

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Наша концепция дальнейшего развития промышленных ускорителей предусматривает использование не только клистронов, но и магнетронных генераторов, таких, как хорошо себя зарекомендовавшего магнетрона МИ-262 (его импульсная мощность – 9 МВт, средняя мощность – 13 кВт) и новых: МИ-451 (2,3 МВт, 3 кВт) и МИ-456 (2,5 МВт, 3,5 кВт). Магнетрон МИ-451 является аналогом магнетрона М-5125, использующегося в ряде зарубежных ускорителей для дефектоскопии и медицины, работающих на частоте 2998 МГц.

На базе 2,5-мегаваттных магнетронов нами проектируется установка для радиационной стерилизации больничного белья, перевязочных материалов, перчаток и других медицинских изделий многоразового использования непосредственно в клиниках. Она снабжена локальной радиационной защитой и может быть установлена на место используемых в клиниках мало-производительных, неэкономичных, менее эффективных парожаровых и газовых стерилизаторов. Для одновременного облучения упаковок, стерилизуемых электронным пучком изделий с двух сторон в установке будут работать 2 ускоряющие секции от одного генератора с системой переключения вч-мощности на 2 канала. Энергия электронов – 3 МэВ при токе 200–300 мкА.

Проектируется и ускоряющая система на стоячей волне на 9 МэВ, которая также будет работать на 2,5 МВт-магнетронах.

Продолжаются работы по совершенствованию ускоряющих структур. Одним из направлений является создание комбинированной ускоряющей структуры с оптимизированным многорезонаторным группирователем [6]. В волноводном ускорителе на бегущей волне особенности конструкции волновода и конфигурации ускоряющего поля ограничивают возможности получения в коротком группирователе электронных сгустков высокого качества. В комбинированной структуре начальная ее часть работает в режиме стоячей волны, а конечная часть в режиме бегущей волны. Такой способ возбуждения достигается тем, что входной конец ускоряющей структуры закорочен по высокой частоте, выходной конец нагружен на согласованную нагрузку, а в.ч. генератор подключен к структуре также, как в ускорителях со стоячей волной, т.е. через одну из промежуточных ускоряющих ячеек, выполняющих функции ТТВ. Резонаторная структура на стоячей волне с соосными ячейками связи, возбуждаемая на $\pi/2$ типе колебаний, работает как многорезонаторный клистронный группирователь и позволяет формировать электронные сгустки с малой фазовой протяженностью и, как следствие, получить на выходе 15-мэвного ускорителя (при

условии стабильности параметров систем питания) пучки с энергетическим разбросом на полувысоте спектральной кривой не более 150 кэВ. Такая структура создана, успешно прошла “холодные” испытания и в ближайшее время будет испытана с пучком. Разрабатывается и другой вариант комбинированной структуры, сочетающей стабильность поля в начале структуры при изменении тока пучка, как это имеет место в диафрагмированном волноводе, с высоким шунт-импедансом ускоряющих структур с отрицательной дисперсией [7]. Основной участок этой структуры – известная периодическая цепочка Ω -образных ячеек с оптимизированной геометрией по $Z_{эф}$ при рабочем типе колебаний $5\pi/6$. Получены расчетные значения $Z_{эф} = 87.1$ МОм/м и собственной добротности $Q=18200$ при $f=2.45$ ГГц.

Разработана и успешно функционирует новая система регулирования энергии ускоряемых частиц. Простейший способ регулирования энергии – изменение нагрузки пучком – приводит к существенному ухудшению энергетического спектра электронов. В ряде ускорителей НПК ЛУЦ на стоячей волне этот недостаток устранен. Регулирование энергии осуществляется с помощью фазосдвигающей ячейки в средней части ускоряющей структуры за счет “переброса фазы”.

Наряду с совершенствованием ускорительной техники в НПК ЛУЦ ведутся работы по поиску новых областей использования радиационных технологий.

Совместно с ВО ВНИПИЭТ разработана комплексная установка для очистки сточных вод больничных комплексов. В радиационно-химических реакторах пучком электронов с энергией 6–8 МэВ от двух линейных ускорителей производится дезинфекция и дегельминтизация больничных стоков и одновременно очистка их от поверхностно-активных веществ и фарм-препаратов. Производительность установки 50 м³ в сутки при дозе до 10 кГр [8].

В плане обработки новых радиационно-технологических процессов были проведены исследования по оптимизации способов и условий стерилизации вращающихся бревен пучком тормозного излучения с энергией до 8 МэВ [9]. Разработана и практически используется методика облучения электронами с энергией до 8 МэВ полимерных изоляторов с целью повышения их механической и термической прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в НПК ЛУЦ разработано 10 моделей ЛУЭ нового поколения на энергию от 3 до 30 МэВ при мощности пучка от 2 до 30 кВт. В качестве ускоряющих систем используются структуры волноводные, резонаторные и комбинированные. В качестве источников СВЧ-энергии применяются как клистронные усилители, так и магнетронные генераторы. Удовлетворяются

пожелания заказчиков на разработку и изготовление технологических комплексов с ускорителями электронов. Управление как самими ускорителями, так и технологическими комплексами автоматизируется. Продолжаются работы по модернизации и повышению эксплуатационных показателей ускорителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П.Вахрушин, В.А.Глухих, В.М.Николаев. “Реализация единой серии линейных ускорителей для промышленности и медицины”. Тезисы докладов 7 Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. – “Ускорители-92”, С-Пб., 1992г, стр. 31.
2. Ю.П.Вахрушин, В.А.Глухих, В.М.Николаев, В.В.Румянцев. “Развитие серии линейных ускорителей электронов для использования в медицине и промышленности”. Тезисы докладов 8 Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. – “Ускорители-95”, С-Пб, 1995г, стр.52.
3. В.А.Глухих, В.И.Мунтян, Ю.Н.Бурмистенко и др. “Промышленная гамма-активационная лаборатория для анализа рудных проб на золото и сопутствующие элементы”. Доклады 3 Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве”, Ленинград, 1979, т. 4, стр.3.
4. В.А.Глухих и др. “Ускорительный комплекс лаборатории многоэлементного активацион-

ного анализа геологических проб”. Тезисы докладов 5 Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, Москва, 1985г, стр.122.

5. V.M.Levin et al. “Production of radionuclides by photonuclear reactions”, Radiochem. Radioanal. Letters, 49/2, стр.111–118, 1981.
6. Ю.П.Вахрушин, А.В.Рябцов, В.Л.Смирнов, В.В.Терентьев. “Комбинированная ускоряющая структура с оптимизированным многорезонаторным группирователем”. Труды 13 Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1993, т.1, стр. 249.
7. Ю.П.Вахрушин, М.А.Калининченко, А.В.Рябцов. “Высокоэффективная ускоряющая структура для односекционных ЛУЭ с бегущей волной”. Тезисы докладов 8 Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. – “Ускорители-95”, С-Пб, 1995, стр.8.
8. Ю.П.Вахрушин, Г.А.Вязьменова, В.С.Кузнецов, Р.П.Фидельская. “Дезинфекция сточных вод инфекционных больниц электронным пучком”. Там же, стр.65.
9. Г.А.Вязьменова, В.С.Кузнецов и др. “Обеспечение равномерности распределения дозы при облучении крупногабаритных объектов тормозным излучением от ускорителей”. Аннотации докладов 15 Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1996, стр.71.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ “СИБИРЬ-2”

В.Н. Корчуганов, Е.Б. Левичев, О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко, Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецкий, В.А. Ушаков, А.В. Филипченко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Новосибирск, Россия

А.А. Кадников, Ю.В. Крылов, С.Н. Кузнецов,
В.Л. Ушков, Ю.Л. Юпинов
РНИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс “Сибирь-2”, разработанный в ИЯФ СО РАН, работает в РНИЦ “Курчатовский Институт” (г. Москва) в качестве источника синхротронного излучения [1]. Он состоит из

накопительного кольца, с максимальной энергией 2.5 ГэВ и комбинации линейного ускорителя электронов [2] с энергией 80 МэВ и бустерного кольца “Сибирь-1” с энергией 450 МэВ (инжекционная часть). ЛУ введен в действие в конце 1992 года, когда был получен электронный пучок с энергией 62.5 МэВ. В докладе представлены

экспериментальные ВЧ характеристики ускоряющей структуры, а также результаты измерений тока, энергетического спектра, эмиттанса и профиля пучка линейного ускорителя.

ЛУ – ФОРИНЖЕКТОР

Схема линейного ускорителя приведена на Рис. 1.

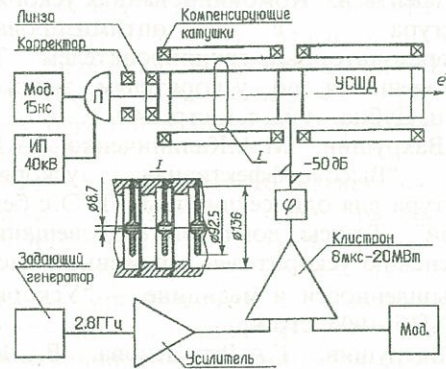


Рис. 1: Блок-схема линейного ускорителя

Линейный ускоритель выполнен на основе ускоряющей структуры с шайбами и диафрагмами (УСШД) [3] с радиальными опорами шайб [4] и работает на частоте 2.8 ГГц. Каждая шайба поддерживается тремя радиальными опорами круглого сечения длиной, близкой к $\lambda/4$. Использование УСШД длиной 6 метров позволило обеспечить требуемую энергию и ток пучка для бустера "Сибирь-1" при использовании одного 18 МВт генератора

Дисперсионные кривые структуры показаны на Рис. 2, из которого видно, что в полосе ± 20 МГц относительно рабочей моды TM_{02n} [5] отсутствуют высшие моды колебаний.

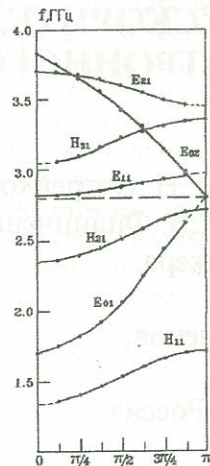


Рис. 2: Дисперсионные кривые

Результаты измерения распределения электрического поля на оси регулярной секции изображены на Рис. 3.

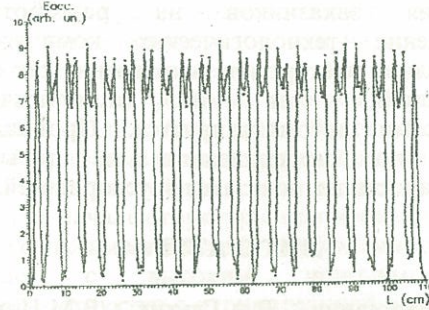


Рис. 3: Распределение поля на оси структуры

Основные параметры структуры представлены в Таб. 1.

Рабочая частота, МГц	2797.2±0.1
Эфф. шунт. сопот., МОм/м	95±3
Добротность	28000±100
Характ. сопот., кОм/м	3.4±0.1
Перенапряжение	5.5
Групповая скорость (β)	0.4

Возбуждение структуры осуществляется через специальную коаксиальную ячейку ввода ВЧ мощности, расположенную в середине ускорителя и разделяющую его на два симметричных плеча. При этом ширина полосы между рабочей частотой и ближайшими нерабочими увеличивается вдвое.

Волновод (90×45 мм²) состоит из вакуумной и газовой секций, разделенных керамическим окном.

Экспериментальные зависимости амплитуд падающей ($U_{пад}$) и отраженной ($U_{отр}$) волны в волноводе и напряжения на ускорителе ($U_{лу}$) от частоты генератора приведены на Рис. 4. Как видно из рисунка, длина волновода должна быть равна $(2n+1)\lambda/8$. В этом случае в волноводе обеспечивается минимальное перенапряжение при расстройке структуры либо пробоях в ней.

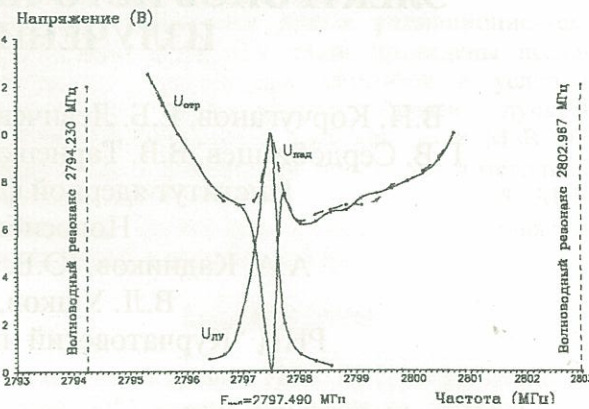


Рис. 4: ВЧ сигналы

Осциллограммы ВЧ сигналов ($U_{пад}$ – 1, $U_{отр}$ – 2, $U_{лу}$ – 3) показаны на Рис. 5.

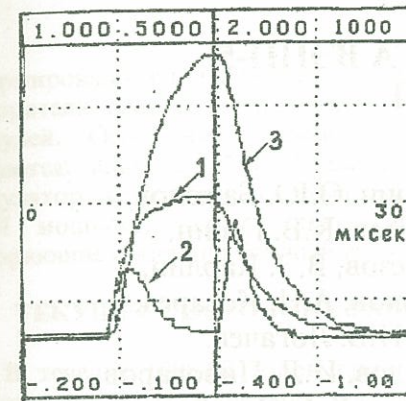


Рис. 5: Осциллограммы ВЧ-сигналов

ЛУ имеет простую инжекционную систему (Рис. 1) [6]. Несгруппированный пучок электронов длительностью до 20 нс. вводится в ускоритель. А процесс группирования происходит в первом резонаторе. Ограничение длительности вызвано однооборотной инжекцией в бустерный накопитель "Сибирь-1", период обращения электронов в котором 29 нс. Таким образом ускоритель работает в режиме накопленной энергии.

Система фокусировки также проста (Рис. 1). Фокусировка обеспечивается линзой и ВЧ полем структуры. Чтобы исключить фокусировку пучка ВЧ полем при входе его в структуру, входное отверстие первого резонатора закрывается сеткой.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПУЧКОМ

Экспериментальный энергетический спектр пучка электронов в ЛУ показан на Рис. 6 [6].

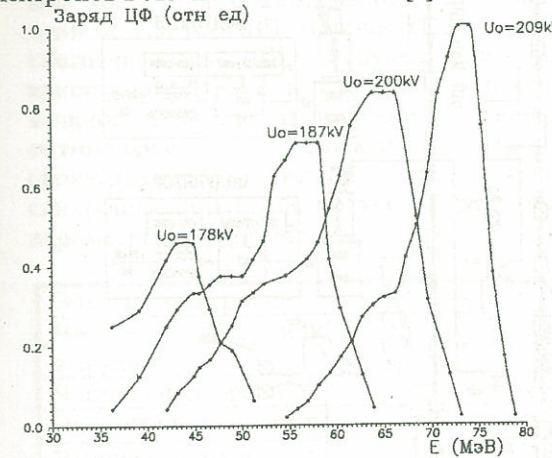


Рис. 6: Энергетический спектр пучка в ускорителе

Профиль пучка, измеренный сеточными пробниками, приведен на Рис. 7.

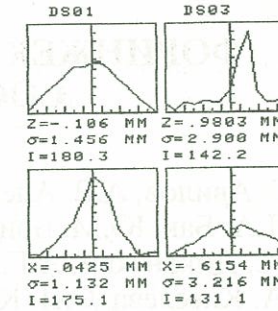


Рис. 7: Картинки профиля пучка

В Таб. 2 представлены результаты измерения параметров электронного пучка на выходе ускорителя:

Максимальная энергия, МэВ	75
Ток пучка в импульсе, мА	600
$\Delta E/E=7\%$	65
$\Delta E/E=1\%$	18
Длительность импульса, нс	0.03
Поперечный эмиттанс, мрад·см	3
Поперечный размер пучка на расстоянии 1600 мм от ЛУ, мм	1-5
Частота повторения, Гц	1-5

В настоящее время ЛУ инжектирует электронный пучок с энергией 75 МэВ в накопительное кольцо "Сибирь-1". Захваченный на равновесную орбиту ток достигает 23 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Линейный ускоритель обеспечивает работу комплекса "Сибирь-2". Ведется работа по увеличению тока и энергии пучка. В отдельных режимах работы ЛУ получена энергия электронного пучка 80 МэВ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.V.Anashin et al., Proc of EPAC, Rome, 1988, p. 57.
- [2] M.M.Karliner et al., Ibid, pp. 601-603.
- [3] В.Г.Андреев, ЖТФ, 1971, т. 41, с. 788-796.
- [4] S.O.Schriber, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-30, N4, pp. 3542-3544, 1983.
- [5] O.A.Nezhevenko et al., Proc. of PAC, San Francisco, 1991, vol. 5, p. 3186.
- [6] V.N.Korchuganov et al., Proc. of PAC, Washington, 1993, vol. 1, pp. 564-566.

ФОРИНЖЕКТОР КОМПЛЕКСА ВЭПП-5. СОСТОЯНИЕ РАБОТ

М.С. Авилов, А.В. Александров, А.В. Антошин, О.Ю. Баженов,
П.А. Бак, Ю.М. Боймельштейн Р.Х. Галимов, К.В. Губин,
Н.С. Диканский, А.Г. Иголкин, И.В. Казарезов, В.Э. Карлин,
Н.А. Киселева, С.Н. Ключев, О.В. Корозников, А.Н. Косарев,
Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин, А.Д. Лисицин, П.В. Логачев,
Л.А. Мироненко, А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров,
А.М. Резаков, В.С. Северило, Ю.И. Семенов, Б.А. Скарбо,
А.Н. Скринский, Д.П. Суханов, Ю.Ф. Токарев, А.В. Филиппов,
А.Р. Фролов, В.Д. Хамбиков, А.Н. Шарара, А.В. Шемякин, С.В. Шиянков.

ИЯФ им. Будкера, Новосибирск, Россия.

ВВЕДЕНИЕ

Основные параметры, состав и описание отдельных узлов форинжектора достаточно подробно отражены в работах [1-8]. Важнейшие параметры форинжектора приведены ниже, а общая схема показана на рис. 1.

Энергия пучков	510 МэВ
Число электронов в сгустке	10^{11}
Число позитронов в сгустке	10^9
Частота следования сгустков	50 Гц
Разброс энергий:	
в электронном сгустке	$\pm 1\%$
в позитронном сгустке	$\pm 3\%$
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	≈ 63 МВт
Число клистронов	4
Полная потребляемая мощность	≈ 1 МВт

Форинжектор состоит из линейных ускорителей на энергию 300 и 510 МэВ, системы изохронного поворота 300 МэВ-ного пучка на 180° , конверсионной системы и ВЧ фотопушки. Ускоритель на энергию 300 МэВ предназначен для получения позитронов (ожидаемый коэффициент конверсии $3\pm 6\%$), а 510 МэВ-ный ускоритель

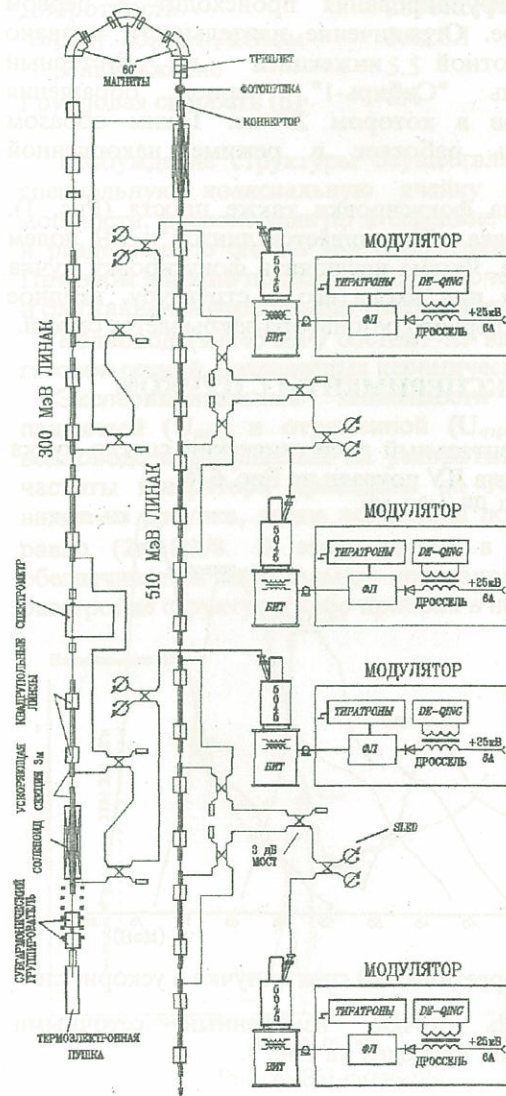


Рис. 1. Общая схема форинжектора.

ускоряет как позитронные сгустки, полученные в конверсионной системе, так и электронные сгустки,

сформированные в ВЧ фотопушке. Линейные ускорители состоят из набора ускоряющих модулей. Основными элементами модуля являются: клистрон 5045 10-см диапазона, модулятор клистрона, система умножения СВЧ мощности, волноводная система и ускоряющие секции на бегущей волне.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ

В течение 1996-97 годов продолжались работы по проектированию, изготовлению, монтажу, настройке и испытаниям элементов форинжектора. Основные усилия были направлены на монтаж и запуск в эксплуатацию прототипа форинжектора, а также созданию специализированного участка высоковакуумной технологии для изготовления ускоряющих секций и других ВЧ элементов форинжектора в ЭП ИЯФ.

Прототип форинжектора был создан для испытаний основных элементов ускорителей на высоких уровнях СВЧ мощности и определению основных параметров ускоряющей секции. Более подробно прототип и его испытания описаны в докладе на данной конференции. Здесь же отметим, что схема прототипа аналогична первоначальной части 300 МэВ-ного ускорителя (см. Рис. 2), а в качестве прототипа секции использовалась ускоряющая структура с постоянным импедансом на бегущей волне ($\beta_p=1$, рабочий вид колебаний $\theta=2\pi/3$, частота 2797 МГц) длиной 2.5 м. СВЧ мощность для секции обеспечивалась ВЧ модулем на базе клистрона КИУ-12 и системой умножения мощности. После тренировки и подбора оптимальных режимов работы (фокусирующей системы и системы синхронизации) были получены следующие параметры прототипа:

Энергия электронов	44 МэВ
Число электронов в импульсе	1.2×10^{10}
Частота повторения	50 Гц
Энергетический разброс	$\pm 0.5\%$
Рабочая частота	2797 МГц
Средний темп ускорения в ускоряющей секции	17 МэВ/м

В ЭП ИЯФ создан участок высоковакуумной технологии для изготовления ускоряющих секций и других ВЧ элементов форинжектора. Он включает помещение для чистой сборки, зал вакуумных печей, систему ультразвуковой мойки с использованием деионизированной воды, помещения для форвакуумных насосов,

предварительной мойки и "холодных" СВЧ измерений.

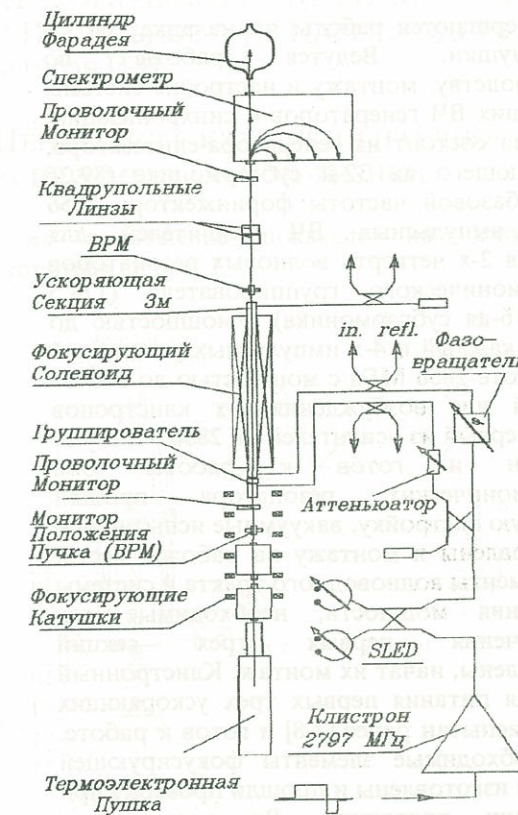


Рис. 2. Схема прототипа форинжектора

Изготовлена и установлена чистая комната с системой очистки и кондиционирования воздуха. В настоящее время ведется наладка и запуск оборудования, а к середине ноября 1997 планируется изготовление первых трех секций форинжектора полностью по чистой технологии.

Успешное испытание прототипа ускоряющей секции, завершение работ по созданию участка чистой технологии и готовность к серийному производству основных узлов форинжектора позволяют к концу текущего года приступить к изготовлению, монтажу и настройке и испытаниям первоочередной части 300 МэВ-ного ускорителя форинжектора. Она включает (см. Рис. 3) термоэлектронную пушку, систему продольной компрессии электронного сгустка, три ускоряющих секции, питающиеся от одного клистронного поста через систему умножения мощности, а также соответствующие элементы фокусирующей системы, волноводного тракта, системы диагностики пучка и управления.

СОСТОЯНИЕ ДРУГИХ РАБОТ ПО ФОРИНЖЕКТОРУ

Завершаются работы по наладке 200 кВ термолушки. Ведутся работы по производству, монтажу и настройке системы задающих ВЧ генераторов и синхронизации. Система состоит из генератора-синтезатора, работающего на 32-й субгармонике (89.25 МГц) базовой частоты форинжектора 2856 МГц, импульсных ВЧ усилителей для питания 2-х четверть волновых резонаторов субгармонического группирователя (178.5 МГц, 16-ая субгармоника) с мощностью до 20 кВт каждый и 4-х импульсных усилителей на частоте 2856 МГц с мощностью до 500 Вт каждый для возбуждения 4-х клистронов 5045. Первый из усилителей на 2856 МГц уже испытан и готов к работе. Оба субгармонических резонатора прошли холодную настройку, вакуумные испытания и подготовлены к монтажу на рабочее место. Все элементы волноводного тракта и системы умножения мощности, необходимые для подключения первых трех секций изготовлены, начат их монтаж. Клистронный пост для питания первых трех ускоряющих секций испытан ранее [7-8] и готов к работе. Все необходимые элементы фокусирующей системы изготовлены и прошли проверку при испытании прототипа. Во время этих испытаний прошли настройку и проверку также элементы систем диагностики и управления.

В клистронной галерее завершаются пусконаладочные работы на втором модуляторе для клистронов 5045. Особенностью этого модулятора является использование в нем схемы импульсного заряда формирующей линии, а сама формирующая линия выполнена с воздушной изоляцией на конденсаторах типа К75-54. Завершаются работы по монтажу и подготовке к наладке третьего модулятора

Завершается производство волноводного тракта форинжектора, систем умножения мощности (первая из 4-х подготовлена к СВЧ испытаниям на проектном уровне входной мощности 60 МВт и будет использоваться для питания начальной части 300 МэВ-ного ускорителя), идет производство большой партии квадрупольных линз, 60° поворотных магнитов форинжектора.

Ведутся работы по макетированию согласующего устройства конверсионной системы и разрабатывается конструкция конверсионной мишени.

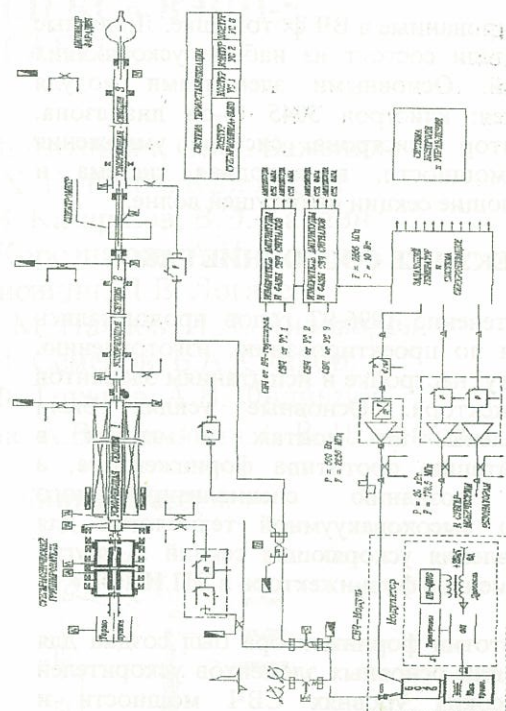


Рис. 3. Первоочередная часть форинжектора

На прототипе СВЧ фотолушки с GaAs фотокатодом после успешных вакуумных и СВЧ испытаний [8] проведены полномасштабные испытания катодного узла с GaAs фотокатодом в ускоряющем поле СВЧ резонатора. Состояние работ по СВЧ фотолушке и результаты этих испытаний представлены в докладах на данной конференции.

Литература

- [1] N.S. Dikansky et al., "Status of the VEPP-5 Complex". Proc. 1994 Fourth European Part. Acc. Conf., London, June 27, p 482.
- [2] A.V. Novokhatski et al., "Electron-positron Preinjector Complex at Novosibirsk". Proc. 1994 Int. Workshop SOURCES'94, Schwerin, Germany, Sept.29-Oct.4.
- [3] М.С. Авилов, А.В. Александров и др. "Форинжектор для электрон-позитронных фабрик". XIV Совецание по ускорителям заряженных частиц, 1996, Протвино, Россия.
- [4] N.S. Dikansky et al., "Modulator for Klystron 5045". Proc. 1995 Part. Acc. Conf. on High-Energy Acc., Dallas, Texas, USA, May 1-5.
- [5] M.S. Avilov, A.V. Novokhatski, "A Single Bunch Compression in the Exponential Field". Proc. 1994 Fourth European Part. Acc. Conf., London, June 27, p971.
- [6] A.V. Aleksandrov et al., "A Prototype of RF Photogun for injector of VEPP-5". Presented at EPAC96, June 10-14, Sitges, Barcelona.
- [7] A.V. Aleksandrov et al. Electron-positron preinjector of VEPP-5 complex. Proc. 1996 Linear Acc. Conf. Geneva, Switzerland. pp. 821-823.
- [8] М.С. Авилов, А.В. Александров и др. "Форинжектор Ускорительно-Накопительного Комплекса ВЭПП-5. Состояние Работ." XV Совецание по ускорителям заряженных частиц, 1996, Протвино, Россия.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУ-10-20

Завьялов Н.В., Хохлов Ю.А., Иньков В.И., Горкунов В.С., Девяткин И.В., Иванин И.А., Ситников Н.П., Таранасов В.П., Тельнов А.В., Царегородцев А.Г., Шикин В.Н., Шориков И.В.

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР - ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

1. Введение

Одним из важнейших направлений научно-технического прогресса в настоящее время является создание новых технологий в различных областях науки, техники и народного хозяйства. В различных странах ведется внедрение радиационных технологий в стерилизацию изделий медицинского назначения, дезинсекцию зерна, консервацию пищи, обработку сельскохозяйственной продукции и т.д. Ведется обширный поиск новых технологий, позволяющих получать материалы с новыми физико-химическими и механическими свойствами, использование которых в обычных процессах улучшает производство и обеспечивает существенный экономический эффект.

Кроме того, в сравнении с обычными термическими и химическими методами, радиационные технологии имеют существенные экономические и технические достоинства и являются экологически чистыми технологическими процессами.

Источник излучения в радиационных процессах выбирают с учетом целого ряда факторов. Однако при решении задач с облучением крупногабаритных изделий и материалов с большими массовыми толщинами предпочтительными являются ускоренные электроны со средней мощностью пучка в несколько киловатт и энергией до 10 МэВ, обеспечивающие наивысшую производительность технологического процесса и отсутствие наведенной радиоактивности.

2. Линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20

2.1 Основные технические решения и блок-схема ускорителя

Мощность современных промышленных ускорителей электронов составляет (10...20) кВт при энергии ускоренных электронов (5...10) МэВ [1]. Для отдельных задач существуют ускорители большей мощности [2].

Линейный ускоритель ЛУ-10-20 ВНИИЭФ [3] разработан на базе СВЧ-генератора магнетронного типа. Основные элементы ЛУ-10-20

и их размещение показано на блок-схеме ускорителя на рис. 1.

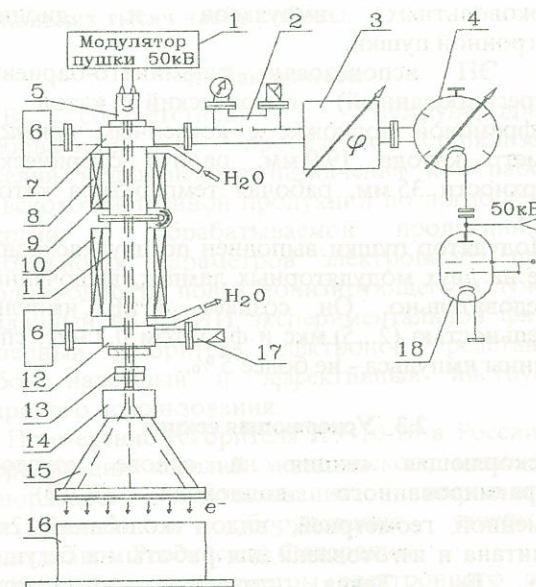


Рис 1. Блок-схема ускорителя ЛУ-10-20

Ускоряющая секция (УС) ускорителя запитывается СВЧ-мощностью от магнетрона (4), который возбуждается 50 кВ импульсом модулятора (18). СВЧ-мощность с магнетрона, через циркулятор (3) и рефлектометр (2), попадает во входной трансформатор типа волны (ТТВ) (7), в котором происходит преобразование волны H_{10} в ускоряющую волну E_{01} . Неиспользованная при ускорении электронов энергия отводится при помощи выходного ТТВ (12) в согласованную поглощающую нагрузку (17). Ускоряющая секция отделяется от питающего волновода, наполненного азотом, керамическим окном.

Модулятор (1) подаёт на катод диодной электронной пушки (ЭП) (5) высоковольтный импульс напряжения. Электроны с катода ЭП инжектируются в ускоряющую секцию, которая технологически разделена на две подсекции (9, 11) с общим контуром водяного охлаждения. В УС ускоряемый электронный пучок фокусируется соленоидами (8, 10), которые создают продольное фокусирующее аксиально-симметричное магнитное поле в 0,1 Тл.

Секция 3. ЭЛЕМЕНТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ, УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ, ВЧ-СИСТЕМЫ

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА ФОРИНЖЕКТОРА ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

А.Н. Косарев, Д.Е. Куклин, А.В. Новохатский, В.В. Подлевских, С.В. Шиянков

ИЯФ им. Будкера, Новосибирск, Россия

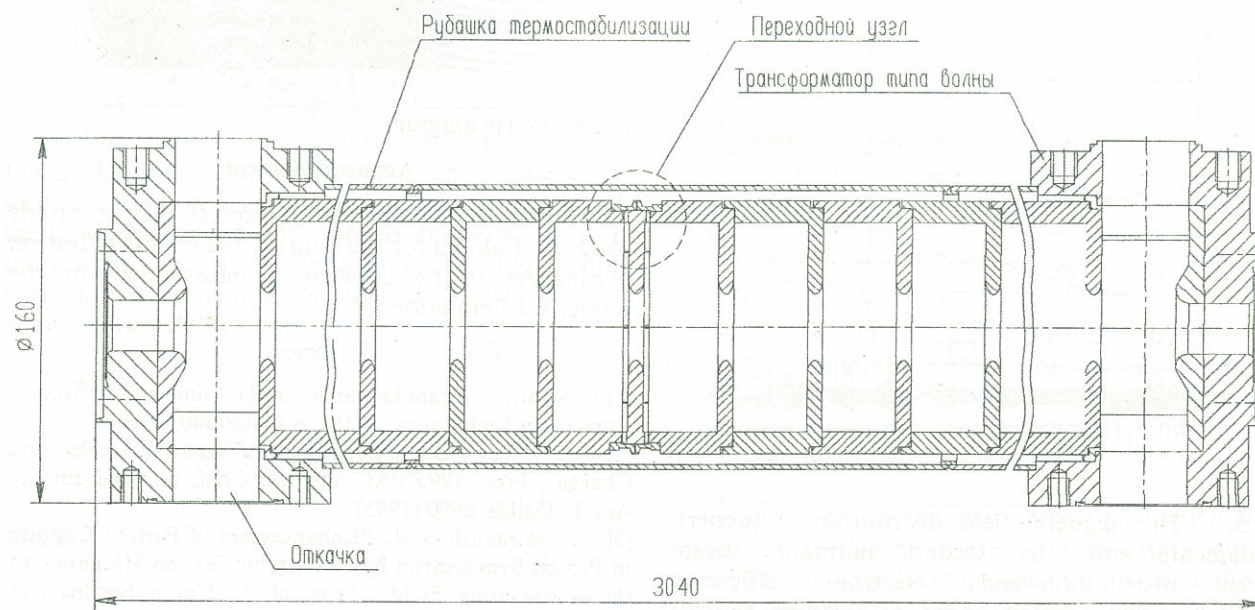


Рис.1 Ускоряющая структура.

В институте ядерной физики им. Г.И.Будкера в настоящее время начато серийное производство ускоряющих секций (УС) для форинжектора инжекционного комплекса ВЭПП-5.

В работе приводятся основные электротехнические параметры и характеристики УС, рассматриваются отдельные элементы конструкции и технологии изготовления.

ВВЕДЕНИЕ

На этапе предварительной проработки проекта форинжектора инжекционного комплекса ВЭПП-5 были определены основные требования к электротехническим параметрам и конструкции УС:

а) обеспечение эффективности использования энергии входного СВЧ импульса с учетом

предполагаемого возбуждения структуры от клистронного усилителя KLYSTRON 5045 через систему умножения мощности типа SLED;

б) высокая электрическая прочность системы;

в) относительная технологическая простота изготовления отдельных элементов конструкции и всей структуры при соблюдении жестких требований на технологические допуски.

После рассмотрения различных вариантов был разработан и изготовлен опытный образец УС, который, по нашему мнению, в наибольшей степени отвечает приведенным выше требованиям.

Успешное завершение работ по созданию структуры было связано с решением ряда ключевых технологических проблем:

- отработка технологии изготовления наиболее сложных элементов конструкции:

трансформаторов типа волны, переходного узла и др.;

- обеспечение надежного вакуумного соединения всех элементов структуры при полном электрическом контакте между ними;

- соблюдение технологических допусков и получение высокого качества рабочей поверхности изделия.

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

В качестве основного ускоряющего элемента форинжектора инжекционного комплекса ВЭПП-5 предполагается использовать ускоряющую секцию, работающую в режиме бегущей волны, с видом колебания $2\pi/3$ на частоте 2856 МГц. УС представляет собой периодическую структуру с постоянным импедансом, выполненную в виде круглого диафрагмированного волновода (КДВ), который связан с источником СВЧ мощности и СВЧ нагрузкой через входной и выходной трансформаторы типа волны (ТТВ).

За основу выбрана конструкция опытного образца УС (рабочая частота 2798 МГц), которая в настоящее время прошла стендовые испытания с получением ускоренного электронного пучка [1]. Общий вид конструкции представлен на рис. 1.

Параметры УС приведены в таб. 1. Дисперсионная характеристика волны E_{01} и H_{11} представлены на рис. 2.

Таблица 1

Рабочая частота, МГц	2856
Вид колебаний	$2\pi/3$
Постоянная времени, мкс	1.337
Групповая скорость, с	0.021
Шунтовое сопротивление, МОм/м	51
Коэффициент перенапряжения	2.02
Число ячеек (включая два ТТВ)	85
Длина структуры, м	2.93
Время заполнения, мкс	0.471

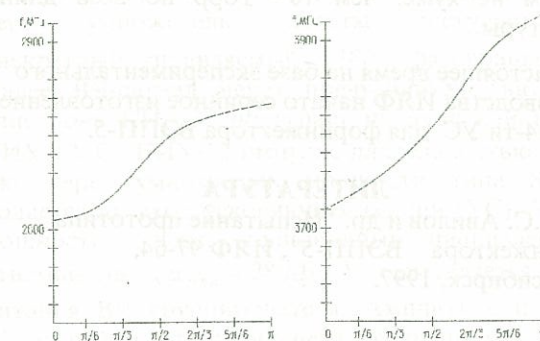


Рис. 2: а) дисперсионная характеристика волны E_{01} , б) дисперсионная характеристика волны H_{11} .

Геометрия регулярной ячейки изображена на рис. 3, а размеры представлены в таблице 2.

Таблица 2

Диаметр апертуры $2a$, мм	25.90
Внутренний диаметр ячейки $2b$, мм	83.75
Толщина диафрагмы t , мм	6.00
Длина ячейки D , мм	34.98

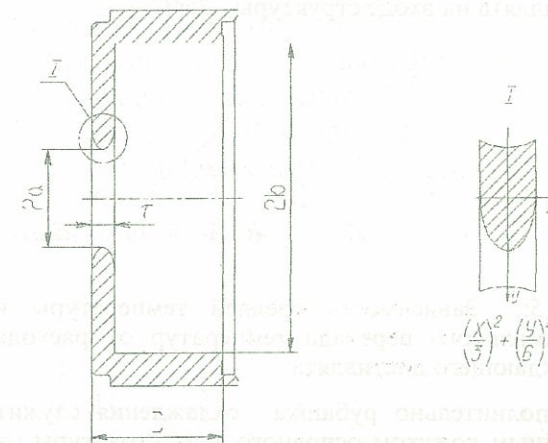


Рис. 3: Геометрия регулярной ячейки

С целью дополнительного повышения электрической прочности структуры скругление диафрагмы выполнено с соотношением осей (2:1).

Трансформатор типа волны выполнен из нержавеющей стали с впаянной медной ячейкой, геометрические размеры которой близки к размерам регулярной ячейки. Общий вид конструкции ТТВ представлен на рис. 4.

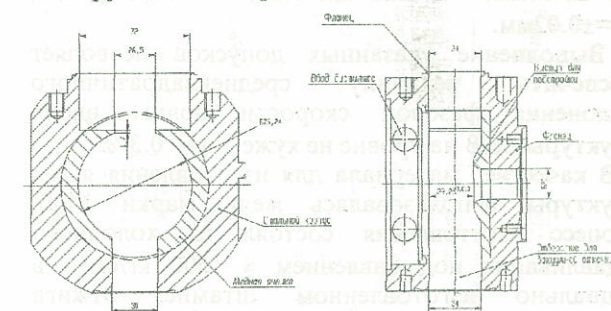


Рис. 4: Трансформатор типа волны

Используемая конструкция позволяет совмещать в ТТВ функции согласующего узла, откачного узла и узла ввода-вывода охлаждающего дистиллята. Отверстие для вакуумной откачки (см. рис. 4), расположенное симметрично отверстию связи с подводным волноводом, кроме того, позволило уменьшить величину амплитудной асимметрии электрического поля на расстоянии 10мм от оси ТТВ до величины $\leq 0.01\text{мм}^{-1}$ при фактическом отсутствии фазовой асимметрии.

Рубашка водяного охлаждения предназначена для отвода рассеиваемой в структуре СВЧ мощности и представляет собой стальную трубу постоянного сечения. Величина зазора между рубашкой охлаждения и внешней поверхностью ячеек составляет 4мм. На рис. 5 приведены

графики зависимости средней температуры УС и максимального перепада температуры вдоль структуры от величины расхода охлаждающего дистиллята, рассчитанные для следующих параметров: средняя мощность, рассеиваемая в структуре - 4 кВт, температура окружающего воздуха - 20°C, температура охлаждающего дистиллята на входе структуры - 25°C.

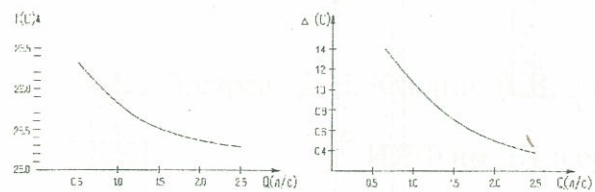


Рис. 5: Зависимость средней температуры и максимального перепада температур от расхода охлаждающего дистиллята.

Дополнительно рубашка охлаждения служит защитным кожухом основного тела структуры от механических повреждений и возможных искривлений геометрической оси.

При выборе допусков на геометрические размеры ячеек в первую очередь учитывалась степень их влияния на изменение фазовой скорости волны и технологическая возможность их обеспечения без существенного удорожания производства. В результате были установлены следующие допуски на основные размеры: $\Delta 2b = \pm 0.01 \text{ мм}$, $\Delta 2a = \pm 0.01 \text{ мм}$, $\Delta t = \pm 0.01 \text{ мм}$, $\Delta D = \pm 0.02 \text{ мм}$.

Выполнение указанных допусков позволяет обеспечить величину среднеквадратичного отклонения фазовой скорости волны вдоль структуры $\Delta\beta/\beta$ на уровне не хуже, чем 0.3%.

В качестве материала для изготовления ячеек структуры использовалась медь марки М06. Процесс изготовления состоял из холодного выдавливания под давлением $\approx 1500 \text{ кг/см}^2$ в специально изготовленном штампе, отжига заготовки и последующей токарной обработки. Чистовая обработка размеров выполнялась алмазными резцами.

Используемая технология обеспечила высокую точность соблюдения допусков на все геометрические размеры (брак не превышал 2% от общего количества ячеек, а повторяемость размера 2b для серии изделий, выполняемых без переналадки оборудования, составила $\pm 2 \text{ мкм}$).

Контроль за соблюдением допусков производился по результатам радиочастотных измерений отдельных ячеек на резонансном макете.

Проверка, выполненная интерференционным методом, показала, что чистота обработки внутренней поверхности соответствует $Ra \leq 0.025 \text{ мкм}$.

Пайка структуры является одной из наиболее сложных технологических операций, которая производилась в термовакуумной печи в специально изготовленной оснастке.

Разработанная конструкция посадочного соединения и используемая технология пайки (выбор припоя, место его укладки, температурный режим, технологическая оснастка) обеспечили высокую надежность всех паянных соединений, полный электрический контакт, отсутствие щелей и натекания припоя во внутреннюю полость структуры в местах соединения отдельных ячеек.

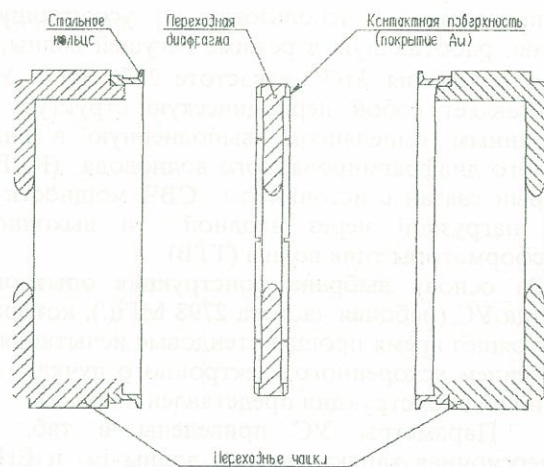


Рис. 6: Переходной узел

Процесс изготовления структуры состоял из последовательной пайки двух полуструктур и последующего их соединения через переходной узел, который включает в себя две медные ячейки с металлической юбкой (рис. 6) и переходную диафрагму. Поверхность контакта диафрагмы предварительно покрывается золотом. Используемый способ соединения предполагает возможность, в случае необходимости, дальнейшего наращивания длины структуры.

Вакуумная откачка может производиться одновременно через оба ТТВ и обеспечивает вакуум не хуже, чем 10^{-8} Торр по всей длине структуры.

В настоящее время на базе экспериментального производства ИЯФ начато серийное изготовление всех 14-ти УС для форинжектора ВЭПП-5.

ЛИТЕРАТУРА

[1] М.С. Авилов и др. "Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5", ИЯФ 97-64, Новосибирск, 1997.

ПРОТОТИП ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5

М.С. Авилов, А.В. Александров, А.В. Антошин, О.Ю. Баженов, П.А. Бак, Ю.М. Боймельштейн, Р.Х. Галимов, К.В. Губин, Н.С. Диканский, А.Г. Иголкин, И.В. Казарезов, В.Э. Карлин, Н.А. Киселева, С.Н. Ключев, О.В. Корозников, А.Н. Косарев, Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин, А.Д. Лисицин, П.В. Логачев, Л.А. Мироненко, А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров, А.М. Резаков, В.С. Северило, Ю.И. Семенов, Б.А. Скарбо, А.Н. Скринский, Д.П. Суханов, Ю.Ф. Токарев, А.В. Филиппов, А.Р. Фролов, В.Д. Хамбиков, А.Н. Шарапа, А.В. Шемакин, С.В. Шиянков

ИЯФ им. Будкера, Новосибирск, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Прототип форинжектора ВЭПП-5 [1,2] был создан для проведения комплексных испытаний элементов ускоряющего тракта. Он представляет собой начальную часть форинжектора и включает в себя его основные элементы: электронную пушку, группирователь, одну ускоряющую секцию, ВЧ модуль на базе клистрона КИУ-12, систему умножения мощности, фокусирующую систему и систему диагностики пучка. В работе приведены основные результаты испытаний прототипа с ускоряющей секцией длиной 2.5 м. Получен средний темп ускорения электронного пучка 17 МэВ/м с полным зарядом 1.2×10^{10} частиц в импульсе.

СХЕМА СТЕНДА

Общая схема стенда показана на рис.1. В ходе проводившихся экспериментов субгармонический группирователь не использовался.

Для получения пучка использовалась электронная термопушка с выходной энергией электронного пучка 100 кэВ и длительностью токового импульса (ширина на полувысоте) 2.5 нс.

ВЧ-сигнал ($f \approx 51.8 \text{ МГц}$), с генератора Г4-164 через умножитель частоты поступает на дискретный управляемый 180° фазовращатель. Далее ВЧ-сигнал через предусилитель на базе клистрона КИУ-37 поступает на вход клистрона КИУ-12. С КИУ-12 импульс длительностью $\sim 2.5 \text{ мкс}$ через умножитель мощности типа SLED подается на вход ускоряющей секции (УС). Часть мощности через волноводный направленный ответвитель ($\alpha_{отв} \approx 28 \text{ дБ}$) ответвляется для питания ВЧ группирователя. Амплитуда и фаза ВЧ-импульса, поступающего в группирователь,

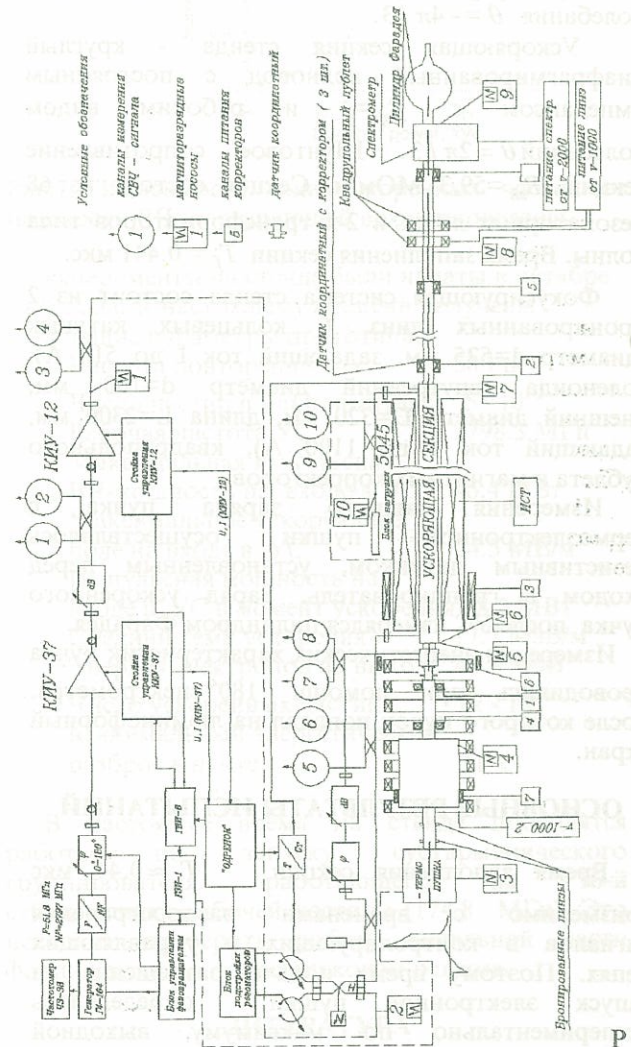


рис. 1: Принципиальная схема прототипа форинжектора

регулировалась с помощью аттенюатора и фазовращателя.

Система умножения мощности SLED состоит из волноводного щелевого моста и двух высокочастотных цилиндрических резонаторов,

работающих на виде колебания H_{015} . У резонаторов одна из стенок сделана подвижной, что дает возможность перестраивать резонансную частоту умножителя с помощью шаговых двигателей. Собственная добротность резонаторов $Q_0 = 10^5$, коэффициент связи с волноводом $\beta = 5.7$, собственное время резонатора $\tau_0 = 11.9$ мкс, нагруженное время - $T_c = 1.78$ мкс.

Указанные параметры резонаторов были выбраны для получения квазиравномерного распределения ускоряющего поля вдоль УС при подаче на нее ВЧ-импульса после системы SLED.

ВЧ-группирователь состоит из четырех связанных цилиндрических резонаторов (3 чашки + 1 трансформатор типа волны). Рабочий вид колебания $\theta = -4\pi/3$.

Ускоряющая секция стенда - круглый диафрагмированный волновод с постоянным импедансом с $\beta_\phi = 1$ и рабочим видом колебаний $\theta = 2\pi/3$. Шунтовое сопротивление секции $R_{sh} = 59.3$ МОм/м. Секция состоит из 68 резонаторных ячеек и 2-х трансформаторов типа волны. Время заполнения секции $T_f = 0.441$ мкс.

Фокусирующая система стенда состоит из 2 бронированных линз, 6 кольцевых катушек (диаметр $d=525$ мм, задающий ток I до 510 А), соленоида (внутренний диаметр $d=160$ мм, внешний диаметр $D=320$ мм, длина $L=2300$ мм, задающий ток I до 1100 А), квадрупольного дублета и магнитных корректоров.

Измерения полного заряда пучка с термоэлектронной пушки осуществлялось резистивным датчиком, установленным перед входом в группирователь. Заряд ускоренного пучка после УС измерялся цилиндром Фарадея.

Измерения энергетических характеристик пучка проводились при помощи 180° спектрометра, после которого пучок попадал на люминофорный экран.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Время заполнения секции $T_f \approx 0.44$ мкс соизмеримо с временами распространения сигналов в контролирующих и управляющих цепях. Поэтому время подачи разрешения на запуск электронной пушки определялось экспериментально по максимуму выходной энергии пучка.

Измеряя зависимость мощности $P(t)$, поступающей после системы умножения мощности на вход УС, можно определить полную энергию $E(\tau)$, набираемую пучком в зависимости от времени влета в секцию τ . На рис. 2 приведен график зависимости $E(\tau)/E_{max}$. Точки на графике - экспериментально полученные при определении

оптимального времени задержки импульса тока электронной пушки.

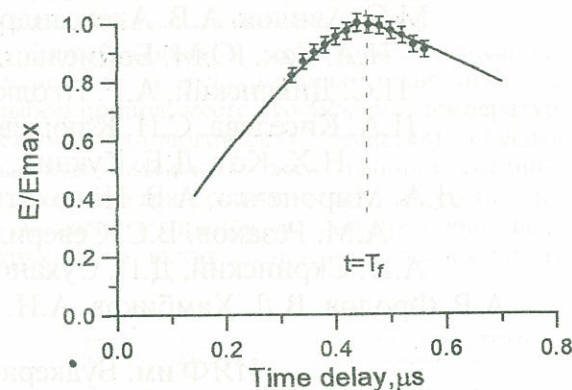


Рис.2: Зависимость энергии пучка от времени задержки (сплошная линия - теоретический расчет).

На рис. 3 показана зависимость максимальной энергии, набираемой частицами в УС от величины расстройки $\delta f = f - f_0$.

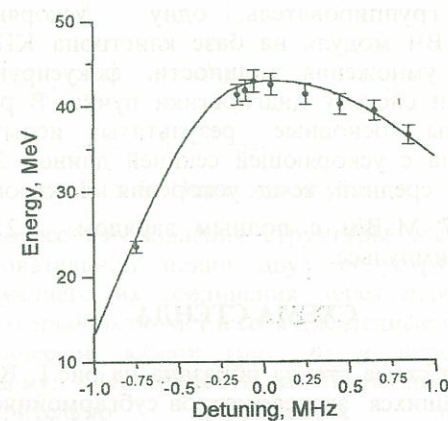


Рис.3: Зависимость набираемой пучком энергии от расстройки частоты. Сплошная линия - численное решение уравнений движения, точки - экспериментальные данные, полученные при определении рабочей частоты УС.

Нулевое значение расстройки соответствует частоте $f_0 = 2798.3$ МГц, при которой достигается максимум выходной энергии ускоренного пучка.

На рис. 4 показана зависимость относительной максимальной энергии пучка на выходе УС при различных значениях входной мощности P/P_0 на рабочей частоте УС.

Зависимость тока ускоренных частиц от разности фаз ϕ между группирователем и УС $I(\phi)$, снятая на рабочей частоте УС показана на рис.5. В результате измерений был установлен оптимальный сдвиг фаз между группирователем и УС, при котором достигается максимум ускоряемого тока.

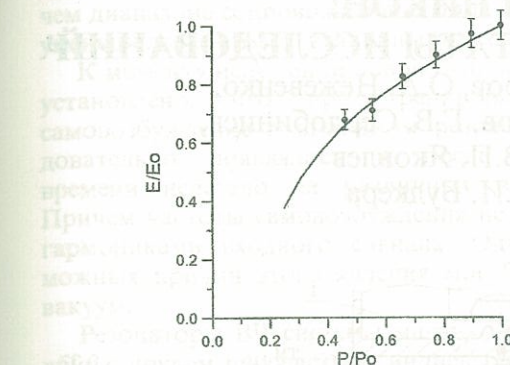


Рис. 4: Зависимость относительной выходной энергии пучка от входной мощности. Сплошная линия - численное решение уравнений движения, точки - экспериментальные данные

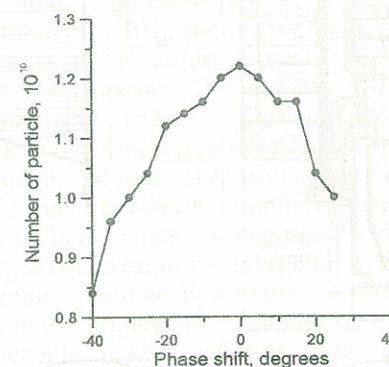


Рис.5: Зависимость тока ускоренного пучка от разности фаз между группирователем и УС (экспериментальные данные)

На рис. 6 представлены зависимости энергии ускоренного пучка и энергетического разброса в пучке от разности фаз между группирователем и УС.

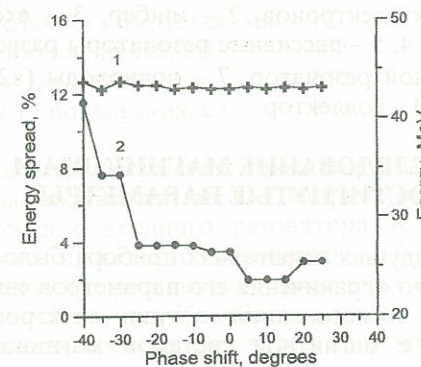


Рис.6: Зависимость энергии ускоренного пучка (кривая 1) и энергетического разброса (кривая 2) от разности фаз между группирователем и УС

Видно, что минимальный энергетический разброс в пучке достигается также вблизи выбранного нуля, а энергия пучка довольно слабо зависит от сдвига фаз между группирователем и УС.

На рис.7 приведена зависимость тока ускоренных частиц от мощности ВЧ, поступающей в группирователь $I(P_{gp})$, при постоянной мощности ВЧ на входе в УС. Из рисунка следует довольно сильная зависимость тока пучка от напряженности поля в группирователе, что подтверждает эффективность группировки.

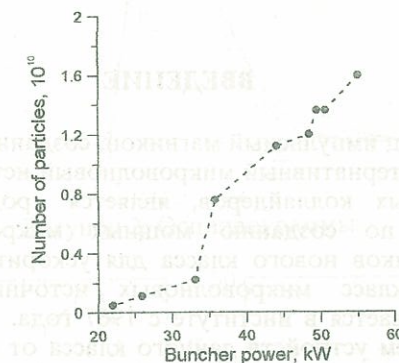


Рис.7: Зависимость тока ускоренных частиц от мощности ВЧ, поступающей в группирователь

Эксперименты на стенде были начаты в октябре 1996 года. К настоящему времени получены следующие параметры прототипа:

Частота повторений	50 Гц
Число частиц в макроимпульсе	5×10^{10}
Рабочая частота УС	2798.3 МГц
Максимальная импульсная ВЧ-мощность на входе в УС	46.4 МВт
Максимальное ускоряющее поле на входе в УС	24.5 МВ/м
Импульсная мощность на входе в УС в момент ускорения	28.5 МВт
Средний темп ускорения	17.7 МэВ/м
Энергия электронов на выходе	44.3 МэВ
Число ускоренных частиц	1.2×10^{10}
Минимальный энергетический разброс в пучке	$\pm 1\%$

В настоящее время на стенде проводятся работы по запуску субгармонического группирователя, работающего на 16-й субгармонике рабочей частоты (174.8 МГц). Это позволит проверить работу начальной части форинжектора в одногустковом режиме.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.V.Alexandrov et al., "Preinjector for electron-positron factories". Proc. 1994 XIV Conf. on Charge Part. Acc., Protvino, Russia.
- [2] A.V.Alexandrov et al., "Electron-positron preinjector of VEPP-5 complex". Proc. 1996 of the XVIII Int. Linear Acc. Geneva, Switzerland. pp. 821-823.

7 ГГц ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНИКОН: ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ¹

И.А. Запрыгаев, Е.В. Козырев, И.Г. Макаров, О.А. Нежевенко,
А.А. Никифоров, Г.Н. Острейко, Б.З. Персов, Г.В. Сердобинцев,
В.В. Тарнецкий, С.В. Щелкунов, В.П. Яковлев
Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера
Новосибирск, Россия

ВВЕДЕНИЕ

7 ГГц импульсный магникон, созданный в ИЯФ как альтернативный микроволновый источник для линейных коллайдеров, является продолжением работ по созданию мощных микроволновых источников нового класса для ускорителей [1-3]. Этот класс микроволновых источников разрабатывается в институте с 1967 года. Основным отличием устройств данного класса от остальных источников является способ модуляции пучка – круговая развертка пучка релятивистских электронов. В докладе рассмотрены особенности работы прибора и представлены новые экспериментальные результаты.

УСТРОЙСТВО МАГНИКОНА

Схематическое устройство магникона показано на Рис.1. Прибор состоит из источника электронов, ВЧ – системы, магнитной системы и коллектора. ВЧ – система содержит систему развертки для модуляции электронного пучка и выходной резонатор, в котором пучок преобразует свою энергию в электромагнитные колебания. Прибор работает в режиме удвоения частоты входного сигнала. Во всех резонаторах развертки возбуждается TM_{110} мода с круговой поляризацией на частоте 3.5 ГГц. В выходном резонаторе модулированный пучок возбуждает TM_{210} моду с частотой 7 ГГц. Угловая частота вращения этой моды совпадает с частотой входного сигнала. Все резонаторы расположены внутри соленоида, обеспечивающего продольное магнитное поле необходимого профиля.

Данная конструкция является результатом численного моделирования и экспериментального исследования различных вариантов прибора (см. [4, 8]). Расчеты динамики пучка и оптимизация элементов магникона (электронная пушка, ВЧ-резонаторы, магнитная система) проводились специальными программами SAM и SuperLANS [5, 6]. Использовались также программы для расчета установившегося и переходного режима работы магникона [7,8].

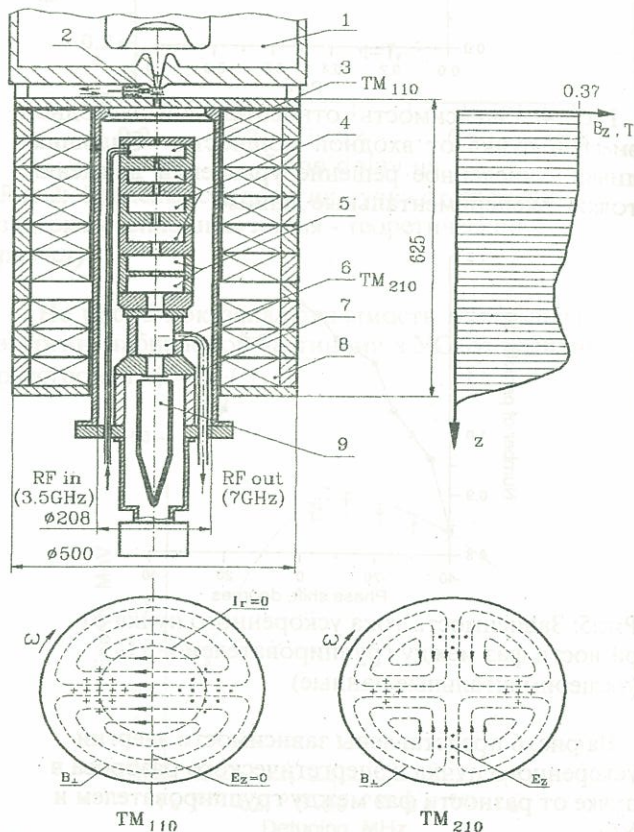


Рисунок 1: Схематическое устройство магникона: 1 – источник электронов, 2 – шиббер, 3 – входной резонатор, 4, 5 – пассивные резонаторы развертки, 6 – выходной резонатор, 7 – волноводы (x2), 8 – соленоид, 9 – коллектор.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИКОНА И ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В предыдущих испытаниях прибора было установлено, что ограничения его параметров связаны с плохим согласованием оптики электронного источника с магнитной системой магникона, а также с искажением ВЧ-поля в выходном резонаторе [4].

Плохое согласование оптики пушки с магнитной системой приводило к сильным пульсациям поперечного размера электронного пучка. Для устранения этой причины в 1996 мы модернизировали электронную пушку. Испытания показали, что пульсации уменьшились, а

максимальный измеренный диаметр пучка в рабочем диапазоне сопровождающего магнитного поля уменьшился с 4 мм до величины менее 3 мм.

К моменту испытаний новой пушки было также установлено, что при тренировке прибора самовозбуждение в выходном резонаторе последовательно появлялось и после некоторого времени исчезало на различных частотах [5]. Причем частоты самовозбуждения не совпадали с гармониками входного сигнала. Одной из возможных причин этого явления мог быть плохой вакуум.

Резонаторы ВЧ системы магникона соединены друг с другом посредством индиевых уплотнений, что позволяет производить оперативную замену отдельных частей, но препятствует возможности прогрева резонаторов до высоких температур. Результатом является значительное время тренировки резонаторов. В описываемых экспериментах ВЧ резонаторы предварительно прогревались, а затем производилась быстрая сборка магникона в целом. Кроме того, волноводный тракт, образующий вместе с нагрузкой и выходным резонатором единый вакуумный объем (керамическое окно отсутствует), был снабжен дополнительной системой откачки. Дальнейшие эксперименты показали, что эти меры сократили время тренировки прибора и устранили самовозбуждение. Достиженные к настоящему времени параметры магникона перечислены ниже в таблице. Для сравнения там же приведены расчетные значения.

Параметры магникона	получено	расчет
Рабочая частота, ГГц	7.002	7.000
Входная частота, ГГц	3.501	3.500
Выходная мощность, МВт	46	55
Усиление, дБ	62	55
КПД, %	49	56
Длительность импульса, мкс	1.0	1.3
Напряжение пучка, кВ	405	420
Ток пучка, А	230	240
Частота повторения, с ⁻¹	3	5

На осциллограммах, представленных на Рис.2, кривые соответствуют: U – напряжение пучка, DC – сигнал с входного резонатора, GC – сигнал с первого пассивного резонатора, PC – сигнал с последнего резонатора развертки, OUTC – выходной сигнал. Калибровка пиковой выходной мощности проводилась путем калориметрических измерений среднего уровня ВЧ мощности.

Рисунок 3 иллюстрирует измеренные зависимости эффективности и выходной мощности от: величины входного сигнала, входной частоты, величины магнитного поля сопровождения и мощности электронного пучка (2 – расчетная кривая).

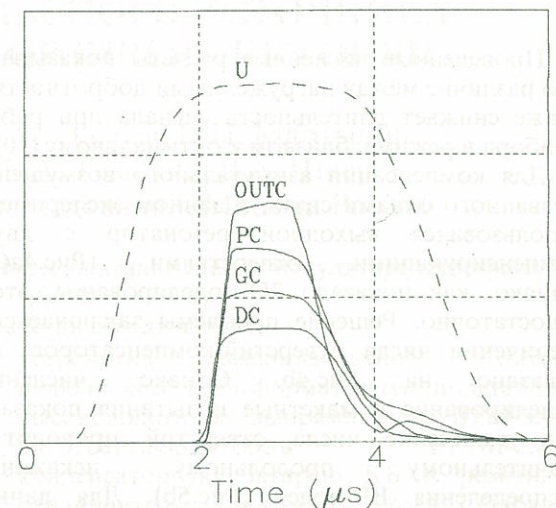


Рисунок 2: Осциллограммы

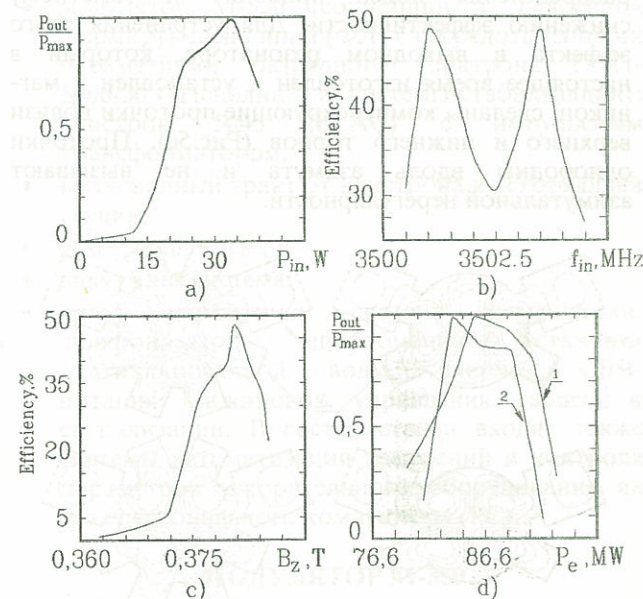


Рисунок 3: Экспериментальные кривые.

Сильная зависимость выходной мощности от мощности пучка, а, значит, и от напряжения пучка (диодная пушка) объясняет сокращение длительности импульса выходного сигнала. Численное моделирование показывает, что для данной формы импульса напряжения на электронной пушке, длительность выходного сигнала не может превышать 1.3 мкс на уровне половинной мощности.

Таким образом, измеренная эффективность прибора составляет 89%, а длительность импульса – 70% от проектных значений. Основной причиной отличия полученного результата от расчетного является продольная и азимутальная нерегулярность ВЧ-полей в выходном резонаторе ввиду наличия отверстий связи с волноводами [9]. Азимутальная нерегулярность ведет к различным нагруженным добротностей ортогональных TM_{210} мод, суперпозиция которых определяет распределение ВЧ-полей в выходном резонаторе.

¹ Работа поддержана РФФИ в 1997 г.

Проведенные численные расчеты показывают, что различие между нагруженными добротностями также снижает длительность сигнала при работе прибора в режиме, близком к оптимальному [10].

Для компенсации азимутального возмущения, вызванного окнами связи, в данном эксперименте использовался выходной резонатор с двумя компенсирующими отверстиями (Рис.4а(2)). Однако, как показало 2D-моделирование, этого недостаточно. Решение проблемы заключается в увеличении числа отверстий-компенсаторов, как показано на Рис.4б. Однако, численное моделирование и макетные испытания показали, что увеличение числа отверстий приводит к значительному продольному искажению распределения ВЧ-полей (Рис.5б). Для данной конструкции магнотрона такое искажение распределения полей приводит к заметному снижению эффективности. Для устранения этого эффекта в выходном резонаторе, который в настоящее время изготовлен и установлен в магнотрон, сделаны компенсирующие проточки вблизи верхнего и нижнего торцов (Рис.5с). Проточки однородны вдоль азимута и не вызывают азимутальной нерегулярности.

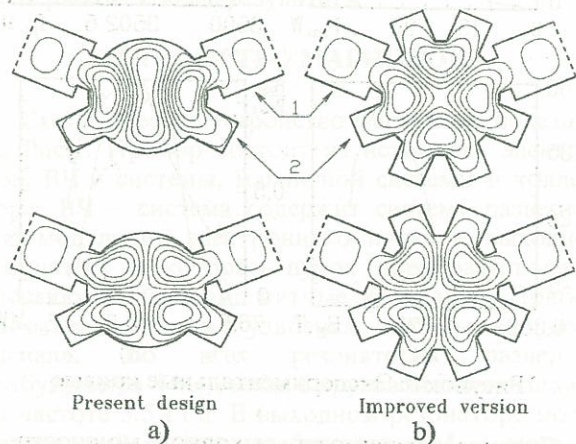


Рисунок 4: Устройство выходного резонатора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последней серии экспериментов на 7 ГГц магнотроне-удвоителе была достигнута выходная пиковая мощность 46 МВт при 49% КПД, что составляет 89% от расчетных значений. Полученные результаты позволяют рассматривать магнотрон в качестве возможного источника для применения в линейных коллайдерах. Улучшенный вариант выходного резонатора изготовлен и установлен в магнотрон. Прибор находится в стадии запуска и мы надеемся в ближайшее время получить проектные параметры.

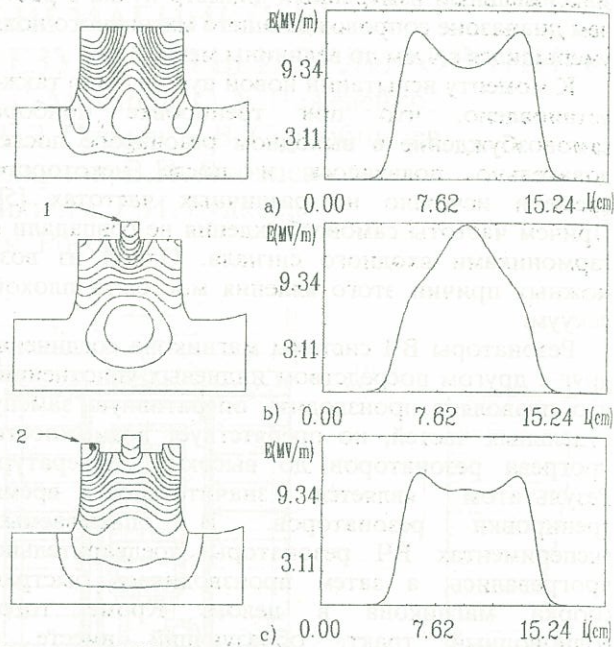


Рисунок 5: Карта полей и продольное распределение электрического поля в выходном резонаторе: а) без боковых отверстий; б) с окнами связи и "отверстиями-компенсаторами" (1); в) с дополнительными компенсирующими проточками вблизи верхнего и нижнего торцов (2).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G.I. Budker et al., Particle Accelerators том 10, 1979, стр. 41-59.
- [2] M.M. Karliner et al., NIM-A, том A 269, No. 3, 1988, стр. 459-473.
- [3] O.A. Nezhevenko, в IEEE Trans. of Plasma Science том. 22, No. 5, Октябрь 1994, стр. 756-772.
- [4] E.V. Kozyrev et al., в Proc. of the Third Workshop on Pulsed RF Sources for Linear Colliders, стр. 234-242, 1996.
- [5] E.V. Kozyrev et al., Particle Accelerators том 55, 1996, стр. 55-64.
- [6] V. Fomel, M. Tiunov, and V. Yakovlev, в Proc. XIII Int. Conf. on High-Energy Acc., том 1, 1987, стр. 353-355.
- [7] D. Myakishev and V. Yakovlev, in Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995.
- [8] V. Yakovlev et al., в Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995.
- [9] E.V. Kozyrev et al., в Proc. of 7th Adv. Acc. Concepts Workshop, Lake Tahoe, California, Октябрь 12-18, 1996, (to be published).
- [10] E.V. Kozyrev et al., "7 GHz Pulsed Magnicon: Study and New Results" в Proc. of Part. Accel. Conf. (PAC'97), 1997, (to be published).

МОДУЛЯТОР М350 ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА РЕЗОНАНСНЫХ НЕЙТРОНОВ (ИРЕН) ЛНФ ОИЯИ

А.А. Каминский, А.К. Красных, Э.М. Лазиев, И.Н. Мартынов,
Ю.А. Метелкин, А.П. Сумбаев, В.А. Тимохин, В.А. Швец.
Объединенный институт ядерных исследований, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории нейтронной физики начато проектирование и создание интенсивного импульсного нейтронного источника, состоящего из линейного ускорителя электронов и нейтронной размножающей мишени (проект ИРЕН) [1]. В основу проекта ИРЕН положена структурная схема установки ИБР-30, но с новыми линаком ЛУЭ-200 и современной размножающей мишенью. Проект линака основан на лучших мировых достижениях в области ускорительной техники. Темп набора энергии в ЛУЭ-200 должен составлять около 35 МэВ/м, частота повторения импульсов - 150 Гц при средней мощности в пучке 12 кВт. В ЛУЭ-200 используются самые мощные в своем классе импульсные клистроны типа 5045 и система умножения мощности (SLED), разработанные для Стенфордского электрон-позитронного коллайдера (SLAC), а также современные ускоряющие секции, изготавливаемые в Новосибирске. Для экспериментальной проверки проектных параметров, а также для отработки основных систем ускорителя, в ЛНФ ОИЯИ создается полномасштабный Стенд на основе одного клистрона 5045, системы умножения мощности, волноводного фидера и одной ускоряющей секции. Клистрон 5045 вместе с импульсным трансформатором, СВЧ-нагрузкой и некоторым вспомогательным оборудованием приобретен ОИЯИ ранее. Поскольку в России отсутствуют клистроны с параметрами, близкими к параметрам клистрона 5045, то не существует и модуляторов на соответствующую импульсную мощность. Поэтому возникло предложение о модификации разработанных ранее модуляторов М-250 на базе станции ОЛИВИН в более мощные импульсные модуляторы М-350. В ЛНФ выполнена работа по созданию модулятора М-350 с импульсной мощностью 150 МВт, средней мощностью 150 кВт, зарядным напряжением 50 кВ, частотой повторения импульсов 150 Гц, длительностью плоской части импульса 3,5 мкс и использованием отечественной элементной базы. К началу работ по созданию стенда ОИЯИ приобрел также комплект оборудования станции ОЛИВИН из ЕрФИ (Армения).

В данной работе основное внимание уделено первым результатам по созданию и исследованию узлов модулятора М-350.

Общее описание стенда модулятора клистрона 5045 (SLAC)

В состав стенда входят:

- устройство высоковольтного питания, включающее трансформаторную подстанцию с высоковольтным выпрямителем ВТМ-35/200, автотрансформатором РТТМ-250/0,5, конденсаторную батарею КБ и реактивный ограничитель зарядного тока (зарядный дроссель) ЕРОМ-100/0,5;
- модулятор М-350 (состоящий из сдвоенной формирующей линии (ФЛ) с сосредоточенными параметрами, разрядного тиратрона ТГИ1-5000/50 ("Исполин") и системы стабилизации); клистрон 5045 (SLAC) с импульсным трансформатором;
- волноводный тракт от клистрона к ускоряющей секции;
- ускоряющая секция;
- вакуумная система;
- пульт управления, система диагностики, синхронизатор, теплообменная установка дистиллированной воды, системы СВЧ-питания, блокировок, управления, защиты и сигнализации. В состав стенда входят также системы автоматизации измерений и контроля параметров ускорительного оборудования на базе персонального компьютера (PC).

МОДУЛЯТОР М-350

Наиболее близким аналогом по требуемой импульсной мощности и освоенным промышленностью модулятором может служить модулятор М-250, разработанный в Российском институте мощного радиостроения (РИМР), г. С.-Петербург, для клистронной усилительной станции "ОЛИВИН" [2]. Однако по частоте повторения импульсов и по выходной импульсной мощности модулятор не пригоден к прямому использованию для питания клистрона 5045. Поэтому применение клистронной импульсной станции "ОЛИВИН", возможно только после существенной переработки импульсной части ее модулятора М250, включая систему стабилизации, для того, чтобы можно было использовать промышленную нестабилизированную сеть ОИЯИ для питания модулятора М-350.

Параметры импульсных модуляторов М-250 и М-350 приведены в таб. 1, из которой видно, что модуляторы М-250 и М-350 отличаются наиболее значительно по следующим параметрам:

ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ИНЖЕКТОРА ВЭПП-5 НА ОСНОВЕ СВЧ-ФОТОПУШКИ С GaAs ФОТОКАТОДОМ

А.В.Александров, Н.С.Диканский, Е.С.Константинов, П.В.Логачев, А.В.Новохатский

Институт Ядерной Физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа посвящена исследованию возможности применения СВЧ фотопушки 10см диапазона с GaAs фотокатодом в качестве высокоинтенсивного источника поляризованных электронов для форинжектора ВЭПП-5, сооружаемого в настоящее время в ИЯФ. Рассмотрены основные аспекты выбора типа источника применительно к конкретным условиям ВЭПП-5. Обсуждаются проблемы использования GaAs фотокатода в СВЧ пушке. Приведено описание параметров и конструкции прототипа источника электронов, созданного в ИЯФ. На Рис.1 показан внешний вид установки.

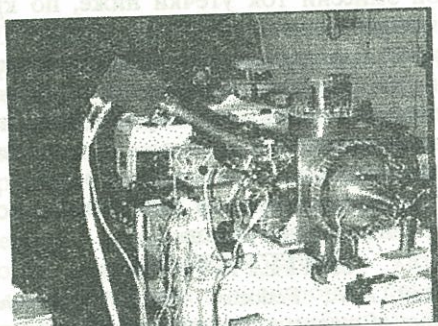


Рис.1

ВВЕДЕНИЕ

Форинжектор для ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-5, сооружаемого в настоящее время в ИЯФ [1], состоит из 2-х линейных ускорителей. Первый ускоритель на 300МэВ используется для производства позитронов, а второй ускоряет электронный и позитронный пучки до рабочей энергии накопителя охладителя 510МэВ.

При использовании одного и того же источника электронов для формирования позитронного и электронного пучков необходимо перестраивать схему питания ускорителей СВЧ мощностью и магнитную систему при переходе с одного пучка на другой. Это снижает производительность инжектора и усложняет управление.

Естественным решением этой проблемы было бы применение отдельного источника для формирования электронного пучка на входе

ускорителя на 510МэВ. Этот источник должен формировать сгусток электронов со следующими параметрами: энергия равна энергии позитронного пучка на выходе конвертора (т.е. 1 - 3 МэВ), число электронов 10^{11} , длительность - 20 пс, частота повторения - 1Гц. Эти параметры соответствуют пиковой плотности тока 480А/см² при диаметре катода 1см.

Для достижения таких параметров в источнике с обычной пушкой на постоянном напряжении необходимо использовать субгармонический группирователь. Такая система имеет большие размеры и не может быть размещена в существующем зале форинжектора. Компактным источником электронов, способным обеспечить необходимые параметры пучка, является СВЧ фотопушка.

В качестве материала фотокатода был выбран GaAs благодаря возможности получения пучков поляризованных электронов, что является весьма привлекательным при проведении экспериментов на встречных пучках.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОТОТИПА

Можно выделить три главные проблемы, возникающие при работе GaAs фотокатода в СВЧ резонаторе с большой напряженностью поля.

- Создание в резонаторе вакуумных условий обеспечивающих приемлемое время жизни активированного фото-катода.
- Возможность обеспечить короткое, по сравнению с периодом поля, время отклика фотокатода при большой пиковой плотности тока.
- Возможность достижения небольших значений темнового тока с активированной поверхностью фотокатода при большой напряженности ускоряющего поля.

Решение первой проблемы носит, в основном, технологический характер и тесно связано с последними достижениями при изготовлении ускоряющих структур с высоким темпом ускорения. Как было показано в [2], при правильном выборе материалов, использовании современных технологий и соблюдении жестких

условий вакуумной гигиены вакуум на уровне 10^{-10} торр достигается при напряженности поля на поверхности резонатора до 100МэВ/м. Учитывая, что необходимая частота повторения источника для инжектора ВЭПП-5 составляет всего 1Гц, а необходимая напряженность поля на катоде 30-50 МэВ/м, не вызывает сомнений возможность достижения вакуума лучше 10^{-10} торр, что является приемлемым для работы GaAs фотокатода.

Маленькое время отклика фотокатода требуется по двум причинам. Во-первых, это позволяет устранить бомбардировку катода возвращенными электронами. Такая бомбардировка сокращает время жизни катода, разрушая активирующий слой на поверхности, и увеличивает темновой ток благодаря вторичной эмиссии. Во-вторых, для формирования пучка с малыми поперечным эмиттансом и энергетическим разбросом длительность эмитируемого катодом сгустка должна быть мала по сравнению с периодом СВЧ колебаний.

Время отклика τ фотокатода с отрицательным электронным сродством определяется временем диффузии термализованных электронов на дне зоны проводимости и может быть оценено как

$$\tau = d^2/D, \quad (1)$$

где d - меньшая из величин: глубина поглощения света в GaAs и толщина катода, D - коэффициент диффузии фотоэлектронов на дне зоны проводимости.

Время отклика толстого GaAs фотокатода (толщина которого больше или сравнима с глубиной поглощения света) может достигать нескольких сотен пикосекунд, что сравнимо с периодом СВЧ колебаний 10см диапазона.

Есть, по крайней мере, два способа уменьшить время отклика. Первый связан с уменьшением толщины кристалла в соответствии с (1). Второй заключается в использовании фотокатода с малым положительным электронным сродством, когда в основном, из кристалла эмитируются нетермализованные электроны. В этом случае время отклика определяется процессами термализации и не превышает нескольких пикосекунд. Использование GaAs фотокатода в состоянии малого положительного сродства может иметь некоторые преимущества, особенно для использования в СВЧ пушке:

- маленькое время отклика
- уменьшение коэффициента вторичной эмиссии.
- большая степень поляризации у нетермализованных электронов

Ценой этих преимуществ является уменьшение квантовой эффективности фотокатода до 10^{-3} - 10^{-4} , однако эту величину все еще можно считать приемлемой и она сравнима с эффективностью

напряженных фотокатодов, применяемых для достижения высокой степени поляризации [3].

Для экспериментального исследования времени отклика GaAs фотокатода был создан специальный стенд, состоящий из электрода пушки с GaAs фотокатодом и системы измерения длительности эмитируемого пучка [4,5]. Фотокатод возбуждался световым импульсом длительностью 30пс от Nd:YLF лазера (длина волны 524 нм). В экспериментах использовался фотокатод толщиной 450 мкм из кристалла GaAs, легированного цинком, производства фирмы "MCP Wafer Technology Limited". Фотокатод активировался до состояния отрицательного электронного сродства путем нанесения на поверхность слоев цезия и кислорода в соответствии со стандартной процедурой [4]. В результате было достигнуто время жизни 3.5 часа в пушке с постоянным градиентом 80 кВ/см при давлении в камере $3 \cdot 10^{-10}$ торр. Параметры эмитируемого пучка: длительность сгустка 60 пс, плотность тока 25 А/см², частота повторения 1Гц [6]. Достигнутая напряженность электрического тока на поверхности катода близка к пределу для пушки с постоянным напряжением, поэтому для дальнейшего увеличения плотности эмитируемого тока необходим полномасштабный эксперимент с СВЧ фотопушкой. Такой эксперимент необходим и для исследования эмиссии темновых токов с активированной поверхности.

Все вышесказанное указывает на необходимость создания полномасштабного прототипа СВЧ фотопушки для экспериментальной проверки работоспособности GaAs фотокатода в условиях СВЧ резонатора и отработки конструкции узлов фотопушки.

ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА

Подробное описание прототипа СВЧ фотопушки можно найти в [7].

На рис. 2 показан общий вид прототипа.

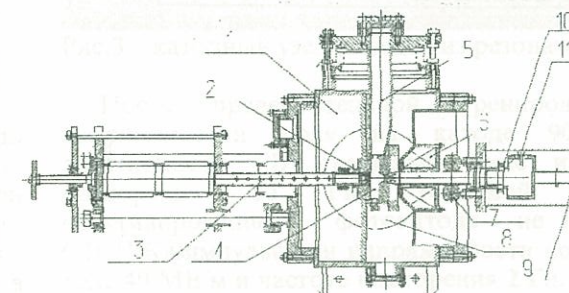


Рис.2. Схема прототипа. 1- активационная камера, 2- катодный узел, 3- манипулятор, 4 - резонатор, 5- волновод, 6- магнитная линза, 7- корректор, 8- рабочая камера, 9-окно для лазерного луча, 10- изолятор, 11-цилиндр Фарадея

Вакуумный объем установки разделен на активационную камеру и рабочую камеру. Такое разделение позволяет устранить попадание цезия на поверхность резонатора при активации фотокатода, а также защищает катод при ухудшении вакуума во время тренировки резонатора. Катодный узел размещен на манипуляторе и может перемещаться из резонатора в активационную камеру.

В активационной камере расположены цезиевый и кислородный диспенсеры, используемые при активации.

Конструкция катодного узла показана на рис.3. Подготовка катода к активации достигается путем нагрева до 600°C , для этой цели внутри катодного узла размещены нагреватель и термopара.

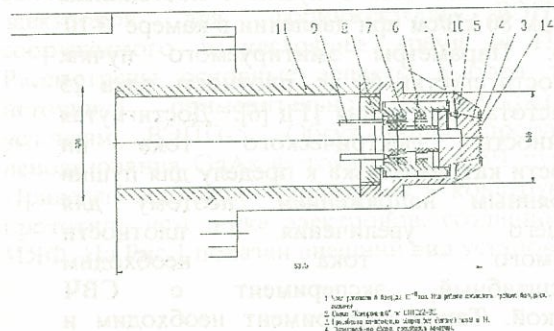


Рис. 3 Конструкция катодного узла СВЧ фотопушки. 11 - шток, 9 - выводы нагревателя, 8 - основной фиксатор, 7 - керамический корпус нагревателя, 6 - двойная рубашка из танталовой фольги, 1 - элемент, распределяющий тепло, 10 - внешний корпус, 5 - внутренний корпус, 1 - золотое кольцо, 3 - золоченый прижим, 14 - GaAs кристалл.

Рабочая частота	2797 МГц
Добротность	11000
Шунтовое сопротивление	920 кΩ
Коэффициент перенапряжения	1,23
Напряженность поля на катоде	30 - 100 МэВ/м
Диаметр фотокатода	8 мм

Параметры резонатора пушки приведены в таблице. Резонатор размещен внутри рабочей камеры и состоит из двух частей, соединенных между собой путем механического прижима. Такая конструкция позволяет легко модифицировать форму резонатора и менять узел крепления фотокатода к стенке резонатора.

В настоящее время прототип прошел вакуумные и СВЧ испытания. Проведены первые эксперименты с фотокатодом результаты которых представлены в [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В.Александров и др. "Форинжектор для электрон-позитронных фабрик", 14-ое Совещание по ускорителям заряженных частиц, 1994г., Протвино.
2. H.Matsumoto. "Dark Currents", KEK Preprint 96-120, September 1996.
3. T.Nakanishi, H. Aoyagi, H. Horinaka, et. al. Large enhancement of spin polarization observed by photoelectrons from the Strained GaAs layer. DPNU-91-23, April, 1991
4. A.V. Aleksandrov, ..., P.V. Logatchov, et. al. The GaAs electron source: simulations and experiment. NIM A 340(1994), p. 118-121.
5. A.V. Aleksandrov, P.V. Logatchov, A.V. Novokhatski, et. al. Device for electron bunch length measurement in the picosecond region. Rev. Sci. Instrum. 66(5), May 1995, p.3363.
6. A.V. Aleksandrov, M.S. Avilov et. al. "The production of Short Intensive Bunches From GaAs Photocathode". EPAC 96, 1535-1537.
7. А.В.Александров. Формирование пикосекундных электронных пучков для форинжектора ВЭПП-5 с использованием GaAs фотокатода. Диссертация, ИЯФ, Новосибирск, 1996г.
8. А.В.Александров, Е.С.Константинов и др. Экспериментальное исследование работы GaAs фотокатода в условиях СВЧ пушки. Представлена на этой конференции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ GaAs ФОТОКАТОДА В УСЛОВИЯХ СВЧ ПУШКИ

А.В.Александров, Е.С.Константинов, П.В.Логачев, Ю.И.Семенов, А.Б.Старостенко, -Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Экспериментальный заход на прототипе высокочастотной фотопушки был посвящен проверке работоспособности всех узлов прототипа, измерению вакуумного состава остаточного газа, тренировке резонатора повышенной мощностью, измерению времени жизни арсенид-галлиевого фотокатода в активационной камере и в резонаторе. Для измерений спектра масс вакуума использовался высокочастотный квадруполь MKS. Через сутки после старта с атмосферы сухого азота, установка вышла на вакуум 10^{-9} Торр. В это время производились прогревы катодного узла и диспенсеров активирующих компонентов для их очистки и обезгаживания, а также пробные активации с целью определения состояния поверхности фотокатода. При этом был получен фототок на уровне десятков наноампер.

После достижения стабильных вакуумных условий был проведен прогрев вакуумной системы.

На Рис.1 показан спектр масс остаточного газа, полученный в результате 48 часового прогрева

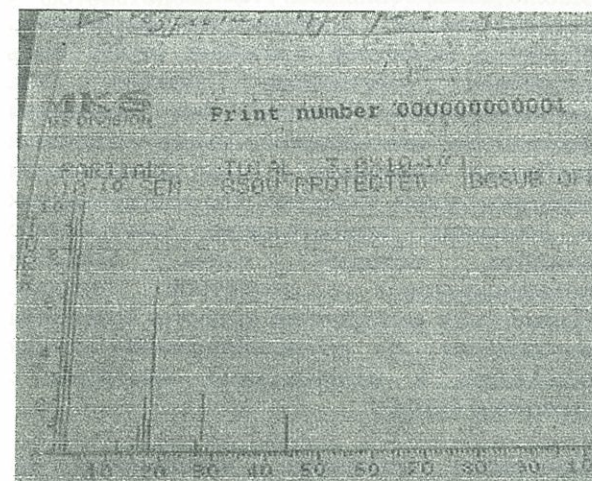


Рис.1 показана зависимость парциального давления от атомной массы

После прогрева, когда вакуум улучшился до 10^{-10} Торр, была проведена регенерация кристалла и фотокатод активирован по стандартной процедуре. В результате была достигнута квантовая эффективность на уровне 5% на длине волны 630 нм (HeNe лазер) и время жизни в активационной камере составляло 3 часа при вакууме $2 \cdot 10^{-10}$ Торр. На Рис.2 представлена зависимость фототока от времени.

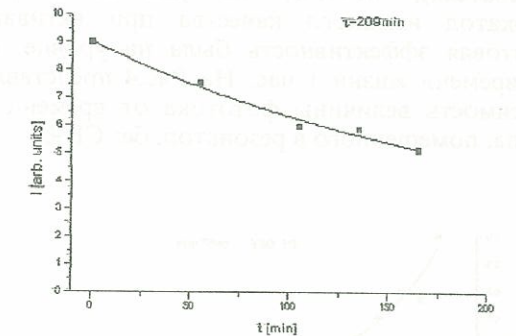


Рис.2 величина фототока дана в относительных единицах

Затем были проведены тренировки резонатора пушки на нескольких уровнях мощности. На Рис.3 показана осциллограмма, верхний луч которой индицирует уровень падающей мощности 2.5 Мвт, а нижний сигнал с цилиндра Фарадея 1.6 В.

Параметры цилиндра Фарадея: 1 МОм, 3 нФ. Временная развертка 1 мкс/дел.

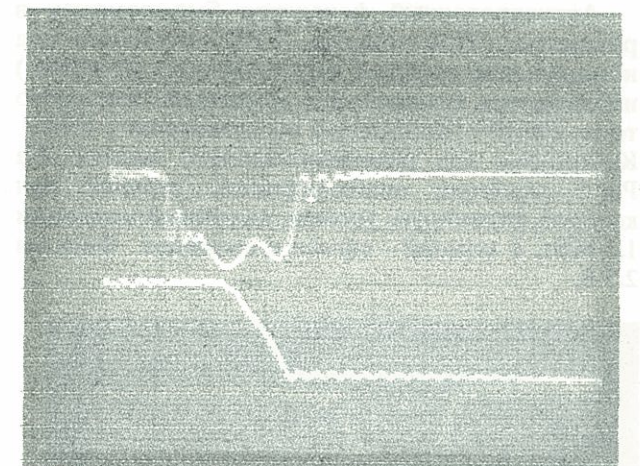


Рис.3 катодный узел выведен из резонатора.

После предварительной тренировки при напряженности поля на катоде 90 МВ/м, длительности СВЧ импульса 2мкс и частоте повторения 50 Гц, темновой ток с неактивированного фотокатода не превышал $6 \cdot 10^{-12}$ Кл/импульс при напряженности поля на катоде 40 МВ/м и частоте повторения 2 Гц. Вакуум в рабочей камере при выключенной СВЧ мощности $2 \cdot 10^{-10}$ Торр, при включенной - $5 \cdot 10^{-10}$ Торр.

Более длительная тренировка резонатора и использование титанового испарителя должны

привести к дальнейшему улучшению вакуумных условий, чему должно способствовать отсутствие в спектре масс вакуума компонент, быстро приводящих фотокатод в нерабочее состояние. Из-за ухудшения вакуума в процессе тренировки состояние поверхности фотокатода ухудшилось (повторить регенерацию не удалось из-за поломки нагревателя), поэтому не удалось получить фотокатод высокого качества при активации. Квантовая эффективность была на уровне 0.05% при времени жизни 1 час. На Рис.4 представлена зависимость величины фототока от времени для катода, помещенного в резонатор, без СВЧ.

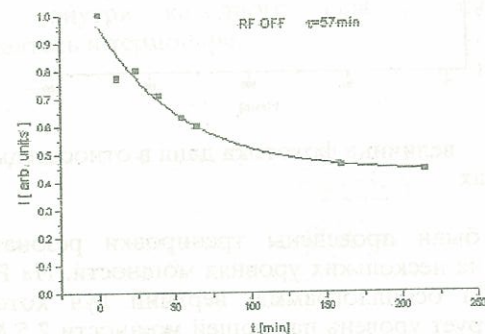


Рис.4 величина фототока дана в относительных единицах

Активированный фотокатод был помещен в резонатор. При подаче СВЧ мощности на номинальном уровне (напряженность 40 МВ/м) наблюдалось значительное увеличение темнового тока: $100 \cdot 10^{-12}$ Кл/импульс по сравнению с $6 \cdot 10^{-12}$ Кл/импульс для неактивированного катода. На Рис.5 показана осциллограмма, верхний луч которой индицирует уровень падающей мощности 1.3 МВт, а нижний - сигнал с цилиндра Фарадея 2.5 В.

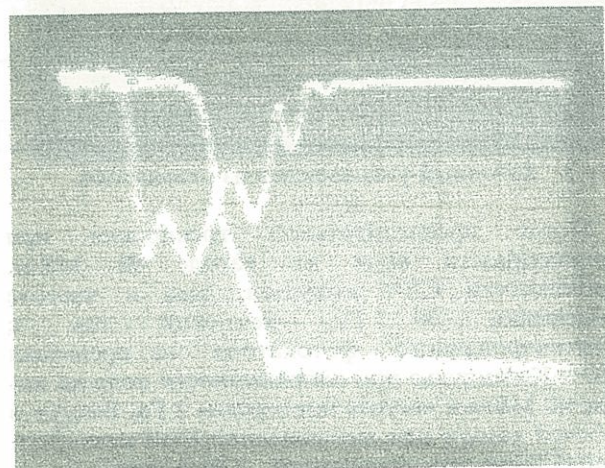


Рис.5 катодный узел помещен в резонатор

Так-как прямое измерение фототока было невозможно из-за отсутствия в настоящее время

мощного импульсного лазера, то время жизни фотокатода измерялось по спаду темнового тока и составляло около 30 мин. На Рис.6 показана зависимость темнового тока от времени на номинальном уровне мощности 0.6 МВт.

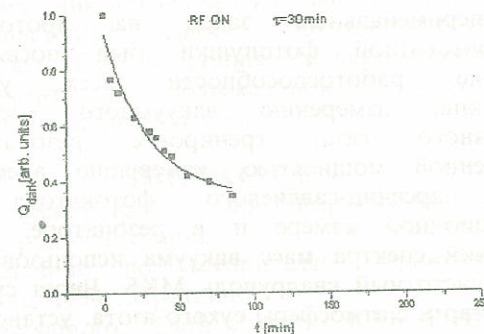


Рис.6 темновой ток дан в относительных единицах

Главным результатом первых экспериментов можно считать следующее:

1. GaAs фотокатод работоспособен в условиях СВЧ резонатора и время жизни при напряженности поля 40 МВ/м уменьшается всего в два раза по сравнению с временем жизни в активационной камере.
2. Наблюдается большой темновой ток с активированной поверхности фотокатода. Наиболее вероятной причиной может быть вторичная электронная эмиссия, т.к. автоэлектронная эмиссия без освещения фотокатода маловероятна, ввиду отсутствия свободных электронов в зоне проводимости полупроводника. Известно, что полупроводник в состоянии отрицательного электронного заряда обладает очень большим коэффициентом вторичной эмиссии. Первичными электронами являются электроны автоэмиссии с противоположной стенки резонатора и возвращенные электроны с держателя катода.

Ближайшая программа деятельности на прототипе высокочастотной фотопушки включает в себя работы по совершенствованию конструкции, оптимизацию формы резонатора с целью уменьшения числа первичных электронов, попадающих на катод. Изучение вторичной эмиссии планируется и на специальной установке, созданной для методологических экспериментов с GaAs фотокатодом. В частности, параллельно с работами на прототипе высокочастотной фотопушки, проводились эксперименты по изучению метода очистки поверхности GaAs кристалла электронным пучком. На Рис.7 показан внешний вид тестового объема.

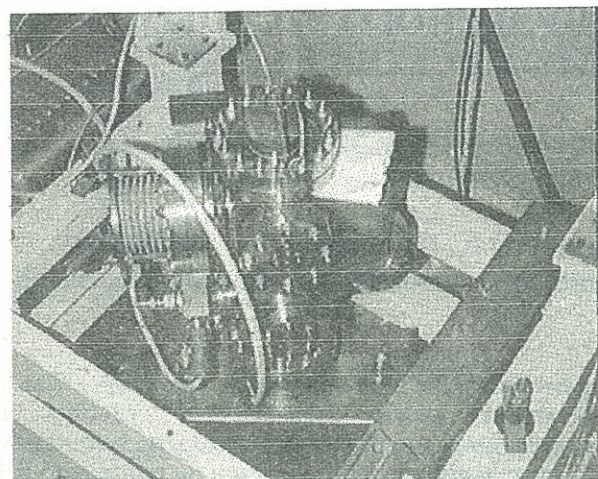


Рис.7

Перспективная программа работ включает в себя создание спинового манипулятора и объединение фотопушки, спинового манипулятора и моттовского поляриметра в источник поляризованных электронов, проведение измерений времени жизни поляризации арсенид-галлиевого фотокатода в резонаторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В.Александров и др., "Источник поляризованных электронов для инжектора ВЭПП - 5 на основе СВЧ фотопушки с GaAs фотокатодом. (Работа представлена на этой конференции.)