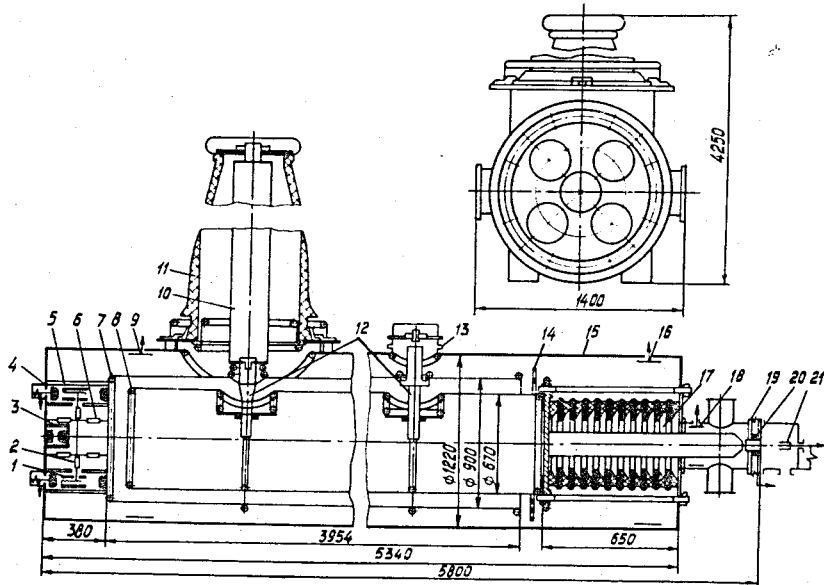


Рис.1. Схема СЭУ "Тонус".

делителей напряжения 9,16,18, электронного тока в диоде – при помощи шунта обратного тока 19 и тока выведенного СРЭП – с помощью пояса Роговского 20 и цилиндра Фарадея 21. Кроме того, при помощи низкоомных шунтов 4 контролируется синхронность работы разрядников коммутатора ДФЛ. Энергия частиц измеряется с помощью магнитного и пробегового спектрометров (в последнем случае – по частичному или полному поглощению пучка в материале с известной функцией поглощения). Для определения геометрических размеров СРЭП – получения "автографов" – применяются полимерные пленки и мишени. При исследовании СИП используются реакции $Be^9(\alpha, n)C^{12}$, $Li^7(p, n)Be^7$ с регистрацией дочерних нейтронов. Необходимо отметить, что задачи контроля за параметрами СЭУ и измерения характеристик СРЭП и СИП сложны, их решение во многом зависит от удачного выбора мер защиты от электромагнитных и радиационных помех, уменьшения паразитных параметров при сохранении достаточной электрической прочности, динамической и тепловой устойчивости измерительных устройств.

Таблица 1.

Характеристики генераторов импульсов
ускоряющего напряжения комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ

СЭУ	Первичный накопитель энергии		Промежуточный накопитель энергии		Изоляционная среда, способ запуска коммутатора
	Тип, изоляция	кДж	Тип	Изоляция	
"Тонус"/18/ НСУ-600	ГИН, воздух	15	коакс. ДФЛ	гр. масло	элегаз, управление
"Пионер"	"-	1,1	"-	"-	элегаз, самопробой
"Тонус-2М"	ГИН, тр. масло	96	4 полос. ДФЛ	вода	элегаз, самопробой
"Тонус-2"	"-	260	16 полос. ДФЛ	вода	элегаз управление
"Вера"	ГИН, воздух	6,2	коакс. ДФЛ	вода	элегаз, управление
"Криус"	Сверхпроводящий индуктивный накопитель	25			Сверхпроводящий размыкатель

Разработка и сооружение многоцелевого СЭУ "Тонус-2" была начата в 1974 г. /17,27,28,35,44,45/. Уже после начала строительства "Тонуса-2" появилось сообщение о сооружении многоцелевого СЭУ "Веба" в лаборатории "Сандия" (США) (см. /1/). Это явилось дополнительным подтверждением перспективности применения многоцелевых СЭУ в физических экспериментах и технике.

В четвертой главе, состоящей из шести параграфов, обсуждаются результаты разработки и исследования электронных пушек комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ. К началу выполнения данной диссертации были очевидны преимущества применения в технике СЭУ ненакаливаемых катодов, работающих в режиме взрывной эмиссии. Вместе с этим необходимо было исследовать в сопоставимых условиях характеристики различных эмиттирующих поверхностей и конструкций диодов, позволяющих получать сплошные и трубчатые СРЭП наносекундной длительности, §§ 4.2-4.4 /21,33,34/. Особый интерес представляли электронные пушки с магнитной изоляцией для получения СРЭП микро-

секундной длительности, § 4.5/41,58/. Однако непосредственное применение ненакаливаемых катодов и электронных пушек с магнитной изоляцией, разработанных для наносекундных СЭУ, в микросекундном диапазоне связано со значительными трудностями и потребовало дополнительных исследований.

Параметры СРЭП комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ, формируемых с помощью ненакаливаемых катодов, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры СРЭП комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ

СЭУ	Энергия, МэВ	Ток, кА	Длительность, нс
"Тонус"	1,5	60	50
НСУ-600	0,5	16	20
"Пионер"	1,0	5	30
"Тонус-2М"	1,5	10	3000
"Тонус-2"	1,5	1500	60
"Вера"	0,5	120	70
"Криус"	0,1	0,5	50000

Исследования показали, что в большинстве экспериментов со СРЭП оправдано применение катодов из нержавеющей стали - наиболее простых и доступных. Лишь в некоторых случаях исследования транспортировки и автоускорения СРЭП, генерации СВЧ-колебаний применяются металлические многоэмиттерные и графитовые катоды (в последнем случае формируется СРЭП с минимальным угловым разбросом электронов, однако происходит быстрое загрязнение вакуумного объема электронной пушки).

В § 4.3 проведено исследование режима комбинированной магнитной изоляции коаксиальных вакуумных промежутков катодных держателей электронных пушек СЭУ, создаваемой совместным действием магнитного поля тока по катодному держателю I_b и внешнего магнитного поля B . Критический потенциал $U_{кр}$ определяется выражением

$$U_{кр} \approx \left\{ \left[\frac{B(r_a^2 - r_c^2)}{2r_a} \right]^2 + \left[\frac{2I}{c} \ln \frac{r_a}{r_c} \right]^2 + \left[\frac{mc^2}{e} \right]^2 \right\}^{1/2} - \frac{mc^2}{e},$$

где r_a - радиус анода. С целью изменения магнитного поля, образованного током по катододержателю, в трубе дрейфа устанавливался цилиндр Фарадея с плоским коллектором на расстоянии l от торца коаксиального катода. l выбиралось таким, чтобы имел место

прямой (как в планарном диоде) ток с катода на коллектор. Изменяя ℓ , можно изменять ток по катододержателю и, следовательно, величину азимутального магнитного поля.

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных, приведенные в таблице 3, можно считать удовлетворительными.

Таблица 3.

№	r_a см	r_c см	ℓ см	$V_{кр}$ кГс	$I_{в.кр.}$ кА	$U_{кр.эксп.}$ МВ	$U_{кр.теор.}$ МВ
1	4,5	2,6	2,1	1,3	40,1	1,15	1,01
2	4,5	2,6	3,7	2,1	23,7	0,95	1,11

Пренебрежение влиянием поля тока I на $U_{кр}$ приводит к завышению V , необходимого для отсечки, \sim в 1,5 раза.

Эксперименты по получению СРЭП микросекундной длительности обсуждаются в § 4.5. Динамика разлета плазмы исследовалась с помощью ЭОПа.

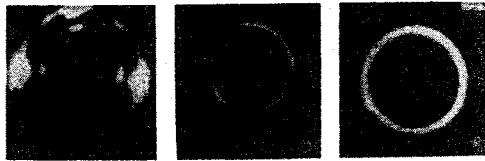


Рис.2. Эопограммы плазменных процессов в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией: а- $V=0$, $r_a=6$ см, $r_c=4$ см, $t_3=1$ мкс; б- 4,3 кГс, $r_a=6$ см, $r_c=4$ см, $t_3=1$ мкс; в- 7,2 кГс, $r_a=6$ см, $r_c=4$ см, $t_3=1$ мкс соответственно.

6 см, 4 см, 1 мкс; в - 7,2 кГс, 6 см, 4 см, 4 мкс соответственно.

ЭОП типа ЗИМ-2 работает в режиме затворных импульсов длительностью 100 нс. Характерные эопограммы приведены на рис.2. Зависимость толщины плазменного слоя на катоде Δ через 1 мкс после подачи импульса ускоряющего напряжения (время t_3) при различных V приведена в таблице 4.

Таблица 4.

V , кГс	2,9	4,3	5,8	7,2	8,7
Δ , мм	5,7	4,2	3,6	3,2	2,7

Приведенные данные подтверждают предположение о торможении катодной плазмы магнитным давлением.

Одним из препятствий увеличения длительности импульса СРЭП СЭУ микросекундного диапазона являются паразитные токи с катода

и катодного держателя, бомбардирующие поверхность изолятора электронной пушки и резко уменьшающие его электрическую прочность. Лишь применение защитных металлических экранов в секционированном изоляторе СЭУ "Тонус-2М" позволило получить СРЭП длительностью до 5 мкс.

При транспортировке СРЭП микросекундной длительности на расстоянии 32 см при давлении $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. наблюдалась самофокусировка пучка через 1,6 мкс после приложения импульса ускоряющего напряжения. При увеличении пути до 83 см задержка возрастала до 2,7 мкс. Облицовка трубы дрейфа полиэтиленом уменьшала задержку до 0,4 мкс^{/58/}.

В § 4.6 приведены первые экспериментальные результаты по получению СИП в рефлексном триоде, установленном на СЭУ "Тонус" в реверсированном режиме^{/49,52/}. Максимальный ионный ток при толщине анода из майлара 15 мкм достигал 6 кА, что в предположении однородной плотности соответствует 90 А/см² и более чем в 5 раз превышает плотность тока, вычисленную в предположении биполярного режима.

Пятая глава состоит из шести параграфов и посвящена анализу выполненных на СЭУ НИИ ЯФ ТПИ экспериментов, в которых в результате транспортировки существенно изменяются параметры инжектируемого СРЭП. Типичная схема эксперимента приведена на рис.3.

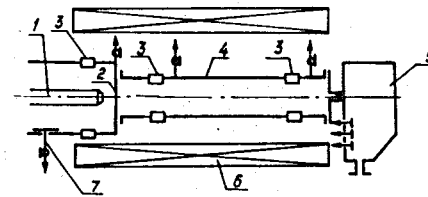
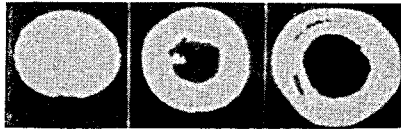


Рис.3. 1- катод, 2- анод, 3- шунт обратного тока, 4- труба дрейфа, 5- магнитный спектрометр, 6- соленоид, 7- делитель напряжения.

В § 5.2 приведено описание выполненных на СЭУ НСУ-600 и "Тонус" экспериментов по дополнительному ускорению электронов СРЭП за счет действия индукционных полей, образованных вследствие резкого изменения направленных скоростей и числа электронов пучка^{/57/}. Это изменение осуществлялось автоматически при инжекции в трубу дрейфа СРЭП с током, амплитуда которого больше $I_{пред.вск.}$. На рис.4 показан характер изменения распределения электронов по сечению пучка на расстоянии 40 см от анода - "автографы" СРЭП на астролоне. Видно, что при образовании виртуаль-



$B=0,8\text{кГс} < B_{кр}$ $B=1,8\text{кГс} = B_{кр}$ $B=3\text{кГс} > B_{кр}$

Рис.4.

значение отрицательного потенциала. При этом наблюдается увеличение энергии электронов, рис.5. Этому способствует локальное

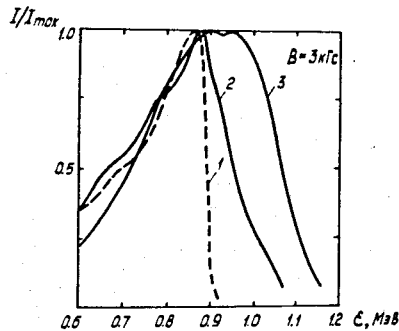


Рис.5. Энергетический спектр СРЭП СЭУ "Тонус": 1- в диоде, 2- при транспортировке в однородном и 3- в неоднородном магнитном поле.

уменьшение B за анодом СЭУ на 40% от максимального значения (при этом еще не изменяется эффективность транспортировки СРЭП).. Оценка амплитуды полей $E = c^{-2} \tau^{-1} \Delta I L$, где τ - время сброса тока $\Delta I = I_{инж} - I_{пред.бак}$, L - индуктивность СРЭП в трубе дрейфа, дает значения в сотни кВ/см, что по порядку величины совпадает с наблюдаемыми значениями дополнительного увеличения энергии электронов. Недостаточно исследована динамика образования виртуального катода, однако уже сейчас можно сформулировать условия, необходимые для практического использования эффекта: $I_{инж} > I_{пред.бак}$, замagnetизированный участок транспортировки с длиной, необходимой для образования виртуального катода (не меньше $2D_{тр.др.}$).

Вопросам фокусировки выведенных СРЭП посвящен § 5.3. Рис.6 иллюстрирует возможности увеличения плотности тока СРЭП за счет самофокусировки в диоде электронной пушки^{/54/}. Они ограничены разрушением анодной титановой фольги, которое наступает при $j > 10^4 \text{ А/см}^2$. Поэтому представляет также интерес исследование

ного катода ($B > B_{кр}$) сплошной, однородный по сечению пучок становится трубчатым, т.к. при инжекции сверхпредельного тока прежде всего прекращается транспортировка электронов присоединенной области СРЭП, приобретающей наибольшее по абсолютной величине

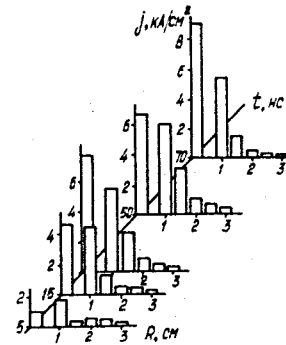
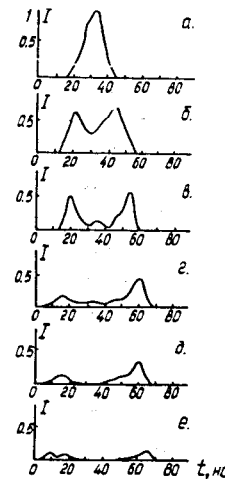


Рис.6. Распределение плотности тока j по сечению пучка СЭУ "Тонус" при $v/\gamma = 1,1$ ($d = 15 \text{ мм}$) в различные моменты времени.

конусной фокусировки^{/30/}, основанной на том, что при транспортировке СРЭП в нейтральном газе, заполняющем металлический конус, время пробы газа увеличивается по длине конуса; это приводит к уменьшению обратного тока по продольной координате и появлению замороженного фокусирующего магнитного поля. Сжатие пучка СЭУ "Тонус" в 6,7 раза при эффективности транспортировки 50% было осуществлено в медном конусе длиной 642 мм с радиусами входного и выходного отверстий 30 мм и 11,6 мм соответственно.

В § 5.4 приведены результаты исследования энергетических и временных характеристик СРЭП при транспортировке в нейтральном газе. На рис.7 приведены осциллограммы импульсов тока электронов



с энергиями (кэВ): а - (985-1045), б - (895-960), в - (805-870), г - (715-780), д - (625-690), е - (535-600), снимаемые с коллекторов магнитного спектрометра за один импульс срабатывания ускорителя. Характерным является наличие двух пиков тока для электронов с энергией $\epsilon < \epsilon_{max}$, что соответствует переднему и заднему фронтам импульса ускоряющего напряжения, и одного пика для $\epsilon = \epsilon_{max}$ (вершина импульса ускоряющего напряжения). Подобные осциллограммы позволяют судить об эффективности транспортировки электронов фронтальной и хвостовой частями СРЭП, чего нельзя сделать с помощью интегрального энергетического спектра^{/48,56/}. Существенные изменения в энергетическом спектре СРЭП.

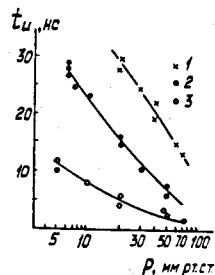
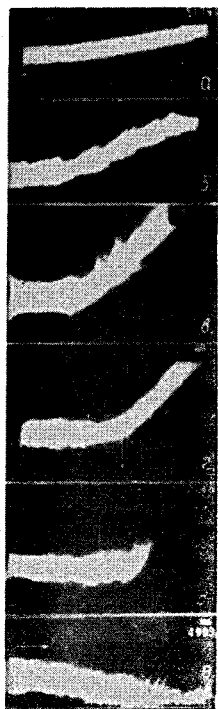


Рис.8. Зависимость $t_u = f(\rho)$ при транспортировке на расстояние (м): 1- 0,8; 2- 1,5; 3- 2,0.

ре СРЭП происходят при давлениях, отличных от оптимального, равного 0,6-1 мм рт.ст., за счет значительного ухудшения эффективности транспортировки фронтальной ($\rho < 1$ мм рт.ст.) или хвостовой ($\rho > 1$ мм рт.ст.) частей пучка, причем при давлении в несколько десятков мм рт.ст. срыв тока происходит со скоростью до 10^{13} А/с /46/. Этот эффект применен для плавного изменения длительности СРЭП t_u , рис.8 /50/.



В § 5.5 изложены результаты исследования взаимодействия самофокусирующегося СРЭП с поверхностью раздела различных сред /20,31,43,51/. Пренебрегая эффектами излучения и торможения, силу, действующую на единицу длины пучка, можно определить, используя метод зеркальных изображений для постоянного тока. Если электронный пучок движется в среде с диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ_1 и μ_1 над плоской границей со средой из материала с ϵ_2 и μ_2 , то сила взаимодействия F равна
$$F = \frac{I^2}{4\pi\chi_0} \left[\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1(\mu_2 + \mu_1)} (1 - fm)^2 + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1(\epsilon_2 + \epsilon_1)} \frac{(1 - fe)^2}{\beta^2 c^2} \right],$$
 где χ_0 - расстояние от оси пучка до границы раздела. Для импульсного тока СРЭП необходимо учитывать влияние вихревых токов. На рис.9а-д приведены фотографии СРЭП СЭУ "Тонус" при отражении от медной пластины при углах падения и давлениях (мм рт.ст.) соответственно: а- 0° , 2,0; б- 15° , 0,1; в- 35° , 0,1; г- 35° , 0,2; д- 48° , 0,1, а на рис.9е - при притяжении Рис.9.

СРЭП к ферромагнетику. При углах падения до 30° не наблюдается заметных потерь тока СРЭП при отражении и изменений в структуре пучка.

При $\rho = 0,01 \pm 0,07$ мм рт.ст. наблюдалось притяжение СРЭП к диэлектрику (титанат бария), которое уменьшалось с ростом давления из-за увеличения f_e . На основе "зеркального взаимодействия"

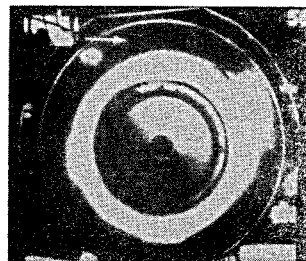


Рис.10.

СРЭП предложен ряд пассивных устройств для управления траекторией СРЭП /22,23,37/. Фотография электронного кольца, полученного на основе "зеркального захвата" /32/, приведена на рис.10.

При исследовании транспортировки СРЭП в трубах дрейфа большого диаметра в условиях газовой фокусировки было установлено /53,55/, что пучок образует два канала для протекания обратного тока: в области, занимаемой самим пучком, и в тонком цилиндрическом слое. Наличие лайнера обратного тока вне пучка, роль которого выполняет цилиндрический плазменный слой, создает возможность полного замыкания электронного тока пучка на ускоритель с сохранением условия самофокусировки.

В § 5.6 приведены результаты исследования динамики зарядово-нейтрализационных процессов и коллективного ускорения ионов на СЭУ НИИ ЯФ ТПИ /25,42,47/. Предложен механизм формирования глубокой потенциальной ямы на фронте СРЭП при конечной длительности фронта t_f : при ρ , обеспечивающем достижение $f_e \sim 1/\gamma^2$ за время, сравнимое с t_f , рассипание СРЭП будет продолжаться вместе с ростом тока до значений, существенно больших, чем $I_{пред}$. Потенциальная яма при этом не превосходит ϵ_e/e , где ϵ_e - энергия электронов. При $f_e = 2+3/\gamma^2$ рассипание СРЭП прекращается, происходит формирование виртуального катода, сопровождающееся сбросом избыточного тока $\Delta I = I - I_{пред}$ к аноду СЭУ. Изменение тока на участке анод СЭУ - виртуальный катод сопровождается генерацией вихревой э.д.с. E - процесс, подобный обсуждаемому выше дополнительному ускорению электронов СРЭП. Вихревое электрическое поле ускоряет нижектируемые электроны, они обеспечивают формирование потенциальной ямы $V = \epsilon_e/e + \Delta W$, где $\Delta W = EZ$, Z - расстояние вир-

туальный катод — анод СЭУ. Графическое определение ΔI при инжекции СРЭП СЭУ "Тонус" в водород при $p = 0,1$ мм рт.ст. приведено на рис. II.

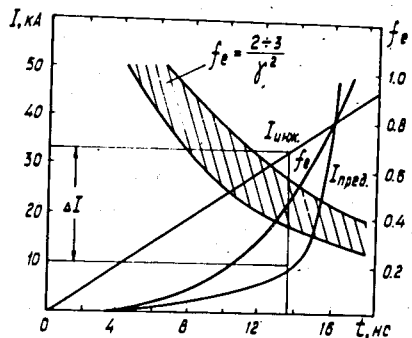


Рис. II.

Поля, ускоряющие ионы, носят электростатический характер, несмотря на индукционную природу возникновения глубокой потенциальной ямы.

В Приложении 2 приведены результаты исследования возможности экспериментального наблюдения реакции $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ с помощью СЭУ/36/.

Основные результаты работы, включающие обнаружение, исследование и применение новых явлений, разработку новых устройств, а также конкретизацию ранее известных устройств и явлений, сводятся к следующему.

1. Проведен анализ применяемых в настоящее время элементов блок-схемы СЭУ (первичных и промежуточных накопителей энергии, коммутаторов, электронных пушек), специфических требований к этим элементам, возникающих в связи с конкретными применениями ускорителей, и особенностей транспортировки СРЭП. На основании этого анализа показано, что задача получения пучка с заданными параметрами является комплексной, пути ее решения, как правило, неоднозначны, конструкция и характеристики СЭУ во многом зависят от условий сооружения и эксплуатации. Впервые обосновывается целесообразность рассмотрения СРЭП как активного элемента блок-схемы СЭУ, обеспечивающей формирование пучка с требуемыми параметрами (гл. I).

2. Разработаны современные электрофизические, ядерно-физические, оптические методики и устройства, обеспечивающие контроль параметров комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ и измерение характеристик сильноточных электронных и ионных пучков (гл. II).

3. Решены проблемы генерирования мощных импульсов применительно к генераторам импульсов ускоряющего напряжения СЭУ с напряжением до 2 МВ. В процессе выполнения этой работы сконструированы и сооружены первичные накопители энергии СЭУ, выполненные

по схеме ГИнов Аркадьева-Маркса с воздушной и масляной изоляцией, промежуточные накопители энергии на основе коаксиальных и полосковых линий с масляной и водяной изоляцией; исследована работа и определены области применения этих элементов (§§ 3.1-3.4). Разработаны управляемые газовые разрядники СЭУ мегавольтного диапазона, имеющие наносекундную стабильность запуска и ресурс непрерывной работы до 10^4 импульсов. В многоканальных коммутаторах промежуточных накопителей энергии комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ впервые применена "внутренняя" синхронизация разрядников с помощью дополнительного запускающего газового разрядника, расположенного в изолирующей среде промежуточного накопителя энергии и управляемого от первичного накопителя энергии. В экспериментах с ливневыми искровыми камерами показана практически неограниченная возможность многоканальной коммутации газовых искровых зазоров, на основе которых строятся коммутаторы СЭУ (§ 3.5).

4. Разработан СЭУ наносекундного диапазона "Тонус", состоящий из воздушного ГИНа, ДФЛ с масляной изоляцией, многоканального газового коммутатора и электронной пушки с ненакаливаемым катодом, обеспечивающий получение сплошных и трубчатых СРЭП с энергией до 1,5 МэВ, током 60 кА и длительностью импульса 50 нс. Аналогичные элементы применены в СЭУ "Вера" (0,5 МэВ, 120 кА, 70 нс), в качестве изоляции ДФЛ этого СЭУ используется хорошо очищенная вода. Сооруженный за короткий срок (8 месяцев) и запущенный в 1972 г. СЭУ "Тонус" успешно эксплуатируется до настоящего времени и остается одним из крупнейших в Советском Союзе. Опыт сооружения и эксплуатации комплекса СЭУ НИИ ЯФ ТПИ показал, что простым и надежным путем осуществления генератора импульсов ускоряющего напряжения СЭУ наносекундного диапазона с энергией до 2 МэВ и током до 200 кА является выбор приведенных выше основных элементов блок-схемы: воздушного ГИНа, ДФЛ с масляной или водяной изоляцией, многоканального газового коммутатора (гл. III).

5. Для увеличения эффективности применения СЭУ в научных исследованиях и в технике разработана конструкция многоцелевого СЭУ с изменяемой полярностью импульса ускоряющего напряжения, в котором первичный накопитель энергии служит генератором импульсов ускоряющего напряжения килоамперного диапазона микросекундной длительности, а промежуточный накопитель энергии — генератором импульсов ускоряющего напряжения мегаамперного диапазона.

наносекундной длительности, служащего для получения СРЭП и СИП. Первым в мировой практике ускорителем такого типа является многоцелевой СЭУ "Тонус-2". Первичным накопителем энергии этого СЭУ является ГИИ в трансформаторном масле с запасаемой энергией до 260 кДж и напряжением 1,5 МВ – крупнейшая в СССР установка такого типа, а низкоомным промежуточным накопителем энергии – радиальные полосковые линии в очищенной воде. Применение предложенного автором с сотрудниками промежуточного накопителя энергии на дисковых или радиальных полосковых линиях с расположенной в центре пучковой перспективно при необходимости максимальной концентрации энергии СРЭП или СИП, получении сходящегося потока тормозного излучения для технических применений и физических экспериментов (гл. III).

6. Разработаны электронные пучки СЭУ наносекундного и микросекундного диапазона; научная новизна представлена отсутствующими ранее результатами изучения характеристик коаксиальных диодов с ненакаливаемыми катодами с магнитной изоляцией нано- и микросекундного диапазонов, включая пространственно-временные характеристики плазмы в диоде электронной пучки микросекундного диапазона. Проведено исследование формирования сплошных и трубчатых СРЭП нано- и микросекундной длительности, исследование магнитной изоляции коротких отрезков вакуумных коаксиальных линий. Впервые проведено исследование комбинированной магнитной изоляции в отрезках вакуумных коаксиальных линий с сопоставлением теоретической и экспериментально определенных потенциалов отсечки (§§ 4.1–4.4).

7. Указан и практически осуществлен путь увеличения электрической прочности изолятора электронной пучки микросекундного диапазона за счет установки градиентных колец с экранами, защищающими изоляционные секции от электронной бомбардировки. Получен на СЭУ "Тонус-2М" СРЭП с энергией до 0,8 МВ, током до 10 кА, длительностью до 5 нс. "Тонус-2М" является крупнейшим СЭУ микросекундного диапазона. Впервые осуществлена транспортировка СРЭП микросекундной длительности в условиях технического вакуума и отсутствия внешнего фокусирующего поля. Экспериментально показано, что облицовка канала дрейфа диэлектриком существенно повышает эффективность транспортировки СРЭП (§ 4.5).

8. На СЭУ "Тонус" в реверсированном режиме впервые в Совет-

ском Союзе исследована работа рефлексного триода с током ускоренных протонов до 6 кА, получены сведения, необходимые для разработки сильноточной ионной пучки мегаамперного диапазона ускорителя "Тонус-2" (§ 4.6).

9. Проведен комплекс исследований, направленных на выяснение возможностей преобразования параметров СРЭП в процессе транспортировки (гл. V). Впервые экспериментально подтвержден выдвинутый Г.А.Аскарьяном механизм индукционного самоускорения электронов СРЭП – осуществлено увеличение (до полторакратного) максимальной энергии 10–15% общего числа электронов СРЭП СЭУ "Тонус" и ИСУ-600 при инжекции в вакуумное пространство дрейфа пучка, ток которого существенно превышает предельный вакуумный ток (§ 5.2).

Осуществлено увеличение до 10^4 – 10^5 А/см² плотности тока выведенного из ускорителя СРЭП СЭУ "Тонус" за счет фокусировки пучка в диоде электронной пучки. Исследован режим конусной фокусировки СРЭП СЭУ "Тонус" в остаточном газе низкого давления. При десятикратном увеличении плотности тока эффективность транспортировки СРЭП составила 50%. Эффективность повышается до 70% за счет уменьшения длительности фронта и увеличения амплитуды импульса тока СРЭП (§ 5.3).

Проведено исследование влияния условий транспортировки на энергетический спектр и временные параметры СРЭП. Получены новые экспериментальные результаты, устанавливающие экстремальный характер изменения этих характеристик СРЭП в зависимости от давления остаточного газа. Впервые предложено использовать транспортировку самофокусирующегося СРЭП при давлении остаточного газа, отличного от оптимального, равного 0,6–1 мм рт.ст., для сужения на несколько десятков кэВ энергетического спектра СРЭП за счет эрозии фронтальной части пучка при меньших давлениях или хвостовой части пучка при больших давлениях остаточного газа. Впервые предложен способ плавного укорочения длительности импульса тока СРЭП до 10 нс и менее со скоростью до 10^{13} А/с за счет срыва тока самофокусирующегося СРЭП при транспортировке в газе с давлением в несколько десятков мм рт.ст. (§ 5.4).

10. Проведено исследование поведения самофокусирующегося СРЭП при распространении вдоль поверхности металла, ферромагнетика, диэлектрика; впервые наблюдалось притяжение СРЭП к поверхности ферромагнетика; предложены пассивные устройства для уп-

равления траекторией СРЭП. Впервые осуществлен предсказанный К.В.Ходатаевым "зеркальный захват" СРЭП на замкнутую орбиту (§ 5.5).

II. Проведено исследование изменения в процессе транспортировки СРЭП вида ускоряемых частиц - коллективного ускорения ионов в нейтральном газе. Показано, что ускорение ионов при низких давлениях газа осуществляется за счет преобразования запасенной в прианодной области СЭУ магнитной энергии СРЭП в энергию электростатического поля при отражении от виртуального катода избыточного над предельным значением тока инжекции (§ 5.6).

Комплекс СЭУ НИИ ЯФ ТПИ, включающий ускорители наносекундного диапазона "Тонус", "Вера" и первую очередь многоцелевого ускорителя "Тонус-2" - СЭУ микросекундного диапазона "Тонус-2М", методы автопреобразования параметров СРЭП прошли длительную проверку в различных практических применениях, подтвердивших правильность основных научно-технических решений (Приложение 3).

Таким образом, создание под руководством автора комплекса СЭУ и результаты проведенных автором исследований позволяют по-новому подойти к проблеме получения СРЭП: характеристики выведенного СРЭП определяются не только параметрами СЭУ, но и условиями транспортировки пучка, выбором которых на основе действия собственных электромагнитных полей осуществляется автопреобразование параметров СРЭП; СРЭП является активным элементом блок-схемы СЭУ, обеспечивающей формирование пучка с требуемыми параметрами. Сформулированные выше положения представляют собой новое перспективное направление в технике сильноточных релятивистских электронных пучков.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. - М., Атомиздат, 1977, 276 с.
2. Воробьев Г.А., Месяц Г.А., Усов Ю.П. Генератор одиночных высоковольтных импульсов наносекундной длительности. - ПТЭ, 1961, № 3, с.165-166.
3. Исследование времени коммутации разрядника. - Изв.вузов. Физика, 1961, № 5, с.174-175. Авт.: Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Месяц Г.А., Усов Ю.П.
4. Месяц Г.А., Усов Ю.П. Влияние давления в искровом промежутке разрядника на параметры фронта высоковольтного импульса. - Изв.вузов, Энергетика, 1961, № 12, с.39-44.

5. Усов Ю.П. Генератор коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-2. - В кн.: Приборы и электронная аппаратура для измерения радиотехнических величин и параметров радиотехнических устройств. Вып.9, тема 35, № П-62-53/9, М., ГОСИТИ, 1962, с.10-14.
6. Месяц Г.А., Усов Ю.П., Голынский А.И. Некоторые данные о влиянии формы электродов и пробивного напряжения на время коммутации искрового разрядника. - Изв.вузов. Физика, 1963, № 2, с.38-41.
7. Усов Ю.П. Устройство для запуска разрядников в высоковольтном импульсном генераторе. Авторское свидетельство № 175085 от 24.2.1964. - Бюллетень изобретений, 1965, № 19, с.26.
8. Усов Ю.П. Запаздывание пробоя необлучаемого искрового промежутка при больших перенапряжениях. - Изв.вузов. Физика, 1964, № 1, с.81-83.
9. Усов Ю.П. Определение слабых фототоков с катода искрового разрядника. - Изв.вузов. Физика, 1964, № 5, с.181-182.
10. Месяц Г.А., Усов Ю.П., Коршунов Г.С. Исследование времени запаздывания пробоя промежутков с облучением для применения в наносекундной импульсной технике. - Изв.вузов. Радиотехника и электроника, 1964, № 5, с.882-887.
- II. Field emission from extended metal surfaces and its influence on vacuum breakdown with subnanosecond voltage pulses. - DAW zu Berlin, Zentralinstitut für Elektronenphysik, 1966, p.1-43. Auth.: Juttner B., Rohrbeck W., Usov J., Wolf H.
12. Усов Ю.П., Стерлигов А.Г. Уменьшение длительности фронта высоковольтного импульса. - ПТЭ, 1968, № 2, с.123-125.
13. О работе искровых камер при больших нагрузках. - ПТЭ, 1970, № 4, с.42-44. Авт.: Усов Ю.П., Ананьин П.С., Стерлигов А.Г., Толмачева В.Г.
14. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов точной длительности. - ПТЭ, 1970, № 4, с.137-138. Авт.: Ананьин П.С., Стерлигов А.Г., Толмачева В.Г., Усов Ю.П.
15. Усов Ю.П., Стерлигов А.Г. Устройство для запуска параллельно включенных искровых разрядников. Авторское свидетельство № 395939 от 20.4.1971. - Бюллетень изобретений, 1973, № 35, с.185.
16. Стерлигов А.Г., Усов Ю.П. Имитация ливня в искровой камере. - ПТЭ, 1972, № 3, с.53-54.

17. Ускоритель электронов. Авторское свидетельство № 511799 от 3.6.1974. - Бюллетень изобретений, 1978, № 42, с.215. Авт.: Быстрицкий В.М., Окулов Б.В., Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А.
18. Сильноточный электронный ускоритель "Тонус". - ПТЭ, 1974, № 3, с.17-20. Авт.: Глейзер И.З., Дронова Л.П., Жерлицын А.П., Котляревский Г.И., Окулов Б.В., Пак В.С., Ремнев Г.Е., Руденко Н.С., Тузов В.А., Сметанин В.И., Усов Ю.П., Шатанов А.А.
19. "Тонус" - наносекундный ускоритель релятивистских электронов. - Атомная энергия, 1974, т.36, № 5, с.378-382. Авт.: Глейзер И.З., Диденко А.Н., Дронова Л.П., Жерлицын А.Г., Котляревский Г.И., Окулов Б.В., Пак В.С., Ремнев Г.Е., Руденко Н.С., Тузов В.А., Сметанин В.И., Усов Ю.П., Шатанов А.А.
20. Особенности отражения сильноточного пучка релятивистских электронов от проводящей поверхности. - ЖТФ, 1974, т.44, № 9, с.2613-2615. Авт.: Диденко А.Н., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
21. Experimental studies of cold emission diode on high current electron nanosecond accelerator.-Proc.of the 6 intern. Symposium on discharges and electrical insulation in vacuum, Swansea, England, p.167-172. Auth.: Gleiser I.S., Didenko A.N., Okulov B.V., Tusov V.A., Usov Yu.P.
22. Устройство для формирования сильноточного кольца релятивистских электронов. Авторское свидетельство № 504320 от 21.3.1975. - Бюллетень изобретений, 1978, № 29, с.225. Авт.: Диденко А.Н., Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
23. Устройство для формирования сильноточного кольца релятивистских электронов. Авторское свидетельство № 518938 от 21.3.1975.- Бюллетень изобретений, 1978, № 29, с.225. Авт.: Диденко А.Н., Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
24. Коммутатор. Авторское свидетельство № 525376 от 24.3.1975.- Бюллетень изобретений, 1978, № 5, с.236. Авт.: Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Руденко Н.С., Усов Ю.П.
25. Быстрицкий В.М., Усов Ю.П. Ускоритель заряженных частиц. Авторское свидетельство № 544333 от 23.9.1975.- Бюллетень изобретений, 1978, № 5, с.236.

26. Стерлигов А.Г., Усов Ю.П. Питание ливневой искровой камеры от генератора мощных импульсов.- ПТЭ, 1975, № 1, с.56-59.
27. Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А. Простой разрядник для высоковольтных импульсных генераторов.- ПТЭ, 1975, № 2, с.112-113.
28. Формирующее устройство сильноточного наносекундного ускорителя. - ПТЭ, 1975, № 4, с.16-18. Авт.: Быстрицкий В.М., Окулов Б.В., Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А.
29. Быстрицкий В.М., Усов Ю.П., Шустова В.Н. Восстановление спектра импульса тормозного излучения наносекундного сильноточного ускорителя.- Письма в ЖТФ, 1975, т.1, № 7, с.338-341.
30. Экспериментальное исследование конусной фокусировки электронного пучка "Тонуса".- Письма в ЖТФ, 1975, т.1, № 7, с.335-337. Авт.: Григорьев В.П., Ремнев Г.Е., Рябчиков А.И., Усов Ю.П., Шулаев Н.С.
31. Взаимодействие сильноточного самофокусирующегося пучка релятивистских электронов с ферромагнитной поверхностью. - Письма в ЖТФ, 1975, т.1, № 11, с.538-541. Авт.: Диденко А.Н., Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
32. Эксперимент по захвату сильноточного пучка релятивистских электронов на замкнутую орбиту.- Письма в ЖТФ, 1975, т.21, № 3, с.186-190. Авт.: Диденко А.Н., Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
33. Глейзер И.З., Окулов Б.В., Усов Ю.П. Об эмиссионной характеристике сильноточных диодов наносекундных ускорителей.- ЖТФ, 1975, т.45, № 6, с.1332-1333.
34. Получение трубчатого релятивистского электронного пучка в коаксиальной пушке с магнитной изоляцией.- Письма в ЖТФ, 1975, № 10, с.463-468, Авт.: Глейзер И.З., Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Красик Я.Е., Усов Ю.П., Цветков В.И.
35. "Тонус-2" - сильноточный электронный ускоритель с запасаемой энергией 0,2 МДж. - В кн.: Труды 4 всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, М., "Наука", 1975, с.278-280. Авт.: Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Окулов Б.В., Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А.
36. Исследование возможности экспериментального наблюдения реакции $\gamma + \gamma \rightarrow e^{\pm}$ с помощью НСУ. - Изв.вузов. Физика, 1975, № 11, с.81-85. Авт.: Быстрицкий В.М., Окулов Б.В., Усов Ю.П., Шустова В.Н.

37. Устройство для формирования сильноточного кольца релятивистских электронов. Авторское свидетельство № 606628 от 4.5. 1976. - Бюллетень изобретений, 1978, № 46, с.210. Авт.: Диденко А.Н., Красик Я.Е., Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
38. Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. Секционированный цилиндр Фарадея. - ПТЭ, 1976, № 3, с.37-38.
39. Быстрицкий В.М., Стерлигов А.Г., Усов Ю.П. Пробежно-пролетный спектрометр многозарядных ионов. - ПТЭ, 1976, № 3, с.42-43.
40. Многоканальный коммутатор для наносекундных генераторов. - ПТЭ, 1976, № 4, с.139-141. Авт.: Ремнев Г.Е., Руденко Н.С., Усов Ю.П., Шатанов А.А.
41. Forming of hollow relativistic electron beams of microsecond duration.- Proc. of the 7 intern. Symposium of discharges and electrical insulation in vacuum, Novosibirsk, 1976, p.358-361. Auth.: Didenko A.N., Smetanin V.I., Tsvetkov V.I., Usov Yu.P., Shatanov A.A.
42. Potential well formation on the front of a relativistic electron beam.- Proc. of the 7 intern. Symposium of discharges and electrical insulation in vacuum, Novosibirsk, 1976, p.362-365. Auth.: Bistritsky V.M., Didenko A.N., Usov Yu.P., Shustova V.N.
43. Behaviour of selffocusing relativistic electron beam propagating along the interface of different media.- Proc. intern. conf. on electron beam research and technology, Albuquerque, USA, 1976, vol.1, p.409-422. Auth.: Didenko A.N., Petrov A.V., Rjabchikov A.I., Tusov V.A., Usov Yu.P.
44. TONUS-2 - intense electron beam generator with stored energy of 0,2 MJ.- Proc. intern. conf. on electron beam research and technology, Albuquerque, USA, 1976, vol.1, p.529-537. Auth.: Bistritsky V.M., Didenko A.N., Gleiser I.S., Gerlitsin A.G., Okulov B.V., Sterligov A.G., Usov Yu.P., Tsvetkov V.I., Shatanov A.A.
45. Генератор импульсного напряжения с запасаемой энергией 135 кДж ускорителя "Тонус-2М". - ПТЭ, 1976, № 6, с.71-73. Авт.: Стерлигов А.Г., Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А.

46. Котляревский Г.И., Рябчиков А.И., Усов Ю.П. Экспериментальное наблюдение срыва тока сильноточного пучка при транспортировке в плотном газе. - "Физика плазмы", 1976, т.2, в.4, с.689-690.
47. Исследование коллективного ускорения ионов в релятивистских сильноточных электронных пучках. - Письма в ЖТФ, 1976, т.2, в.2, с.80-84. Авт.: Быстрицкий В.М., Подкатов В.И., Стерлигов А.Г., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П.
48. Котляревский Г.И., Усов Ю.П. Временная структура энергетического спектра сильноточного релятивистского электронного пучка. - ЖТФ, 1976, № 7, с.1550-1552.
49. Ионная пушка. Авторское свидетельство, № 605480 от 20.12. 1976.- Бюллетень изобретений, 1978, № 46, с.209. Авт.: Быстрицкий В.М., Красик Я.Е., Подкатов В.И., Толмачева В.Г., Усов Ю.П.
50. Котляревский Г.И., Усов Ю.П. Регулировка длительности импульса тока сильноточного пучка релятивистских электронов. - ЖТФ, 1977, № 9, с.2005-2006.
51. Взаимодействие сильноточного релятивистского электронного пучка с поверхностью раздела двух сред. - Письма в ЖТФ, 1977, т.3, в.24, с.1346-1349. Авт.: Диденко А.Н., Петров А.В., Печенкин С.А., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
52. Генерирование сильноточных ионных пучков. - Труды У всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1, М., "Наука", 1977, с.391-394. Авт.: Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Окулов Б.В., Подкатов В.И., Толмачева В.Г., Усов Ю.П.
53. Исследование распространения сильноточного РЭП в поперечном магнитном поле. - "Физика плазмы", 1977, т.3, в.5, с.1128-1134. Авт.: Диденко А.Н., Красик Я.Е., Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
54. Быстрицкий В.М., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. Временная структура сильноточного электронного пучка. - Изв.вузов.Физика, 1978, № 5, с.135-137.
55. Особенности транспортировки сильноточного РЭП в больших объемах.- Изв.вузов.Физика, 1978, № 7, с.144-146, Авт.: Петров А.В., Рябчиков А.И., Тузов В.А., Усов Ю.П.
56. Котляревский Г.И., Усов Ю.П. Об энергетическом спектре сильноточного электронного пучка, транспортируемого в нейтральном газе. - ЖТФ, 1978, т.48, в.3, с.490-493.

57. Индукционное самоускорение сильноточных релятивистских электронных пучков. - Письма в ЖТФ, 1978, т.4, в.7, с.381-384. Авт.: Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Усов Ю.П., Фоменко Г.П.
58. Транспортировка сильноточного микросекундного пучка в нейтральном газе. - Письма в ЖТФ, 1978, т.4, в.7, с.412-415. Авт.: Диденко А.Н., Пак В.С., Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А., Шулаев Н.С.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 апреля 1979 года