

Б-955



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БЫСТРИЦКИЙ Виталий Михайлович

**ПОЛУЧЕНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ
И ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

Специальность 01.04.13 — Электрофизика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна—1982

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

Официальные оппоненты: Чл.-корр. АН СССР
доктор технических наук Г. А. МЕСЯЦ
доктор физико-математических наук
В. П. САРАНЦЕВ
доктор физико-математических наук
А. А. ПЛЮТТО

Ведущее научно-исследовательское учреждение — Украинский физико-технический институт Академии Наук УССР, Харьков.

Автореферат разослан « » _____ 1982 г.

Защита диссертации состоится « » _____ 1982 г.

в « » часов на заседании специализированного Ученого Совета Д 047.01.03 при Лаборатории Ядерных проблем Объединенного Института Ядерных Исследований, Дубна, Московской области, ЛЯП, ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного Института Ядерных Исследований.

Ученый секретарь Совета,
доктор физико-математических наук

Ю. А. БАТУСОВ

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Актуальность проблем получения, исследования и применения мощных ионных пучков определяется широкими возможностями и перспективами их использования: в импульсной энергетике ближайшего будущего (управляемый термоядерный синтез инерциального и стационарного типов — непосредственное обжатие дейтерий — тритиевой мишени, "Астрон", нагрев плазмы); в квантовой электронике (генерация лазерного излучения в различных волновых диапазонах и на уровнях мощности энерговкладов, недоступных для иных методов накачки); в ядерной физике (получение мощных импульсных потоков нейтронов, новых короткоживущих изотопов); в технологии (изменение прочностных свойств поверхности материалов); в ускорительной технике (создание инжекторов для сильноточных ускорителей диапазона единицы — десятки ГэВ, мезонных фабрик и т.д.).

Мощные ионные пучки — новое, быстро развивающееся направление сильноточной электроники. Оно обязано своим появлением крупным успехам в развитии технологии больших импульсных мощностей (до 10^{13} Вт). Большой вклад в это внесли отечественные ученые, начиная с пионерских работ в области импульсной технологии высоких напряжений (Будкер Г.И., Комельков В.С., Цукерман В.А., Павловский А.И., Воробьев А.А. и др.) до развернутых программ больших научных коллективов. Среди них необходимо отметить лаборатории ИАЭ им.И.В.Курчатова (Завойский Е.К., Велихов Е.П., Рудаков Л.И., Смирнов В.П., Бабыкин М.В. и др.), ИЯФ г.Новосибирска (Будкер Г.И., Нестерихин Ю.Е., Рязов Д.Д., Абрамян Е.А., Федоров В.М., Лагунов В.М. и др.), НИИ ЭФА г.Ленинграда (Глухих В.А., Гусев О.А., Печерский О.П. и др.), ИСЭ г.Томска (Месляц Г.А., Ковальчук Б.М. и др.), НИИ ЯФ г.Томска (Диденко А.Н., Руденко Н.С., Усов Ю.П. и др.), ФИАН (Коломенский А.А., Яблоков Б.Н. и др.), УФИИ г.Харькова (Ткач Ю.В. и др.). Этот список далеко не полон. Необходимо также отметить предшествующие большие работы в области физики и техники квазистационарных ионных пучков Семашко Н.Н., Габовича М.Д., Морозова А.И., Лебедева С.В., Соловьева Л.С. и др., результаты которых явились основой для более глубокого понимания процессов и в значительной степени были экстраполированы на больший диапазон энергий и токов.

Существующие методы получения мощных ионных пучков (МПИ) и коллективно ускоренных сгустков (МКС), как правило, связаны с мощными ускорителями прямого действия нано- и микро-секундного диапазона (длительности импульсов десятки — сотни наносекунд), состоящими из медленного накопителя энергии, элементов, преобразующих эту энергию

в нано и микро-секундный импульс и передающих его в пушку ускорителя, и собственно, пушки ускорителя. При непосредственном получении МИП в пушке ускорителя (диоде) возникает ряд проблем, связанных с необходимостью подавления электронной компоненты, вопросами согласования пушки с формирующими элементами и т.д. При генерации коллективно-ускоренных МИС в релятивистских электронных пучках (РЭП) основные проблемы связаны с динамикой ускорения МИС, синхронизацией, контролируемостью и эффективностью процессов передачи энергии электронного пучка ионным ступкам. Работы автора, выполненные в указанных направлениях в 1974-1982 г.г., обобщены в представляемой диссертации. В проведении исследований под руководством автора принимали участие сотрудники Лаборатории сильноточных ускорителей и Лаборатории оптико-физических исследований НИИ ЯФ при ТПИ г.Томск Арбузов А.И., Баранов С.В., Красик Я.Е., Лопатин В.С., Матвиенко В.Н., Подкатов В.И., Петров А.В., Силакин С.С., Толмачева В.Г., Толопа А.М., Шустова В.Г., Чистяков С.А.

Цель работы. Целью настоящей работы является:

- а) создание ускорительно-диагностического комплекса для выполнения программ исследований, включающее в себя разработку, сооружение и запуск нового, а также модификацию существующего наносекундного ускорителя; разработку диагностической аппаратуры и методик исследования параметров РЭП, МИП и МИС, а также самих ускорителей, используемых в экспериментах. Особое внимание уделено корреляции измерений параллельными методиками;
- б) изучение механизмов коллективного ускорения МИС в релятивистских электронных пучках, дрейфующих в газе и в вакууме (в системах с изолированным анодом и отражательных системах); проверка существующих модельных представлений и теорий этих процессов; обобщение и анализ новых полученных данных и прежних экспериментальных и теоретических результатов на основе единого подхода; анализ перспективности коллективных методов ускорения;
- в) исследование генерации МИП и их характеристик в отражательных системах с упором на динамику внутридиодных процессов; теоретическая и экспериментальная разработка новых типов отражательных систем (триод с неразрушаемым анодом, асимметричный триод, тетрод, плазмонаполненный триод);
- г) исследование генерации МИП в магнитно-изолированных диодах, включая разработку новых диодных систем магнитно-изолированного типа; изучение вопросов баллистической фокусировки МИП и возможностей получения мощных пучков тяжелых ионов;
- д) исследование возможностей использования МИП и МИС для им-

пульсной накачки лазеров коротковолнового диапазона, с упором на лазерующие среды с высоким удельным порогом энерговклада, где можно ожидать высокие уровни эффективности - к примеру лазеры с самоограниченными переходами, либо эксимерные лазеры с легкими буферными газами.

Метод исследования. Работа включает в себя экспериментальные исследования, теоретические модели и соответствующие расчеты, а также опытную проверку расчетных результатов.

Научная новизна. В основу диссертации положены работы /Г-43/, выполненные автором в 1974-1982 г.г. К числу результатов, обладающих научной новизной, относятся следующие:

1. В исследованиях коллективного ускорения МИС:

Экспериментально и теоретически исследована динамика формирования ускоряющих полей в прианодной области при инжекции РЭП в нейтральный газ. Впервые показано отсутствие стационарной потенциальной ямы в этой области с глубиной, превышающей ξ_e/e , где ξ_e - энергия инжекции РЭП. Экспериментально исследованы зависимости коллективного ускорения ионов от пороговых характеристик РЭП и пространства дрейфа - $J_{инж} / J_{пр}$, E / ρ . Показано, что концепция превышения предельного тока $J_{инж} / J_{пр} \geq 1$, как достаточного и необходимого условия для начала ускорения, не является общей, и эта величина изменяется в широких пределах в зависимости от всей совокупности параметров РЭП и пространства дрейфа. Впервые показано, что существует два режима распространения фронта РЭП в зависимости от величины $J_{инж} / J_{пр}$.

Рассмотрен новый обобщенный подход к ускорению МИС на основе единого критерия - срыва процессов перезарядки на заднем склоне прианодной потенциальной ямы, включающий в себя полную совокупность параметров РЭП и дрейфа. В рамках подхода сформулированы основные требования к схеме коллективного ускорения МИС в РЭП, обладающей высокой эффективностью.

Впервые выполнены исследования зависимости эффективности коллективного ускорения МИС в вакууме в системах с изолированным анодом от предимпульсных характеристик ускорителя. Показано, что, при уменьшении длительности фронта импульса и амплитуды предимпульса, развязке каналов пробоя анода увеличивается повторяемость и эффективность коллективного ускорения МИС.

Выполнены исследования коллективного ускорения РЭП и МИС в асимметричных отражательных системах. Впервые показано, что коллективно ускоренные электронно-ионные фракции не коррелируют во времени друг с другом. Рассмотрена качественная модель коллективного ус-

корения ионов в этих системах, основанная на нестационарных процессах накопления и рассасывания объёмного заряда в системе, приводящих к осцилляции потенциала в отражательной системе.

2. В исследованиях по генерации ММП в отражательных системах (ОС):

Впервые показано существование двух режимов работы отражательных систем и возможность перехода от одного режима к другому.

Впервые предложены, разработаны и созданы новые ОС (отражательный триод с массивным, неразрушаемым анодом, асимметричный триод, тетрод), обладающие мировой новизной. Проведены теоретические и экспериментальные работы по генерации ММП в таких системах.

Выполнены экспериментальные и численные работы по генерации ММП с $A > 1$ в плазмонаполненных ОС, обеспечивающих генерацию пучка в режиме растущего импеданса, что предпочтительно для увеличения мощности ММП за счет банчирувания при транспортировке. Предложена и разработана плазмонаполненная ОС, обладающая мировой новизной.

Разработаны и исследованы новые типы магнитно-изолированных диодов, как источников ММП, обладающие мировой новизной. Выполнен цикл исследований ММП, генерируемых такими диодами. Получены новые результаты о механизмах электронных потерь, показана возможность получения с их помощью тяжелых ММП (Al , Cu , Pb) в подобных ММД.

3. В области применения ММП и ММС.

Разработаны новые ОС и ММД целевого назначения - для накачки лазеров, обладающие мировой новизной - неразрушаемый тетрод ленточного типа и ММД с катодом типа "белые колесо".

Впервые осуществлена накачка и генерация $Ar - N_2$ лазера с помощью коллективно ускоренных ММС (в том числе сгустками многозарядных ионов).

Впервые с помощью ММП (протоны) осуществлены:

а) накачка и генерация эксимерного лазера ($XeCl^*$) с различными наполнителями (Ar , He);

б) накачка и генерация молекулярного $Ar - N_2$ лазера на 4-х линиях 2^+ системы N_2 ($C \rightarrow B$);

в) цикл исследований основных характеристик указанных лазеров в зависимости от параметров ММП и активной среды;

г) режим сверхгенерации без резонаторов начинал с определенного уровня удельного энерговыклада ($W \approx 0,3 \text{ Дж/см}^3$).

4. В области ускорительно-диагностического комплекса.

Разработаны, сооружены и модифицированы наносекундные ускорители для работы в режиме генерации ММП.

Разработаны диагностические устройства, обладающие мировой но-

визной (пробёжные спектрометры).

Разработаны новые параллельные методики обработки экспериментальных данных, позволяющие значительно повысить надежность измерений параметров ММП.

Практическая ценность. Разработанный автором ускорительно-диагностический комплекс, а также выполненные работы по генерации и исследованию ММП и ММС, позволили в НИИ ЯФ к настоящему времени вернуть исследования по использованию ММП для накачки газовых лазеров, обработки материалов в технологических целях, по транспортировке и фокусировке ММП в плане нагрева плазмы и УТС; начать сооружение ионных НСУ на более высоких уровнях мощности (до 10^{12} Вт). Результаты выполнения исследований, включая устройства, обладающие мировой новизной (ОС, ММД, регистрирующие системы), используются в лабораториях института при сооружении новых ускорителей ММП и накачке лазеров, а также позволили выполнить ряд научно-исследовательских работ для МРТИ (г.Москва). Защищенные авторскими свидетельствами новые устройства внедрены в эксперименты.

Апробация работ. Работы, положенные в основу диссертации, представлялись и докладывались на IY, Y, VI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц в Москве в 1974 г. и в Дубне в 1976 г., 1978 г., на 2-м и 3-м Международных симпозиумах по коллективным методам ускорения заряженных частиц в Дубне в 1976 г. и в 1982 г., Лагуна Бич (Калифорния, США) в 1978 г., на VII Международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме в Новосибирске в 1976 г., на Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" в Томске в 1975 г., на III и IV Всесоюзных симпозиумах по сильноточной электронике в Томске в 1980 г. и в г.Новосибирске в 1982 г., на 2-ой, 3-ей и 4-й Международных конференциях по мощным электронным и ионным пучкам в Корнелле (США) в 1977 г., Новосибирске в 1979 г. и Паласо (Франция) в 1981 г., на 2-й Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов в Ленинграде в 1981 г., на Национальных конференциях по ускорителям в Сан-Франциско и Плеймесе (США) в 1979 г. и 1981 г., на X и XI Всесоюзных конференциях по когерентной и нелинейной оптике в г.Киеве в 1980 г., и в г.Брелане в 1982 г., Международной конференции Лазер-81 (США), Всесоюзных семинарах-совещаниях по физике и технике ионных источников в 1979, 1980 и 1981 г.г. в г.Киеве, Всесоюзном семинаре-совещании по ускорителям заряженных частиц и физике плазмы в г.Звенигороде в 1980 г., X-ой Европейской конференции по управляемому синтезу и физике плазмы в г.Москве в 1981 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликована-

ны самостоятельно и в соавторстве два монографических обзора, изданные в журналах "Известия ВУЗов" и "Успехи физических наук" в 1979 и 1980 г.г., статьи и доклады в журналах "ЖТФ", "ПТЭ", "Физика плазмы", "Письма в ЖТФ", "Известия ВУЗов", "Физика", "Квантовая электроника", а также в изданных в Атомиздате трудах НИИ ЯФ ТПИ вып.8, 1979, трудах Международного симпозиума по разрядам и электрической изоляции в вакууме в Новосибирске в 1976 г., трудах Международных симпозиумов по коллективным методам ускорения в г.Дубне в 1977 г., и Калифорнии (США) в 1978 г., трудах Международных конференций по исследованию и технологии мощных электронных и ионных пучков в Корнелле (США) в 1977 г., Новосибирске 1979 г., трудах Всесоюзных конференций по ускорителям заряженных частиц в г.Москве в 1976 и 1978 г.г., трудах института инженеров по электронике (раздел ядерные исследования) в 1979 г. и 1981 г. (США), трудах X Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике г.Киев в 1980 г., трудах 2-ой Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов в г.Ленинграде 1981 г., трудах Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике в г.Томске в 1980 г. и в г.Новосибирске в 1982 г.

Предложенные и внедренные новые устройства защищены авторскими свидетельствами, опубликованными в бюллетенях изобретений с 1976 по 1982 г.г.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 240 страницах машинописного текста, содержит таблицы на 8 страницах и иллюстрируется рисунками на 82 страницах. Работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка используемых литературных источников из 304 наименований.

Состояние вопроса и задачи исследований. Работы по источникам ионных пучков и сгустков насчитывают около 40 лет и связаны с появлением ускорителей тяжелых заряженных частиц и задачами, стоящими перед ними. Исторически они концентрировались вокруг ионных пучков

1. Векслер В.И. Когерентный принцип ускорения заряженных частиц. - Атомная энергия, 1957, т.5, с.427-430.
2. Будкер Г.И. Релятивистский стабилизированный электронный пучок. - Атомная энергия, 1956, т.5, с.9-19.
3. Файнберг Я.Б. Ускорение частиц в плазме. - Атомная энергия, 1959, т.6, в.4, с.431-446.
4. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. - М., Атомиздат, 1979, с.312.

квазинепрерывного характера с энергией на уровне десятков кэВ и током до долей - единиц ампер, получаемых в пламенных источниках. Дальнейшее развитие ускорительной физики поставило на повестку дня вопрос о новых методах ускорения, в том числе - коллективных, суть которых сводится к использованию собственных полей интенсивных пучков и сгустков заряженных частиц, в основном - электронов. основополагающие работы Векслера В.И.^{/1/}, Будкера Г.И.^{/2/} и Файнберга Я.Б.^{/3/} по новым методам ускорения и удержания заряженных частиц, доложенные на Международном симпозиуме в Женеве в 1956 г., обеспечили "права гражданства" и развертывание широкого фронта исследований по коллективным методам ускорения во многих лабораториях мира. Усилиями больших коллективов ученых лабораторий ОИЯИ ОИМУ (Векслер В.И., Саранцев В.П., Перельштейн Э.А., Бонч-Осмоловский В.Г., Иванов И.Н. и др.) ФИАН, а (Коломенский А.А., Цытович В.И., Аскаръян Г.А. и др.) был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, завершившийся созданием электронно-кольцевого метода ускорения и жизнеспособного ускорителя интенсивных сгустков многозарядных ионов в лаборатории Векслера В.И. - Саранцева В.П.^{/4/}. Параллельно с этими исследованиями пионерские работы группы Шютто А.А. (СФТИ)^{/5/} по генерации мощных ионных пучков в вакуумных и плазмоннаполненных диодах предвосхитили будущие экспериментальные исследования по коллективному ускорению ионов на медленных волнах в плазме, идеи которого были заложены Файнбергом Я.Б. в 1956 г.

"Второе дыхание" и реальную технологическую базу указанные методы коллективного ускорения получили в конце 60-х годов благодаря появлению принципиально нового класса электронных ускорителей - наносекундных сильноточных ускорителей прямого действия, обеспечивающих пиковые мощности до $(10^{13} + 10^{14})$ Вт, энергии до десятка МэВ и собственные поля до 10^{8+9} В/м. Все последующие годы развития коллективных методов ускорения, начиная с первых экспериментов группы Грейбилла С.Е. в 1968 г.^{/6/}, так или иначе связаны с прямыми интенсивными релятивистскими электронными пучками (РЭП), дрейфующими в нейтральном газе, плазме или вакууме. Здесь необходимо отметить вклад коллективов отечественных лабораторий ФИАН (Коломенский А.А., Цытович В.И., Лебедев А.И. и др.)^{/7/}, УФИ (Файнберг Я.Б., Курилко

5. Шютто А.А. Ускорение положительных ионов в расширяющейся плазме вакуумных искр. - ЖТФ, 1960, т.39, с.1589-1591.
- 6: Graybill S., Uglum J., Rizze J. et al. Observation of Energetic Ions from a Beam Generated Plasma. - Proc. of VII -th Int. Conf. on High Energy Accel., Cambridge, 1967, p. 289-291.

В.И. и др.) и лабораторий США (Ростокер Н., Патнем С., Олсон К.Л., Струй Д.С., Миллер Р.Б., Нейшн Дж., Куэва Г., Дроммонд В.Е. и др.)^{/8/}. Накопленный к настоящему времени большой экспериментальный и теоретический материал по коллективному ускорению ионов в прямых РЭП, тем не менее, еще не сложился в единую теорию этого явления.

Вместо нее выдвинуто более десятка моделей, с разной степенью полноты и точности согласующихся с экспериментальной статистикой. Многие из них носят постулятивный характер (к примеру, концепция глубокой потенциальной ямы стационарного характера, предельного тока), а также не учитывают реальных особенностей РЭП. Все это обуславливает необходимость дальнейших экспериментальных и теоретических исследований с упором на проверку указанных концепций коллективного ускорения и обобщение полной совокупности прежних и новых результатов в едином подходе к этому явлению.

С другой стороны, быстрое развитие импульсной сильноточной технологии естественным образом привело к середине 70-х годов к генерации мощных ионных пучков в самих диодных системах ускорителей. Эти пучки отличаются от классических квазинепрерывных ионных пучков уровнями токов (на 5-6 порядков больше), ускоряющих напряжений (выше на 1+2 порядка), длительностью (на 6+7 порядков меньше).

Основные проблемы эффективной генерации МИП в диодных системах связаны с необходимостью подавления электронного тока, получения плотной анодной плазмы требуемых параметров, являющейся источником ионного пучка, а также активного контроля внутридиодных процессов (движение плазмы, неустойчивости РЭП и т.д.). К началу выполнения диссертационной работы в 1974 г. в области генерации мощных ионных пучков в диодных системах имелись единичные публикации Винтерберга Ф., Судана Р.Н., Прона Д.С. и др.^{/9-II/*}, в которых была показана такая возможность. Развитие этого направления требовало планомерных исследований полного комплекса вышеперечисленных проблем, включая теоретическую и экспериментальную разработку новых диодных систем, обладающих значительно большей эффективностью и ресурсом работы, а также возможностью активного управления параметрами МИП.

- 7* Айрапетов А.И., Синильщикова И.В. Коллективное ускорение ионов в сильноточных релятивистских электронных пучках. АТ за рубежом, 1981, т.6, с.11-21.
- 8* Olson C.L. Collective Ion Acceleration.-Springer Tracts in Modern Physics, Springer-Verlag, 1979, v.84, 144p.

Т.о., к настоящему времени получение мощных ионных пучков и ступков, как новое направление ускорительной физики, разделяется на:

- 1) коллективное ускорение МИС в прямых интенсивных электронных пучках, дрейфующих в нейтральном газе, плазме или вакууме;
- 2) генерацию МИП в диодных системах наносекундных или микросекундных ускорителей прямого действия.

Проблемам, связанным с указанным новым направлением, теоретическим и экспериментальным исследованиям в области получения МИП и МИС и их применения, а также анализу их перспектив и посвящена представляемая диссертация.

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

1. Разработка, сооружение и использование в исследованиях ускорительно-диагностического комплекса, включая разработку новых методик исследований и диагностической аппаратуры.
2. Экспериментальное и теоретическое исследование коллективного ускорения МИС в РЭП, дрейфующих в нейтральном газе и вакууме, и выполнение совместного анализа новых и имеющихся экспериментальных и теоретических материалов с целью обобщения подходов к этому явлению.
3. Экспериментальное и теоретическое исследование физических механизмов и закономерностей генерации МИП в диодных системах, характеристик МИП, включая оптимизацию их параметров, фокусировку и транспортировку, а также разработку и создание новых диодных систем, обладающих лучшими параметрами по сравнению с известными.
4. Экспериментальное исследование применения МИП для накачки газовых лазеров на новых уровнях мощности накачки, излучения и длинах волн.

К защите выносятся следующие тезисы:

А. По коллективному ускорению ионов в РЭП:

- 9* Winterberg F. The Possibility of Producing a Dense Thermonuclear Plasma by an Intense Field Emission Discharge.-Phys.Rev., 1968, v.174, p.212-220.
- 10* Creedon J.M., Smith I.D., Prono D.S. Method of Generating of Very Intense Positive Ion Beams.-Phys.Rev.Lett., 1975, v.55, n.2, p.91-97.
- 11* Humphries S.Jr., Lee J., Sudan R.N. Generation of Intense Ion Beams.-Appl.Phys.Lett., 1974, v.25, p.20-22.

1. Инжекция РЭП в полость дрейфа, заполненную нейтральным газом при низком давлении ($p < 1$ мм рт.ст.), не сопровождается формированием квазистационарной потенциальной ямы глубиной $\Phi_a \approx (2+3) \epsilon_e / e$. В случае возникновения такая яма носит нестационарный характер и имеет малое время жизни (доли нс), в течение которого ионы могут пройти барьер перезарядки и участвовать в дальнейшем ускорении.

2. Начало ускорения ионов в РЭП обусловлено только срывом процесса перезарядки на заднем склоне прианодной потенциальной ямы, возникающем при выполнении неравенства $E / \rho \geq 10^6$ В/см мм рт.ст.; условие $J_{инж} / J_{пр} \geq 1$ в общем случае не является необходимым и достаточным для ускорения ионов до энергий, соответствующих глубине провисания потенциала в РЭП и более.

Диапазон газовых давлений, при котором наблюдается ускорение ионов, зависит от $J_{инж} / J_{пр}$ и расширяется с увеличением этого отношения, а оптимум давления (при достаточной длительности импульса), как и его верхняя граница, смещаются в сторону больших давлений. С увеличением энергии инжекции РЭП пороговая величина $J_{инж} / J_{пр}$ уменьшается.

3. Существуют два режима распространения РЭП в нейтральном газе: при давлении $p > 1/p$ в зависимости от величины $J_{инж} / J_{пр}$: при наличии ($J_{инж} / J_{пр} \gg 1$) и без формирования ($J_{инж} / J_{пр} \approx 2+3$) виртуального катода на его фронте.

4. Эффективность и повторяемость процессов коллективного ускорения ионов в системах с изолированным анодом критичным образом зависят от длительности фронта импульса и амплитуды предимпульса, влияющих на состояние анод-катодного зазора, заанодного пространства к моменту прохождения в него РЭП и симметрию образовавшейся анодной плазмы.

5. Коллективно ускоренные электронные и ионные фракции в асимметричных отражательных системах (к примеру, в тетрадах) не коррелируют друг с другом во времени. Появление первой из них обусловлено генерацией вихревой ЭДС при запираании тетрада пространственным зарядом осциллирующих электронов в А-К зазоре; появление второй фракции - осцилляциями потенциала в области анод-виртуальный катод.

Б. По генерации мощных ионных пучков в диодных системах.

1. Существует два режима генерации МПП в отражательных системах:

- а) режим раннего образования анодной плазмы и преобладания зарядо-нейтрализационных процессов, при котором наблюдается возрастание электронно-ионных компонент тока с уменьшением толщины анода;
- б) режим позднего образования плазмы и преобладание процессов

закопления пространственного заряда, при котором наблюдается возрастание электронной компоненты тока с увеличением толщины анода.

2. Эффективность генерации МПП может быть существенно повышена при использовании новых типов отражательных систем - асимметричных триодов и тетродов, генерирующих преимущественно один ионный пучок.

3. Повторяемость параметров МПП может быть существенно улучшена, а ресурс работы ускорителя расширен (до 10^{2+3} выстрелов) при использовании массивного неразрушаемого анода.

4. Вывод МПП в сторону виртуального катода не обеспечивает его полной токовой компенсации и отрицательно сказывается на возможностях транспортировки в закатодной области.

5. Использование плазмонаполненной ОС обеспечивает:

а) генерацию МПП с нарастанием во времени импеданса пучка ускорителя в течение основной части импульса и, следовательно, возможность пространственного банширования МПП при его транспортировке к мишени;

б) генерацию пучков ионов с $A > 1$.

6. Использование в МИД катода или анода в качестве токнесущего электрода, создающего быстрое изолирующее магнитное поле, обеспечивает генерацию мощных пучков требуемой геометрии, параметров и их баллистическую фокусировку.

7. Величина превышения Чайльд-Ленгмюровского предела ионного тока в МИД растет с увеличением длительности импульса и массы ионов и достигает порядка и более (для $\tau_{инп} \leq 100$ нс, $B \leq 28$ кр; при работе с пучками ионов углерода $J_i / J_{пр} \approx 14$), что обусловлено нейтрализацией (А-К) зазора вдоль силовых линий.

8. Незащитный азимутальный дрейф электронов в МИД с B_z -полем приводит к потерям на анод с образованием анодной плазмы и возможности генерации пучков тяжелых ионов из материала анода.

9. Применение магнитного изолирующего поля типа "апельсин" (нулевой магнитный поток, пересекаемый ионами) обеспечивает генерацию и транспортировку МПП к оси диода в свободном пространстве.

В. По использованию мощных ионных пучков:

1. Высокие удельные энергопотери ионов в веществе (в частности - в газе), их нерелятивистский характер делают МПП перспективными для накачки газовых лазеров в области коротких длин волн.

2. При использовании МПП для генерации лазерного излучения возможны:

а) работа на уровнях полной эффективности ($\eta = E_n / E_i$), превышающих соответствующие величины при накачке с помощью РЭП;

здесь: E_A - энергия лазерного излучения, E_i - полная энергия ионного пучка;

б) работа без резонатора, т.е. сверхгенерация;

в) использование легких буферных газов (гелий и т.д.), чьи полосы поглощения лежат выше области генерации;

г) снятие ограничения по длительности импульса и парциальному давлению лазерующего компонента смеси при работе на самоограниченных переходах (к примеру, в $Ag - N_2$).

3. Возможна генерация лазерного излучения с помощью многозарядных коллективно ускоренных МИС с $A > I$ (гелий, азот).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В основу диссертации положены результаты разработки ускорительно-диагностического комплекса, исследования коллективного ускорения МИС в РЭП, дрейфующем в нейтральном газе и вакууме, исследования по генерации ММП в диодных системах, включая разработку новых типов таких систем, исследования накачки газовых лазеров с помощью ММП и МИС.

Во введении вкратце охарактеризовано новое направление - генерация ММП и МИС, области его применения и основные проблемы, стоящие перед ним. Приведено перечисление содержания глав и сформулированы тезисы, выносимые к защите.

В первой главе дан обзор современного состояния работ по коллективному ускорению МИС в РЭП и генерации ММП в диодных системах двух типов - отражательных системах и магнитно-изолированных диодах, а также сформулированы задачи исследований, решаемые в диссертации. Обзорная глава, в основном, следует монографическим обзорам автора и в соавторстве с А.Н. Диденко [1,2].

В § 1.1 изложены основные идеи и принципы коллективного ускорения ионов, заложенные Векслером В.И., Будкером Г.И., Файнбергом Я.Б., и приведена классификация развиваемых в настоящее время коллективных методов ускорения МИС в прямых РЭП.

В § 1.2 рассмотрены основные модели ионизационно-фронтального типа коллективного ускорения МИС в нейтральном газе, сформулированы их общие черты, дан анализ предсказываемых ими характеристик процессов ускорения МИС и возможности экспериментальных проверок. В плане моделей анализируются возможности повышения КПД коллективных методов ускорения МИС и некоторые предложения в этом направлении.

В § 1.3 выполнен обзор экспериментальных и численных работ по ускорению МИС в РЭП, дрейфующих в нейтральных газах и вакууме, и

сравнительный анализ их с рассмотренными выше моделями. Показано, что основные концепции некоторых моделей - (Ростокера-Науки, Оксона) глубокой стационарной потенциальной ямы в предельного тока нудаются в экспериментальной проверке. Во второй части параграфа показана неоднозначность имеющегося экспериментального материала по ускорению МИС в РЭП, дрейфующем в вакууме, и необходимость в дальнейших исследованиях.

§ 1.4 посвящен обзору теоретических и экспериментальных исследований по генерации ММП в отражательных триодах (ОТ) и двойных диодах. Выполнен анализ двухкомпонентных потоков (электронно-ионных) в диодных системах. Рассмотрены стационарные модели симметричных отражательных триодов и двойных диодов. Основной чертой этих моделей является предсказываемый ими коллапс импеданса диода и появление расходимости токов для бесконечной мощности генератора при наличии дисперсии энергии осциллирующих электронов. Приведены основные данные экспериментальных исследований генерации ММП в ОТ, выполнено сравнение с предсказаниями моделей.

§ 1.5 посвящен теоретическим и экспериментальным исследованиям генерации ММП в магнитно-изолированных диодах. Рассмотрены общие характеристики магнитной изоляции, приведены основные соотношения, связывающие величины магнитных полей и параметров диода, выполняющиеся при её достижении. Изложены стационарные модели МД, основанные на различных допущениях о виде дрейфового электронного потока. Модели предсказывают, как качественно, так и количественно различное поведение диода, что позволяет провести сравнительный анализ с экспериментами. Такой анализ выполнен по основной совокупности реферированных работ.

В § 1.6 сформулированы основные выводы по выполненным обзорам и поставлены задачи исследований в области коллективного ускорения МИС в прямых РЭП, дрейфующих в нейтральном газе и вакууме, а также в области генерации ММП в отражательных и магнитно-изолированных системах.

Вторая глава посвящена описанию ускорительно-диагностического комплекса, использованного в экспериментальных исследованиях [3-8].

§ 2.1 посвящен ускорителям, включающим в себя: модифицированную версию ускорителя "Тонус", ускоритель "ВЕРА"/5/ (см. рис. 1). Приведено краткое изложение расчётных и экспериментальных характеристик ускорителей.

В § 2.2 сформулированы основные проблемы диагностики ММП, возникающие в связи с их значительной степенью токовой и зарядовой компенсации, а также большим энерговыделением при взаимодействии с

измерительными блоками и существенной ролью вторичных процессов (плазмообразование, вторичные электроны).

Электрофизические методы диагностики рассмотрены в § 2.3. Приводятся описания детекторов МИП и МИС время-пролетного и пробного типов /3,4,6/, цилиндровФарадея, ионных профилометров.

§ 2.4 посвящен ядерно-физическим методам исследования - активационным и нейтронно-активационным, использующим технику восстановления спектра МИП по активационным выходам нескольких детекторов (стопы фольги).

Калориметрические и оптико-физические методы изложены в § 2.5. Здесь рассмотрены различные конструкции калориметров, обеспечивающие подавление разлета плазмы, ЭОП - система и гамма-детекторы на базе ФЭУ и ЭМУ-19 /7/.

И, наконец, в § 2.6 дается сравнительный анализ параллельных методов исследования и анализируются ошибки измерений. Показано, что электрофизические измерения при выполнении определенных условий дают показания, согласующиеся с ядерно-физическими и калориметрическими с точностью до коэффициента $1.5 \div 2$.

Третья глава посвящена исследованию коллективного ускорения МИС на фронте РЭП, дрейфующих в нейтральном газе. В ней изложены основные новые результаты теоретических и экспериментальных работ автора в этом направлении /8+19/.

В § 3.1 дано описание экспериментальных установок, используемых в работе /9,11,17/ (рис. 2).

В § 3.2 приведены основные результаты исследований ускорения МИС в аксиальном направлении, которые сводятся к следующему /9,10,14/.

1. Пороговые величины $J_{инж} / J_{пр}$, с которых начинается ускорение ионов, уменьшаются с увеличением энергии электронов РЭП (при прочих неизменных параметрах) и простое выполнение условия $J_{инж} \geq J_{пр}$ в общем случае становится явно недостаточным для начала ускорения (см. рис. 3).

2. С увеличением $J_{инж} / J_{пр}$ происходит расширение диапазона газовых давлений в режиме ускорения ионов, в optimum давления смещается в более высокую сторону (см. рис. 4).

3. Средняя энергия МИС возрастает с увеличением $J_{инж} / J_{пр}$.

§ 3.3 посвящен экспериментальным исследованиям формирования ускоряющих полей в привнодной области при наложении и без внешнего магнитного поля /11,14,15/. При наложении внешнего магнитного поля $B_z \geq 2B_{кр}$ выполнялись прямые измерения провисания потенциала РЭП в привнодной области, а без поля - измерялись верхние границы энер-

гии электронных и ионных потоков в радиальном направлении. Основные результаты этих исследований сводятся к тому, что в привнодной области, независимо от наличия или отсутствия магнитного поля, провисание потенциала в РЭП не превышает ξ_e / e , где ξ_e - энергия инжектируемых электронов. Установлено существование двух режимов транспортировки РЭП - с виртуальным катодом на его фронте и без виртуального катода в зависимости от величины превышения $J_{инж}$ над $J_{пр}$.

Статистическое моделирование коллективного ускорения ионов в радиальном направлении, выполненное в § 3.4, согласуется с экспериментальными результатами для моделей формирования потенциальной ямы статического типа с глубиной $\approx \xi_e / e$ (либо с короткоживущей < 1 нс) глубокой ямой, имеющей глубину $\approx 1,5 \xi_e / e$ /16/.

В § 3.5 приведены численные исследования формирования потенциальных полей в инжекции РЭП в пространство дрейфа различных конфигураций /17-19/. Суть результатов сводится к тому, что инжекция РЭП с конечными длительностями фронта напряжения (в реальной ситуации) не приводит к формированию глубокой ямы (при учете лишь квазистатических полей) (рис. 5). В случае отсутствия фронта напряжения РЭП глубокая яма носит существенно нестационарный характер (длительность - доли нс), т.е. не может быть ответственна за ускорение ионов до конечной энергии $\xi_i \approx Z_i \xi_e (1 + 5)$.

На основании полной совокупности уже имеющихся в новых экспериментальных данных в § 3.6 рассмотрен обобщенный подход к коллективному ускорению ионов, основанный на выполнении единственного условия - $(E / \rho \geq 10^6 \text{ В/мм рт.ст.})$, т.е., срыва процессов перезарядки на заднем склоне потенциальной ямы. Рассматриваемый подход включает полную совокупность всех параметров РЭП и пространства дрейфа, и в его рамках естественным образом находят объяснения основные закономерности ускорения МИС (определенные пороговые значения $J_{инж} / J_{пр}$; существование и зависимость нижнего и верхнего давлений срыва ускорения МИС от параметров РЭП и дрейфа; зависимости максимальных энергий МИС от $J_{инж} / J_{пр}$, скорости фронта РЭП и т.д.). Для широкого круга работ выполнено сравнение предсказываемых моделью и наблюдаемых значений ($J_{инж} / J_{пр}$).

И, наконец, в § 3.7 формулируются основные выводы из проведенных экспериментальных и численных исследований, а также рекомендации по оптимизации рассмотренного метода газового ускорения МИС на фронте РЭП.

В четвертой главе изложены экспериментальные исследования кол-

деятельного ускорения МИС в вакууме в системах с изолированным анодом, а также в отражательных асимметричных системах /19,21/.

В § 4.1 приведены описания экспериментальных установок (см. рис. 6).

§ 4.2 и § 4.3 посвящены исследованиям коллективного ускорения МИС в системе с одиночным анодом и в системе с заанодными электродами. Основные результаты экспериментов таковы.

1. Эффективность и повторяемость коллективного ускорения МИС возрастают с уменьшением длительности, амплитуды предимпульса и длительности фронта импульса, влияющих на состояние (А-К) зазора к моменту прохождения РЭП в заанодное пространство, а также время образования анодной плазмы, ее симметричность. В рассмотренной модели ускорения предпочтительны короткие фронты напряжения, подавление зарядного предимпульса и хороший вакуум (10^{-5} мм рт.ст.). Как правило, более высокоэнергетичная компонента ионов ускоряется в более поздние моменты времени (≈ 50 нс).

2. В целом, надежное и высокоэффективное ускорение ионов в системах с изолированным анодом может быть получено при осуществлении активного контроля за временем образования, плотностью и симметричностью электродной плазмы на аноде, к примеру с помощью развязки каналов пробоя анода, применения сторонней плазмы или управляемого разряда на поверхности анода /20,21/.

3. Введение заанодных электродов приводит к увеличению максимальной энергии ионов.

§ 4.4 посвящен исследованию коллективных процессов ускорения МИС в отражательных системах и взаимосвязи электронно-ионных коллективных фракций. Экспериментально показано, что появление "быстрых" электронов обусловлено генерацией вихревой э.д.с. вследствие периодического защипывания диодного зазора пространственным зарядом электронов, в коллективно ускоренных ионов - осцилляциями потенциала в анод - катодном зазоре.

В § 4.5 сформулированы основные выводы по четвертой главе.

В пятой главе излагаются экспериментальные и теоретические исследования отражательных систем /5,7,22-31/.

В § 5.1 описаны экспериментальные установки /5,7,22/.

В § 5.2 и § 5.3 приведены основные результаты экспериментов по генерации МИП и изучению их характеристик в симметричных ОС с разрушаемыми и неразрушаемыми анодами. Они сводятся к следующему:

1. Работа симметричных ОС характеризуется двумя режимами - сильноточным и слаботочным, обусловленными наличием двух конкурирующих процессов. В первом из них благодаря раннему в интенсив-

ному образованию плазмы преобладают зарядно-нейтрализационные процессы, во-втором преобладают процессы накопления пространственного заряда. Первый режим свойственен низкоимпедансным ускорителям (или при работе с хорошим плазмообразованием на аноде).

Второй режим может наблюдаться при работе на умеренных уровнях мощности с проводящими анодами /1,7/ (рис. 7).

2. Использование массивных неразрушаемых анодов значительно увеличивает ресурс работы отражательных систем (в 10^{2+3} раз) ценой приемлемого уменьшения к.п.д. (до 30%) /23,24/.

В § 5.4 изложена стационарная модель асимметричного отражательного триода (АОТ), обладающего по сравнению с ОТ повышенным к.п.д. и импедансом. Модель предсказывает возможность генерации МИП с ионным током на уровне $10^{-1} J_{eчл}$ /25,26/.

Приведены результаты экспериментального исследования АОТ, выполнено сравнение со стационарной моделью. Показано, что наблюдаемая функция распределения осциллирующих электронов по энергии скорее приближается к убывающей (рис. 9) /25,27/.

В § 5.6 рассмотрены стационарная модель и экспериментальное исследование генерации МИП в тетраде /28,29/. Показано, что характер работы тетрады определяется влиянием двух конкурирующих вкладов в суммарную плотность пространственного заряда в зазорах (К-А₁), (А₁-А₂) и (А₂-ВК) - вклада электронов, осциллирующих вокруг обоих анодов, и вклада электронов, осциллирующих вокруг одного из анодов. В результате, генерация МИП характеризуется наличием максимума, растущего с увеличением отношения (А₁-А₂)/(А₁-К) и смещающегося в сторону больших значений толщин анодов. Экспериментальные результаты находятся в хорошем качественном согласии с рассмотренной стационарной моделью (рис. 9).

§ 5.6 посвящен экспериментальному и численному исследованию генерации МИП в плазмонаполненных триодах /30,31/. Показана перспективность использования плазмонаполненных триодов для генерации МИП с $A > 1$, а также для получения бунчирующего МИП на мишени для целей УТС; последнее обусловлено ростом напряжения на аноде триода в течение большей части импульса. Основные выводы этих исследований таковы:

1. Импеданс плазмонаполненного триода является возрастающей функцией времени (рис. 10).

2. Скорость нарастания напряжения на триоде (и энергия МИП) находятся в обратной зависимости от атомного веса ионов и плотности плазмы.

3. Оптимальное расстояние для облучения ионов с заданным энергетическим разбросом возрастает с уменьшением массы ионов и увеличением их энергии.

4. При оптимальной плотности плазмы (для конкретного импеданса генератора) максимальные величины ионных токов превосходят Ч.-Л. значения в (3+5) раз, что согласуется с уровнем потерь электронов на анод. Эффективность генерации МИП 10%-25%.

И, наконец, в заключительной этой главе § 5.7 перечислены основные результаты исследований ОС в целом.

Шестая глава отведена под исследования генерации МИП в магнитно-изолированных диодах ^{/32-37/}.

В § 6.1 приводятся экспериментальные установки различных конструкций - коаксиальные МИД с несколькими разновидностями магнитных изолирующих полей, генерирующие сходящиеся к оси МИП ^{/32-35/}.

В § 6.2 изложены эксперименты по генерации МИП в новом МИД с внутренним B_z - полем, замкнутой конфигурации типа "апельсин" (рис. II) ^{/34/}. Такая геометрия обеспечивает высокую стабильность электронного потока и малые потери его на анод. Эксперименты показали сильное влияние асимметрии магнитных полей и неоднородности генерации плазмы на результирующую эффективность генерации МИП. Полученные значения J_i лежат на уровне Ч.-Л. величин ^{/36,37/}.

§ 6.3 посвящен исследованию генерации МИП в МИД с B_θ - полем, создаваемым током, протекающим по цилиндрическому катоду типа "белочье колесо" ^{/33,36/} (рис. I2).

Основные результаты этих исследований таковы:

1. Величины электронных потерь, в основном, определяются минимальным (А-К) расстоянием и слабо зависят от других параметров - полной длины и формы анода.

2. Распределение плотности тока вдоль образующей поверхности анода соответствует уменьшению эффективного А-К зазора вследствие осевого дрейфа и накопления на краю электронов.

3. Максимальные плотности МИП превышают соответствующие Ч.-Л. величины примерно до порядка и нарастают с увеличением длины импульса и массы ионов, что указывает на существенную нейтрализацию зазора вдоль магнитных силовых линий в процессе дрейфа электронов (см. рис. I3). Эксперименты показали высокую степень баллистической фокусировки, достигающей (80-90)% от геометрической; к.п.д. генерации МИП достигало 67%.

Разновидность МИД с катодом типа "белочье колесо" в B_z -изолирующим магнитным полем рассмотрена в § 6.4. Подобный МИД работает на более высоком уровне электронных потерь (за счет неидеальной

экспериментальной) на анод, приводящих к его разогреву и образованию плазмы, служащей источником ионов, имеющих природу, как десорбированных газов, так и материала анода ($A/Z \gg 1$). Величины удельных пороговых энерговкладов, приводящих к образованию плазмы, уменьшаются с увеличением индукции магнитного поля и оказываются значительно меньше расчетных ($0,1 + I \text{ Дж/см}^2$), что свидетельствует о "брежнем характере" электронных потоков потерь. Амплитуды генерируемых МИП при $B_z \leq 2B_{кр}$ превышает соответствующие Ч.-Л. значения в 7-15 раз в зависимости от атомного веса материала анода.

И, наконец, в § 6.5 перечислены основные результаты и выводы по генерации МИП в рассмотренных коаксиальных МИД.

Седьмая глава посвящена применению МИП и МИС для накачки газовых лазеров.

В § 7.1 изложены основные положения теоретических моделей накачки газовых лазеров на примере нескольких газовых смесей $Ar - N_2$ и $He - Ar - CCl_4$ (либо $He - He - CCl_4$). Обсуждаются преимущества накачки газовых лазеров с помощью МИП по сравнению с другими методами накачки. К их числу относятся - высокая тормозная способность МИП и, соответственно, высокая удельная мощность накачки; возможность использования в связи с этим легких буферных газов; более низкоэнергетичный спектр вторичных электронов.

Экспериментальные установки, использовавшиеся в экспериментах, описаны в § 7.2. Ленточный МИП генерировался с помощью целевидного неразрушаемого тетрода, к.п.д. использования пучка в котором достигал 75% ^{/37,39/}. Сходящийся МИП генерировался в коаксиальном МИД с осевым расположением газовой кюветы ^{/33/}. Во всех экспериментах использовалась поперечная накачка (рис. I4).

В § 7.3 дано описание экспериментов и основных результатов накачки $Ar - N_2$ с помощью МИС H^+, D^+, He^+, N^+ ^{/38/}. Размеры лазерного луча соответствует расчетным пробегам ионов соответствующего сорта ^{/31/}. Показана возможность использования коллективно ускоренных ступков ионов для этих целей.

В § 7.4 изложены результаты накачки $Ar - N_2$ лазера с помощью МИП, генерируемых в описанных выше установках ^{/40,41/}. Вкратце они таковы:

1. К.п.д. полный (отношение лазерного энерговыхода к полной энергии ионного пучка) генерации превышает соответствующие величины при накачке электронным пучком и в оптимуме составляет $\approx 2\%$.

2. Получена генерация на всех 4 линиях 2^+ системы молекулы азота ($C \rightarrow B$), а также снятие самоограничения по нижнему рабоче-

му уровню, так, что длительность генерации соответствует длительности накачки.

3. С увеличением мощности МИП наблюдается увеличение оптимального содержания N_2 в смеси $Ar - N_2$ во всем диапазоне экспериментальных энергокладов вплоть до $W \approx 1 \text{ Дж/см}^3$ (рис. 15).

4. При превышении удельной мощности накачки пороговой величины ($W \geq 0,3 \text{ Дж/см}^3$) получена сверхгенерация.

5. Использование МИП для накачки $Ar - N_2$ обеспечивает оптимальную работу на существенно более низких давлениях, чем в случае электронно-пучковой накачки (в диапазоне $I+3 \text{ атм}$).

§ 7.5 посвящен накачке с помощью МИП эксимерного лазера $XeCl^*$ с различными буферными газами. Новые результаты формулируются ниже /42,43/:

1. Исследованы зависимости эффективности генерации $XeCl^*$ лазера от полного набора параметров МИП в активной области.

2. Показано, что применение МИП для накачки $XeCl^*$ обеспечивает:

а) оптимальную генерацию на уровнях давления смеси \approx в 3 раза меньших, чем в случае электронно-пучковой накачки;

б) использование легких буферных газов с меньшим собственным поглощением;

в) работу в режиме сверхгенерации.

3. Исследовано явление срыва генерации, обусловленное "перегревом" смеси при превышении удельным энергокладом оптимальной величины.

Основные результаты работы, включаясье обнаружение, исследование, применение новых явлений и разработку новых устройств, сводятся к следующему:

1. Разработан, сооружен и использован в экспериментах ускорительно-диагностический комплекс, включающий в себя наносекундный ускоритель "ВЕРА" и модифицированную версию ускорителя "Тонус", а также специализированные детекторы для регистрации МИП, МИС, РЭП, в том числе:

а) пробегные спектрометры, обладающие мировой новизной (получено два авторских свидетельства);

б) ионные профилометры;

в) секционированные, коллимированные ИФ;

г) системы для ядерно-активационных измерений;

д) калориметры, работающие в условиях интенсивного плазмообразования;

е) электронно-оптические системы диагностики.

2. Выполнен полный комплекс исследований по генерации МИП в отравляемых системах, в том числе:

а) впервые показано существование двух режимов работы ОС-связанного и слабосвязанного, зависящих от конкурентного вклада процессов накопления и нейтрализации пространственного заряда;

б) впервые предложена и исследована генерация МИП, как в теоретическом, так и экспериментальном аспектах в новом классе ОС (в частности в асимметричных триодах, в тетродах);

в) получены новые результаты по генерации МИП с $A > I$ в плазмоннополненных ОС;

г) разработан и оптимизирован новый класс ОС, обеспечивающий более высокий к.п.д. и ресурс работы, обладающий мировой новизной (получено четыре авторских свидетельства).

3. Выполнены исследования по генерации МИП в коаксиальных МИД с баллистической фокусировкой, в том числе:

а) предложен новый способ создания изолирующего магнитного поля путем пропускания стороннего тока по одному из электродов диода;

б) разработаны, сооружены и исследованы МИД, обладающие мировой новизной (получено четыре авторских свидетельства);

в) показана возможность эффективной генерации МИП с $A \gg I$;

г) получены новые результаты при исследовании электронных потерь и зарядовой нейтрализации поперек магнитного поля.

4. Выполнен цикл исследований коллективного ускорения ионов в нейтральном газе в вакууме, в том числе:

а) впервые проведены экспериментальные измерения квазистатических ускоряющих полей и радиально направленных потоков ионов, возникающих в прианодной области при инжекции РЭП в нейтральное пространство дрейфа;

б) предложен единый подход к явлению коллективного ускорения МИС в нейтральном газе, объединяющий полную совокупность экспериментальных результатов;

в) впервые исследована зависимость эффективности ускорения МИС в системах с изолированными электродами от предимпульсных характеристик ускорителя;

г) предложен способ управления процессом генерации анодной плазмы в этих системах, обладающий мировой новизной (получено авторское свидетельство).

5. Впервые осуществлены с помощью МИП:

а) накачка и генерация лазерного излучения в лазере ($Xe - Ar - CCl_4$); ($Xe - He - CCl_4$);

б) генерация лазерного излучения на 4-х линиях ($0 \rightarrow 0$); ($0 \rightarrow 1$); ($0 \rightarrow 2$); ($0 \rightarrow 3$); 2+ системы молекулы азота ($C \rightarrow B$) в $Ar-N_2$ лазере;

в) цикл исследований зависимости характеристик генерации излучения от параметров МП в указанных выше газовых смесях;

г) лазерная генерация без резонатора (однопроходовая генерация)

6. Впервые осуществлены накачка и генерация лазерного излучения в смесь $Ar-N_2$ с помощью ионов He^+ , N^+ , коллективно ускоренных в нейтральном газе.

Т.о., выполненный под руководством автора комплекс исследований, включающий разработку новых устройств, представляет собой новое перспективное направление сильноточной электроники - получение, исследование и применение мощных ионных пучков в дводных и дрейфовых системах наносекундных сильноточных ускорителей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ

1. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Сильноточные ионные пучки. - УФН, 1980, т.132, с.92-122.
2. Быстрицкий В.М. Импульсные сильноточные ионные пучки. - Известия вузов, Физика, 1979, т.10, с.83-105.
3. Быстрицкий В.М., Стерлигов А.Г., Усов Ю.П. Пробезно-пролетный спектрометр ионов. - ПТЭ, 1976, № 3, с.42-43.
4. Быстрицкий В.М., Котляровский Г.И., Цак В.С., Стерлигов А.Г. Спектрометр заряженных частиц. - Авторское свидетельство № 550864 от 9.06.1975. Бюллетень ОИИОТЗ, 1978, № 1, с.223.
5. Арбузов А.И., Быстрицкий В.М., Подкатов В.И. и др. Сильноточный ускоритель "БЕРА". - Труды НИИ ЯЭ, М7, Атомиздат, 1979, с.5-8.
6. Быстрицкий В.М., Толмачева В.Г. Спектрометр заряженных частиц. Авторское свидетельство № 742847 от 27.03.1978. Бюллетень ОИИОТЗ, № 23, 1980.
7. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е. Исследование генерации сильноточных ионных пучков в триодных и тетродных системах. - Известия вузов, Физика, 1980, т.11, с.99-102.
8. Быстрицкий В.М., Ремнев Г.Е., Стерлигов А.Г., Усов Ю.П. Исследование ускорения ионов в релятивистских сильноточных пучках электронов. - Труды Всесоюзной конференции по разработке и практическому применению электронных ускорителей, Томск, 1975, с.175.
9. Быстрицкий В.М., Подкатов В.И. К вопросу о пороговых характеристиках в коллективном ускорении ионов в нейтральном газе. - ЕТФ, 1982, т.52, в.8, с.1608-1610.

10. Быстрицкий В.М., Подкатов В.И., Стерлигов А.Г. и др. Исследование коллективного ускорения ионов в релятивистских сильноточных электронных пучках. - Письма в ЕТФ, 1976, т.2, в.2, с.80-84.
11. Быстрицкий В.М., Донсков В.И., Подкатов В.И., Усов Ю.П. Исследование зарядо-нейтрализионных процессов в РЭП. - Письма в ЕТФ, 1976, т.2, в.21, с.991-995.
12. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Подкатов В.И. Коллективное ускорение ионов в релятивистских электронных пучках, дрейфующих в нейтральном газе. - Тезисы докладов Всесоюзного симп. по сильн. электр., Новосибирск, 1982, т.2, с.204-208.
13. Быстрицкий В.М., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. Временная структура сильноточного электронного пучка. - Известия вузов, Физика, 1978, № 5, с.135-137.
14. Быстрицкий В.М. Коллективное ускорение ионов и процессы зарядовой компенсации в сильноточных релятивистских электронных пучках. - Труды НИИ ЯФ, 1979, в.8, с.66-69.
15. Быстрицкий В.М., Подкатов В.И. Об измерении верхней границы спектра радиального потока электронов в прианодной области при инжекции РЭП в нейтральный газ. - Письма в ЕТФ, 1980, т.6, с.301-305.
16. Быстрицкий В.М., Подкатов В.И., Чистяков С.А., Яловец А.П. Статистическое моделирование ускорения ионов в радиальном направлении в области формирования виртуального катода. - Физика плазмы, 1982, т.8, в.2, с.117-121.
17. Быстрицкий В.М., Шустова В.Г. Численное моделирование инжекции релятивистского электронного пучка в эквипотенциальное пространство. - Труды НИИ ЯФ, 1979, в.8, с.71-75.
18. Быстрицкий В.М., Шустова В.Г. Численное исследование формирования потенциальной структуры РЭП. - ЕТФ, 1979, т.49, с.654-657.
19. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Усов Ю.П., Шустова В.Г. Формирование ямы на фронте релятивистского электронного пучка. - Труды VII Международного симпозиума по разрядам и электрич. изоляции в вакууме, Новосибирск, 1976, с.362-365.
20. Bistritsky V.M., Didenko A.N., Lopatin V.S. et al. Collective Ion Acceleration in Vacuum System with Insulated Anode. - Proc. of 3-rd Intern. Symp. on Collective Methods of Acceleration, Laguna Beach, California, 1978, v.1, p.136-142.
21. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е., Лопатин В.С., Подкатов В.И. Коллективный ускоритель ионов. - Авторское свидетельство № 702938 от 15.05.1978. Бюллетень ОИИОТЗ, № 25, с.274, 1981.

22. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е., Подкатов В.И. Исследование генерации сильнооточных ионных пучков в триоде.- ЕТЭ, 1979, т.49, в.11, с.2417-2419.
23. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е. Генерация сильнооточных ионных пучков в отражательном триоде. - Физика плазмы, 1980, т.6, в.2, с.413-421.
24. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е., Подкатов В.И., Ионная пушка.- Авторское свидетельство № 605480, от 20.12.1976 Бюллетень ОИПОТЗ, 1978, № 46, с.209.
25. Арбузов А.И., Быстрицкий В.М., Красик Я.Е. Стационарная модель асимметричного триода.- Известия вузов, Физика, 1981, т.5, с.113-115.
26. Bistritsky V.M., Didenko A.N., Krasik Ya.E., Podkatov V.I. Generatio of Intense Ion Beams.- Proc. of Intern. 3-rd Top. Conf. on High Power Elec. and Ion Beam Res. and Tech., Novosibirsk, 1979, v.1, p. 361-363.
27. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е., Подкатов В.И. Отражательный триод. - Авторское свидетельство № 795421 от 3.04.1979 Бюллетень ОИПОТЗ, 1982, № 15.
28. Арбузов А.И., Быстрицкий В.М. Стационарная модель тетрода.- Письма в ЕТЭ, 1981, т.51, с.2383-2385.
29. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е. Отражательный триод. - Авторское свидетельство № 660543 от 28.11.1977 Бюллетень ОИПОТЗ, № 45, 1979, с.257.
30. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Петров А.В. Генерация сильнооточных ионных пучков в плазмонаполненном триоде.- Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Ленинград, 1981, с.174.
31. Быстрицкий В.М., Петров А.В. Ионная пушка для накачки лазеров.- Авторское свидетельство № 845722 от 4.01.1980 Бюллетень ОИПОТЗ, 1982, № 14.
32. Быстрицкий В.М., Красик Я.Е. Ускоритель прямого действия.- Авторское свидетельство № 638223 от 19.04.1977 Бюллетень ОИПОТЗ, № 25, 1979, с.252.
33. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Красик Я.Е. и др. Ионная пушка для накачки лазеров.- Авторское свидетельство № 816316 от 17.12.1979 Бюллетень ОИПОТЗ, 1982, № 15.
34. Быстрицкий В.М. Отражательный триод. - Авторское свидетельство № 794784 от 3.04.1979 Бюллетень ОИПОТЗ, № 1, 1981.
35. Быстрицкий В.М., Глейзер И.З., Красик Я.Е., Толопа А.М. Ионная пушка. - Авторское свидетельство № 768377 от 13.04.1979 Бюл-

- летень ОИПОТЗ, 1982, № 15.
36. Bistritsky V.M., Didenko A.N., Krasik Ya.E. et al. Intense Ion Beam Generation in the Ballistically Focusing Diodes.- IEEE Trans. on Nuclear Sciences, 1981, NS-28, n. 3, p. 3436-3438.
37. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Матвиенко В.М. и др. Генерация мощных ионных пучков в диодах с баллистической фокусировкой. Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Ленинград, 1981, с.175.
38. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Красик Я.Е. и др. $Ag - N_2$ - лазер с накачкой сгустками ионов.- Письма в ЕТЭ, 1980, т.16, в.16, с.991-995.
39. Быстрицкий В.М. Работы по генерации мощных ионных пучков в НИИ МФ, Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения, Дубна, 1982.
40. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Кожевников А.В. и др. Эффективный $Ag - N_2$ - лазер с накачкой сильнооточным ионным пучком.- Квантовая электроника, 1980, т.7, в.9, с.2006-2008.
41. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Кожевников А.В. и др. Газовые лазеры высокого давления с накачкой сильнооточным ионным пучком.- Труды X Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике, Москва, 1980, с.204-205.
42. Баранов С.В., Быстрицкий В.М., Кожевников А.В., Сулакшин С.С. Исследование $Ag - N_2$ лазера при мощной накачке протонным пучком.- Квантовая электроника, 1982, т.9, в.2, с.420-423.
43. Баранов С.В., Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. и др. $HeCl^+$ - лазер, возбуждаемый сильнооточным пучком протонов.- Квантовая электроника, 1982, т.9, в.1, с.110-114.

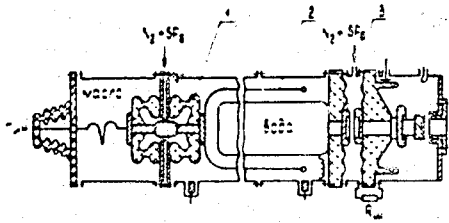


Рис. 1. Общая схема ускорителя "ВЕРА" /5/.

1. Основной коммутатор.
2. ДФЛ.
3. Предимпульсный коммутатор.
4. Диод ускорителя.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования коллективного ускорения МИС в РЛП, дрейфующем в нейтральном газе. 1. Катод, 2. Анод, 3. Пояс Роговского, 4. Пробежный спектрометр, 5. Активируемые мишени, 6. Поперечный магнит, 7. Разделительная плёнка, 8. Время-пролётные датчики, 9. Пробежный спектрометр ионов /15/.

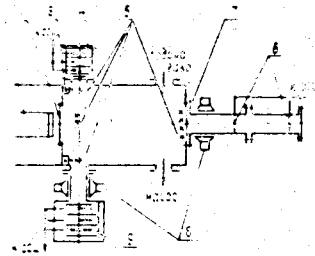


Рис. 3. Зависимость пороговой величины $(J_{инк}/J_{пр})$, соответствующей началу ускорения ионов в аксиальном направлении, от энергии инжектируемых электронов. х - /10/, * - /12/, Δ - /7/, о - /11/, + - /8/.

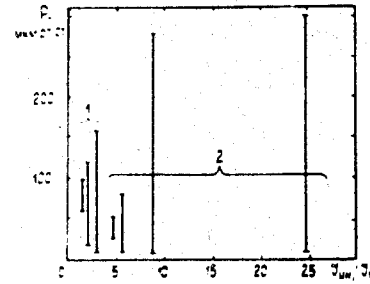
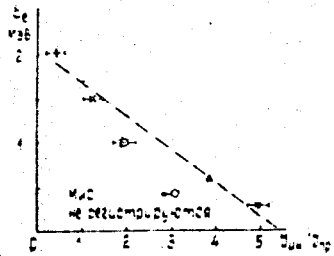


Рис. 4. Зависимость диапазонов газового давления, в которых наблюдается ускорение ионов, от величины $(J_{инк}/J_{пр})$. Начало и конец отрезков соответствуют верхнему и нижнему давлению срыва ускорения МИС. 1. Ускоритель "Тонус", газ-дейтерий, ξ_e - 1 МэВ. 2. Ускоритель "ВЕРА", газ-водород, ξ_e - 0.33 МэВ /12/.

Рис. 5. Зависимость максимального потенциала $(e\phi_{я}/\xi_e)$ на фронте РЛП от времени при инжекции пучка в полупространство через заземлённую плоскость /18/.

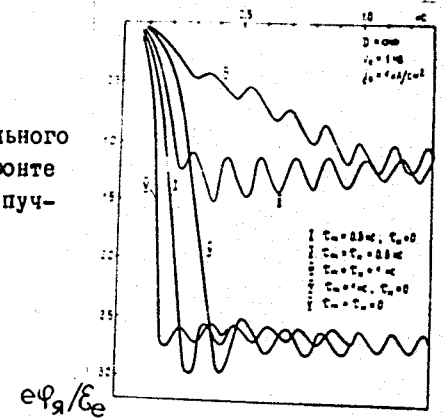
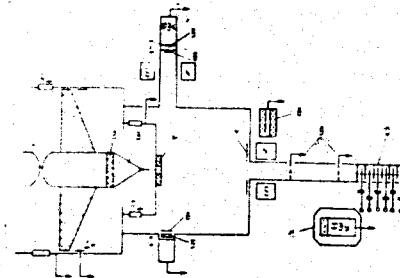


Рис. 6. Схема эксперимента по коллективному ускорению ионов в вакууме с одиночным диэлектрическим вставкой. 1. Газовый предимпульсный коммутатор, 2. Диэлектрическая вставка, 3. Катод, 4. Анод, 5. Сцинтиллятор, 6. Экран и фильтр, 7. Мишень, 8. Серебровываивационный детектор нейтронов, 9. Пролётные датчики, 10. Пробежный спектрометр ионов, 11. Сцинтилляционный детектор с защитой /20/.



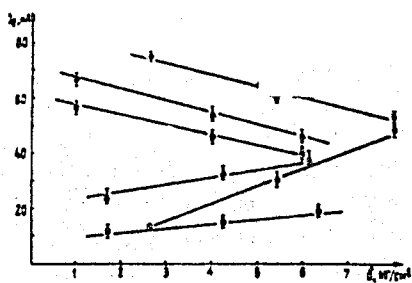


Рис. 7. Зависимости катодного тока от толщины анода. Симметричный ОТ, ускоритель "ВЕРА" /7/.

- A-K = 10 мм, Al-фольга - ⊙
- "- = 20 мм, " - ○
- "- = 20 мм, полиэтилен - Δ
- "- = 25 мм, " - □
- "- = 15 мм, алюминизированный майлар - - Δ
- "- = 20 мм, " - - □

Рис. 8. Зависимость интегрального потока протонов от величины A_I-A₂

зазора в тетраде для различных значений A_I-K:

- - A_I-K = 30 мм,
- ⊙ - " - = 40 мм,
- Δ - " - = 50 мм,
- ▲ - " - = 60 мм.

Ускоритель "Тонус" /22/.

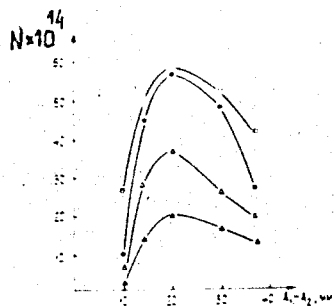


Рис. 9. Зависимость $\dot{j}_e/\dot{j}_{eчл}$ от среднего числа пересечений анода электронами.

Кривые 1, 2, 3 соответствуют линейным возрастающей, постоянной и убывающей функциям распределения энергии осциллирующих электронов. Точки с указанными ошибками соответствуют эксперименту /25/.

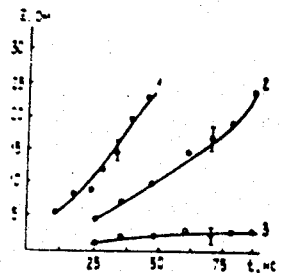
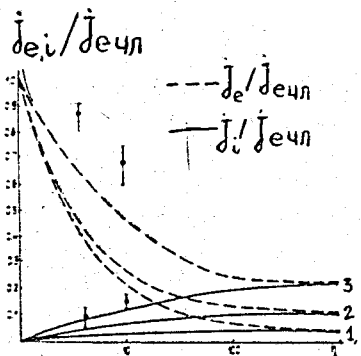


Рис. 10. Временная зависимость экспериментального импеданса плазмонеполненного двойного диода для различных плотностей и состава плазмы: 1. A = I, p = 2 · 10¹³ см⁻³, 2. A = I, p = 4 · 10¹³ см⁻³, 3. A = I4, p = 4 · 10¹³ см⁻³ /30/.

Рис. 12. Общий вид магнитно-изолированного диода с полем и катодом типа "белые колесо" /36/.

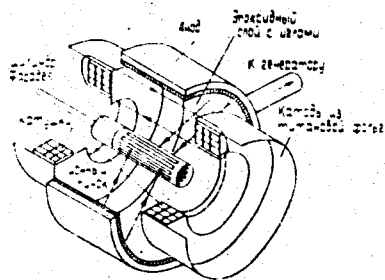
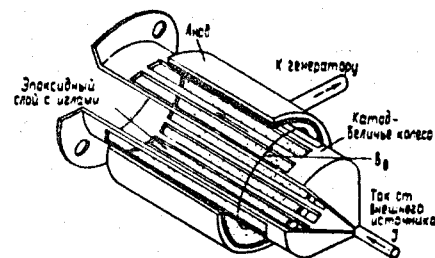


Рис. 11. Общий вид магнитно-изолированного диода с полем типа "апельсин" /36/.

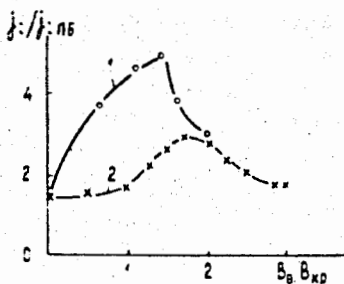


Рис. 13. Зависимость j_i / j_{i_0} для двух значений длительности импульса от величины $V_0 / V_{кр}$.

1. $\tau_{имп} = 80$ нс,
2. $\tau_{имп} = 40$ нс /39/.

Рис. 14. Схема эксперимента по накачке $Ag-N_2$ и $XeCl$ лазеров протонным пучком в тетроде со щелевидным неразрушаемым вводом; ускоритель "Тонус" /41/.

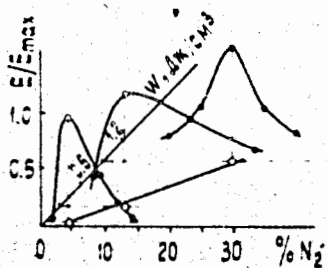
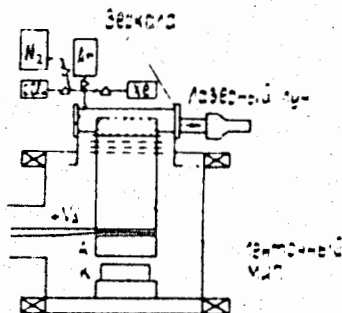


Рис. 15. Зависимость лазерного энерговыхода (отн.ед.) от удельного энерговклада W Дж/см³ и парциального давления N_2 для $P_{смеси} = 2.2$ втм. /42/.