

5.46



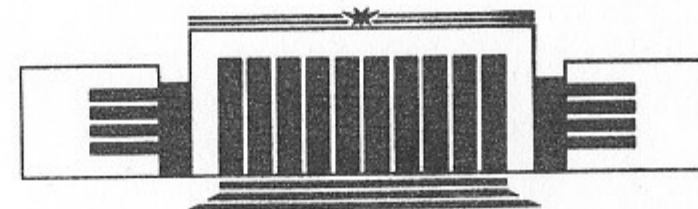
Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

Е.Д. Бендер, С.А. Вибе, В.И. Давыденко,
Г.И. Димов, Ю.В. Коваленко,
В.Я. Савкин, Г.И. Шульженко

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ИНЖЕКТОРЫ
ПУЧКОВ БЫСТРЫХ АТОМОВ
ВОДОРОДА –
ДИНА-6 и ДИНА-7**

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики им. Г.И. Будкера
ИЯФ, м. _____

ИЯФ 96-4



НОВОСИБИРСК

Диагностические инжекторы пучков быстрых атомов водорода - ДИНА-6 и ДИНА-7

Е.Д.Бендер, С.А.Вибе, В.И.Давыденко, Г.И.Димов, Ю.В.Коваленко,
В.Я.Савкин, Г.И.Шульженко

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия.

Аннотация

Для диагностики плазмы в токамаках средних размеров и открытых ловушках разработаны и испытаны диагностические инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7. Инжектор ДИНА-6 обеспечивает пучок атомов водорода с энергией 30 кэВ с эквивалентным током 1.4 А, инжектор ДИНА-7 - пучок атомов с энергией 40 кэВ и эквивалентным током 0.7 А. В течение рабочего цикла инжекторы выдают серию из 20 миллисекундных импульсов с промежутками между импульсами не короче 15 мс. В ионном источнике инжекторов плазменный эмиттер создается дуговым генератором плазмы с быстрой подачей газа и формирование пучка осуществляется многоапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системой со сферической геометрической фокусировкой. Для откачки ионного источника и перезарядной трубки используется встроенный сорбционный насос с импульсным электро-дуговым распылением титана. Инжекторы оборудованы автономной системой электропитания и компьютерной системой управления и контроля.

Neutral Beam Injectors for Plasma Diagnostics DINA-6 and DINA-7

Annotation

The designs and the main parameters of the series of the DINA-type diagnostic injectors are presented. Injector DINA-6 provides a hydrogen neutral beam with energy of 30 keV and 0.7 A. Injector DINA-7 - 40 keV and 0.7 A correspondently. The injectors are operated in a pulse mode 1ms with repetition time 15...100 ms and up to 20 pulses in series. The pause time between series ≥ 3 min.

E.D.Bender, S.A.Wiebe, V.I.Davidenko, G.I.Dimov, Yu.V.Kovalenko, V.Ya.Savkin,
G.I.Shulzhenko

Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

© ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН",

Введение

Для обеспечения потребностей корпускулярной диагностики плазмы в токамаках средних размеров и открытых ловушках разработаны диагностические инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7. Инжекторы отличаются от предыдущих инжекторов этой серии [1-4] повышенной энергией атомов пучка и временным режимом работы. В инжекторе ДИНА-6 энергия атомов пучка повышена до 30 кэВ, а в инжекторе ДИНА-7 до 40 кэВ. Длительность импульса тока пучка увеличена до 1 мс, кроме того импульсы могут следовать в виде серии с числом импульсов до 20 и промежутками между импульсами от 15 мс до 100 мс. Указанные отличия привели к значительным изменениям в конструкционной схеме инжекторов и системе электропитания.

Описание инжекторов

Инжекторы ДИНА-6 и ДИНА-7 имеют почти одинаковую конструкцию, схематически показанную на рис. 1. Инжектор состоит из ионного источника, перезарядной трубки и вакуумного сорбционного насоса.

В ионном источнике плазменный эмиттер с малой поперечной ионной температурой создается плазменной струей, вытекающей из анодного отверстия дугового генератора. Используемый генератор плазмы имеет дополнительную подачу водорода в прианодную область разряда, что требуется для поддержания длительности импульса 1 мс. С целью минимизации напуска водорода подача газа в прианодную область производится импульсным клапаном со сверхзвуковым соплом.

Для формирования пучка используется многоапертурная четырехэлектродная ионно-оптическая система со сферически вогнутыми

электродами [5]. Радиусы кривизны первых трех электродов: плазменного, вытягивающего и ускоряющего являются различными, что обеспечивает возрастание зазоров ионно-оптической системы с радиусом, необходимое для оптимального формирования протонного пучка из плазменной струи с радиально спадающим профилем плотности [5]. Радиус кривизны четвертого, заземленного электрода совпадает с радиусом кривизны ускоряющего электрода. Конкретный выбор радиусов производился с учетом расстояния от анодного отверстия генератора до центра ионно-оптической системы и фокусного расстояния пучка для каждого инжектора. В ионно-оптической системе инжектора ДИНА-6 плазменный электрод изготовлен из тантала толщиной 0.5 мм, вытягивающий электрод из ниобия толщиной 0.3 мм, а ускоряющий и заземленный электроды из ниобия толщиной 1 мм. В ионно-оптической системе инжектора ДИНА-7 все электроды изготовлены из ниобия толщиной 1 мм. Для фиксации прецизионного зазора между плазменным и вытягивающим электродами предусмотрен дополнительный центральный изолятор из алунда. Начальный диаметр пучка составляет 7 см. В инжекторе ДИНА-6 формирование пучка производится 294 круглыми апертурами диаметром 3 мм образующими гексагональную структуру с шагом 3.75 мм, а в инжекторе ДИНА-7 - 150 апертурами диаметром 4 мм с шагом структуры 5 мм.

Использованные ионно-оптические системы не обеспечивают достаточной скорости откачки экспандерного объема ионного источника и поэтому на боковой поверхности экспандерного объема предусмотрены дополнительные отверстия для вытекания водорода. Вытекающий через указанные отверстия водород вначале проходит через лабиринт, предотвращающий выход ионов за счет их нейтрализации на стенках. Для экранировки от внешнего магнитного поля ионный источник окружен двойным магнитным экраном. Внешний экран представляет собой вакуумный корпус инжектора, внутренний изготовлен из пермаллоя толщиной 2 мм.

Перезарядная трубка установлена внутри вакуумного насоса. Перезарядная трубка является частью внутреннего магнитного экрана тракта пучка и изготовлена из пермаллоя. Установка импульсного газового клапана непосредственно на перезарядной трубке обеспечивает быструю подачу водорода в нее. Импульсный клапан включается за 600 мкс до начала каждого отдельного импульса пучка и подача водорода в перезарядную трубку составляет $\sim 10^{17}$ молекул за импульс. Вакуумный сорбционный насос с импульсным электродуговым распылителем титана имеет скорость откачки 20 тысяч л/сек. Конструкция насоса близка к описанной в работах [6,7]. Насос имеет два кольцевых электродуговых распылителя и ребристую внутреннюю поверхность. Для исключения попадания распыляемого титана на ионно-оптическую систему предусмотрены специальные экраны.

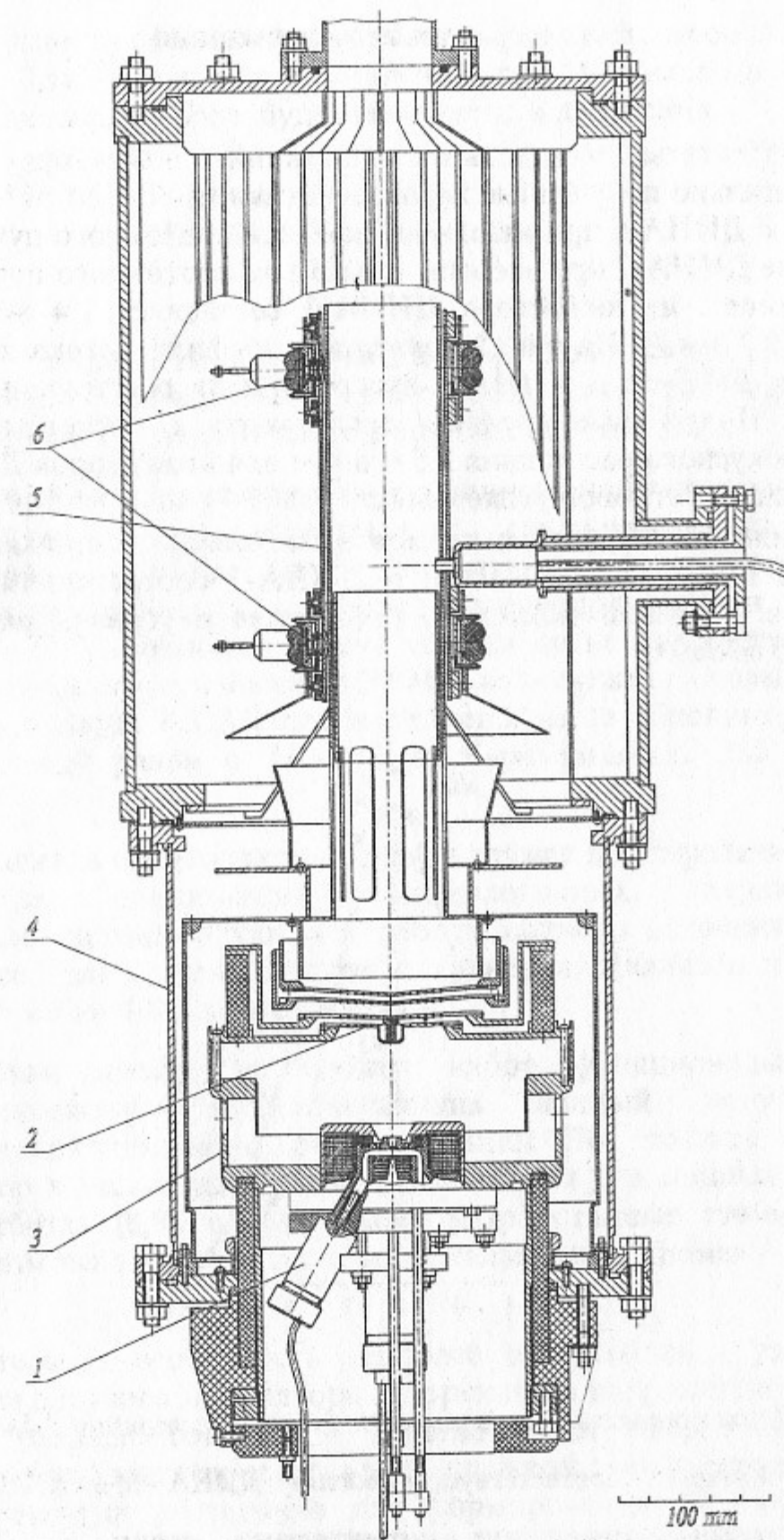


Рис.1 Конструкция инжектора.

1- генератор плазмы, 2-ионно-оптическая система, 3- корпус экспандера, 4-внутренний магнитный экран, 5- перезарядная трубка, 6- электродуговые распылители титана.

Результаты испытаний

Результаты стендовых испытаний инжекторов показали, что экспериментально полученные характеристики пучка соответствуют расчетным. В инжекторе ДИНА-6 при энергии 30 кэВ ток протонного пучка составил 2.5 А, в инжекторе ДИНА-7 при энергии 40 кэВ ток протонного пучка составил 1.8 А. Поток атомов из инжектора ДИНА-6 составляет 1.4 экв.А, а инжектора ДИНА-7 - 0.7 экв.А. На рис. 2 приведены профили потока атомов в пучке для инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7 измеренные на расстоянии 2.5 м от ионного источника. Полученные профили согласуются с расчетными для принятых значений фокусного расстояния 2.5 м и 4 м для инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7 соответственно и угловой расходимости $1.2 \cdot 10^{-2}$ рад и $1.5 \cdot 10^{-2}$ рад. Измеренные величины плотностей потока атомов в максимуме составляет 49 мА/см² и 14 мА/см² для инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7 соответственно, расчетные для приведенных значений фокусного расстояния и угловой расходимости — 50 мА/см² и 15 мА/см².

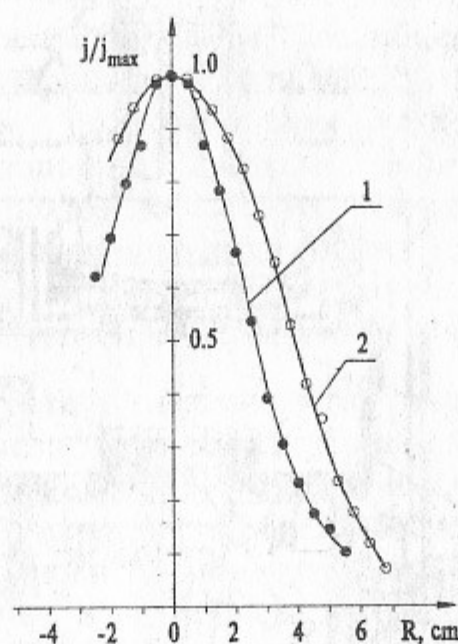


Рис.2 Профили потока атомов измеренные на расстоянии 2,5 м от инжектора.

Кривая 1 - соответствует инжектору ДИНА - 6, 2 - ДИНА - 7.

В режиме генерации инжекторами серии из 20 импульсов с промежутками между ними 15 мс воспроизводимость тока пучка в импульсах оказалась не хуже 10%. Кроме того обнаружился эффект накопления газа в ионном источнике при сокращении промежутка между импульсами, который приводит к повышению вероятности пробоев. В режиме однократных импульсов вероятность пробоев не превышает 2%, а в сериях состоящих из 15-20 импульсов она достигает 20-30% при промежутке между импульсами менее 15 мс. При

увеличении длительности промежутка до 30 мс вероятность пробоя снижается в несколько раз. Для устранения накопления газа необходимо изменение конструкции экспандера, которое будет выполнено в дальнейшем.

Система электропитания

Система электропитания включает в себя силовой шкаф, соединенный с ионным источником специальным высоковольтным кабелем и пульт управления, связанный со шкафом жгутом оптоволоконной связи.

Пульт позволяет устанавливать для ионного источника число рабочих импульсов в серии и последовательность синхроимпульсов, задающих временную диаграмму работы узлов системы питания внутри рабочего импульса. Логика работы пульта определяется микропроцессором 580ВМ80 с 4 КБ ОЗУ и 4 КБ ПЗУ. Возможна работа как при ручном управлении с панели пульта, так и под управлением внешней ЭВМ. Связь пульта с последовательным портом ЭВМ в стандарте RS232с осуществляется через дополнительный блок связи, расположенный рядом с ЭВМ. Этот блок занимает 2М в стандарте КАМАК.

Четыре канала оптоволоконной связи служат для передачи на пульт от силового шкафа информации (осциллограмм), характеризующей функционирование системы питания и работу ионного источника в каждом рабочем импульсе для ее запоминания и хранения. Диапазон передаваемых напряжений от 50 мВ до 4 В в полосе 0-50 кГц.

В силовом шкафу расположен набор функциональных блоков электронной аппаратуры, обеспечивающих ионный источник всеми необходимыми напряжениями и токами питания. По составу и выходным параметрам набор в целом идентичен применяемому для ионных источников, описанных в работах [8,9], однако вновь разработанные схемные решения обеспечивают возможность работы с минимальными промежутками между импульсами 8 мс.

Отличительная особенность наиболее ответственных узлов системы питания - высоковольтного модулятора ускоряющего напряжения и генератора тока дугового разряда состоит в использовании энергозапаса батарей электролитических конденсаторов большой удельной энергоемкости типа К50-17. Запасаемой энергии достаточно для формирования 20 импульсов тока газового разряда в 400 А при напряжении до 150 В и импульсов ускоряющего напряжения до 30 кВ при 3 А, или до 40 кВ при 2 А и длительности 1 мс.

Упрощенная схема, поясняющая работу высоковольтного модулятора приведена на рис. 3. Высоковольтный импульс формируется при разряде LC линии с волновым сопротивлением 4 Ом, напряжением зарядки 1800 В через тиристорный ключ D1 и импульсный повышающий трансформатор - Тр.

Напряжение на нагрузке стабилизируется параллельной цепью параметрической стабилизации на варисторах СН-2-2 и регулируется числом включенных варисторов. В отличие от модулятора, описанного в [8] защита инжектора при пробое осуществляется включением тиристорного ключа D2 в первичной обмотке импульсного трансформатора. Расчеты и эксперимент показали, что величина энергии, запасаемая в индуктивности рассеяния трансформатора Tr и выделяющаяся при пробое в ионно-оптической системе не вносит существенного вклада в общую энергию пробоя. Перезарядка линии производится от батареи С через тиристорный ключ D3 и индуктивность L в паузах между импульсами серии, а подзарядка батареи С - между сериями. Уменьшение напряжения на С к концу серии результируется в уменьшении доли тока с импульсного трансформатора в цепь стабилизации и не влияет на величину выходного напряжения модулятора. Точность стабилизации выходного напряжения $\pm 1\%$.

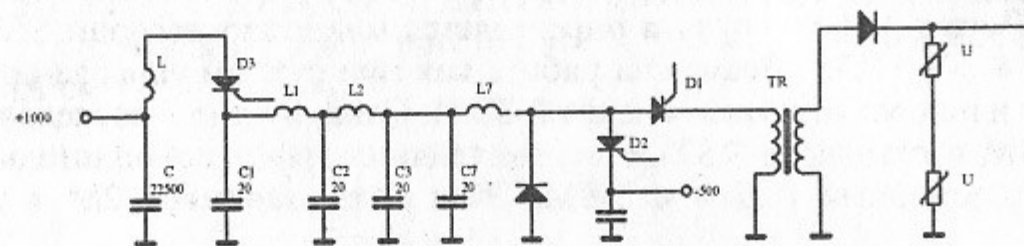


Рис.3 Схема высоковольтного модулятора.

С - К50-17 - 1500 мкФ×300 В, 240 шт. параллельно-последовательно;
С1...С7 - К75-40 - 20 мкФ×2000 В; L - 3 мГн; L1...L7 - 350 мкГн.

Схема питания тока дугового разряда базируется на 5 одинаковых импульсных стабилизаторах тока с выходным током каждого до 80 А. Выходной ток стабилизаторов суммируется на нагрузке. Концепция схемы аналогична описанной в работе [9], общая блок-схема генератора дана на рис. 4. За 3 мс до начала очередного импульса серии посредством включения транзисторов стабилизаторов начинается разгон тока в индуктивностях L. Разгон производится на включенный тиристор D1. При достижении тока в L заданной величины ток стабилизируется переключениями транзистора T1 по принципу релейной стабилизации. Перед поджигом дугового разряда включается тиристор D2, происходит выключение тиристора D1 и разогнанный ток перебрасывается в дуговой генератор ионного источника. Через 1 мс тиристор D1 включается вновь, разряд гаснет, транзисторы стабилизаторов отключаются. Таким образом формируется импульс тока газового разряда величиной 400 А, напряжением горения от 50 до 150 В и длительности фронтов нарастания и спада в несколько микросекунд. Величина энергии в накопительных батареях С выбрана так, чтобы напряжение на батареях к концу серии не падало ниже предельного напряжения горения разряда в ионном источнике 150 В.

Дополнительная стабилизация тока разряда осуществляется параллельным стабилизатором на транзисторах V2, точность стабилизации $\pm 1\%$.

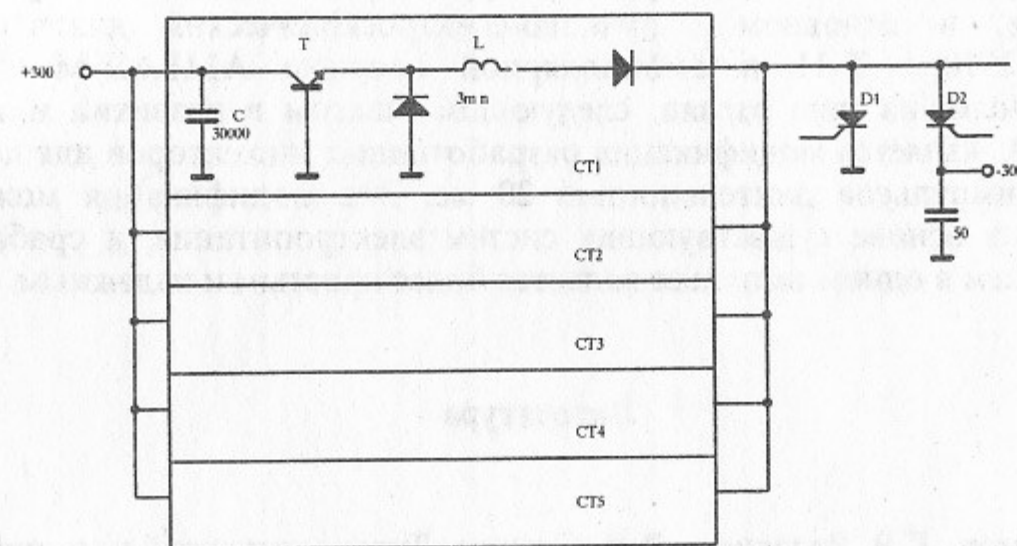


Рис.4 Схема генератора тока дугового разряда.

С - К50-17 - 1500мкФ×300В, 20шт. параллельно; Т - ТК-235-40-4 - 2шт. параллельно;
D1...D2 - ТЧ-125-9

Используемые схемы электропитания высоковольтного модулятора и генератора тока разряда обеспечивают следующий временной режим работы. При работе с длинными сериями (до 20 импульсов) промежуток между сериями должны быть не менее 2 минут. При более коротких сериях промежуток между импульсами пропорционально сокращается. Одиночные импульсы могут следовать с частотой 1 раз в 10 секунд.

Пульт управления расположен в 1-этажном каркасе стандарта ВИШНЯ размером 30×60×60 см. Габариты шкафа питания 1×1×2 м. Длина силового кабеля, связывающего шкаф с инжектором - 6 м. Длина оптоволоконных кабелей связи - 30 м. Блок питания титанового насоса располагается в непосредственной близости от инжектора. Габариты блока 40×60×80 см. Питание силового шкафа и пульта управления осуществляется от сети 220В/50 Гц со среднепотребляемой мощностью менее 1 кВт. Питание титанового насоса от трехфазной сети 380/50 Гц с током, потребляемым в импульсе длительностью 0.1 с до 40 А.

Заключение

Разработанные инжекторы планируется использовать для реализации современных, в основном пучково-спектроскопических диагностик, на токамаках Т-10, Т-11 и амбиполярной ловушке АМБАЛ-М. Наиболее целесообразным, на наш взгляд, следующим шагом в развитии инжекторов серии ДИНА является модификация разработанных инжекторов для получения одиночных импульсов длительностью 20 мс. Эта модификация может быть выполнена на основе существующих систем электропитания, а срабатывание отдельных схем в одном импульсе является более простым и надежным.

Литература

1. Г.И. Димов, Г.В. Росляков, В.Я. Савкин. Диагностический источник атомов водорода. ПТЭ, N4, 1977, с. 29.
2. Г.И. Росляков, В.Я. Савкин. Диагностический источник атомов водорода с модуляцией пучка. ПТЭ, N1, 1978, с. 148
3. В.И. Давыденко, И.И. Морозов, Г.В. Росляков. Диагностический инжектор пучка ионов водорода. Физика плазмы, 7, вып.2, 1981, с. 464
4. В.И. Давыденко, Г.И. Димов, Г.В. Росляков. Получение прецизионных ионных и атомных пучков высокой интенсивности. ДАН СССР, 1983, т. 271, N6, стр. 1380.
5. В.И. Давыденко, Г.И. Димов, И.И. Морозов, В.Я. Савкин. Развитие ионных источников для инжекторов АМБАЛ-М. Труды Всесоюзного совещания по открытым ловушкам. Москва, Энергоатомиздат, 1989, с. 24.
6. Е.Д. Бендер. Дуговые испарители титана для вакуумной установки АМБАЛ-Ю. -ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1987, вып. 4, с. 41.
7. В.С. Белкин, Е.Д. Бендер. Система питания дуговых испарителей титана установки АМБАЛ - Ю. -ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1987, вып. 4, с. 49.
8. В.С. Белкин, В.Я. Савкин. Системы питания импульсных многоамперных ионных пушек. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 1983, вып. 2, с.71.
9. В.Я. Савкин. Генератор импульсов тока 400 А - 0.1 с для питания дугового разряда. ПТЭ, N 5, 1986, с. 138.

*Е.Д. Бендер, С.А. Виле, В.И. Давыденко, Г.И. Димов,
Ю.В. Коваленко, В.Я. Савкин, Г.И. Шульженко*

**Диагностические инжекторы пучков быстрых атомов
водорода – ДИНА-6 и ДИНА-7**

ИЯФ 96-4

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 2.02.1996 г.

Сдано в набор 2.02.1996 г.

Подписано в печать 5.02.1996 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.7 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 4

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.