

На правах рукописи

К-78

КРАСИК
Яков Евсеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИОННЫХ
ПУЧКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ
ОТРАЖАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ**

Специальность 01.04.01 — экспериментальная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 1980 г.

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики при Томском политехническом институте имени С. М. Кирова (г. Томск).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор

Андрей Николаевич Диденко

кандидат физико-математических наук

Виталий Михайлович Быстрицкий

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Владислав Павлович Саранцев

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Владимир Александрович Смирнов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. Курчатова (г. Москва)

Защита диссертации состоится «22» мая 1980 года в «15» часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области, ЛВЭ, ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан «18» апреля 1980 года.

Ученый секретарь специализированного совета

Михаил Федорович Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время наряду с исследованиями интенсивных релятивистских электронных пучков быстро развивается новое направление — сильноточные поперечные пучки, генерируемые в модифицированных пушках наносекундных ускорителей: отражательных системах, магнито-изолированных диодах, пинч-диодах. Это обусловлено большими перспективами использования таких пучков в различных областях науки и техники: при решении проблемы управляемого термоядерного синтеза, создании ловушек с минимумом В-поля, в ядерной физике, для накачки газовых лазеров.

Цель работы. Целью диссертационной работы является изучение сильноточных ионных пучков, генерируемых в отражательных системах (симметричном и асимметричном отражательных триодах, тетраде) и возможности их транспортировки и баллистической фокусировки.

Научная новизна. В работах (1—9), составивших основу диссертации, изложены новые результаты экспериментального исследования сильноточных ионных пучков (СИП), генерируемых в новых типах отражательных триодов с массивными анодами, асимметричном триоде и в тетраде; получены новые экспериментальные данные по токовой компенсации СИП, транспортируемого из области виртуального катода; установлено наличие двух режимов работы отражательного триода (ОТ) в зависимости от процессов плазмообразования на аноде; предложена качественная модель асимметричного триода. Получены новые экспериментальные данные по динамике образования и распространения анодной плазмы ($n \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и роли зарядо-нейтрализационных процессов при формировании электронного и ионного потоков. Даны рекомендации по работе в оптимальных режимах с максимальной эффективностью генерации поперечных пучков в отражательных системах.

Практическая ценность. Результаты проведенных исследований позволили: 1) повысить повторяемость параметров СИП и осуществить их баллистическую фокусировку ($j_1 \approx 2 \text{ кА/см}^2$); 2) повысить эффективность генерации ($\epsilon \approx 70\%$) и увеличить энергию попов до номинального напряжения генератора; 3) генерировать ионные пучки с заданным профилем; 4) осуществить накачку $\text{Ag}+\text{N}_2$ лазера с помощью СИП с энергией протонов $E_1 \leq 600 \text{ кэВ}$.

Предложенные и разработанные методы генерации СИП могут быть использованы при проведении исследований по созданию магнитных ловушек с минимумом В-поля, фокусировке и транспортировке ионных пучков, в ядерной физике. Разработанная аппаратура может быть использована в экспериментах с интенсивными ионными и электронными пучками.

Реализация. Разработанные методы генерации СИП в отражательных системах внедрены в НИИ ядерной физики при Томском политехническом институте и используются в экспериментах по накачке газовых лазеров и фокусировке ионных пучков.

Апробация работы. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на V и VI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (г. Дубна, 1976, 1978 гг.), II Международном симпозиуме по коллективным методам ускорения (г. Дубна, 1976 г.), II Всесоюзном семинаре по физике и технике интенсивных источников ионов и ионных пучков (г. Киев, 1979 г.), III Всесоюзном симпозиуме по сильноточной импульсной электронике (г. Томск, 1978 г.), III Международной конференции по исследованию и получению сильноточных электронных и ионных пучков (г. Новосибирск, 1979 г.), а также докладывались на семинарах ОНМУ ОИЯИ (1979, 1980 гг.) и ФИАН (1980 г.).

Публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в журналах ЖТФ, «Известия вузов СССР. Физика», трудах симпозиумов и конференций, а также получено два авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 102 страницах машинописного текста, иллюстрирована 62 рисунками на 33 страницах и 7 таблицами на 4 страницах. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы из 109 наименований.

Состояние вопроса и задачи исследования. Генерация СИП в обычных планарных диодах наносекундных ускорителей

подавлена электронным потоком, отбирающим до 97% энергии, подводимой к диоду. Для повышения эффективности передачи энергии ионному пучку необходимо увеличить среднее время нахождения электрона в диоде. Данная проблема решается в трех разновидностях модифицированных пушек, а именно: отражательном триоде, магнитоизолированном диоде и пинч-диоде. Первые работы по исследованию СИП, генерируемых в ОТ, были выполнены в 1974 году в Корнельском университете (США) группой Судана. В этих экспериментах были получены протонные пучки с током до 5 кА и энергией $E_1 \approx 0,3 \text{ МэВ}$. Дальнейшие исследования в этом направлении продолжались в основном группами Капетанакоса, ВМЛ США и Кридона в Международной физической компании. Были получены зависимости величины ионного потока от толщины анода и напряжения в ОТ, предсказаны расходимости электронного и ионного потоков при работе с пленочными анодами. Максимальная величина тока ионного пучка, достигнутая в этих экспериментах, составила $I_1 \approx 200 \text{ кА}$, плотность тока $j_1 \approx 1 \text{ кА/см}^2$, энергия ионов $E_1 \approx 10^6 \text{ эВ}$, расходимость пучка $\alpha \approx 8^\circ$. Однако эффективность работы отражательной системы ($\epsilon = I_1/(2I_1+I_e)$) не превышала обычно 30%. Следует также отметить, что генерация СИП в этих экспериментах носила однократный характер, в связи с разрушением анода в течение 1—2 сбросов ускорителя, что значительно ухудшало повторяемость параметров ионного пучка.

Первая часть диссертационной работы посвящена изучению СИП, генерируемых в ОТ с пленочным или фольговым анодами и процессам плазмообразования на аноде. Вторая часть работы включает исследования СИП, генерируемых в новых типах отражательных систем и характеристик последних. Эти отражательные системы (ОТ с массивным анодом, асимметричный триод, тетрод) позволяют получать ионные пучки с заданным профилем, повысить повторяемость параметров СИП, увеличить энергию попов до номинального напряжения генератора и довести эффективность передачи энергии ионному пучку в пределе до 100%.

К защите представляются следующие тезисы:

1. В симметричном ОТ могут реализовываться два режима генерации СИП: а) режим раннего образования анодной плазмы, в котором преобладают процессы нейтрализации и

имеет место увеличение потока электронов с катода с увеличением толщины анода; б) режим позднего образования анодной плазмы, в котором преобладают процессы накопления пространственного заряда осциллирующих электронов и наблюдается увеличение катодного тока с увеличением толщины анода.

2. Время образования анодной плазмы находится в интервале $0 < \Delta t < 10$ нс после начала импульса напряжения при работе тетрода и ОТ с диэлектрическими пленочными и массивными анодами. Скорость распространения светящегося слоя от анода равняется $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^7$ см/сек в первые 30 нс импульса напряжения и $2,3 \cdot 10^6$ см/сек в последующее время. Значительное превышение $I_{e, \text{ч-л}}$ электронного и ионного потоков в симметричном ОТ с диэлектрическими пленочными анодами связано с зарядо-нейтрализационными процессами в анод-катодном промежутке, а не с замыканием его плазмой с концентрацией $n \geq 10^{16}$ см⁻³.

3. Генерация СИП в асимметричном ОТ в случае вывода пучка в сторону виртуального катода не сопровождается падением напряжения. Эффективность передачи энергии ионному пучку может достигать 100 %.

4. Генерация СИП в тетродной конфигурации отражательной системы в которой анодный блок состоит из двух тонких анодов, один из которых водородосодержащая пленка или массивный диэлектрический диск с отверстиями — расположен со стороны виртуального катода, а другой — эквипотенциальный, металлическая фольга или сетка со стороны реального катода, позволяет: а) повысить повторяемость параметров СИП по сравнению со случаем асимметричного ОТ; б) увеличить, по сравнению со случаем асимметричного ОТ, энергию ионов до действующего напряжения генератора; в) повысить эффективность передачи энергии СИП в пределе до 100 %.

5. Использование ОТ с массивными диэлектрическими анодами позволяет: а) повысить ресурс работы ОТ до более чем 10^2 срабатываний ускорителя; б) получать СИП с заданной формой сечения; в) осуществлять баллистическую фокусировку СИП за счет уменьшения характерных размеров области виртуального катода.

6. Токовая компенсация СИП, выводящегося из области виртуального катода, не является полной и уменьшается с падением величины электронного потока с катода.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены основные принципы генерации сильнооточных ионных пучков в модифицированных пушках наносекундных ускорителей; проведен обзор параметров ионных пучков, полученных в отражательных системах, и основных экспериментальных и теоретических результатов, полученных в этом направлении. На основе анализа отмечается отсутствие литературных данных о некоторых весьма существенных свойствах ионного пучка, процессах плазмообразования, а также способах повышения стабильности параметров ионного пучка и увеличения эффективности его генерации. Сформулированы основные вопросы, исследуемые в диссертации.

В первой главе рассматриваются экспериментальные установки и аппаратура для исследования СИП, генерируемых в отражательных системах. Экспериментальное оборудование включает следующие элементы: сильнооточные ускорители «ВЕРА» и «ТОНУС», используемые в качестве генераторов высоковольтных импульсов напряжения положительной полярности, две экспериментальные вакуумные камеры, систему внешнего импульсного магнитного поля, электро- и ядерно-физическую аппаратуру для изучения параметров ионных пучков и режимов работы отражательных систем и ускорителей.

Ускоритель «ВЕРА» (1, 2) имеет следующие параметры: максимальное напряжение 450 кВ, длительность импульса на полувысоте 75 нс, длительность фронта импульса напряжения $t_f < 10$ нс, выходное сопротивление формирующего элемента $\rho = 7$ Ом. Ускоритель состоит из следующих элементов: генератор импульсного напряжения на 0,5 МВ, 5 кДж, выполненный по схеме Аркадьева — Маркса; быстрый формирующий элемент — двойная формирующая линия в коаксиальном исполнении, заполненная деионизованной водой, радиальный газовый коммутатор, работающий в режиме самопробоя, предимпульсный газовый разрядник, уменьшающий амплитуду предимпульса и обостряющий фронт основного импульса напряжения, пушка с радиальным изолятором, имеющим оптимизированную для работы в реверсивном режиме поверхность (рис. 1). Изложена методика расчета формы поверхности изоляторов, в основу которой положено требование $\gamma \cdot \epsilon_k = \text{Const}$, где ϵ_k — усредненная диэлектрическая постоянная смежных сред.

Ускоритель «ТОНУС» (2) вырабатывал высоковольтный импульс напряжения положительной полярности амплитудой 1 МВ и длительностью 50 нс. Проведен анализ причин пробоя секционированного изолятора. Результаты анализа использованы при конструировании нового изолятора пушки ускорителя «ТОНУС», изготовленного из цельного блока полиэтилена и имеющего профилированную поверхность со стороны вакуума.

Экспериментальные камеры (2, 3, 4) представляли цилиндры из нержавеющей стали, имеющие патрубки для вывода пучка, сигнальных кабелей и высоковольтные вводы. Для возможности проведения фотографирования анодного-катодного зазора торец вакуумной камеры закрыт отполированным оргстеклом.

Внешнее магнитное поле создавалось токовыми катушками, расположенными вне вакуумного объема камеры при работе на ускорителе «ТОНУС» (2) и внутри камеры, но за экранами, при работе на ускорителе «ВЕРА» (3, 4). Катушки служили нагрузкой конденсаторных батарей емкостью 200 кДж и 22,5 кДж на ускорителях «ТОНУС» и «ВЕРА», соответственно.

Приведен подробный анализ погрешностей, возникающих при измерении параметров СИП электро- и ядерно-физической диагностики, и способы их устранения. Для измерения параметров СИП применялись емкостные и активно-емкостные делители напряжения, интегральные и секционированные цилиндры Фарадея, работающие с отрицательным смещением для сброса низкоэнергетичных электронов, сопровождающих ионный пучок, стационарные и передвижные калориметры, совмещенные с цилиндрами Фарадея, имеющие профилированную поверхность для уменьшения эффектов плазмообразования и вторичной эмиссии электронов, время — пролетные датчики, пояса Роговского, шунты обратного тока, магнитные петли dB/dt , ФЭУ. Параметры ионного пучка определялись также с помощью ядерно-физической диагностики, основанной на активационной методике по пороговым реакциям $C^{12}(p, \gamma)N^{13}$, $N^{14}(p, \gamma)O^{15}$. Для изучения процессов плазмообразования применялся ЭОП, ЗИМ-2, работающий в кадровом режиме с экспозицией 10 нс. Минимальная концентрация плазмы с температурой ≈ 10 эВ, свечение которой регистрировалось, не превышала 10^{15} см⁻³. Путем введения задержек в тракт затворного импульса фо-

тографирование проводилось в различные моменты импульса напряжения. В этой главе рассмотрены вопросы калибровки и погрешности описанной выше аппаратуры. Экспериментально показано, что показания цилиндра Фарадея дают в ≈ 6 раз больше значение тока СИП, чем это следует из показаний активационной методики.

Во второй главе рассмотрены теоретические модели генераций СИП в симметричных ОТ, приведены экспериментальные результаты и их анализ по исследованию генерации СИП в симметричных ОТ с пленочными, фольговыми и массивными анодами:

Стационарные модели генерации СИП в ОТ предсказывают расходимости электронных и ионных потоков при достижении определенного условия (относительное количество рассеянных электронов, среднеквадратичный угол рассеяния, среднее число пересечений электронами анода), что соответствует полной нейтрализации объемного заряда в анод-катодном (А-К) зазоре ОТ, более сильную зависимость, чем это следует из закона Чайлда — Ленгмюра, величины ионного тока от напряжения, $j_i \sim V^k$ ($k = 2,6—4,0$). В проделанных экспериментах расходимости электронного и ионного потоков отсутствовали, но наблюдалось конечное увеличение ионного тока с увеличением числа пересечений электронами анода. Это расхождение связано с нестационарностью процессов, имеющих место при генерации СИП в ОТ и конечным внутренним сопротивлением генератора.

Экспериментально показано, что существует два режима работы симметричного ОТ /5, 6/: 1) режим раннего образования анодной плазмы за счет пробоя по поверхности диэлектрического анода или разогрева его большим потоком осциллирующих электронов, когда в А-К зазоре превалируют зарядо-нейтрализационные процессы над накоплением объемного заряда колеблющихся электронов; этот режим реализуется в ОТ с диэлектрическими пленочными анодами или фольговыми анодами на малых (меньших, чем согласованный зазор) А-К зазорах и выражается в быстром падении напряжения и соответствующем уменьшении энергии электронов и ионов; увеличении полного и катодного токов с уменьшением толщины анода (рис. 3), увеличении длительности ионного пучка за счет раннего начала его генерации и энерго-распределении с максимумом, смещенным в область энергий меньших, чем номинальное напряжение генератора; 2) ре-

жим позднего образования анодной плазмы, когда в А-К зазоре превалирует накопление объемного заряда колеблющихся электронов над зарядо-нейтрализационными процессами; этот режим реализуется с эквипотенциальными анодами, когда образование плазмы за счет пробоя по поверхности анода отсутствует, а разогрев материала анода осциллирующими электронами замедлен в связи с малым уровнем электронного потока с катода; для этого режима характерно уменьшение полного и катодного потоков с уменьшением толщины анода, задержка начала генерации пучка относительно импульса напряжения, наличие ВЧ колебаний электронного потока в первые (20÷30) нс длительности импульса, отсутствие или незначительное смещение максимума спектра ионов в область энергий меньших максимального напряжения генератора.

Изучение параметров СИП, транспортируемого из области виртуального катода, показало, что токовая нейтрализация пучка не является полной и уменьшается с увеличением А-К зазора. Это соответствует уменьшению потока электронов с катода /6/. Для устранения данного явления, которое ухудшает эффективность транспортировки СИП и увеличивает его расходимость, было предложено ставить на пути дрейфа СИП заземленную металлическую сетку с высокой прозрачностью. С помощью этого способа удалось скомпенсировать ионный пучок по току.

Было проведено исследование однородности поперечного сечения СИП, которое показало, что плотность ионного тока максимальна в центре и спадает по радиусу. Величина тока СИП, генерируемого симметричным ОТ с диэлектрическим пленочным анодом, превышает в (30—40) раз соответствующую величину для биполярного потока в планарном диоде. При этом расходимость ионного пучка не превышала 10° . Состав ионного пучка, генерируемого симметричным ОТ с диэлектрическими анодами из полиэтиленовой пленки, был преимущественно из протонов, величина ионного тока при этом достигала 30 кА на ускорителе «ВЕРА» при эффективности генерации $\epsilon < 45\%$ /6/.

Фотографирование ЭОПом в различные времена длительности импульса напряжения А-К зазора ОТ с пленочным анодом показало, что время образования анодной плазмы приходится на начало длительности импульса напряжения в результате пробоя по поверхности анода за счет или переходных процессов на переднем фронте импульса напряжения

или накопления заряда поглощенных в аноде электронов /7/. Скорость распространения анодной плазмы с концентрацией $n \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ равняется $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^7 \text{ см/сек}$ в первые 30 нс импульса напряжения и $2,3 \cdot 10^6 \text{ см/сек}$ в последующее время длительности импульса. Тем не менее, несмотря на столь высокую скорость распространения анодной плазмы, показано, что уменьшение энергии электронов и ионов связано с нейтрализационными процессами в А-К зазоре ОТ, а не с перекрытием его плазмой /5/.

Во второй главе описаны также результаты и анализ впервые проведенных экспериментов по изучению СИП, генерируемых в симметричных ОТ с различными конфигурациями массивных анодов /8/. В этих системах (рис. 2) генерация ионных пучков осуществляется анодами, толщина которых много больше длины свободного пробега электронов. Аноды имеют отверстия, напротив которых устанавливаются катоды с формой, соответствующей форме этих отверстий. Вся система помещалась во внешнее магнитное поле, препятствующее потерям осциллирующих через анодное отверстие электронов на анод. Исследование ионных пучков, генерируемых в таких системах, показало, что профиль СИП соответствует форме анодного отверстия. Были получены ленточные, трубчатые и сплошные ионные пучки. За счет уменьшения характерных размеров области виртуального катода была осуществлена баллистическая фокусировка СИП с максимумом плотности ионного тока $j_1 \approx 2 \text{ кА/см}^2$. Повторяемость параметров ионного пучка (величина тока, энергия, расходимость), генерируемого ОТ с массивным анодом, существенно повысилась по сравнению со случаем использования пленочного анода. Это связано с повышенной долговечности анода и, следовательно, отсутствием необходимости переборки экспериментальной камеры. Источником ионов служила плазма, образованная в результате поверхностного пробоя диэлектрического анода на переднем фронте импульса напряжения. Как показало фотографирование ЭОПом поверхности массивного анода свечение плазмы расположено вокруг анодного отверстия полосой, ширина которой не превышает (10—15) мм. При исследовании генерации СИП массивными анодами было получено, что с уменьшением А-К зазора отражательная система переходила в режим работы магнито-изолированного диода с выводом ионного пучка в сторону виртуального катода за счет дрейфа в скрещенных радиальном электрическом поле и азимутальном магнитном

поле тока катода. Эффективность генерации СИП в ОТ с массивными анодами не превышала 30% при среднем токе ионного пучка 12 кА, длительностью по основанию 100 нс, энергией протонов 200 кэВ и 800 кэВ на ускорителях «ВЕРА» и «ТОНУС» соответственно.

В третьей главе приводятся результаты численного расчета генерации СИП в асимметричном триоде /7/, сравнение с экспериментальными результатами и анализ экспериментов по изучению параметров ионных пучков, генерируемых в новых отражательных системах /9/ — тетрадах.

В рассмотренной модели генерации СИП в асимметричном ОТ выделены две области: область А-К зазора, где присутствуют электронный поток с катода и потоки осциллирующих электронов и область анод-виртуальный катод, где имеются поток осциллирующих электронов и ионный поток с анода (см. рис. 2). В отличие от рассмотрения симметричного ОТ в амплитуду спектральной функции распределения электронов по энергии была введена величина «чистого» тока колеблющихся электронов в предположении полной токовой компенсации ионного пучка, транспортируемого из области виртуального катода. Результаты совместного решения уравнений Пуассона для I и II областей с заданными граничными условиями на катоде, аноде и виртуальном катоде приведены на рис. 4. Рассмотренная модель асимметричного триода предсказывает отсутствие расхождений электронных и ионных компонент потоков и, следовательно, уменьшения энергии ионов. При увеличении числа осцилляций электронов через анод электронный поток с катода уменьшается и становится много меньше тока Чайлда — Ленгмюра, а ионная компонента возрастает и стремится в пределе ($n \rightarrow \infty$, что соответствует физической картине бесконечно тонкого анода) к значению электронного тока, при этом эффективность передачи энергии ионному пучку достигает 100%.

Проведенные эксперименты по исследованию СИП, генерируемых в ОТ с анодом из алюминизированного лавсана на ускорителе «ВЕРА» и с анодом из диэлектрической пленки на ускорителе «ТОНУС» показали, что в данных случаях реализуется режим работы асимметричного триода. Генерация СИП наблюдалась преимущественно с той стороны анода, где имело место образование плазмы. С анодом из алюминизированного лавсана плазма образовывалась за счет резистивного нагрева слоя Al электронным током, протекающим по аноду. Если слой Al находился со стороны виртуаль-

ного катода, то при этом энергия протонов соответствовала максимальному напряжению генератора, генерация СИП наблюдалась в основном в сторону виртуального катода, величина электронного потока была меньше Чайлд—Ленгмюровского значения и уменьшалась с уменьшением толщины анода. Сравнение экспериментальных значений $I_e/I_{eч-л}$ и $I_i/I_{eч-л}$ с численными показывает согласие с убывающей функцией распределения колеблющихся электронов по энергии.

При выполнении анода из диэлектрической пленки режим работы ОТ на ускорителе «ТОНУС» зависел от того, на какой стороне анода происходил поверхностный пробой. В случае пробоя со стороны виртуального катода, режим работы ОТ был такой же как с алюминизированным лавсаном слоем Al к виртуальному катоду. В противоположном случае наблюдалось уменьшение энергии электронов, больше катодные токи ($I_e > I_{eч-л}$) и генерация ионного потока преимущественно в сторону реального катода. Проведенные эксперименты с асимметричным ОТ показали, что с уменьшением толщины анода наблюдается уменьшение величины электронного тока с катода, то есть, преобладали накопления объемного заряда осциллирующих электронов над зарядо-нейтрализационными процессами в А-К зазоре ОТ, что соответствует II режиму работы ОТ, описанному в предыдущей главе.

Рассмотренная модель генерации СИП в асимметричном ОТ эффективно использована в предложенной модификации асимметричного триода-тетраде /7, 9/. В данной системе (рис. 2) анодный блок состоит из двух анодов, один из которых служит источником водородосодержащей плазмы (A_2), а другой анод экранирует эту плазму от электрического поля в А-К зазоре. Таким образом, ионный пучок в тетраде формируется только в сторону виртуального катода.

Проведенные эксперименты по исследованию СИП, генерируемых в тетраде показали, что эффективность передачи энергии ионному пучку достигала 70%, при этом энергия СИП равнялась 1 кДж при токе протонного пучка 20 кА и расходимости $\alpha \approx 8^\circ$. Генерация СИП в сторону реального катода была подавлена в ≥ 10 раз при работе с сеточным анодом A_1 и более чем в 10^2 раз при использовании анода A_1 из Al фольги или алюминизированного лавсана, что подтверждает эффект экранировки плазмы анода A_2 от электрических полей в А-К зазоре. Генерация СИП начиналась через $\Delta t < 10$ нс после начала импульса напряжения, согла-

суясь с показаниями ЭОПа, свидетельствующими, что источником ионов служит плазма, образованная в результате пробоя по поверхности диэлектрического анода. Измерения энергетического спектра СИП (рис. 6), генерируемого в тетроде показало, что максимум спектра приходится на номинальное напряжение, приложенное к тетроду. Это подтверждает полученные ранее результаты о малой величине ионного потока в сторону реального катода и, следовательно, отсутствие зарядо-нейтрализационных процессов в A_1 -К зазоре тетрода.

Исследовалось влияние величины A_1 -К и A_1 - A_2 зазоров в тетроде на параметры генерируемых ионных пучков. Было показано наличие оптимальных A_1 - A_2 и A_1 -К зазоров, при которых наблюдается максимальная величина тока генерируемого СИП (рис. 5). Уменьшение величины ионного потока при увеличении A_1 -К зазора или при уменьшении межэлектродного зазора связано с уменьшением провисания потенциала в A_1 - A_2 зазоре и тем самым ухудшением условий для осуществления пробоя по поверхности диэлектрического анода A_2 . С другой стороны уменьшение A_1 -К зазора приводит к падению энергии электронов за счет рассогласования тетрода с формирующим элементом ускорителя и, следовательно, к малой величине электронного тока, проходящего в область A_2 — виртуальный катод, что вызывает уменьшение ионного потока.

Были проведены исследования СИП, генерируемых в тетроде с массивным диэлектрическим анодом A_2 , при этом характеристики ионного пучка оказались аналогичными соответствующим характеристикам тетрода с пленочным анодом A_2 , но существенно возрос ресурс работы анодного блока.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получены новые результаты по генерации СИП в новой отражательной системе-тетроде, позволяющей повысить энергию ионов до действующего напряжения генератора и эффективность передачи энергии ионному пучку до 100%. Показано большое значение эффекта накопления объемного заряда колеблющихся электронов в межэлектродном пространстве на процессы плазмообразования. Для увеличения повторяемости параметров СИП исследована тетродная конфигурация с массивным диэлектрическим анодом /7, 9/.

2. Впервые исследованы СИП, генерируемые в симметричном ОТ с неразрушающимся анодом, обеспечивающим высокую повторяемость параметров ионных пучков, заданный профиль сечения и позволяющим осуществлять баллистическую фокусировку за счет уменьшения характерных размеров области виртуального катода /6, 8/.

3. Получены новые данные о времени образования и скорости распространения анодной плазмы ($n \geq 10^{16}$ см⁻³): $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^7$ см/сек. в первые 30 нс длительности импульса напряжения и $2,3 \cdot 10^6$ см/сек. в последующее время. Показано, что уменьшение энергии электронов и ионов при использовании диэлектрического анода связано с зарядо-нейтрализационными процессами, а не с замыканием А-К зазора плазмой /5, 6/.

4. Впервые экспериментально показано существование двух режимов генерации СИП в симметричном ОТ в зависимости от процессов плазмообразования на аноде /7/:

а) режим раннего образования анодной плазмы, когда наблюдается увеличение электронного потока с катода при уменьшении толщины анода и превалирование зарядо-нейтрализационных процессов над накоплением объемного заряда колеблющихся электронов в А-К зазоре ОТ;

б) режим позднего образования анодной плазмы, когда наблюдается уменьшение электронного потока с катода при уменьшении толщины анода и превалирование накопления объемного заряда колеблющихся электронов над зарядо-нейтрализационными процессами в А-К зазоре ОТ.

5. Экспериментально показано, что токовая компенсация СИП, транспортируемого из области виртуального катода, не является полной и уменьшается с падением величины электронного потока. Получены новые данные о распределении плотности тока СИП, генерируемого в ОТ, и найдены оптимальные параметры ОТ, при которых имеет место максимальная генерация тока ионного пучка /3, 4, 5/.

6. Показано, что если эффективность передачи энергии ионному пучку, генерируемому ОТ с пленочным и массивным анодом, не превышала 45% и 30%, соответственно, то эффективность передачи энергии СИП, генерируемому в тетроде с пленочным и массивным анодами, составила 70% и 50%, соответственно /7/.

7. Численно исследована генерация СИП в асимметричном ОТ. Показано отсутствие расходимости ионного и электронного компонент потоков и увеличение эффективности переда-

чи энергии ионному пучку до 100% при $n \rightarrow \infty$, где n — среднее число пересечений электронов через анод. Получено хорошее согласие с экспериментальными результатами [7].

8. Разработан и запущен в эксплуатацию в реверсированном по полярности режиму сильноточный ускоритель «ВЕРА» мощностью $2 \cdot 10^{10}$ Вт, напряжение 0,4 МВ, длительность импульса: на полувысоте 74 нс, волновое сопротивление формирующего элемента 7 Ом. Сконструирована и запущена в эксплуатацию новая пушка наносекундного ускорителя «ТО-НУС» для работы в реверсированном по полярности режиму на уровне напряжений 1 МВ. Предложен аналитический метод расчета формы поверхности проходных изоляторов [1, 2].

9. Разработан комплекс электрофизической аппаратуры, позволяющий дублировать методы регистрации параметров ионных пучков и тем самым повышающий достоверность полученных результатов [2].

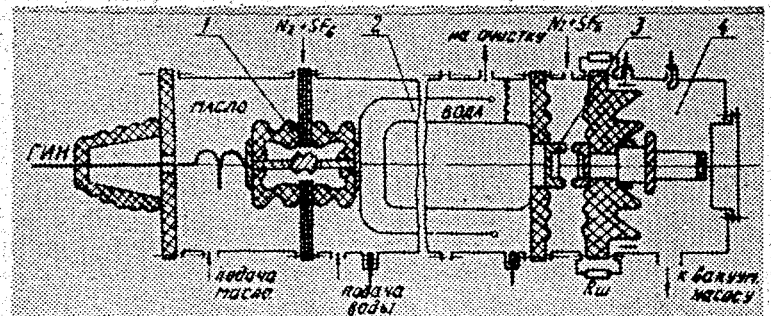


Рис. 1. Схема ускорителя «ВЕРА». 1 — коммутатор; 2 — двойная формирующая линия; 3 — предимпульсный разрядник; 4 — пушка.

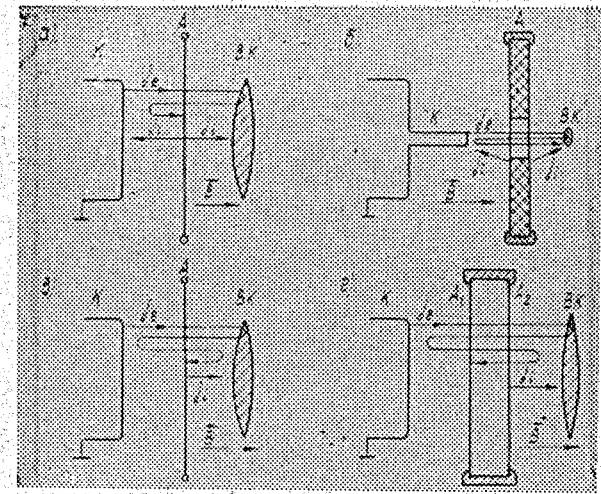


Рис. 2. Схемы отражательных систем: а) симметричный отражательный триод с пленочным или фольговым анодом; б) симметричный отражательный триод с массивным анодом; в) асимметричный отражательный триод; г) тетрод.

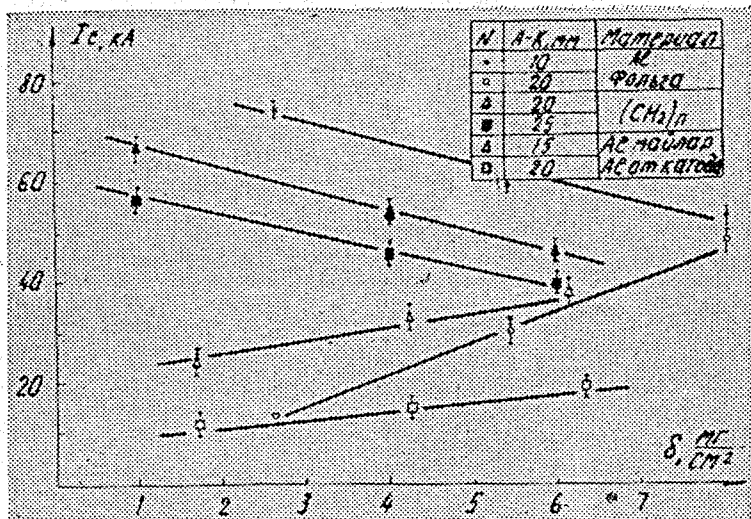


Рис. 3. Зависимость катодного тока отражательного триода от толщины анода.

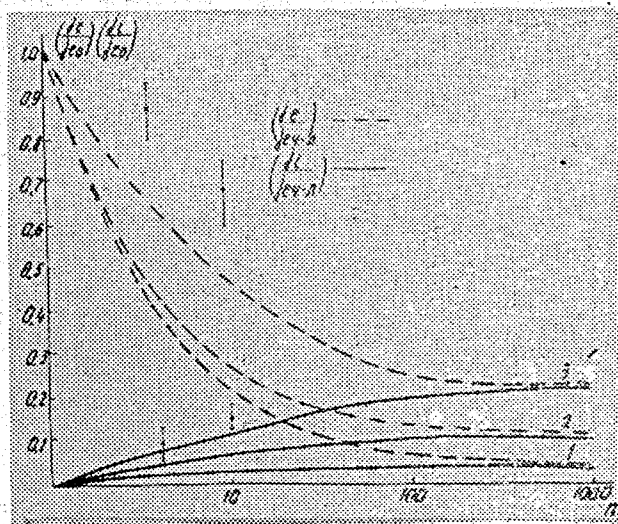


Рис. 4. Зависимости $(I_c/I_{e_{a-l}})$ и $(I_1/I_{e_{a-l}})$ от среднего числа пересечений электронами анода для трех модельных функций энергетического распределения электронов.

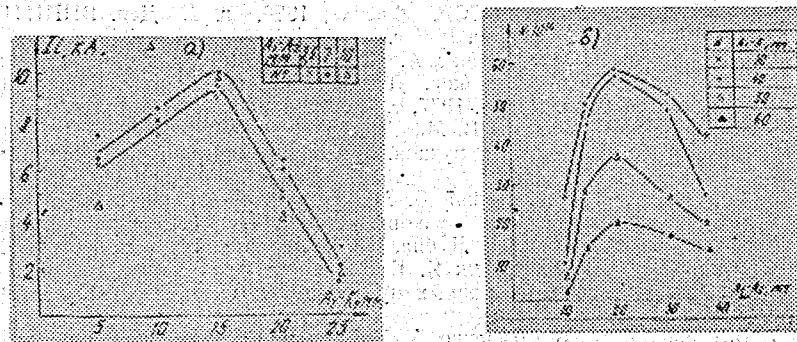


Рис. 5. Зависимость величины тока ионов от параметров тетрода для ускорителей «ВЕРА» (а) и «ТОНУС» (б).

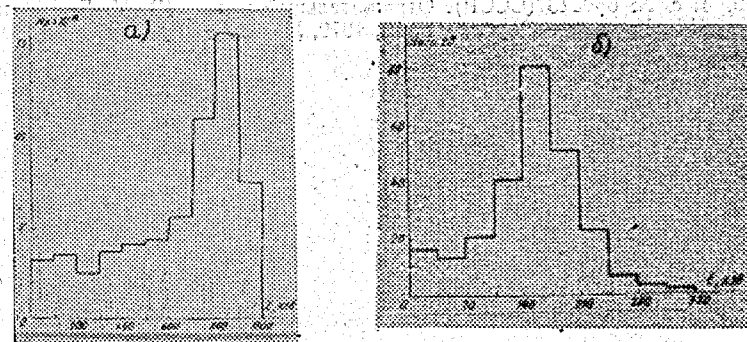


Рис. 6. Энергетический спектр сильноточного ионного пучка, генерируемого в тетроде на ускорителе «ТОНУС» (а) и в инверсном тетроде на ускорителе «ВЕРА» (б).

Содержание диссертации отражено в следующих основных работах:

1. Арбузов А. И., Быстрицкий В. М., Красик Я. Е. и др. Сильноточный ускоритель с водяным накопителем. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по сильноточной импульсной электронике. Томск, 1978, с. 119—120.
2. Быстрицкий В. М., Красик Я. Е., Подкатов В. И. и др. Ускорительно-диагностический комплекс для генерации ионных пучков и сгустков. Известия вузов СССР. Физика, 1980, в. 4. Деп. ВИНТИ № 525-80Д от 12 февраля 1980 г.
3. Быстрицкий В. М., Диденко А. Н., Красик Я. Е. и др. Генерация сильноточных ионных пучков. Тр. V Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1977, т. 1, с. 391—394.
4. Красик Я. Е., Подкатов В. М., Толмачева В. Г., Усов Ю. П. Генерация сильноточных ионных пучков. Тр. НИИ ЯФ, 1979, М., Атомиздат, вып. 8, с. 76—80.
5. Арбузов А. И., Быстрицкий В. М., Красик Я. Е. и др. Генерация сильноточных проточных пучков в триоде. VI Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978, Аннотации докладов, с. 52.
6. Быстрицкий В. М., Красик Я. Е., Подкатов В. И. Исследование генерации сильноточных ионных пучков в триоде. ЖТФ, 1979, т. 49, в. 11, с. 2417.
7. Быстрицкий В. М., Диденко А. Н., Красик Я. Е. и др. Генерация сильноточных ионных пучков. III Межд. конф. по исследованию и получению сильноточных электронных и ионных пучков. Новосибирск, 1979, Аннотации докладов, с. 71.
8. А. с. № 605480 (СССР). Ионная пушка (В. М. Быстрицкий, Я. Е. Красик, В. И. Подкатов, — Оpubл. в Б. И., 1978, № 46).
9. А. с. № 660543 (СССР). Отражательный триод. (В. М. Быстрицкий, Я. Е. Красик, — Оpubл. в Б. И., 1979, № 49).