

УДК 621.384.6

А.И.РЯБЧИКОВ

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ДРУГИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ НИИЯФ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

Обзор посвящен разработкам в области ускорительной техники генерации пучков заряженных частиц электромагнитного и других видов излучений. Описаны как базовые установки, проработавшие по 30-40 лет, такие, как ядерный реактор, электронный синхротрон «Сириус», циклотрон У-120, электростатический генератор ЭГ-2,5, а также современные сильноточные и высокомошные ускорители заряженных частиц и генераторы плазмы. Рассмотрены наиболее перспективные области применения в современных условиях созданного несколькими поколениями ученых ТПУ и НИИ ядерной физики (НИИЯФ) ускорительно-диагностического комплекса как в научных исследованиях, так и для развития и создания новых наукоемких технологий.

Обзор может быть полезен для специалистов в области ускорительной техники, пучковой и плазменной электроники, а также разработчиков и пользователей новых технологий на основе ускорителей заряженных частиц с широким спектром энергетических параметров.

Введение

История развития исследований в области ускорителей заряженных частиц и их применения в науке и технологиях в Томском политехническом университете неразрывно связана с созданием и развитием научно-исследовательских институтов и, главным образом, НИИ ядерной физики.

Более 40 лет назад Александр Акимович Воробьев, в то время ректор ТПИ, почувствовав благоприятное отношение руководства страны к ядерной физике, на правительственном уровне решил вопрос о создании НИИЯФ при ТПУ в системе высшей школы.

Планировалось, что материальной базой должны быть не только необходимые для любого института ядерной физики ядерный реактор, циклотрон и электростатический генератор, но и электронные ускорители, в разработке которых Томский политехнический институт к тому времени имел серьезный задел – обычные, сильноточные и малогабаритные бетатроны.

Первое десятилетие становления НИИЯФ было ознаменовано чередой запусков в эксплуатацию ставших впоследствии базовыми установок, таких как электростатический генератор ЭГ-2,5, микротроны, циклотрон, синхротрон «Сириус», ядерный реактор ИРТ-Т. Наличие такой экспериментальной базы, не имеющей до настоящего времени аналогов в системе высшего образования страны, а также активная и успешная работа А.А.Воробьева по подбору талантливой молодежи способствовали быстрому развертыванию широкомасштабных исследований по радиационной физике, физике ускорителей, физике пучков заряженных частиц и ядерной физике.

Очевидно, что обновлять такой парк ускорительной техники, поспевая за развитием ядерной физики, в системе высшего образования страны не представлялось возможным. Это обстоятельство предопределило в последующем развитие ускорительной техники в институте в направлении малогабаритных и относительно малогабаритных, но уникальных по своим параметрам установок.

Конец 60-х и начало 70-х гг. ознаменовались развитием нового поколения ускорителей, отличающихся от традиционных высокой импульсной мощностью. У истоков создания сильноточных наносекундных ускорителей в НИИЯФ при ТПУ стояли крупные ученые Г.А.Воробьев, академик РАН Г.А.Месяц, члены-корр. РАН А.Н.Диденко, С.П.Бугаев и многие другие. История развития сильноточной электроники в ТПУ описана в [1]. Как следствие развития сильноточной электроники в НИИЯФ была создана серия сильноточных ускорителей прямого действия и линейных индукционных ускорителей. Первоначально они использовались в исследованиях по формированию сильноточных электронных пучков и для генерации на их основе мощного СВЧ-излучения. С кон-

на 80-х гг. большой объем исследований на сильноточных ускорителях проводился в направлении генерации мощных ионных пучков.

В результате исследований, определяемых задачами направленного изменения поверхностных свойств различных материалов пучками ускоренных ионов, были созданы ионные ускорители с широким диапазоном длительностей импульсов (от нескольких десятков наносекунд до нескольких сотен микросекунд), током ускоренных ионов (от нескольких килоампер до единиц ампер) и с плотностью мощности, перекрывающей диапазон от 10^3 до 10^8 Вт/см².

Данная статья посвящена краткому описанию созданных к настоящему времени излучательных установок, их настоящему и перспективному применению в науке, технике и технологиях.

Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т

Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т является реактором бассейного типа (рис.1). В качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя в реакторе используется деионизованная вода. Реактор введен в эксплуатацию в 1967 г. С 1977 по 1984 г. была проведена коренная реконструкция реактора, в результате которой были модернизированы или изготовлены заново бак реактора и внутрибачковые устройства, система охлаждения активной зоны (АЗ) реактора, система управления и защиты, системы контрольно-измерительных приборов и электроснабжения, дозиметрического контроля и т.д. Это позволило повысить тепловую мощность реактора с 2 до 6 МВт. Можно утверждать, что в результате реконструкции построен новый реактор.

Основной задачей, выполняемой на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т, является использование нейтронного излучения для решения научных и практических задач и подготовка высококвалифицированных специалистов в области разработки и эксплуатации ядерных установок, исследования последствий их эксплуатации, путей устранения этих последствий.

Реактор ИРТ-Т до сих пор занимает особое место в ряду других – это единственный исследовательский реактор на территории Сибири и Дальнего Востока. В силу этого на нем развивались и развиваются исследования, в которых заинтересованы научные и производственные организации, непосредственно связанные с изучением его природных ресурсов и развитием производительных сил. В связи с этим на ИРТ-Т систематические исследования проводили в основном в области нейтронно-активационного анализа, радиационной физики и химии. Для выполнения этих исследований в ходе реконструкции реактора была создана соответствующая экспериментальная база.

Реактор имеет 10 горизонтальных экспериментальных (ГЭК) и 14 вертикальных (ВЭК) каналов. При работе реактора на мощности 6 МВт максимальная плотность потока тепловых нейтронов равна $1,1 \cdot 10^{14}$ нейтр./(см²·с), а быстрых – $2 \cdot 10^{13}$ нейтр./(см²·с). Из 10 ГЭК, восемь – радиальных, диаметром 100 мм, один – касательный сквозной, диаметром 150 мм, и один – касательный с односторонним доступом, диаметром 150 мм. Три радиальных ГЭК оборудо-

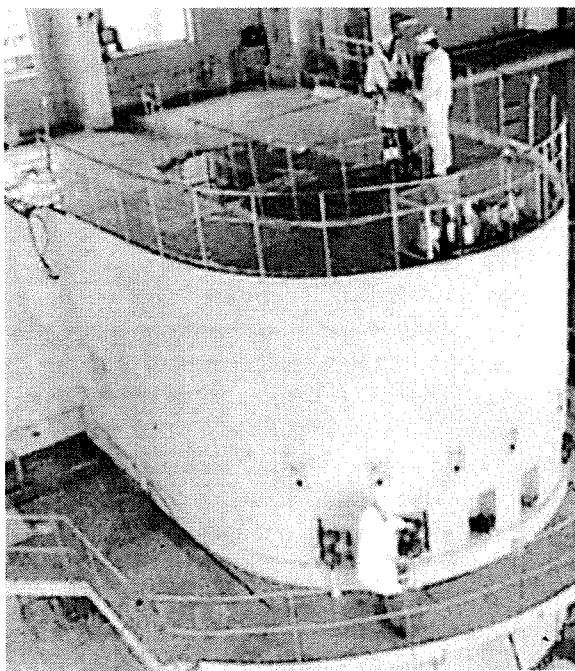


Рис.1

ваны пневмотранспортными системами, на позициях измерения которых расположены автоматизированные аналитические комплексы. Два радиальных ГЭК оборудованы устройствами, позволяющими облучать объемные образцы выведенным пучком нейтронов. Один радиальный ГЭК оборудован низкотемпературной установкой, которая предназначена для исследований в области радиационного материаловедения. Охлаждение облучаемого в канале ядерного реактора образца

производится газообразным гелием. Диапазон температур, в котором может производиться облучение, 85 – 300 К. В криоканале могут облучаться образцы диаметром 37 мм и длиной до 100 мм.

Два касательных ГЭК оборудованы автоматическими устройствами, позволяющими облучать образцы диаметром до 130 и длиной до 700 мм с объемной неоднородностью не хуже 5% относительных.

Три ВЭК диаметром 32 мм установлены в бериллиевой ловушке нейтронов, расположенной в центре АЗ реактора. Одиннадцать каналов, расположенных за пределами АЗ, имеют диаметр 55 мм. Узел облучения ВЭК-2 оборудован борно-кадмиевым фильтром. Все каналы, за исключением одного, установленного во внутренней тепловой сборке, искривлены для исключения прострела гамма-нейтронного излучения и не имеют защитных пробок.

В настоящее время на реакторе ИРТ-Т ведутся исследования в следующих научных направлениях: разработка, исследование и внедрение в народное хозяйство комплекса аналитических, диагностических, контрольно-измерительных методов и средств, основанных на использовании нейтронного излучения ядерного реактора, создание на этой основе современных материалов и изделий, отвечающих мировому уровню; создание научно обоснованной системы мониторинга состояния природной среды, выработка на ее основе рекомендаций по рациональному природопользованию.

Исследования ориентированы на разработку новых, совершенствование существующих ядерно-физических методов анализа состава вещества, модификации свойств веществ и материалов под воздействием нейтронного излучения, внедрение этих средств и методов в целях развития производительных сил России, обеспечение мониторинга экологической обстановки на территории Сибири.

Упор сделан на широкое использование аналитической и научно-технической базы единственного в Сибири исследовательского ядерного реактора, в том числе в кооперации с научными организациями и промышленными предприятиями.

Метод нейтронно-активационного анализа (НАА) состава веществ и материалов используется в институте с момента запуска реактора. Достоинством этого метода является возможность определения в одной пробе около 30 элементов на кларковом уровне. Работы по НАА проводились и проводятся в интересах изучения природных ресурсов Сибири и Дальнего Востока, повышения эффективности переработки минерального сырья и качества продукции, мониторинга окружающей среды и разработки простых и эффективных методов определения благородных, редких и рассеянных элементов, исследования микроэлементного состава нефти и нефтепродуктов, анализа объектов природного происхождения.

Большое внимание уделяется не только разработке новых методик НАА, но и широкому внедрению результатов этих разработок, их использованию для решения научно-технических задач [2 – 4].

На ИРТ-Т разработан и внедрен в практическое здравоохранение целый ряд технологий получения короткоживущих радиофармпрепаратов (РФП) на основе технеция-99m, которые используются для диагностики различных заболеваний, начиная от ишемии и инфаркта миокарда, нарушений кровотока головного мозга, нарушений функции печени, почек и кончая онкологическими заболеваниями. Эти препараты широко используются в практическом здравоохранении Томской области начиная с 1989 г. С помощью этих препаратов проведено более 30 тыс. обследований в НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН и свыше 5 тыс. обследований в НИИ онкологии. Для получения РФП разработан первый отечественный экстракционный генератор технеция-99m. В настоящее время проводятся исследования по синтезу РФП на основе йода-123 [5,6].

С 1984г. на реакторе ИРТ-Т ведутся исследования по нейтронно-трансмутационному легированию (НТЛ) полупроводниковых материалов, которые широко используются для создания приборов с минимальным (2 – 3%) разбросом значений удельного электрического сопротивления (УЭС): мощных тиристоров, приборов с зарядовой связью, СБИСов, фотоприемников, детекторов излучения и т.д. На основе этих исследований разработана технология НТЛ слитков монокристал-

лического кремния. Отличительная особенность технологии – большой диаметр (до 130 мм включительно) легируемых слитков кремния, что не имеет аналогов ни в России, ни в странах СНГ.

До 1991 г. на реакторе НТЛ кремний выпускался для электротехнической промышленности страны с годовым объемом до 2,2 тонны на номиналы у.э.с. от 100 до 250 Ом·см, а также выпускался высокоомный кремний марки БДН на номиналы у.э.с. 10 – 40 кОм·см для фотоприемников. С 1991 г. и по настоящее время осуществляется легирование кремния для зарубежных партнеров. Производительность легирования слитков кремния диаметром 5 дюймов на комплексе ИРТ-Т на конечный номинал у.э.с. 60 Ом·см равна 4500 кг/год [7,9].

Электронный синхротрон «Сириус»

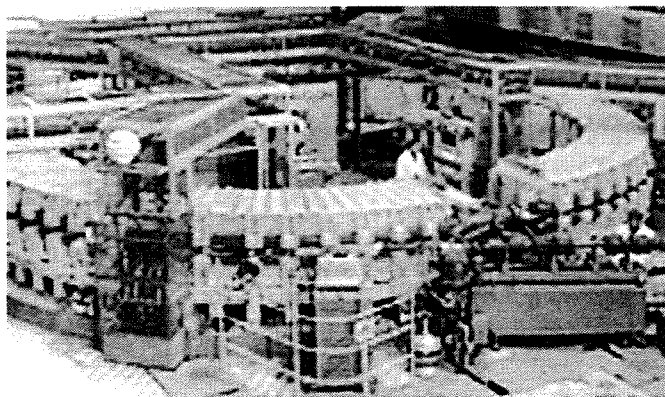


Рис. 2

Синхротрон «Сириус» является электронным циклическим ускорителем на энергию 1500 МэВ (рис.2) [10 – 12]. Магнитная система – со слабой фокусировкой и показателем спада магнитного поля 0,58. Четыре квадранта магнита с равновесным радиусом 4,23 м разделены прямолинейными промежутками длиной 1,57 м каждый. Длина орбиты равна 32,9 м.

В 1-м и 2-м прямолинейных промежутках установлены гониометры для ориентации кристаллических мишеней, во 2-м и 4-м – системы измерения пучка, в 3-м – ускоряющий резонатор. На 3-м квадранте оборудованы два канала синхротронного излучения.

Рабочие характеристики излучательно-измерительного комплекса приведены в табл. 1.

Отличительной особенностью синхротрона «Сириус» является импульсный режим работы схемы питания электромагнита, когда запасенная в емкостном накопителе энергия преобразуется в энергию магнитного поля. Импульсный режим работы, который был принят в основном из экономических соображений при реализации схемы питания ЭМ, и большая длительность импульса магнитного поля синхротрона (до 0,1 с) позволили получить растяжку импульса излучения около 20 мс и успешно вести экспериментальные исследования по физике элементарных частиц и физике ускорения.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение параметра
Энергия, МэВ	130 – 1300
Разрешение по энергии, %	$\pm 0,1$
Частота повторения, имп./с	1 – 6
Длительность импульса излучения, с	$2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$
Коэффициент заполнения (макроскопический), %	(2 – 12)
Внутренний пучок, част./имп.	2500
Число пучков тормозного излучения	2
Число линейно поляризованных пучков	2
Число каналов параметрического рентгеновского излучения	3

В течение 30 лет наряду с проведением физических исследований осуществлялась модернизация самого синхротрона.

Схема питания магнита из двухполярного режима, который позволял реально работать с частотой повторения 1 Гц, переведена на однополярный режим. Газоразрядные тиратроны типа ТР1-85/15 были заменены вначале на полупроводниковые приборы типа ТЛ и ВЛ, а впоследствии на другие современные диоды и тиристоры с водяным охлаждением. Была создана схема для форми-

рования плоской вершины на импульсе магнитного поля длительностью $22 \cdot 10^{-3}$ с и неравномерностью поля $\pm 0,1$ %, осуществлена стабилизация магнитного поля с точностью $\pm 0,1$ %. Это позволило увеличить частоту повторения циклов до 6 Гц, осуществить плавную регулировку энергии ускоренных электронов с точностью 1 МэВ в диапазоне энергий от 300 до 1000 МэВ с долговременной стабильностью $\pm 0,1$ %, получить импульсы излучения, генерируемые с мишеней, длительностью до $20 \cdot 10^{-3}$ с, увеличить среднюю интенсивность ускоренного тока в 6 раз. Максимальный коэффициент заполнения (макроскопический) для синхротрона «Сириус» составляет около 12 %, Заметим, что для 10 ГэВ-синхротрона Корнельского университета (США) с частотой повторения 60 Гц он также составляет 12 %, а для линейных ускорителей электронов менее 0,1 %.

Емкость накопителя образована последовательно-параллельным соединением импульсных конденсаторов типа ИМ-3/100 и равна 10^{-2} Ф. При колебательном режиме работы контура электромагнита была очень велика аварийность его работы, что привело к частым взрывам конденсаторов и возгораниям. Перевод на однополярный режим и уменьшение напряженности электрического поля значительно снизили аварийность конденсаторов, что позволило наработать емкостному накопителю за 20 лет около 10^9 циклов практически без аварий.

Произведена замена инжектора – микротрона с энергией 5,5 МэВ – на другой микротрон с энергией 6,4 МэВ и с лучшими выходными параметрами: по величине и стабильности ускоренного тока, надежности работы и др.

Осуществлен перевод вакуумной системы на безмасляные средства откачки. В настоящее время применяется трехступенчатая система откачки: форвакуумная – на основе механического насоса ВН-4Г, предварительная – с помощью турбомолекулярных насосов ТМН-500 и высоковакуумная – электроразрядными насосами типа НОРД. Почти все вакуумные уплотнения – резиновые. Рабочий вакуум улучшен почти на порядок, т.е. до $5 \cdot 10^{-6}$ Па. Все насосы работают почти 6 лет без снятия с установки.

Перевод вакуумной системы на безмасляные средства откачки позволил снизить энергоемкость, повысить надежность работы микротрона и ускоряющего резонатора, сократить время получения рабочего вакуума. При частом вскрытии вакуумной камеры, 20 – 25 раз в год, при еженедельных остановках это дает существенное повышение эффективности использования синхротрона.

На ВЧ-системе установлен ускоряющий резонатор с высокой добротностью, что позволило устранить потери пучка в конце цикла ускорения и повысить энергию ускоренных электронов. Разработана и внедрена частотная модуляция ускоряющего напряжения на время ВЧ-захвата и сброса частиц на внутреннюю мишень, что позволило получить более устойчивый захват на втором этапе ускорения, увеличить стабильность по интенсивности и улучшить равномерность сброса частиц на мишень.

Применение частотно-модулированного (ЧМ) напряжения при сбросе, когда рабочая частота увеличивается относительно равновесной, позволяет получать растяжку при более низких энергиях за счет уменьшения равновесного радиуса и использования эффекта потерь энергии электронов на излучение. Диапазон энергии снижается до 350 МэВ при растяжке 10–15 мс. Принципиально возможно получение растяжки при более низких энергиях только за счет использования ЧМ, однако длительность импульса излучения уменьшается до нескольких миллисекунд.

Разработана и введена в эксплуатацию система позиционированного во времени сброса пучка электронов на мишень в диапазоне времени $80 \cdot 10^{-3}$ с по закону случайных чисел. Длительность импульса излучения не превышает $1 \cdot 10^{-4}$ с.

Проведенная модернизация синхротрона позволила существенно улучшить его рабочие характеристики (энергию, ток, импульс излучения и др.), обеспечить проведение экспериментов в широком диапазоне энергий и ускоренного заряда (от 350 до 900 МэВ и от 10^6 до $3 \cdot 10^{10}$ част./имп.) при их плавной регулировке, получить нестандартные режимы в области низких энергий (135 – 350 МэВ) при импульсе излучения $(0,1 - 10) \cdot 10^{-3}$ с, увеличить надежность работы ускорителя до 0,85 и более.

Выполненные исследования и полученные результаты на экспериментальном микротроне с внешней инжекцией (МВИ) показали, что эффективность как по коэффициенту захвата, так и по используемой СВЧ-мощности выше, чем в обычном микротроне. Высокая надежность структуры

МВИ позволяет использовать режим ускорения с большим Ω . Запуск МВИ дал возможность на первом этапе увеличить ток инжектора с 30 до 60 мА/имп., а с группирователем – до 120 мА/имп. При этом качество пучка (расходимость и энергетический разброс) и надежность работы инжектора существенно улучшаются.

С момента запуска и до настоящего времени электронный синхротрон «Сириус» используется как базовая установка для проведения фундаментальных исследований по физике элементарных частиц и ядерной физике. С направлениями проводимых исследований, полученными оригинальными результатами можно познакомиться в [1, 13 – 16], а также в статье, представленной в данном сборнике.

Циклотрон

Циклотрон НИИ ядерной физики при ТПУ (рис.3) классического типа с регулируемой энергией ускоряемых ионов широко используется в прикладных и фундаментальных исследованиях в области ядерной физики и ее различных приложениях.

Основные характеристики циклотрона

Диаметр полюсов магнита, см	120
Индукция магнитного поля, кГс	9-15
Стабильность магнитного поля	$1 \cdot 10^{-4}$
Диапазон плавной регулировки частоты резонансной системы, МГц	9-17
Дискретность регулирования энергии, МэВ	1,0

Таблица 2

Параметры пучков

Тип иона	Энергия ионов, МэВ	Ток пучка, мкА
^1H (протоны)	4,5 – 11	50
$^1\text{H}_2$ (дейтроны)	9 – 14	50
$^2\text{He}_4$	18 – 28	40
^{+2-5}C , ^{+2-5}N , ^{+2-5}O , ^{+8}Ar	1- 1,2 МэВ/нуклон	10 – 0,15

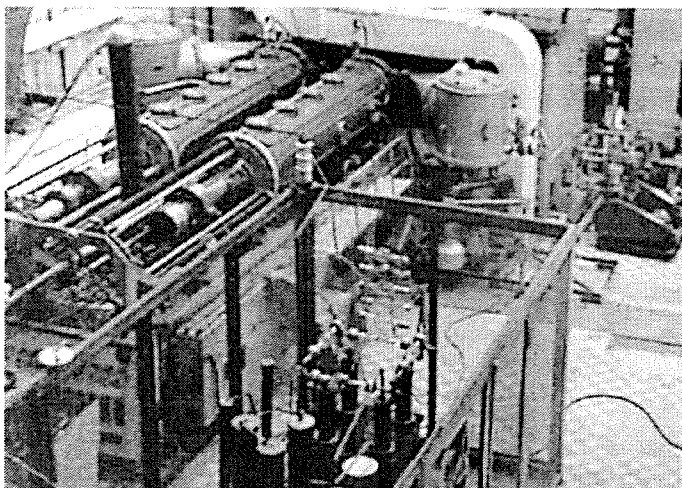


Рис. 3

Физические исследования на циклотроне начались в 1961 г.

Основными направлениями исследований в начальный период были:

- взаимодействие заряженных частиц с ядрами,
- радиационная физика,
- прохождение заряженных частиц через вещество,
- активационный анализ на заряженных частицах.

Перевод циклотрона в режим ускорения ионов с регулируемой в широком диапазоне энергией и расширение типов ускоряемых частиц позволили выполнить цикл исследований обратного рассеяния ионов гелия-3 и альфа-частиц.

Обнаруженное явление аномального увеличения сечения обратного рассеяния альфа-частиц на легких ядрах позволило предложить новый метод определения азота, кислорода и углерода в тонких пленках в изделиях электронной промышленности [17].

На основе исследований резонансного обратного рассеяния были развиты методы анализа поверхностных слоев сверхпроводящих материалов на основе ниобия и его сплавов, тугоплавких металлов и полупроводниковых планарных структур [19, 20, 23].

С помощью регистрации ядер отдачи ионов были развиты методы анализа водорода, дейтерия, гелия в поверхностных слоях материалов [21].

Использование реакций обратного рассеяния в условиях каналирования ионов в кристаллических структурах позволило развить методики определения местоположения кислорода, имплантированного в монокристалл кремния [18].

Для послойного и интегрального инструментального и радиохимического анализа примесей легких элементов (C, N, O) в высокочистых металлах, полупроводниках и диэлектриках был развит комплекс методик активационного анализа на заряженных частицах [22].

В таблице 3 приведены основные аналитические характеристики методов определения содержания и концентрационных профилей элементов.

Таблица 3

Метод	Энергия ионов, МэВ	Анализируемые элементы	Толщина исследуемого слоя, мкм	Разрешение по глубине, мкм	Предел обнаружения, ат./см ²
Резерфордовское обратное рассеяние	0.1 – 5	Средние и тяжелые	0.1 – 5	0,005 - 0,03	$10^{12} - 10^{13}$
Ядерные реакции	0.5 – 20	Легкие	0.1 – 5	0.05 - 0,1	$10^{13} - 10^{14}$
Резонансное обратное рассеяние	0.5 – 25	C, N, O	1 – 10	0.01 - 0,1	10^{13}
Активационный анализ	13 – 21	Легкие, средние, тяжелые	1 – 500		$10^{-7} - 10^{-5}$ ат. %
Метод ядер отдачи	1 – 15	от H до O	1 – 5	0.03 – 0.1	10^{13}

На базе циклотрона с 1983 г. функционирует комплекс для проведения дистанционной нейтронной терапии злокачественных новообразований.

В настоящее время этот комплекс является единственным в России.

Нейтроны генерируются в бериллиевой мишени при ее облучении дейтронами с энергией 13 МэВ.

Поток нейтронов – $1,3 \cdot 10^7$ нейтр./см²·с.

Средняя энергия – $(7,5 \pm 0,3)$ МэВ.

Скорость набора нейтронной дозы ~ 0,15 Гр/мин.

Глубина половинного ослабления нейтронной дозы в тканях – 5,5 см.

Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) нейтронов – 2,7- 3.

Разовая очаговая нейтронная доза от 1,2 до 2,4 Гр при 2 сеансах в неделю. Суммарная очаговая доза – от 14 до 25 Гр.

Полная регрессия опухолей после облучения только нейтронами у пациентов с метастазами различного генезиса – (80–100) %, при опухолях слюнных желез, сарком мягких тканей, щитовидной железы, раке молочной железы – (80–97) %. При опухолях других локализаций – (45–70) %.

Полная регрессия при смешанной нейтронно-фотонной терапии в среднем составляла от 45 до 85 % (данные д.м.н. Л.И.Мусобаевой, НИИ онкологии, г.Томск).

Появления новых опухолей, индуцированных нейтронным излучением, не зарегистрировано.

За 15 лет проведено 5000 сеансов облучения, прошло нейтронную терапию 550 пациентов.

С 1987 г. проводятся работы по производству короткоживущих радионуклидов (таллия-199 и йода-123) и синтеза радиофармацевтических препаратов на их основе для однофотонной скинтиграфии [24]. Исследования с РФП позволяют производить диагностику важнейших органов человека – миокарда, головного мозга, почек, щитовидной железы и др.

Перспектива использования циклотрона в этом направлении связана с созданием центра позитронной эмиссионной томографии.

С 1992 г. циклотрон используется для получения ультра- и микрофильтров, получаемых при облучении полимерных пленок тяжелыми ионами, так называемых трековых мембран.

Мембраны используются для плазморефаза крови, для очистки питьевой воды от взвесей и микробов, осветления и микробиологической стабилизации лекарственных препаратов, «холодной» стерилизации пива, вина; тонкой очистки воздуха и газов от аэрозолей и микробов, при микробиологическом анализе проб воды и в других областях науки и техники.

Материал мембраны – полиэтилентерефталат (лавсан), толщина мембраны – 10 мкм, ширина – 320 мм, диаметр пор – 0,2 – 2 мкм.

Плотность пор – $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Мембраны химически стабильны в средах с pH от 2 до 12, в органических растворителях и могут быть стерилизованы всеми известными методами.

Отличительная особенность технологии производства – существенно меньшая стоимость по сравнению с аналогами.

Электростатический генератор

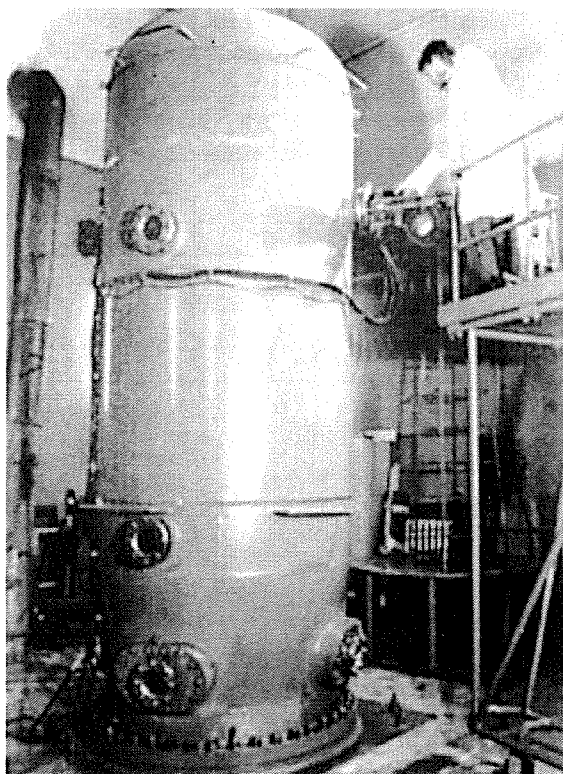


Рис. 4

Электростатический генератор ЭГ-2,5 (рис.4) с током пучка до 100 мкА и регулируемой энергией от 300 кэВ до 2,2 МэВ, позволяющий получать пучки как электронов, так и ионов различной массы, начиная от водорода, кончая ураном, был запущен в эксплуатацию в 1964 г. Первоначально на ЭГ-2,5 на электронах выполнялись работы по исследованию радиационного воздействия излучения (электронов, γ -квантов) на различные материалы (полупроводники, изоляторы, кристаллы) и изделия.

Новые возможности ядерно-физических методов анализа открываются при применении ионных пучков микронных размеров. Пучок ионов диаметром несколько микрон позволяет исследовать элементный состав мелкодисперсных сред, механизм износа материалов, распределение легирующих добавок в имплантированных слоях, проводить анализ биологических объектов.

В 1986 г. была запущена в эксплуатацию первая в СССР установка ядерного микрозонда на основе квадруплета квадрупольных линз с диаметром микропучка 10 мкм, энергией 2 МэВ [25]. На установке ядерного микрозонда была разработана новая методика определения профиля распределения примеси по глубине с разрешением не хуже 20 А[26].

Микротроны

Микротроны на энергию 6,3 МэВ используются в качестве инжектора электронов в синхротрон «Сириус».

Параметры ускорителя:

Энергия пучка, МэВ	-	6,3
Энергетический разброс, %	-	$\pm 0,6$
Ток в импульсе, мА	-	28
Количество частиц в импульсе	-	$5,25 \cdot 10^{11}$
Частота следования импульсов, Гц	-	2 – 8
Выведенный ток, мА	-	25

Расходимость пучка, рад:

- вертикальная	- $9 \cdot 10^{-3}$
- радиальная	- $3 \cdot 10^{-2}$

Микротрон также может работать как самостоятельный ускоритель с частотой повторения до 100 Гц и выведенным током.

Микротрон с изменяемой энергией выведенного электронного пучка используется для исследований процессов каналирования и излучения электронов в кристаллах, в радиационной физике (рис.5).

Параметры ускорителя:

Энергия пучка, МэВ	- 1,5–5,7
Число орбит	- 9
Число импульсов, Гц	- 2,5–25
Средняя мощность пучка, Вт	- 250
Вес электромагнита, кг	- 550
Мощность магнетрона, мВт	- 2
Напряжение, кВ	- 682
Максимальный ток в импульсе, мА	- 50
Размер пучка, мм	- 3×5
Длительность импульса, мкс	- 2,5
Диаметр электромагнита, мм	- 740
Напряженность магнитного поля, Гс	- 1285
Рабочая частота магнетрона, МГц	- 2645
Экспозиционная доза на расстоянии 1 м, Грей/мин	- 5



Рис. 5

Сильноточные ускорители заряженных частиц, генераторы плазменных потоков и их применение

Сильноточные электронные ускорители прямого действия

Становление и развитие одного из основных научных направлений НИИЯФ при ТПУ, связанного с разработкой сильноточных ускорителей и исследованиями по генерации мощных импульсных электронных и ионных пучков, СВЧ- и тормозного излучений, имеет более чем 40-летнюю историю.

Быстрому прогрессу в развитии сильноточной электроники послужили работы в области высоковольтной импульсной техники микросекундного диапазона длительностей импульсов, которые были начаты Г.А.Воробьевым на кафедре техники высоких напряжений ТПИ под руководством А.А.Воробьева.

Учитывая острую потребность в генераторах наносекундных импульсов в различных областях науки и техники, в НИИЯФ под руководством Г.А.Воробьева и Г.А.Месяца были развернуты широкие исследования отдельных элементов генераторов, их создание, а также в первые годы после организации института – разработка средств осциллографической регистрации высоковольтных наносекундных импульсов.

Были разработаны генераторы коротких высоковольтных импульсов, совмещенные с высоковольтным осциллографом; исследованы газовые искровые разрядники, обеспечивающие наносекундную длительность фронта формируемых импульсов, способы коррекции параметров фронта высоковольтных импульсов.

Генераторы нашли применение в квантовой электронике для питания модуляторов добротности мощных лазеров и были разработаны и поставлены на хозяйственной основе различным предприятиям Москвы (ФИАН, МГУ), Ленинграда (ЛОМО), Тарту (Тартуский университет).

С организацией в НИИЯФ сектора высоких энергий была начата подготовка аппаратуры для проведения эксперимента по измерению времени жизни нейтрального пиона на основе эффекта

Примакова. В этом эксперименте выведенный тормозной пучок синхротрона взаимодействовал с кулоновским полем ядер свинцовой мишени (гамма – гамма-взаимодействие), происходило рождение нейтральных пионов, которые через время масштаба 10^{-16} с распадались каждый на два гамма-кванта. Отбор событий осуществлялся системой сцинтилляционных счётчиков и предельно быстрой (наносекундной) электроникой. Для восстановления событий применялись разработанные в НИИЯФ ливневые искровые камеры с оптическим съёмом информации, регистрирующие электрон-фотонные ливни, генерируемые двумя распадными гамма-квантами, под малыми углами к тормозному пучку синхротрона «Сириус». Рекордно высокая ливневая эффективность искровых камер (в одном искровом зазоре одновременно происходило развитие практически неограниченного числа искр по следам заряженных частиц и интенсивность свечения каждой искры-следа не зависела от их числа) была достигнута за счёт применения для питания искровых камер мощного генератора высоковольтных импульсов фиксированной длительности – прообраза генератора импульсов ускоряющего напряжения сильноточных ускорителей электронов и ионов прямого действия на основе формирующих линий. Был приобретён опыт надёжной синхронизации с наносекундной точностью достаточно большого числа параллельно работающих импульсных устройств, успешно решались проблемы многоканальной коммутации – одной из ключевых проблем в технике сильноточных ускорителей. И, может быть, самое главное – был приобретён опыт работы в длительном физическом эксперименте, связанном с необходимостью набора большого статистического материала в чрезвычайно сложных фоновых условиях, когда регистрирующая аппаратура оказывается в буквальном смысле этого слова «нанизанной» на сколлимированный тормозной пучок с максимальной энергией выше 1 ГэВ [27]. Полученный фундаментальный результат был включён в таблицы Розенфельда – международный справочник ядерных констант – и отмечен в итоговом докладе за 1969 г. академика-секретаря Отделения ядерной физики и астрономии АН СССР академика М.А.Маркова как существенное достижение отечественной науки. Следует отметить, что рецензирование результатов эксперимента осуществляли ведущие специалисты страны – сотрудники ФИАН СССР им. П.Н.Лебедева, директор ИЯФ СОАН СССР академик А.М.Будкер, весьма далёкие, естественно, от стремления преувеличить значимость полученных результатов. Такая реакция научной общественности явилась приятной неожиданностью и для ректора ТПУ А.А.Воробьёва.

Все эти подробности приведены здесь с единственной целью – убедить, что когда «группа пиноль» выступила с предложением эксперимента по проверке одного из положений квантовой электродинамики – экспериментальному исследованию рассеяния «света на свете» (гамма – гамма-взаимодействию с рождением электрон-позитронных пар – процессу, обратному аннигиляции) на основе двух сталкивающихся (встречных) тормозных пучков с энергией выше 1 МэВ, генерируемых электронными пучками с током диапазона 100 кА, – то это предложение не воспринималось как фантастическое. Во всяком случае оно было более реальным, нежели альтернативное предложение формирования двух сталкивающихся жёстких рентгеновских пучков, сопровождающих синхронный взрыв двух атомных бомб. Для однократной регистрации продуктов гамма – гамма-взаимодействия в разрушаемых детекторах и передачи на неразрушаемый пункт сбора информации результатов измерений в последнем случае оставались считанные миллисекунды за счёт распространения ударных волн со скоростью порядка звуковой.

Реальность же возможности создания в НИИЯФ сильноточных ускорителей МэВ-диапазона подкреплялась в некоторой степени также тем, что в эти годы в НИИЯФ велись работы по созданию высоковольтных наносекундных генераторов, предназначенных для питания стриммерных камер. Был выполнен ряд интересных работ, в частности исследован стриммерный механизм пробоя газовых промежутков, механизм формирования наклонных по отношению к направлению электрического поля искр, отрабатывались конструкции высоковольтных импульсных генераторов с компрессией, запасаемой в первичном ёмкостном накопителе энергии за счёт промежуточного накопителя энергии на основе линий с распределёнными параметрами и высоковольтных коммутаторов с минимальными паразитными параметрами. Была создана стриммерная камера СКМ-500 для синхрофазотрона ОИЯИ (г.Дубна) [28].

Импульсный генератор, питающий камеру, после минимальных переделок был пригоден для работы с пушкой сильноточного ускорителя с энергией в несколько сотен кэВ.

Наконец, отметим, что в Томске в 1967 г. в лаборатории Г.А. Месяца, уже вышедшей из состава НИИЯФ и включённой в состав Института оптики атмосферы (ИСЭ СО АН СССР будет создан в 1977 г.), Б.М.Ковальчуком был создан первый импульсный наносекундный сильноточный ускоритель «Синус» с параметрами: энергия 500 кэВ, ток 10 кА, длительность импульса 25 нс. И этот ускоритель слишком много «не дотягивал» до параметров, необходимых для экспериментального исследования гамма – гамма-взаимодействия.

В какой-то степени это послужило основанием для того, чтобы в 1971 г. в НИИЯФ при ТПУ, по инициативе директора А.Н.Диденко, было начато сооружение первого сильноточного наносекундного ускорителя на энергию более 1 МэВ.

В 1972 г. был запущен сильноточный ускоритель «Тонус» – томский наносекундный ускоритель (рис 6). «Тонус» в течение нескольких лет после запуска оставался одним из самых крупных ускорителей в СССР, а по надёжности и числу выполненных с его помощью исследований едва ли имеет равных среди сильноточных ускорителей прямого действия, что не раз признавалось отечественными и зарубежными исследователями [29].

Запуск «Тонуса» был отмечен в итоговом докладе за 1972 г. президента АН СССР М.В.Келдыша как существенное достижение советской науки, создатели ускорителя были удостоены золотой медали ВДНХ.

Представляется уместным привести слова уже упомянутого выше академика М.А.Маркова в обоснование целесообразности развития работ по сильноточной электронике в НИИЯФ при ТПУ: «Микрофизика для своих исследований использует не только технику высоких энергий. В физике и микрофизике есть два направления развития, которые дополняют друг друга, – это физика высоких энергий и физика пучков частиц относительно низких энергий, но высоких интенсивностей. Эти направления исследований в некоторой области конкурируют между собой. Так, специфические особенности эффектов, которые характерны для области высоких энергий, при низких энергиях слабо проявляются. Но слабые проявления этих эффектов (малые сечения) могут быть, однако, детектированы в пучках частиц очень высокой интенсивности».

И далее: «В отличие от физики высоких энергий лазерные лучи, сильноточные электронные, протонные ускорители – мезонные фабрики – имеют почти беспредельные возможности практических применений в технике, в медицине, в народном хозяйстве вообще» [30].

Запуск «Тонуса» послужил отправной точкой в новом этапе быстрого развития сильноточной тематики в институте. Широким фронтом развернулись работы по созданию новых ускорителей и исследования по формированию и транспортировке мощных электронных и ионных пучков, исследованию их взаимодействия с границей раздела двух сред, модифицирующего влияния на свойства различных материалов, исследования по генерации СВЧ- и тормозного излучения.

На первом этапе были проведены исследования по транспортировке сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) в газе и вакууме. Впервые наблюдались эффекты, связанные с прохождением СРЭП вблизи магнитоэлектрических и диэлектрических поверхностей с распространением пучка в больших объёмах и при повышенном давлении остаточного газа. За счёт отражения от проводящей поверхности впервые был осуществлён захват СРЭП на замкнутую орбиту [31 – 32].

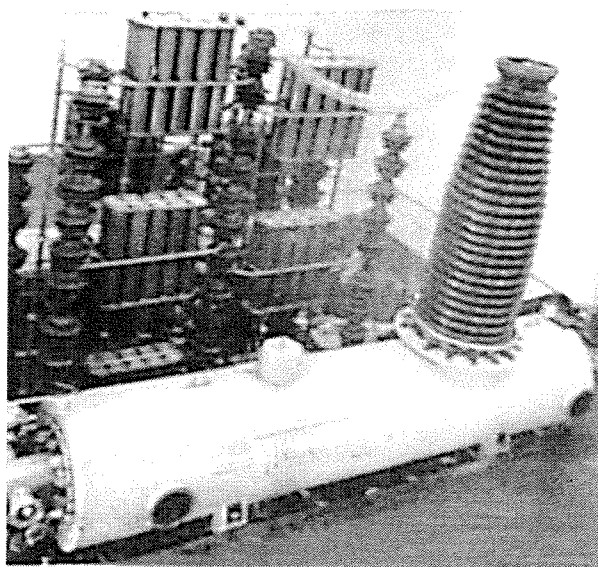


Рис. 6

За несколько лет в институте были сооружены сильноточный ускоритель микросекундной длительности с запаасаемой энергией мегаджоульного диапазона «Тонус-2М», сильноточный ускоритель с промежуточным ёмкостным накопителем энергии «Вера», многоцелевой сильноточный ускоритель «Луч», сильноточный ускоритель «Дубль».

Одновременно с работами по электронным пучкам были начаты исследования по генерации сильноточных ионных пучков, сначала наносекундной, а затем и микросекундной длительности. На первом этапе значительные результаты были достигнуты по коллективному ускорению ионов в прямых пучках. В дальнейшем были развёрнуты работы по прямому ускорению ионов. В результате проведения исследований были предложены и реализованы принципиально новые методы и системы для эффективного формирования мощных пучков ионов как наносекундной, так и микросекундной длительности [33 – 41].

Линейные индукционные ускорители

Подобный класс ускорителей разрабатывается в НИИ ядерной физики с 80-х годов на основе оригинальной элементной базы: низкоимпедансных полосковых формирующих линий, многоканальных искровых разрядников с принудительным делением тока между каналами, нелинейных дросселей насыщения, катодных узлов на основе диэлектрического эмиттера [42 – 45].

Линейные индукционные ускорители могут формировать электронные пучки значительной энергии, в которых токи достигают единиц и десятков килоампер. ЛИУ имеют определенные преимущества перед ускорителями других типов: относительно низкое напряжение на элементах конструкции, не превышающее напряжение возбуждения одного индуктора, темп ускорения до 1 МэВ/м, высокий КПД преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка, нет теоретического предела по величине кинетической энергии электронов.

Принцип действия ЛИУ заключается в том, что в системе ряда последовательно установленных тороидальных ферромагнитных сердечников возбуждается изменяющийся во времени магнитный поток, который создает вихревое электрическое поле, ускоряющее электроны. Напряженность электрического поля на оси индукционной системы определяется как

$$E(t) = -NU(t)/L, \quad (1)$$

где N – число ферромагнитных сердечников; $U(t)$ – напряжение возбуждения сердечника; L – длина индукционной системы.

При возбуждении сердечников импульсами прямоугольной формы $U(t) = U_0$ приращение кинетической энергии пучка с током I_n

$$\Delta\hat{A} = \int_0^t I_n(t)U(t)Ndt = I_n S \Delta B N, \quad (2)$$

где S – сечение ферромагнитного сердечника; $\Delta\hat{A}$ – приращение в нем индукции за время действия импульса напряжения τ .

Поскольку величина $\Delta\hat{A}$ у стали 50 НП не превышает 3 Тл, увеличение S ограничено ростом потерь на перемагничивание сердечника, поэтому повышение энергии пучка может осуществляться за счет ускоряемого тока или кинетической энергии электронов выбором N .

На рис.7 приведена конструкция ускоряющего модуля ЛИУ, в котором объединены в едином корпусе ферромагнитная индукционная система, низкоимпедансные формирующие линии, коммутатор, система размагничивания сердечников и создания фокусирующего магнитного поля для транспортировки пучка. Инжекторный модуль отличается от ускоряющего наличием осесимметричного высоковольтного электрода.

Ферромагнитные сердечники 1, охваченные витками намагничивания 2, подключены к выводам формирующей линии 3, выполненной в виде полосковой двойной (ДФЛ) или одинарной (ОФЛ) формирующей линии. ДФЛ состоит из четырех обкладок a, b, c, d , уложенных по спирали Архимеда вокруг сердечников. На рис.7 показана система трех параллельно включенных ДФЛ. Потенциальные обкладки b, d каждой линии подключены к анодам 1 (рис.8) многоканального раз-

рядника. Обкладки a, c подключены к виткам намагничивания сердечников, причем электрод a другим концом заземлен на корпус ускорителя 7, т. е. подключен к катоду 2 (рис.8) разрядника.

Ускоряющий тракт выполнен из сплошной диэлектрической трубы 6 со слабопроводящим покрытием 7. Поверх трубы уложен соленоид 5, один вывод которого подключен к корпусу ЛИУ, другой – к источнику тока. Ток соленоида осуществляет размагничивание сердечников и создает продольное фокусирующее поле B_z .

Длительность импульса τ , запасаемая энергия Q , волновое сопротивление Z полосковой ДФЛ, ток пучка I_n для N сердечников при максимальном напряжении U_0 заряда ДФЛ связаны с размерами линии и толщиной изоляции d между электродами следующими зависимостями:

$$\tau = 2l\sqrt{\epsilon}/c, \quad (3)$$

$$Q = 2\epsilon\epsilon_0 U_0^2 mhl/d, \quad (4)$$

$$I_n = kQ/U_0 N \tau, \quad (5)$$

$$Z = 400N^2 d / kmh\sqrt{\epsilon}, \quad (6)$$

где c – скорость света; ϵ_0, ϵ – абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости вакуума и изоляции; m – число параллельно соединенных линий; k – КПД преобразования энергии ДФЛ в кинетическую энергию электронов; h, l – ширина и длина электродов.

Основной недостаток полосковых ДФЛ (ОФЛ) – повышение напряженности электрического поля на краях электродов. Снизить влияние краевого эффекта можно, нанеся по контуру всех электродов слабопроводящий слой с объемным сопротивлением в $10^4 - 10^5$ раз меньшим, чем у изоляции линии. Напряженность электрического поля при этом определяется не конфигурацией края обкладки, а падением напряжения вдоль слоя. Экспериментально был подобран материал, имеющий объемное сопротивление $\sim 10^6$ Ом/м³ при $t = 20^\circ\text{C}$, $\epsilon = 4,5$, обладающий хорошей адгезией к металлам, а также рассчитаны размеры слабопроводящего слоя, разработана методика его нанесения.

Для коммутации энергии полосковых формирующих линий, число которых составляет от 2 до 12, требуется коммутатор, обладающий индуктивностью не более 10^{-9} Гн на ток 60 – 420 кА длительностью 10^{-7} с.

На рис.8 показана функциональная схема многоканального разрядника в развернутом виде. Конструктивно он располагается на торце модуля. К электроду 1 и катоду 2 подключены обкладки полосковой ДФЛ, а искровые промежутки, образованные анодами 4, пус-

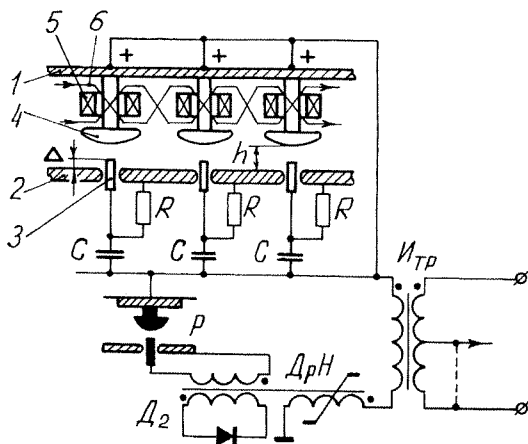


Рис. 8

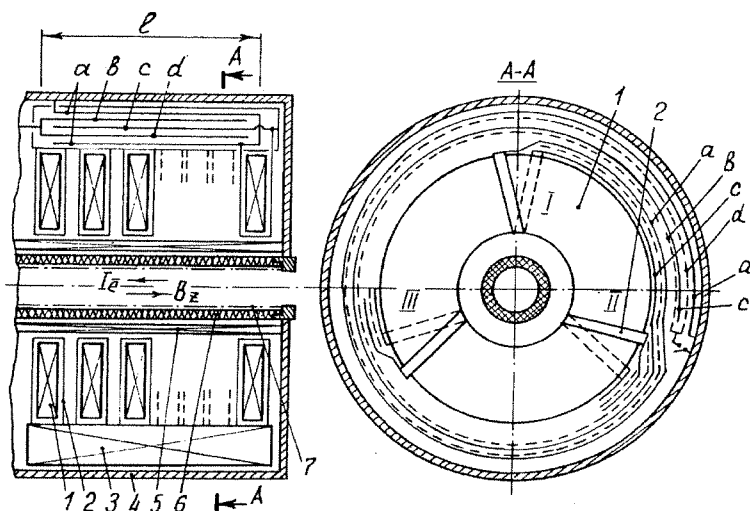


Рис. 7

ковыми электродами 3 с общим катодом 2, помещены в тороидальную диэлектрическую камеру. Электроды 3 длиной h введены в глубь искрового промежутка на величину Δ . Аноды 4 охвачены ферритовыми кольцами 5.

Для заряда формирующих линий ЛИУ с искровыми разрядниками разработаны простые и надежные схемы питания, которые одновременно могут формировать и ток в магнитной системе СВЧ-прибора. В наиболее совершенной модели ЛИУ с импульсной мощностью электронного пучка 4 ГВт габариты установки следующие: диаметр 700 мм, длина 900 мм, масса 700 кг.

Коммутатором, способным практически с неограниченным ресурсом коммутировать в наносекундном диапазоне длительностей с частотой в единицы килогерц ток в сотни килоампер, является магнитный коммутатор, представляющий собой дроссель насыщения. Однако для реализации такого коммутатора с минимальными габаритами и соответственно минимальной индуктивностью требуется осуществлять зарядку формирующих линий от магнитных генераторов импульсов за время в сотни наносекунд.

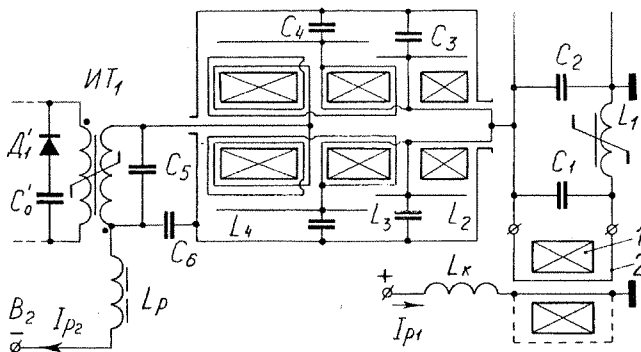


Рис. 9

Функциональная схема модуля ускорителя показана на рис.9. Весь ускоритель состоит из четырех модулей, два из которых являются ускоряющими и два (катодный и анодный) образуют инжекторный участок. Рядом с модулями расположены два магнитных импульсных генератора (МИГ). Высоковольтная часть каждого модуля расположена в цилиндрическом баке диаметром 700 мм, длиной 900 мм и содержит индукционную систему 1 из двадцати одного сердечника, магнитный коммутатор L_1 , представляющий одновитковый дроссель насыщения. Поверх сердечников расположены

электроды полосковых ОФЛ, обладающих емкостью C_1 и C_2 . Высоковольтный электрод является общим и подключен к предпоследней ступени сжатия МИГ. Два других электрода соединены между собой дросселем насыщения L_1 . По оси индукционной системы катодного модуля пропущен катододержатель, анодного модуля – металлическая труба тракта транспортировки пучка, поверх которой уложен фокусирующий соленоид. В ускоряющих модулях пучок ускоряется в диэлектрических вакуумных трактах, поверх которых намотаны фокусирующие соленоиды.

Система зарядки формирующих линий модулей – двухканальная. В первом канале катодный и анодный модули, а во втором оба ускоряющих модуля с помощью набора коаксиальных кабелей подключены к соответствующим им магнитным импульсным генераторам (МИГ). МИГ имеет три ступени сжатия на дросселях насыщения L_2 , L_3 , L_4 . Обкладки конденсаторов C_3 , C_4 уложены вокруг дросселей L_2 , L_3 .

Конденсаторы C_5 – C_6 – высоковольтные типа ИК 100 – 0,25 установлены снаружи бака. Импульсный трансформатор ИТ₁ одновременно выполняет две функции: повышает напряжение, а при насыщении является индуктивностью для перезаряда конденсатора C_3 . Вокруг трансформатора расположены катушки развязывающей индуктивности L_p цепи размагничивания сердечника трансформатора.

Индукционная система размагничивается по цепи индуктивности L_k , подключенной к первичной обмотке импульсного трансформатора.

Принцип работы ЛИУ на магнитных элементах следующий. Первоначально устанавливается требуемый ток I_{p2} в цепи L_p , определяющий магнитное состояние ИТ₁, включаются выпрямители для заряда конденсатора C_0 . С приходом управляющего импульса на тиристорный блок (игнитрон) D_1 конденсатор C_0 подключается к первичной обмотке импульсного трансформатора. Начинается заряд C_5 , C_6 и формирование тока I_{p1} в цепи L_k . Изменение напряжений на некоторых элементах схемы показано на рис.10. Конденсатор C_5 заряжается непосредственно от вторичной обмотки

ИТ₁, а в цепи заряда C_6 оказываются включенными обмотки дросселей насыщения L_4, L_3, L_2, L_1 и витки намагничивания индукционной системы 2, которые размагничиваются. В момент времени t_2 ток конденсатора C_0 переходит нулевое значение и тиристорный блок D_1 выключается. Под действием ЭДС конденсатора C_0 ИТ₁ насыщается и конденсатор C_5 перезаряжается через индуктивность вторичной обмотки трансформатора. При этом разность напряжений конденсаторов C_5, C_6 прикладывается к дросселям насыщения L_4, L_3, L_2, L_1 . К моменту времени t_3 сердечник дросселя L_4 насыщается, C_5 должен перезарядиться, и последовательно включенные относительно C_4 конденсаторы C_5, C_6 разряжаются на C_4 . В интервале времени t_3-t_4 перемагничивается сердечник дросселя L_3 и C_4 разряжается на емкость C_3 . В течение t_4-t_5 перемагничивается сердечник дросселя L_2 , и C_3 разряжается на емкость формирующей линии C_2 . После насыщения дросселя L_1 (момент времени t_6) ОФЛ с емкостью C_2 начинает заряжать ФЛ с емкостью C_1 , формируя импульс высокого напряжения.

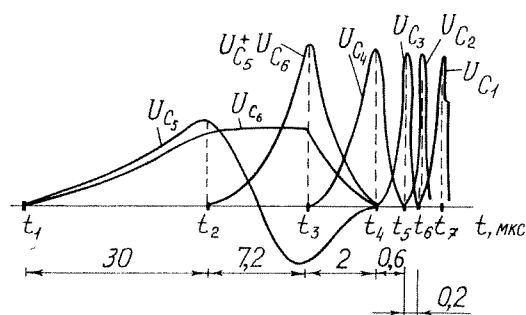


Рис. 10

Как следует из принципа работы ускорителя, интервалы времени передачи энергии от одной ступени сжатия к другой определяются потокоосцеплением дросселей насыщения, импульсного трансформатора и могут регулироваться относительно момента включения тиристорного блока D_1 с высокой точностью выбором начального магнитного состояния сердечника импульсного трансформатора, задаваемого током размагничивания в цепи L_p . Это позволяет синхронизировать работу любого числа однотипных модулей.

В таблице представлены несколько вариантов ЛИУ, разработанных в НИИЯФ при ТПУ по заказу различных организаций и работающих на различные нагрузки при разной частоте следования импульсов.

Таблица 4

Мо- дель	Кол. сек- ций	U , кВ	I , кА	τ , нс	Тип ли- ний	f , Гц	Организации	Применение	Особенности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЛИУ на разрядниках									
ЛИУ 2/3	4	2000	3	70	ДФЛ	10	НИИЯФ, 1981	Лазер на свободных электронах	
ЛИУ	4	2000	5	120	ДФЛ	1	ХФТИ Харьков, 1982	Ускорение тяжелых ионов коллектив- ным методом	Для исследований в об- ласти термоядерного синтеза
ЛИУ 05/5	1	500	4,5	80	ДФЛ	160	НПО «Астрофизика» Москва, 1986	Возбуждение газо- вых лазеров	Релятивистский магне- трон ($P_{свч} \sim 360$ МВт)
ЛИУ 04/7	1	400	7	70	ДФЛ	20	КБ «Проект», НИИЯФ, 1989	Релятивистский магнетрон ($P_{свч} \sim 250$ МВт)	Мобильный вариант
ЛИУ 04/7	1	400	7	80	ДФЛ	10	НИИЯФ, 1992-1997	Релятивистский магнетрон	Сложение мощности с двух выводов, сложе- ние мощности двух магнетронов при син- хронизированной работе двух секций
ЛИУ 07/6	1	700	6	80	ДФЛ	50	НПО «Горизонт» Мо- сква, 1986	Генерация СВЧ-излучения	
ЛИУ 03/18	2	300	18	200	ДФЛ	5	НИИЯФ, 1989	Отражательный триод ($P_{свч} \sim 70$ МВт)	Параллельная работа двух секций

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЛИУ 04/12	1 1	350 280	12 15	200 260	ДФЛ ОФЛ	10 10	НИИЯФ, 1997	Отражательный триод $P_{свч} \sim 200$ МВт $P_{свч} \sim 70$ МВт	Частота 1 Гц ограниче- на нагревом и деформа- цией сетки триода
ЛИУ 05/4	1	480	3,7	80	ДФЛ	50	МРТИ Москва, 1989	Вывод электронного пучка в атмосферу	Совмещенная схема пи- тания ускорителя и магнитного поля
ЛИУ на магнитных элементах									
ЛИУ 2/2	4	2000	2	50	ОФЛ	3300	МРТИ Москва, 1991	Исследование воз- действия РЭП на различные среды	Диэлектрический эмит- тер для формирования РЭП
ЛИУ 03/3	1	450	4,5	200	ОФЛ	до* 400	НИИЯФ, 1997	Релятивистский магнетрон $P_{свч} \sim 300$ МВт	Постоянное магнитное поле

*Проектные параметры

Применение сильноточных электронных ускорителей для генерации СВЧ-излучения

Говоря о применении сильноточных электронных ускорителей, прежде всего следует отметить работы по генерации мощного СВЧ-излучения.

Предельные уровни выходной мощности современных приборов СВЧ в основном определяются возможностями получения сильноточных пучков электронов. Поэтому сразу же после создания первых СЭУ большой интерес вызвало их использование для генерации сверхмощного СВЧ-излучения. Первые экспериментальные исследования в НИИ ядерной физики были начаты по инициативе А.Н.Диденко в 1974 г. после запуска «Тонуса» и через год после того, как был создан первый релятивистский прибор – лампа обратной волны с выходной мощностью более 300 МВт – сотрудниками Института прикладной физики и Физического института Академии Наук [46, 47]. По мере создания новых ускорителей прямого действия нано- и микросекундной длительности импульсов с током до 100 кА и линейных индукционных ускорителей, позволяющих работать в периодическом режиме, экспериментальная база в институте для таких исследований непрерывно расширялась. Одновременно расширялась тематика исследований, появились отдельные группы, специализирующиеся на исследовании наиболее перспективных приборов СВЧ релятивистской электроники [48].

В данной статье невозможно перечислить все достижения по релятивистской электронике, полученные в НИИЯФ. Результаты исследований были широко представлены в монографиях [47, 49] периодической печати и международных конференциях. Кратко остановимся только на некоторых из них.

Был выполнен большой объем исследований по релятивистским СВЧ-генераторам с продольным взаимодействием. Впервые был создан экспериментальный образец черенковского мазера с диэлектрической замедляющей системой, в котором зарегистрировано излучение мощностью 580 МВт в 3-сантиметровом диапазоне длин волн [50, 51]. Были также предложены оригинальные замедляющие системы в виде изогнутых волноводов постоянного поперечного сечения, которые могут быть использованы для создания источников СВЧ-излучения, перестраиваемых по частоте в пределах 25% полосы усиления и с коэффициентом усиления ~ 30 дБ [52].

При исследованиях приборов с продольным взаимодействием большие технические трудности возникают при транспортировке сильноточных пучков как до входа прибора, так и внутри самого прибора. Поэтому было уделено больше внимания релятивистским СВЧ-приборам, в которых пространство получения сильноточных релятивистских электронов и пространство генерации СВЧ-излучения совмещены. В связи с этим были впервые начаты исследования релятивистского магнетрона [53] в 1976 году. Одновременно такие же исследования, как стало известно позже, были начаты в США [54] и Институте прикладной физики АН в России [55]. К настоящему времени в НИИЯФ проведено большое количество экспериментов и разработан ряд оригинальных конструкций релятивистского магнетрона в 30-, 10- и 3-сантиметровом диапазонах длин волн. В реля-

тивистском магнетроне при питании от ускорителя «Тонус» были получены рекордные уровни мощности, достигающие 8,5 ГВт при КПД ~47% в 10-сантиметровом диапазоне [56].

К другому классу приборов, имеющих совмещенное пространство генерации релятивистских электронов и СВЧ-излучения, относится виркатор. Впервые был исследован виркатор на циклотронном резонансе, на выходе которого было зарегистрировано излучение мощностью 1,5 ГВт на частоте $3 \cdot 10^9$ Гц [57]. Наибольшее развитие получила конструкция виркатора-триода с виртуальным катодом [58]. Он генерирует импульсы излучения нано- и микросекундной длительности в широком диапазоне частот. Этот прибор обладает высокими потребительскими качествами, используется в ряде организаций в нашей стране и за рубежом и имеет хорошие перспективы применения в области взаимодействия сверхмощного излучения с различными средами и при разработке новых технологий.

Импульсные ионные ускорители, плазменные генераторы и их применение для модификации свойств материалов

В последние два десятилетия наблюдается значительный рост научного и практического интереса к проблеме модификации свойств материалов пучками заряженных частиц и плазменными потоками. Ионное облучение как метод модификации свойств материалов связан со многими научными и техническими областями, такими как физика и химия, радиационное материаловедение, атомная и ядерная физика и, конечно, ускорительная техника. Яркий пример широкомасштабного применения ионных пучков для направленного изменения свойств материалов реализован в области ионной имплантации в полупроводники.

В течение длительного времени исследования влияния ионного облучения на непроводниковые материалы носили чисто академический характер.

В настоящее время появляется более определенный интерес к технологическому использованию ионных пучков и плазменных потоков. Несколько лет назад наиболее распространенным видом имплантанта для целей металлургической ионной имплантации был азот. Это было связано с тем фактом, что газовые ионные источники были хорошо продвинуты в разработке благодаря реализации программы управляемого термоядерного синтеза. И хотя азот не обеспечивает улучшения широкого спектра свойств металлов, он нашел свое место в индустрии для улучшения трибологических свойств поверхностей различных материалов.

В начале 80-х годов интенсивно начали развиваться импульсно-периодические источники на основе вакуумной дуги. Появились возможности формирования сильноточных импульсных пучков ускоренных ионов широкого круга элементов периодической системы Менделеева. Стало возможным формировать сложные по составу ионные пучки, ионные и плазменные потоки на основе одноэлементных и композиционных катодов для импульсной обычной и многоэлементной имплантации для плазменного осаждения покрытий в условиях ионного, в том числе и динамического перемешивания.

Появление нового поколения ионных ускорителей, а именно ускорителей для получения ионных пучков высокой импульсной мощности, также было связано, прежде всего, с решением проблем управляемого термоядерного синтеза.

В НИИЯФ при ТПУ в рамках программы развития новых типов ионных ускорителей высокой импульсной и средней мощности было разработано несколько различных типов ионных источников. Комплекс ионных сильноточных ускорителей, разработанных к настоящему времени, позволяет получать пучки ионов с широким диапазоном характеристик: длительностью импульса от нескольких десятков наносекунд до нескольких сотен микросекунд, током в импульсе от нескольких килоампер до единиц ампер, с частотой следования импульсов от одного до 200 импульсов в секунду. Диапазон мощностей в ионном пучке простирается от 10^3 до 10^8 Вт/см². Все эти ускорители в той или иной мере находят свое применение в научных исследованиях и для практического применения по модификации поверхностных свойств различных материалов.

Физика и соответственно технология процессов модификации поверхностных свойств материалов существенно зависят от плотности мощности и энергии, запасенной в ионном пучке.

Источники мощных ионных пучков для практического применения

Первые работы, исследующие возможность использования мощных ионных пучков (МИП) для модификации свойств металлов и сплавов, были проделаны в НИИЯФ при ТПУ [33]. Уже на этом этапе исследований стало ясно, что существовавшие на этот момент времени источники МИП требуют изменений, определяемых новой областью применения, и на первый план выходят такие характеристики новых источников, как ресурс работы, стабильность параметров, возможность получения ионных пучков различного состава. В НИИЯФ с середины 70-х годов исследовались различные диодные системы с пассивными источниками плазмы на аноде, инжекцией плазмы от внешнего плазменного источника, образованием плотной плазмы и взрывоэмиссионной плазмы непосредственно в ускоряющем промежутке [59]. Позднее, в начале 80-х годов, эти работы были сосредоточены на магнитоизолированных диодах с указанными методами образования плазмы в направлении практического использования соответствующих ускорителей.

В результате исследований по воздействию мощных ионных пучков на металлы и сплавы определились и основные общие направления их прикладного использования, основанные на чисто энергетическом воздействии и короткоимпульсной имплантации.

Сравнительные исследования, проведенные на ускорителях «ТОНУС», «ЛУЧ», «ВЕРА» с различными диодными системами (диоды с пинчеванием электронного пучка, отражательный триод, магнитоизолированные диоды) в двухимпульсном режиме, показали перспективность практического использования ускорителей на основе магнитоизолированных диодных систем [60 – 63].

В основу ряда исследовательских работ был положен подход с использованием взрывной электронной эмиссии для создания плотной плазмы необходимого состава непосредственно в диоде [34, 64 – 65]. Первый, отрицательный, импульс напряжения от высоковольтного генератора, прикладываемый к потенциальному электроду (в последующем – аноду), служит для образования плазмы, второй же, положительный, является ускоряющим. На рис.11 приведены схема полоскового диода с внешней магнитной изоляцией (а) и зависимость плотности тока выведенного ионного пучка от величины внешнего магнитного поля в плоском диоде с графитовым анодом (б).

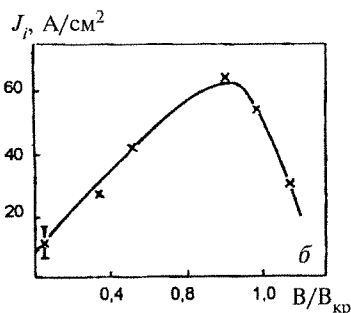
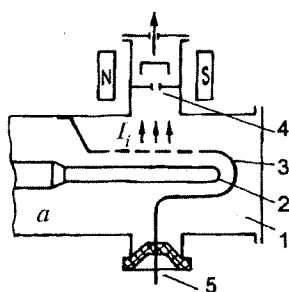


Рис.11. Принципиальная схема полоскового диода с внешней магнитной изоляцией (а): 1 – вакуумная камера; 2 – анод; 3 – катод; 4 – коллимированный цилиндр Фарадея; 5 – ввод от емкостной батареи. Зависимость плотности тока от отношения величины магнитного поля в диоде B к $B_{кр}$ (б)

Для формирования пучков тяжелых ионов на ускорителе «МУК-М» использовался полосковый магнитоизолированный диод несколько другой конструкции. Конфигурация катодного витка предусматривает замкнутость электронного потока во всем сечении анод-катодного промежутка [66]. Катод в виде разомкнутого с одной стороны плоского витка с отверстиями для вывода ионного потока подключен разомкнутыми концами к трансформатору тока Tr_2 , выполняющему функции источника

тока изоляции, изготовлен из меди и охватывает анод с обеих сторон. Получены пучки ионов Al, С наносекундной длительности.

Физические ограничения, свойственные диодным системам с самоизоляцией, не позволяют получить ионные пучки с поперечным сечением более 40 – 100 см² при использовании таких систем на ускорителе «ТЕМП». Для получения ионных потоков с поперечным сечением более 100 см² за основу была взята схема магнитоизолированного диода (МИД) с пассивным плазмообразующим покрытием анода. Плазма на поверхности анодного диэлектрика образуется при поступлении положительного высоковольтного ускоряющего импульса на анод в результате поверхностного пробоя диэлектрика под действием электронных потерь. К моменту начала генерации МИП энер-

гозатраты на создание анодной плазмы в такой схеме незначительны и составляют <20 Дж для всего диода площадью 200 см^2 .

Импульсное изолирующее магнитное поле в ускоряющем зазоре создавалось низкоиндуктивным импульсным трансформатором. Ионный пучок фокусируется, и на расстоянии 140 мм плотность тока достигает $\sim 300 \text{ А/см}^2$ при ускоряющем напряжении на диоде 350 кВ .

Ниже рассмотрен плазмонаполненный ионный диод с внешним радиальным изолирующим магнитным полем и замкнутым дрейфом электронов. Для создания плазмы с заданными свойствами используется расположенный в заанодном пространстве источник на основе индукционного пробоя облака газа, напускаемого импульсным клапаном. Высокая эффективность и надежность магнитной изоляции, простота организации баллистической фокусировки МИП и отсутствие реальной катодной структуры на пути его вывода из диода являются достоинствами данной схемы формирования. Схема МИД приведена на рис. 12. Диод имеет конусную фокусирующую геометрию электродов с полным углом фокусировки 45° . Изолирующее магнитное поле до 1 Тл создается двумя соосными катушками.

В плоском варианте МИД на наносекундном ускорителе были получены пучки ионов водорода и азота с энергией $\sim 500 \text{ кэВ}$, длительностью импульса $\sim 90 \text{ нс}$ и током ~ 12 и 5 кА соответственно на площади $\sim 110 \text{ см}^2$ [39]. Этот же МИД, установленный на генераторе Аркадьева-Маркса, позволил получить пучок ионов азота с энергией $\sim 250 \text{ кэВ}$, током $0,4 - 1 \text{ кА}$, длительностью импульса $1 - 2 \text{ мкс}$ [40].

К настоящему времени разработано и находится в эксплуатации несколько ускорителей: «ТЕМП», «ВЕРА», «МУК». Они собраны по сходной блок-схеме: генератор импульсных напряжений (ГИН) Аркадьева – Маркса или импульсный трансформатор, двойная формирующая линия с газовыми разрядниками, магнитоизолированный диод (табл. 5).

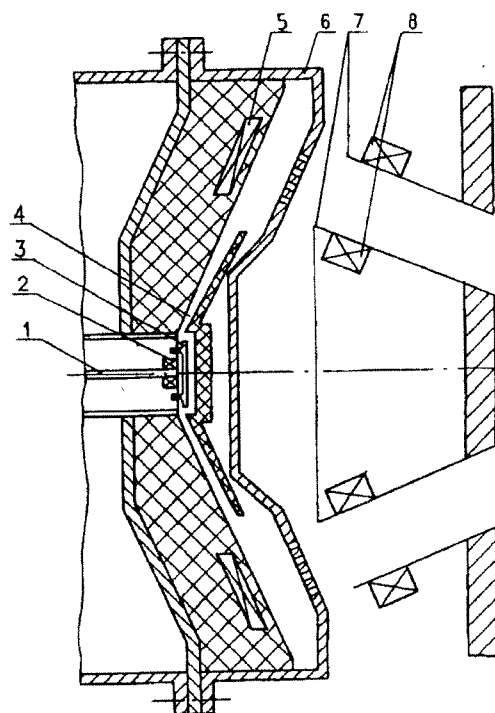


Рис. 12. Фокусирующий ионный диод с радиальным изолирующим магнитным полем и плазменным источником на аноде: 1 – канал газоподачи; 2 – катушка клапана; 3 – чашка клапана; 4 – сверхзвуковое сопло; 5 – ударная катушка; 6 – анод; 7 – катод; 8 – катушки изолирующего магнитного поля

Таблица 5

Название ускорителя	Тип микросекундного генератора	Тип используемых диодов	Энергия частиц, МэВ	Плотность тока на мишени, А/см ²	Частота следования импульсов, мин ⁻¹	Размер пучка, см ²
ТЕМП-1	маслонаполненный ГИН	МИД с самоизоляцией	300	40 – 150	15	20 – 100
ТЕМП-2	маслонаполненный ГИН	МИД с внешней изоляцией	400	40 – 250	5	20 – 200
ВЕРА	газовый ГИН	плазмонаполненный МИД	600	40 – 250	5	20 – 200
МУК	импульсный трансформатор	МИД с внешней изоляцией	150	1 – 20	300	20 – 200

В последнее время разработан и создан ускоритель «ТЕМП-4», который обладает высокопроизводительной вакуумной системой, автоматизированной системой контроля параметров и управления ускорителя.

Сильноточные импульсно-периодические источники ионов и плазмы

Разработанные в НИИЯФ сильноточные источники ускоренных ионов и плазмы, основанные на генерации плазмы вакуумной дугой, работают в режиме импульсно-периодического извлечения и ускорения ионов и в импульсно-периодическом или непрерывном режимах формирования плазменных потоков. Эти ускорители позволяют получать пучки ионов металлов с энергией ионов до нескольких сотен кэВ с током в импульсе до 1 А. Было разработано несколько версий установок, названных «Радуга 1» – «Радуга 5». Ускоритель «Радуга» может обеспечивать формирование одно и многокомпонентных, в том числе и динамически управляемых по составу, ионных пучков для одно и многоэлементной имплантации. Ряд установок «Радуга» обеспечивает получение пучков ускоренных ионов и плазменных потоков для реализации технологических режимов высококонцентрационной имплантации и плазменного осаждения покрытий и динамическими режимами ионного перемешивания.

Основные параметры разработанных источников представлены в таблице 6. Более детальная информация представлена в [1].

В настоящей статье представляются результаты разработки и исследований последней модификации ускорителя, а именно «Радуга 5».

Таблица 6

Название источника	«Радуга 1»	«Радуга 2»	«Радуга 3»	«Радуга 22»	«Радуга 4»	«Радуга 5»
Материал катода	Любое проводящее вещество					
Средняя зарядность ионов	1-3					
Переход к другому типу ионов	-	-	-	Периодически (2 катода)	Периодически (2 катода)	-
Диаметр пучка, мм	до 100	до 200	до 200	до 200	до 200	до 200
Длительность импульса ионного пучка, мкс	30 – 500	50 – 200	100 – 400	100 – 400	50 – 200	200
Импульсное значение тока ионов, А	0,1 – 0,5	0,2 – 0,7	до 1	до 1	0,2 – 0,7	до 1
Длительность импульсов в режиме генерации плазмы, мкс	20 – 500	50 – 400	-	-	до 2000	Непрерывно
Частота следования, имп./с	до 200	до 50	до 100	до 100	до 100	до 200

Сильноточный импульсно-периодический источник ионов и плазмы «Радуга 5»

Отличительной особенностью и преимуществом источника «Радуга 5» (рис.13) является прежде всего непрерывный режим генерации плазмы вакуумной дугой. Такой подход снимает проблемы ограничения ресурса работы источника из-за перепыления изолятора между поджигающим электродом и катодом, его разрушения и т.д. в системе инициирования вакуумной дуги. Достаточно осуществить однократное инициирование вакуумной дуги, а затем использовать непрерывный поток плазмы и осуществлять импульсно-периодическое формирование пучков ускоренных ионов. Ресурс непрерывной работы источника ограничивается только выработкой массивного катода и может достигать нескольких десятков часов. В источнике впервые применена высокоэффективная прямоточная система очистки вакуумно-дуговой плазмы от микрокапельной фракции продуктов эрозии катода.

Плазменный фильтр (ПФ) представляет собой плоско-параллельную или аксиально-симметричную систему жалюзи, расположенных на торце анода под углом к плазменному потоку (рис.14).

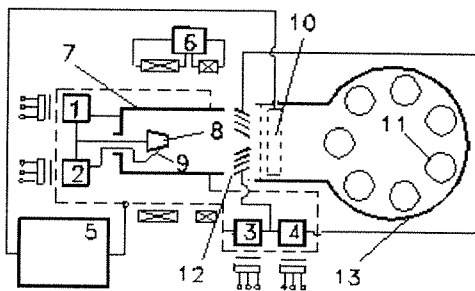


Рис. 13

Устройство может быть использовано в любых технологических и экспериментальных установках с линейными и аксиально-симметричными дуговыми испарителями, а также в созданных на их основе источниках ускоренных ионов. Характеристики устройства обеспечивают улучшение структуры наносимых покрытий за счет многократного уменьшения микрокапельной фракции в плазменном потоке при достаточно высокой эффективности пропускания фильтром плазменного потока. Как видно из рис.15, *а* и *д*, без применения ПФ осаждение покрытий сопровождается появлением значительного количества микрочастиц на поверхности образца, размеры которых, например для Al, достигают 20 мкм. Профилограммы, приведенные на тех же рисунках, демонстрируют резкое увеличение шероховатости поверхности по сравнению с их исходным состоянием, представленным на рис.15, *г* и *з*. Как следует из результатов экспериментов, часть микрочастиц, находясь в расплавленном состоянии, соударяются с поверхностью и разбрызгиваются на более мелкие части, которые могут изменять направление своего движения и частично проникать через ПФ. Об этом свидетельствуют фотографии и рельеф поверхностей Ti- и Al-покрытий рис.15, *б* и *е*, полученных на выходе ПФ. Благодаря фокусирующей геометрии ПФ (см. рис.14) отраженные от поверхности электродов микрочастицы могут распространяться только в телесном угле, определяемом наклоном жалюзей ПФ к оси системы. На расстоянии, превышающем геометрический фокус, обусловленный конической формой аксиально-симметричных электродов, достигается хорошая степень очистки плазмы. Об этом свидетельствуют фотографии и профиль поверхности покрытий Ti и Al, представленные на рис.15, *в* и *ж*. Профиль поверхности этих покрытий практически совпадает с профилем поверхности исходных образцов рис. 15, *г* и *з*.

При формировании пучков ускоренных ионов от генератора импульсов ускоряющее напряжение положительной полярности подается на ПФ и генератор плазмы. Одновременно на две сетки подается импульсное напряжение отрицательной полярности. Извлечение и последующее ускорение ионов из плазмы осуществляется в зазоре между ПФ и первой сеткой. Отрицательное смещение на сетках обеспечивает барьер для проникновения электронов плазмы из вакуумной камеры в ускоряющий зазор. В промежутках между импульсами ускоряющего напряжения плазма вакуумной дуги, проходя ПФ и систему сеток свободно, распространяется в вакуумной камере. Технические параметры источника «Радуга 5» представлены в таблице. На данный момент ионно-плазменный источник «Радуга 5» не имеет аналогов в мире. Его технические характеристики позволяют осуществлять высокоэффективную реализацию широкого круга режимов ионной и плазменной модификации материалов, включающих ионно-ассистированное осаждение плазмы, ионную имплантацию с компенсацией ионного распыления осаждением металлической плазмы, обычные методы ионной имплантации. Возможность формирования в источнике «Радуга 5» очищенной от микрокапельной фракции металлической плазмы и пучков ускоренных ионов открывает широкие перспективы его технологических применений.

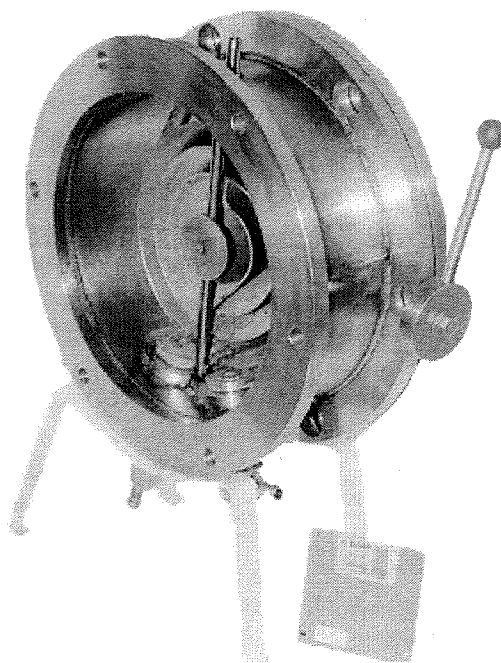


Рис. 14

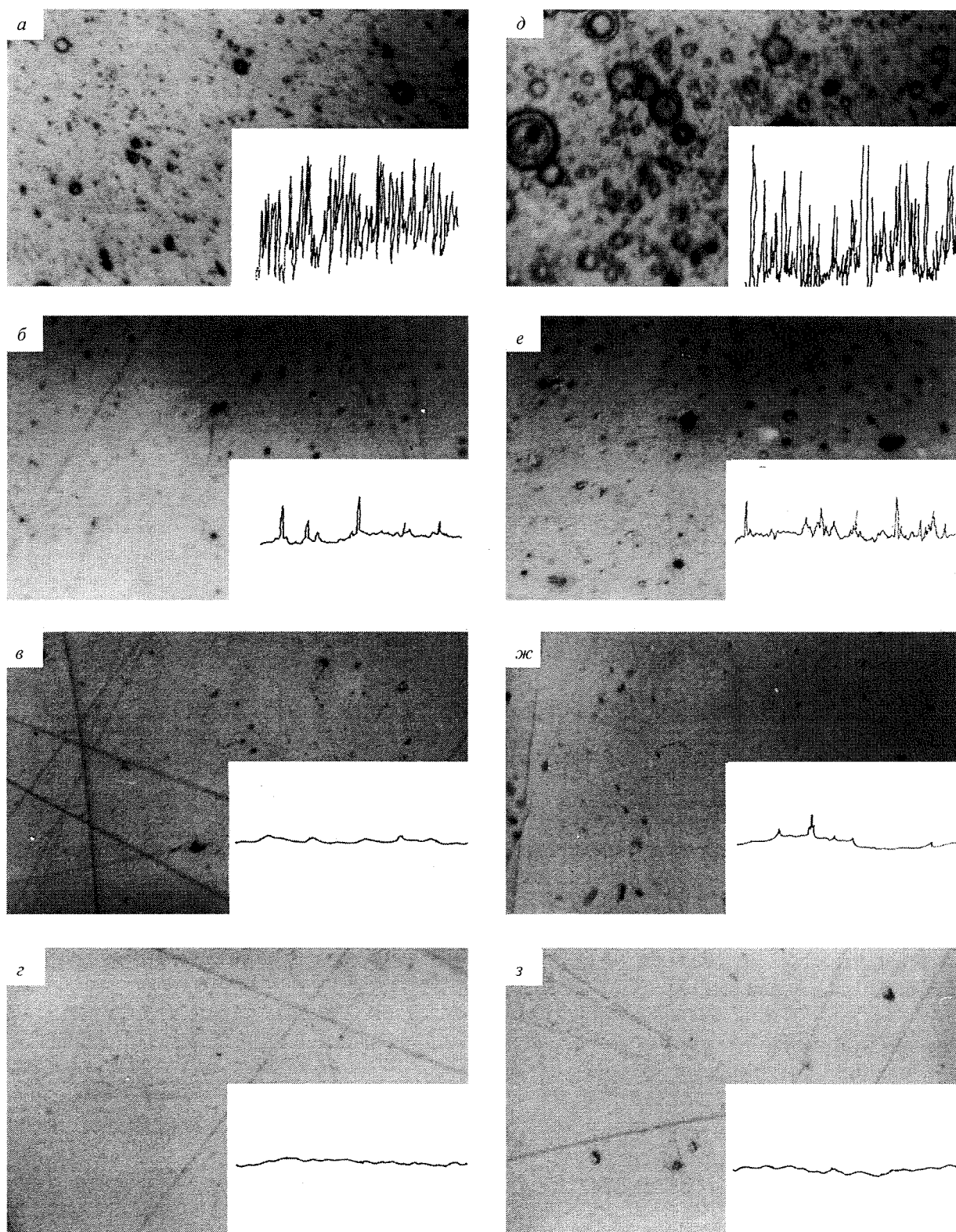


Рис. 15. Фотографии и профили поверхности пленок Ti (а, б, в, з) и Al (д, е, ж, з), сформированных в режиме генерации источником «Радуга 5» потоков металлической плазмы

Устройства для осаждения покрытий на основе магнетронных распылительных систем

Заметное место в технологиях модификации поверхности твердых тел занимают процессы, построенные на использовании потоков ионов относительно малых энергий (менее 10^3 эВ) и плазмы. Основным преимуществом методов этой группы является то, что они способны обеспечить производительность оборудования, на порядки превышающую производительность методов, построенных на использовании высокоэнергетических частиц.

Группой сотрудников НИИ ядерной физики были исследованы физические процессы, имеющие место в диодах со скрещенными электрическим и магнитным полями в разреженной газовой среде, обычно называемых магнетронами.

Выполнен ряд теоретических и экспериментальных исследований процессов эрозии мишеней из различных металлов и сплавов в магнетронных распылительных системах с цилиндрическими и планарными диодами (нержавеющая сталь, медь, алюминий, хром, титан, серебро, цирконий и т.д.). Изучались вопросы их расчета, конструирования, оптимизации параметров магнитного поля, тепловой защиты катодных узлов, пространственной неоднородности потока частиц, генерируемых в диоде, и т.д. Подробно проанализировано влияние факторов состояния газовой среды и поверхности распыляемой мишени на кинетику осаждения покрытий. Изучены некоторые физические характеристики наносимых покрытий (адгезия, оптические свойства, механические характеристики и т.д.).

Показаны хорошие перспективы применения магнетронных распылительных систем для модификации оптических свойств стекла (производство тонированного листового стекла, изготовление зеркал и технических рефлекторов и т.д.). На основании этих результатов и были разработаны несколько типов установок для модификации оптических свойств листового стекла. К наиболее удачным можно отнести следующие.

Проект «Аметист». Установка предназначена для тонирования листового стекла и изготовления зеркал. Отличительная особенность ее в том, что она снабжена стационарными распылительными системами, вертикально расположенными в центре камеры. Обеспечена возможность сканирования листов относительно неподвижных магнетронов.

Основные технические характеристики

Максимальные габаритные размеры обрабатываемых листов	-	1,3x1,6 м (2,08 м ²)
Максимальная суммарная площадь обрабатываемых листов	-	4,16 м ²
Объем рабочей камеры	-	1,51 м ³
Предельное остаточное давление в камере	-	$6,7 \times 10^{-3}$ Па
Скорость осаждения пленки (мишень из стали 12X18H9T)	-	$1,0 \times 10^{-3}$ мкм/с
Скорость сканирования стекла	-	$10-50 \times 10^{-3}$ м/с
Число катодов	-	10 шт.
Средняя производительность	-	6 м ² /ч
Максимальная потребляемая мощность установки	-	20 кВт
Расход охлаждающей воды (20°C)	-	0,9 м ³ /ч
Температура обрабатываемой поверхности	-	30-100°C
Масса установки	-	2200 кг
Установочная площадь	-	30 м ²

Проект «Аметист-3». В отличие от установки «Аметист» система «Аметист-3» обладает двумя подвижными планарными магнетронами. Это позволяет увеличить загрузку рабочей камеры и производительность.

Основные технические характеристики

Максимальные габаритные размеры обрабатываемых листов	-	1,3x1,6 м (2,08 м ²)
Максимальная суммарная площадь обрабатываемых листов	-	8,32 м ²
Предельное остаточное давление в камере	-	$6,7 \times 10^{-3}$ Па
Скорость осаждения пленки (мишень из стали 12X18H9T)	-	$1,0 \times 10^{-3}$ мкм/с
Число катодов	-	2 шт.
Средняя производительность	-	16 м ² /ч
Максимальная потребляемая мощность установки	-	22 кВт

Масса установки	-	2100 кг
Установочная площадь	-	30 м ²

Проект «Изумруд». Установка предназначена для обработки листового стекла. Отличительная особенность ее состоит в том, что она не дискретного, а непрерывного действия. Снабжена входным и выходным шлюзами, которые позволяют производить загрузку установки без разгерметизации рабочей камеры. Благодаря этому существенно повышается производительность.

Основные технические характеристики

Максимальные габаритные размеры обрабатываемых листов	-	1,3х1,6 м (2,08 м ²)
Объем рабочей камеры	-	0,41 м ³
Предельное остаточное давление в камере	-	6,7х10 ⁻³ Па
Скорость осаждения пленки (мишень из стали 12Х18Н9Т)	-	1,0х10 ⁻³ мкм/с
Скорость движения стекла	-	10-50х10 ⁻³ м/с
Число катодов	-	3 шт.
Средняя производительность	-	30 м ² /ч
Максимальная потребляемая мощность установки	-	25 кВт
Масса установки	-	4 т
Установочная площадь	-	50 м ²

Проект «Опал». Установка предназначена для нанесения тонкопленочных покрытий из металлических материалов, а также их оксидов и нитридов методом распыления в вакууме металлических катодов плазмой аномального тлеющего разряда магнетронного типа.

Принцип действия ее основан на дискретном шлюзовании кассеты с листовыми или малогабаритными изделиями и последующей обработкой их в рабочей камере, постоянно находящейся под вакуумом.

Рабочая камера оснащена системами предварительной очистки изделий потоком ионов и магнетронного распыления. Одновременно обрабатываются две пластины размерами до 2600х1600 мм или обе стороны малогабаритных штучных изделий. Управление установкой осуществляется с унифицированного пульта, регламентирующего работу вакуумной системы и процесс напыления в полуавтоматическом режиме.

Основные технические характеристики

Максимальные габаритные размеры обрабатываемых листов	-	2,6х1,6 м (4,16 м ²)
Максимальная суммарная площадь обрабатываемых листов	-	8,32 м ²
Объем рабочей камеры	-	1,23 м ³
Объем шлюзовой камеры	-	0,47 м ³
Скорость осаждения пленки (мишень из стали 12Х18Н9Т)	-	1,0х10 ⁻³ мкм/с
Скорость сканирования загрузочной кассеты	-	5-50х10 ⁻³ м/с
Число катодов	-	2 шт.
Средняя производительность	-	35 м ² /ч
Максимальная потребляемая мощность установки		
в режиме шлюзования	-	17,6 кВт
в режиме напыления	-	34,9 кВт
в ждущем режиме	-	11,4 кВт
Расход охлаждающей воды (20°С)	-	1,6 м ³ /ч
Масса установки	-	5370 кг
Установочная площадь	-	75 м ²
Габаритные размеры в плане:		
вакуумная камера	-	6100х2860 мм
пульт управления	-	600х1000 мм
высота вакуумной камеры	-	2300 мм

В настоящее время изготовлены и внедрены на промышленных предприятиях 15 комплектов оборудования (Анжеро-Судженск, Кемерово, Барнаул, Новосибирск, Томск, Салават, Бийск, Алма-Ата, Токмак). Они показали высокую надежность и хорошие функциональные характеристики.

Методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов

Широкий диапазон энергетических параметров пучков ускоренных ионов и плазменных потоков, формируемых на разработанных ускорителях, позволяет реализовать целый спектр новых перспективных технологий, улучшающих поверхностные свойства различных материалов. Объем данной статьи не позволяет подробно описать каждый метод, его отличительные особенности и место среди многообразия существующих технологий модификации поверхностных свойств материалов. Отметим лишь, что эти методы включают:

- а) модификацию материалов воздействием на поверхность материалов мощных ионных пучков;
- б) ионную имплантацию;
- в) ионную имплантацию с одновременной модификацией структуры материала воздействием мощных ионных пучков;
- г) плазменное осаждение покрытий (магнетронные системы, дуговые испарители с очисткой плазмы от микрокапельной фракции);
- д) плазменное осаждение покрытий в условиях импульсно-периодического перемешивания;
- е) плазменное осаждение покрытий с модификацией структуры и свойств покрытий сильно-точными и мощными ионными пучками;
- ж) высокоскоростное осаждение покрытий на основе испарения материала пучками ионов высокой импульсной мощности.

Результаты исследований отражены в [67 – 91].

Заключение

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность всем сотрудникам института, принимавшим участие в разработке и создании уникального ускорительного комплекса НИИЯФ в особо ценном объекте культурного наследия народов России – Томском политехническом университете.

Автор также признателен ведущим ученым НИИЯФ: В.А.Варлачеву, И.И.Винтизенко, В.М.Головкову, В.К.Кононову, Ю.Ф.Кречетову, В.П.Кривобокову, А.Г.Пузыревичу, Г.Е.Ремневу, Ю.П.Усову, Э.Г.Фурману, Ю.Г.Юшкову, оказавшим практическую помощь в подготовке данной обзорной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тематический сборник трудов НИИ ядерной физики, посвященный 40-летию института / Под ред. А.И.Рябчикова. - Изв. вузов. Физика. - 1998. - №4.
2. Глухов Г. Г. // Изв. вузов. Физика. - 1998. - №4. - С. 207-210.
3. Меркулов В. Г., Глухов Г. Г. // Труды НИИЯФ при ТПИ. - М.: Атомиздат, 1983. - Вып.10. - С. 12-13.
4. Shuvayeva O.V., Koutzenogii K.P., Rezchikov V.I., et al. // Atmospheric research. - 1998. - V.46. - P. 349-359.
5. А.С. № 1603704 от 20.01.89 г. / В.С.Скуридин, В.Г.Паутов, Н.К.Шумихина.
6. Dyda I., Shvera I., Krivonogov N., et al. // Russian-Japanese seminar of technetium July 1-5, Moscow, Russia, 1996. - P. 91-93.
7. Варлачев В. А., Цибульников Ю. А., Солодовников Е. С. и др. // Атомная энергия. - 1995. - Т. 79. - Вып. 1. - С. 38-40.
8. Патент РФ № 2008373 / В. А. Варлачев, Е. С. Солодовников.
9. Патент РФ № 2089011 / В. А. Варлачев, Е. С. Солодовников.
10. Воробьев А. А., Чучалин И. П., Власов А. Г. и др. Синхротрон ТПИ на 1, 5 ГэВ. - М.: Атомиздат, 1968.
11. Воробьев А. А., Волков М. Н., Власов А. Г. и др. // Атомная энергия. - 1966. - Т.21. - С. 435-439.
12. Бутаков Л. Д., Галь Э. Г., Кирюхина Г. Ф. и др. // Изв. вузов. Физика. - 1991. - №6. - С. 5-7.
13. Внуков И. Е., Главанаков И. В., Кречетов Ю. Ф. и др. // ЯФ. - 1988. - Т.47. - Вып.4. - С.913.
14. Внуков И. Е., Главанаков И. В., Кречетов Ю. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. - 1994. - Т.60. - Вып.8. - С.560.
15. Kalinin B.N., Krechetov Yu.F., Kolchuzhkin A.M., et al. // NIM 1995. - V.A361. - P.157.
16. Главанаков И. В., Кречетов Ю. Ф., Моисеенко А. В. и др. // ЯФ. - 1998. - Т. - V.61. - №. 12. - С.1.

17. Кузнецов Б. И., Чернов И. П., Стародуб Г. Я., Ятис А.А // Атомная энергия. - 1973. - Т.35. - Вып.6.
18. Чернов И.П., Тимошников Ю.А., Крючков Ю.Ю., Сохорева В.В // Атомная энергия. - 1978. - Т.44. - №6. - С.515.
19. Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-структуры. - М.: Энергоатомиздат, 1981.
20. Заводчиков В.М., Сохорева В.В., Ятис А.А. // Сверхпроводимость. - 1980. - №1. - С. 15-27.
21. Чернов И.П., Шадрин В.Н. Анализ содержания водорода и гелия методом ядер отдачи - М.: Энергоатомиздат, 1989.
22. Рыжков В.А. Обливанцев А.Н., А.Г.Рыбасов // Высокочистые вещества. - 1995. - № 6. - С.49.
23. Belyanin O.P., Chernov I.P., Cherdantsev Yu.P. et al. // At. Energy. - 1989. - V. 67. - №15. - P. 33.
24. Комов А.И., Скуридин В.С., Рыбасов А.Г., Головков В.М. // Изв. вузов. Физика. - 1998. - №4. - С.183-186.
25. Пузыревич А. Г., Рябчиков А.И., Шипилов А.Л. // Поверхность. - 1989. - №1. - С. 81-87.
26. Иммель А.Р., Пузыревич А.Г., Рябчиков А.И. // ПТЭ. - 1990. - №5. - С.209-211.
27. Крышкин В.И., Стерлигов Н.Г., Усов Ю.П. // ЖЭТФ. - 1969. - Т.57. - № 12. - С. 66-71.
28. Воробьев А.А., Руденко Н.С., Сметанин В.И. Техника искровых камер. - М.: Атомиздат, 1978.
29. Глейзер И.З., Диденко А.Н., Дронова Л.П. и др. // Атомная энергия. - 1974. - Т.36. - № 5. - С.378-382.; ПТЭ. - 1974. - № 3. - С.17-20.
30. Марков М.А. // Будущее науки: Сб. - М.: Знание, 1974. - С.23-60.
31. Диденко А.Н., Рябчиков А.И., Тузов В.А., и др. // ЖЭТФ. - 1974. - Т.44. - №9. - С.2613-2615.
32. Диденко А.Н., Петров А.В., Рябчиков А.И. и др. // Письма в ЖТФ. - 1975. - Т.21. - №3. - С.186-196.
33. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152с.
34. Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. // Письма в ЖЭТФ. - 1983. - Т.6. - Вып.22. - С.1404-1406.
35. Арбузов А.И., Быстрицкий В.М., Подкатов В.И. и др. // НИИЯФ: Труды. - М.: Атомиздат, 1979. - В.8. - С.5-8.
36. Диденко А.Н., Волков С.Н., Красик Я.Е., Рябчиков А.И. // ЖТФ. - 1984. - Т.54. - Вып.4. - С.128-143.
37. Волков С.Н., Красик Я.Е., Рябчиков А.И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. - 1983. - В.2/14. - С.104-106.
38. Асаинов О.Х., Кривобоков В.П., Лигачев А.Е., Сапульская Г.А. // Физика и химия обработки материалов. - 1987. - №3. - С.53-59.
39. Volkov S.N., Krasik Ya.E., Petrov A.V., et al. // Proc. of the 8 Inter. Conf. in High Power Particle Beams. V.1. - Novosibirsk, 1990. - P.529-534.
40. Карпов В.Б., Петров А.В., Полковникова Н.М., Толмачева В.Г. // IV Всес. конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц»: Тез. докл. - Томск, 1996. - С.96-97.
41. Красик Я.Е., Подкатов В.И., Толмачева В.Г., Усов Ю.П. // НИИЯФ: Труды. - М.: Атомиздат, 1979. - В.8. - С.76-80.
42. Фурман Э.Г., Васильев В.В. // ПТЭ. - 1988. - №1. - С.11.
43. Фурман Э.Г., Васильев В.В., Томских О.Н. и др. // ПТЭ. - 1993. - №6. - С.45.
44. Томских О.Н., Фурман Э.Г. // ПТЭ. - 1991. - №5. - С.136.
45. Васильев В.В., Фурман Э.Г. // ПТЭ. - 1992. - №6. - С.158.
46. Коновалов Н.Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. - 1973. - Т.18. - Вып.4. - С.232.
47. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. - М.: Атомиздат, 1977 - 243 с.
48. Фоменко Г.П. и др. // Изв. вузов. Физика. - 1998. - № 4. - С.146.
49. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. - М.: Атомиздат, 1984. - 112 с.
50. Didenko A.N. et al. // IEEE Trans. in Nuclear Sci. - 1981. - V.NS-28 - № 3. - P.3169.
51. Диденко А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. - 1983. - Т.9. - Вып.21. - С.1207.
52. Alexandrovich D.V. et al. // Proc. of the 8-th Int.Conf. on High-Power Part. Beams. - Novosibirsk, Russia. 1990. - P.1161.
53. Диденко А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. - 1978. - Т.4. - Вып.1. - С.10.
54. Bekefi G., Orzechowski T. // Phys. Rev. Lett. - 1976. - V.37. - N 6. - P.379.
55. Ковалев Н.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. - 1977. - Т.4. - Вып.1. - С.10.
56. Винтизенко И.И. и др. // Письма в ЖТФ. - 1983. - Т.9. - Вып.8. - С.482.
57. Didenko A.N. et.al. // Proc. Int. Top. Conf. on Elect. Beam. Res. and Tech. - Albguergue, USA. - 1975. - V.2. - P.424.
58. Диденко А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. - 1979. - Т.5. - Вып.6. - С.321.

59. Диденко А.Н., Кузнецов Б.И., Ремнев Г.Е. и др. // Всес. конференция по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тез. докл. - Тбилиси, 1981. - С.110-111.
60. Isakov I.F., Logachev E.I., Lopatin V.S., Pechenkin S.A. // Proc. X Int.Simp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. - 1984. - P.413-416.
61. Исаков И.Ф., Логачев Е.И., Ремнев Г.Е. и др. // Тезисы 5-го Всес. симп. по сильноточной электронике. - Томск, 1984. - Ч.2. - С.16-18.
62. Исаков И.Ф., Логачев Е.И., Лопатин В.С., Ремнев Г.Е. // Тезисы 5-го Всес.симп. по сильноточной электронике. - Томск, 1984. - Ч.2. - С.60-62.
63. Isakov I.F., Logachev E.I., Lopatin V.S., Pechtnkin S.A. // Proc. 6 Int. Conf. On High Power Particle Beams. BEAMS'86. Kobe. - Japan, 1986. - P.77-80.
64. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. - М.: Сов. радио, 1974. - 255 с.
65. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. - М.: Атомиздат, 1977. - 276 с.
66. Ремнев Г.Е., Опекунов М.С., Васильев В.В., и др. // ПТЭ. - 1997. - №4. - С.1-5
67. Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Лигачев А.Е. // Изв. вузов. Физика. - 1987. - В.1. - С.52-65.
68. Remnev G.E., Shulov V.A. // Laser and Particle Beams. - 1993. - V.11. - №4. - P.707-731.
69. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.В. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхности металлов и сплавов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 187 с.
70. Ремнев Г.Е., Погребняк А.Д. // Новости науки и техники. Серия: Новые материалы, технология их производства и обработки. - М.: ВИНТИ, 1990. - В.2. - 30 с.
71. Davis H.A., Remnev G.E., Stinnett R.W., Yatsui K. // MRS Bulletin. - V.XXI. - N8. - P.58-62.
72. Kutuzov V.L., Ovsjanikov M.Yu., Pogrebnjak A.D., Remnev G.E. // Phys.Stat.Sol.(a). - 1989. - P.361-365.
73. Кутузов В.Л., Овсянников М.Ю., Ремнев Г.Е. и др. // I Всес. конф. «Модификация свойств конструкционных сталей пучками заряженных частиц»: Тез. докл. - Томск, 1988. - Ч.III. - С.167-169.
74. Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е., Рябчиков А.И., Шулов В.А. // Тез. 9 Межд. конф. - Испания, 1995. - С. 151.
75. Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е., Рябчиков А.И., Шулов В.А. // Тез. 3 Всероссийской конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». - Томск, 1994. - Т.1. - С.79-82.
76. Ремнев Г.Е., Погребняк А.Д., Шулов В.А. и др. // Поверхность. - 1990. - №12. - С.214-222.
77. Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Ночевная Н.А., и др. // Поверхность. - 1993. - №3. - С.127-140.
78. Шулов В.А., Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е. и др. // Авиационная промышленность. - 1992. - №2. - С.12-18.
79. Шулов В.А., Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е. и др. // Физика и химия обработки материалов. - 1997. - №4. - С.5-12.
80. Remnev G.E., Isakov I.F., Zakutayev A.N. // Proc.10-th Int. Conf. High Power Particle Beams. NTIS. Springfield. VA. - 1994. - P.840-843.
81. Асаинов О.Х., Кривобоков В.П., Лигачев А.Е., Сапульская Г.А. // Физика и химия обработки материалов. - 1987. - №3. - С.53-59.
82. Кривобоков В.П., Пашенко О.В., Сапульская Г.А. // ЖТФ. - 1994. - Т.64. - Вып.5. - С.37-42.
83. Арзубов Н.М., Исаев Г.П., Рябчиков А.И. // VI Всес. симп. по сильноточной электронике: Тез. докл. - Томск, 1986. - Ч.III. - С.184-186.
84. Арзубов Н.М., Исаев Г.П., Рябчиков А.И. // Всес. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам: Тез. докл. - Днепропетровск, 1986. - С.244-245.
85. Арзубов Н.М., Исаев Г.П., Рябчиков А.И. // Изв. вузов. Физика. - 1989. - №8. - С.68-73.
86. Рябчиков А.И., Арзубов Н.М., Луконин Е.И. // I Всес. конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц»: Тез. докл. - Томск, 1988. - Ч.1. - С.17-19.
87. Arzubov N.M., Isaev G.P., Ryabchikov A.I. // Int.Conf. on Energy Pulse and Particle Beam Modification of Materials: Abstracts. - Drezden, 1987. - P.98.
88. Арзубов Н.М., Дектярев С.В., Рябчиков А.И. // ПТЭ. - 1991. - №1. - С.171-173.
89. Ryabchikov A.I., Arzubov N.M., Vasiliev N.A. et al. // Proc. of the Int. Conf. Ion Implantation and Ion Beam Equipment. Elenite, Bulgaria, 1990. - P.327-332.
90. Ryabchikov A.I., Arzubov N.M., Vasiliev N.A., Dektyarev S.V. // Nucl.Instr. and Meth. in Phys. Res. - 1991. - V.B59/60. - P.124-127.
91. Рябчиков А.И. // Изв. вузов. Физика. - 1994. - №3. - С.34-52.