

Российская академия наук  
Министерство науки и технической политики Российской Федерации  
Министерство Российской Федерации по атомной энергии  
Объединенный институт ядерных исследований

**XIV СОВЕЩАНИЕ  
ПО УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

*Институт физики высоких энергий, Протвино  
25-27 октября 1994 года*

**Сборник докладов  
в 4-х томах**

**Том 4**

Протвино 1994

# Прототипы диполя и квадруполя для LEB SSC

Ю.В.Барышев, Н.С.Диканский, С.Ф.Михайлов, Ю.А.Пупков,  
Г.М.Тумайкин

Институт Ядерной Физики им.Будкера СО РАН,  
Новосибирск 630090

W. Heilbrunn, U. Wienands, F. Knox-Seith, and X.Y. Wu  
Superconductig Super Collider Laboratory,  
2550 Beckleymeade Avenue, Dallas, TX 75237 USA

Институт Ядерной Физики изготовил прототипы дипольного и квадрупольного магнитов LEB SSC (бустер низкой энергии сверхпроводящего суперколлайдера, Даллас, США). Магниты изначально были спроектированы лабораторией SSC (SSCL) и в последствии модернизированы в ИЯФ. Модификации главным образом коснулись профиля и конструкции концевых пакетов. Был разработаны методы коррекции краевых полей и стабилизации эффективной длины позволившие получить магниты с чрезвычайно высокой интегральной однородностью поля.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитная структура LEB SSC состоит из 96 основных поворотных магнитов и 90 квадрупольных линз различной длины (8 типов от 555 до 756 мм) [1]. Предполагалось, что LEB будет работать в режиме под'ема энергии от 1.2 до 12 ГэВ в 10 Гц синусоидальном цикле. Предполагалось последовательное питание диполей и квадруполей одним током, что надало жесткие требования на стабильность их эффективных магнитных длин. Высокие величины сдвигов бетатронных частот на энергии инжекции, вызванные пространственным зарядом, определили высокие требования на величину интегральной однородности магнитного поля [2].

В соответствии с соглашением между SSCL и ИЯФ, ИЯФ изготовил по два

прототипа диполя и квадруполя и провел их магнитные и электрические испытания на постоянном и переменном токе. Первые прототипы диполя и квадруполя (прототипы №1) были изготовлены в точном соответствии с чертежами SSCL в мае 1993 г. Однако, они не удовлетворяли исходным требованиям на интегральные магнитные параметры. Для того чтобы улучшить исходную конструкцию, удовлетворить требованиям на магнитные параметры и увеличить механическую жесткость магнитов, в ИЯФ были разработаны новые концевые пакеты с шиммами и фасками специальной формы. Вторые, модернизированные прототипы диполя и квадруполя (прототипы №2) были изготовлены в октябре 1993 г. Согласно требованиям SSCL, на них был проведен полный набор испытаний и измерений, водяных, электрических и магнитных, на постоянном и переменном токе, на Стенде магнитных измерений в ИЯФ, специально спроектированного для этой цели.

## 2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Основные требования принятые для вторых прототипов диполя и квадруполя представлены в табл. 1. Эти требования были выработаны с учетом насыщения железа и разницы в размерах требуемой области хорошего поля на энергиях инжекции  $E_{inj}$  и выпуска  $E_{extr}$ .

Табл. 1  
Требования к прототипам

Параметры	Диполь		Квадруп.	
	$E_{inj}$	$E_{extr}$	$E_{inj}$	$E_{extr}$
Апертура [мм]	57.2		100	
Длина ярма [мм]	1875		592	
Мин и макс ток [кА]	0.39	3.9	0.39	3.9
Поле (градиент) [кгс / кгс/см]	1.36	13.6	.156	1.56
$L_{eff}$ [мм]	1875		592	
$\Delta L_{eff}$ [мм] во всем диапазоне, не более	1.2		1.5	
Неоднородность (нелинейность) поля $\Delta B/B, \leq$	$10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
в области поля $\Delta x (R_0)$ [мм]	$\pm 30$	$\pm 15$	40	40

### 3. КОНСТРУКЦИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ

#### 3.1 Сталь

Первоначальный проект SSCL предполагал использование для изготовления ярма американской стали М27 толщиной 0.635 мм. В соответствии с российскими стандартами, мы использовали российскую сталь марки 2312 с содержанием кремния около 2% и углерода менее 0.003%. Сравнение показало, что эта сталь подобна М27 как по магнитным, так и по электрическим параметрам. Коэрцитивная сила в ней составляет около 0.8 - 1.0 Э.

Особое внимание обращалось на электрическое сопротивление и радиационную стойкость изоляционного покрытия. Оно сохраняло свои изолирующие качества после испытаний на  $10^9$  рад.

Листы требуемого профиля штамповались на заводе им. Владимира Ильича, г.Москва. Точность штамповки была не хуже 0.025 мм, максимальный размер заусенец не превышал 0.04 мм.

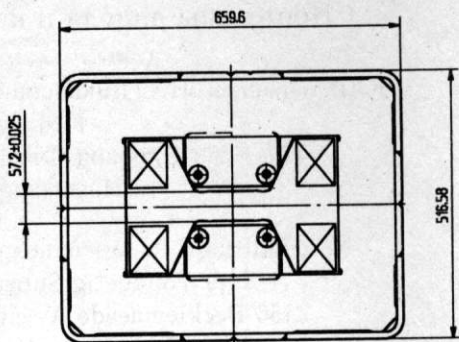


Рис. 1. Общий вид прототипа диполя.

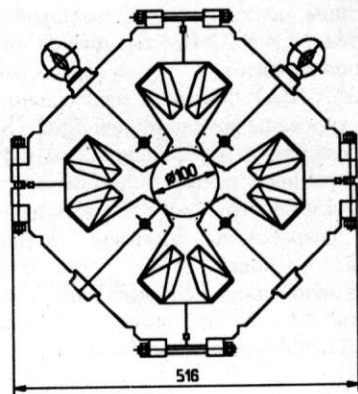


Рис. 2. Общий вид прототипа квадруполья.

#### 3.2 Изготовление ярма и обмоток

Ярмо диполя состоит из пакетов 38.5 мм толщины набранных из листов полного сечения (рис.1). Ярмо квадруполья собиралось из четвертинок, толщина пакетов в них составляет 54 мм (рис.2). Листы каждого пакета как диполя так и квадруполья разворачивались на  $180^\circ$  относительно листов соседних пакетов с целью усреднения (симметризации) погрешностей профиля полюсов. Для каждого пакета листы отбирались из разных рулонов стали таким образом, чтобы добиться наиболее эффективного усреднения их магнитных свойств (см. п.3). Дипольное ярмо собиралось на вертикальном стапеле, квадрупольное - на горизонтальном.

Ярмо набиралось на стапеле пакет за пакетом и сжималось: дипольное - усилием 40 тонн, 4 раза за весь период сборки, квадрупольное - усилием 6 тонн, 5 раз. Непрерывно контролировался плотный контакт базовых поверхностей каждого листа с базовыми поверхностями (прижимными планками) стапеля.

Одним из наиболее важных требований при сборке ярма, определяющий качество магнитного поля, является достижение высокого и однородного вдоль всей длины ярма упаковочного фактора. Чтобы добиться однородности, каждый пакет перед укладкой на стапель взвешивался, перед каждым поджатием фиксировался полный вес всех уложенных пакетов а после поджатия замерялась их суммарная высота. Далее измерялся средний упаковочный фактор, и если его величина отклонялась от расчетной, к последнему пакету добавлялось (или убиралось из него) необходимое число листов (обычно 1-2 шт.). Таким образом, мы получили коэффициент упаковки равный 98.5 % и однородный вдоль всей длины ярма.

После каждого поджатия вновь сжатая часть ярма фиксировалась снаружи короткими прерывистыми сварочными швами. Полностью набранный и сжатый сердечник вместе с клееными торцевыми пакетами окончательно варился непрерывными продольными швами к силовым уголкам из нержавеющей стали в диполе либо к продольным полосам-стяжкам в квадруполе (см. рис.1, 2). Использовалась аргонно-дуговая безфлюсовая сварка. Для минимизации механических деформаций ярма при сварке была разработана специальная последовательность наложения сварочных швов.

Неплоскостность базовых поверхностей на готовом ярме была не более 0.05 мм у квадруполя и у диполя в вертикальном положении, и 0.1 мм - у диполя в горизонтальном положении опертого в двух крайних точках по углам. В собранном квадруполе измерялись межшпильные расстояния и радиус

вписанной окружности относительно оправки. Для первых отклонения от проектной величины на всей длине были ~ 0.02 мм, для последнего - ~ 0.01 мм.

Обмотки мотались полым проводником из бескислородной меди прямоугольного сечения 18×21 мм для диполей и 21.9×23 мм для квадруполей, размер отверстия 9 мм и 6.5 мм соответственно, производства компании Outokumpu, Финляндия. По всей длине проводник обматывался вполнахлеста тонкой майларовой лентой и затем отожженной стеклолентой. После намотки и изоляции обмотки подвергались горячей вакуумной пропитке эпоксидным компаундом проверенным на радиационную устойчивость 10<sup>9</sup> рад.

### 3.3 Концевые пакеты

На рис.3 и 4 показана конструкция новых концевых пакетов разработанных в ИЯФ для дипольного и квадрупольного прототипов №2.

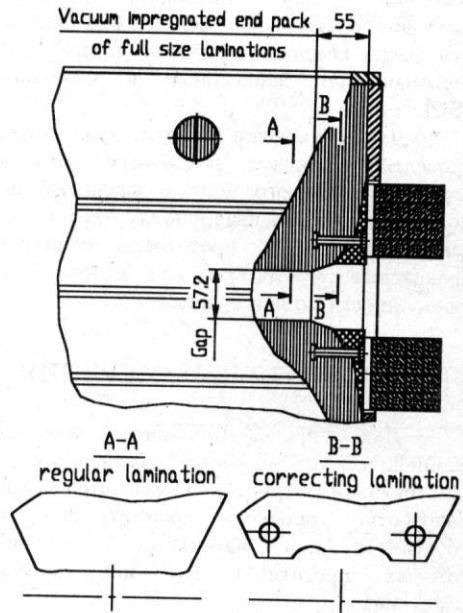


Рис. 3. Концевой пакет прототипа диполя №2



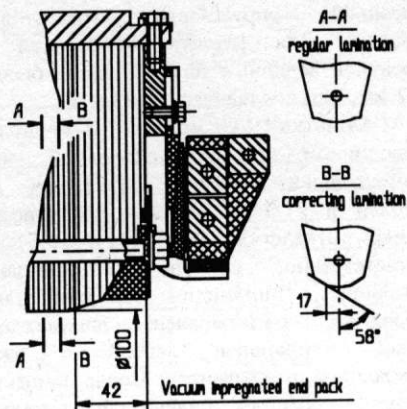


Рис. 4. Концевой пакет прототипа квадруполя №2

Новые концевые пакеты имели намного лучшую механическую жесткость. Для них были разработаны концевые шиммы и фаски корректирующие интегральную однородность поля (градиента). Они формировались с помощью корректирующих листов шихтовки специальной формы (см. рис.). Эти фаски намного крупнее и "глаже" чем первоначально заложенные в чертежах SSCL.

Для выработки формы края было проведено изучение различных методов коррекции краевого поля и градиента на моделях диполя и квадруполя. Магнитные измерения вторых прототипов показали прекрасные результаты для интегральной однородности поля и градиента.

#### 4. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для предварительного изучения специфических эффектов связанных с шихтованной структурой магнитов, при разработке коррекции краевого поля и собственно для магнитных измерений готовых прототипов мы использовали следующую технику:

1. матрицу из 11 датчиков Холла калиброванных по ЯМР и применяемых для снятия полной карты поля диполей и

квадруполей в медианной плоскости на постоянном токе;

2. комплект вертикальных и горизонтальных плоских катушек движущихся поперек магнитной оси и используемых для прецизионного измерения полных и внутренних интегральных неоднородностей (гармоник) поля в диполе на постоянном токе;

3. узкую плоскую полосу горизонтальных катушек, используемую для измерения распределения полного и внутреннего интеграла поля в диполе на переменном токе, в т.ч. и внутри вакуумной камеры;

4. комплект вращающихся катушек, используемых для гармонического анализа магнитных полей в квадруполях как на постоянном, так и на переменном токе.

Чтобы эффективно усреднить магнитные свойства листов шихтовки, мы старались минимизировать характерный период нерегулярностей поля вдоль оси и, следовательно, их амплитуду. Измеренная амплитуда нерегулярностей в диполе была в пределах  $\pm 1.5$  Гс при характерном периоде равном толщине одного пакета листов (см. п. 2.2). Остаточное поле в диполе было 8-9 Гс однородное в пределах  $\pm 0.5$  Гс вдоль всей длины, что говорит о хорошем качестве стали. По магнитным измерениям в диполе была замечена непараллельность магнитного зазора вдоль оси величиной около 30 мкм, подтвержденная затем и механическим измерениями.

Для диполя был разработан метод коррекции интегрального поля второго порядка с помощью корректирующих листов (см.рис 3). Аналогичная коррекция использовалась и в квадруполе (рис 4). В квадруполе некоторое количество корректирующих листов кроме собственно торцевых пакетов также добавлялось на концы основного ярма, таким образом, чтобы листы добавленные в концевые пакеты корректировали только вклад краевых полей в интегральную нелинейность, тогда как листы добавленные в основное ярмо корректировали только нелинейность внутреннего (удаленного от

краев) поля. Это позволяет использовать одинаковые концевые пакеты в квадрупольях любой длины, что было необходимо принимая во внимание различие длин серийных квадрупольей (см. Введение).

Измерения прототипов были сделаны для 9 уровней постоянного тока и для растущей полуволны переменного тока 10 Гц в рабочем режиме его изменения от 390 до 3900 ампер. На рис. 5, 6 и 7 показаны наиболее значительные результаты полученные для дипольных прототипов:

1. Получена интегральная однородность поля в пределах  $\Delta B/B \leq \pm 3 \cdot 4 \times 10^{-5}$  в апертуре 60 мм на токах до 2-2.5 кА, в то время как внутренняя интегральная неоднородность (т.е. усредненное поле в среднем сечении, без краев) составляла  $\Delta B/B \leq \pm 8 \cdot 9 \times 10^{-5}$  (см. рис.5).

Таким образом, мы даже скорректировали небольшую неоднородность поля в среднем сечении вызванную перешиммированием полюсов. Выпуклости и вогнутости на кривой  $\Delta B/dl / |Bdl|$  легко ассоциируются с профилем корректирующих шиммов (см. профиль корректирующих листов на рис.3).

Качество поля в квадрупольях определялось главным образом точностью их сборки, т.е. 3-ей и 4-ой гармониками поля, хотя мы значительно уменьшили с помощью краевой коррекции суммарный вклад квадрупольных гармоник (6, 10, 14 и т.д.) в интегральную нелинейность поля.

2. На постоянном токе получена стабильность эффективной длины диполя ( $L_{eff} = 1877$  мм) во всем диапазоне полей  $\Delta L_{eff} \approx 0.6-0.8$  мм, тогда как на прототипе №1 она составляла около 7.1 мм (см. рис.6). На переменном токе эта стабильность была  $\Delta L_{eff} \approx 2.2$  мм из-за того что насыщение железа ярма на торцах в этом режиме наступает существенно раньше (на меньших полях) по сравнению с постоянным током.

Для квадрупольей  $L_{eff} = 596$  мм,  $\Delta L_{eff} \approx 1.8$  мм для прототипа №2, и 5.1 мм для прототипа №1.

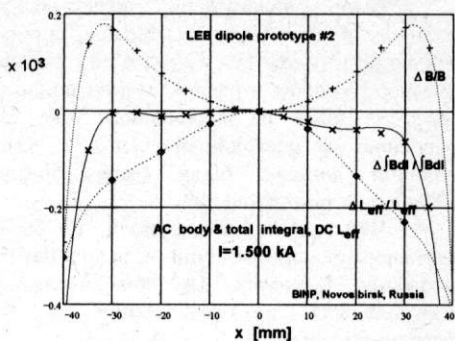


Рис. 5. Коррекция краевых полей на прототипе диполя №2.

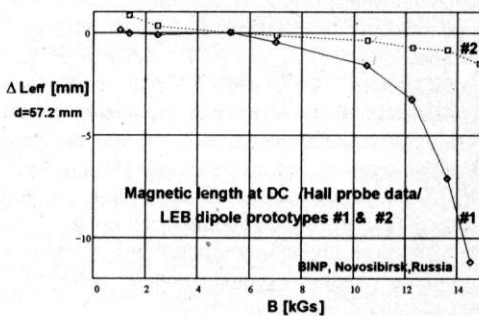


Рис. 6.  $\Delta L_{eff}(1)$  в прототипах диполя №1 и №2.

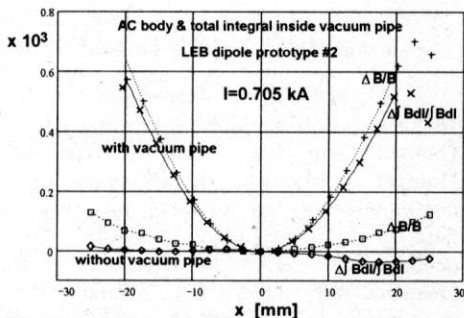


Рис. 7. Максимальное возмущение поля в прототипе диполя №2 вакуумной камерой (нерж.ст. 1 мм толщины,  $d \approx 60$  мм) на переменном токе.

3. Было обнаружено значительное различие в поведении магнитной длины дипольного прототипа №2, и вполне заметное различие в распределении полного интеграла поля на переменном токе по сравнению с постоянным (см.п.2). Эти различия должны были быть гораздо сильнее для прототипа №1.

Что касается квадруполь, не было замечено никаких отличий в величинах и поведении гармоник (в том числе и интегральных) на переменном и на постоянном токе.

4. Наблюдалось сильное нелинейное возмущение поля в диполе на переменном токе моделью вакуумной камеры из нержавеющей стали толщиной около 1 мм, представляющую собой в сечении эллипс  $\sim 55 \times 64$  мм. На рис. 7 показано это возмущение на  $I=705$  А, где оно максимально (по относительной величине). Оно приблизительно описывается секступолем с амплитудой в 40 мм апертуре в 15 раз превышающей величину полной интегральной неоднородности поля. Это возмущение предполагалось компенсировать дополнительной одновитковой обмоткой наложенной прямо на камеру.

Резюмируя, можно заключить что вторые прототипы практически полностью удовлетворили заданным требованиям.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Боба Шелдона (Bob Sheldon), Мартина Шульца (Martin Schultze), Теда Хантера (Ted Hunter), и Наньянг Ли (Nanyang Li) за постоянный интерес к работе, весь персонал опытного производства ИЯФ, и в особенности его руководителя, Б.В. Иванова, и технолога Е.С. Рувинского, за их усилия по организации производства прототипов.

## 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] R.C.York et al. "The Super Collider Low Energy Booster: a Status Report", in IEEE Particle Accelerator Conference Proceedings, San-Francisco, USA, May 1991, vol.1, pp.62-64.
- [2] V.Thiagarajan, X.Wu, R.York, R.D.Schlueter, and K.Halbach, "Design of the main dipoles and quadrupoles for the SSC Low Energy Booster", SSCL-568, March 1992.
- [3] Cherrill M.Spenser, "Fabrication of a Prototype Dipole for the SSC Low Energy Booster", SLAC-PUB-6333, December 1993.

# ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ КОЛЛАЙДЕРОВ

И.Е.Валыка, Ю.Ф.Токарев  
Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И.Будкера  
г.Новосибирск

## Генераторы импульсов на физических комплексах

На ускорительных комплексах Института ядерной физики таких как ВЭПП-2М и ВЭПП-3 – ВЭПП-4 электрон-позитронные пучки последовательно ускоряются в нескольких (до четырех) ускорительных установках. После завершения цикла ускорения в одной установке осуществляется перепуск сгустка частиц в следующую. Отдельные установки связаны между собой электронно-оптическими каналами транспортировки пучка. В эти каналы входят многочисленные магнитные элементы: поворотные и корректирующие магниты, фокусирующие линзы, впускные и выпускные магниты. Перепуски пучков частиц по каналам осуществляются не чаще, чем раз в секунду, поэтому питание магнитных элементов каналов производится короткими импульсами тока - только ко времени прохождения сгустка. Питание импульсами тока не только позволяет экономить энергию и материалы, но и является единственно возможным в случаях, когда профиль поля определяется токами, протекающими по скин-слоям шин магнитов, что, в частности, относится к питанию впускных/выпускных септум-магнитов. Для питания элементов каналов в Институте на протяжении ряда лет велись работы по созданию и совершенствованию систем импульсного питания [1]. В настоящее время на комплексах ВЭПП-3 – ВЭПП-4 работают 73 генератора импульсов, на модернизированном комплексе ВЭПП-2М от генераторов питаются до пятидесяти элементов. В данной работе представлен выработанный общий подход к построению генераторов импульсов.

## Работа типичной схемы генератора

Большинство генераторов реализовано по схеме, представленной на рисунке 1. Емкостной накопитель заряжается от зарядного устройства 1. Зарядный коммутатор позволяет задавать необходимую полярность напряжения на емкостном накопителе. Встречно-параллельно включенные тиристорные ключи разрядного коммутатора обеспечивают подключение емкостного накопителя к нагрузке. Работу генератора поясняют временные диаграммы на рисунке 2, где представлены кривые напряжения на емкостном накопителе  $U_{сн}$  и тока в нагрузке  $I_n$  для приведенной схемы (существуют модификации).



В начальный момент емкостной накопитель заряжен и зарядное устройство удерживает напряжение на накопителе на заданном уровне, компенсируя утечки в измерительные цепи.

Непосредственно перед разрядкой зарядное устройство прекращает свою работу, далее включается один из разрядных тиристоров и формируется импульс тока в нагрузке. Если нагрузкой является элемент канала, то интервал времени пролета пучка приходится на максимум тока и помечен буквой А на рисунке 2.

В процессе формирования выходного импульса тока напряжение на емкостном накопителе обычно меняет знак, что видно по кривой Усн. Поэтому перед началом зарядки запускается второй разрядный тиристор, и напряжение на емкостном накопителе меняет знак повторно. Так как во время второго импульса тока пучок в канале отсутствует, то повторный импульс не влияет на прохождение частиц по каналу.

Далее включается преобразователь, и в течение длительного времени, помеченного буквой Б, осуществляется основная зарядка емкостного накопителя. При приближении зарядного напряжения к требуемому уровню зарядный ток уменьшается, и окончательная дозарядка, а затем удержание осуществляются малым током.

На рисунке 4 представлена схема зарядного преобразователя, построенная на базе управляемого выпрямителя, на рисунке 5 – пример схемы, построенной на транзисторах.

### Диапазон характеристик импульсных генераторов

Генераторы импульсов тока на комплексах Института характеризуются широким спектром выходных параметров.

Амплитуды выходных токов в зависимости от назначения генераторов составляют от десятков ампер до двухсот тысяч ампер. Первые питают корректирующие магниты, вторые – впускные/выпускные септум-магниты.

Длительности полуволн импульсов составляют от 40 мкс до единиц миллисекунд. Первые питают септум-магниты, для которых важно, чтобы импульс был коротким и поля не успевали проникать вглубь шин магнитов. Вторые питают элементы, где важна длительность расположенного на вершине импульса участка с относительно стабильным током и полем.

Рабочие напряжения для различных генераторов могут составлять от десятков вольт до 25 кВ.

Энергоемкость емкостных накопителей энергии составляет от единиц джоулей до десяти килоджоулей и более.

Средняя мощность зарядных устройств – от единиц ватт до десяти киловатт и более.

Типичные требования на повторяемость напряжения на емкостных накопителях непосредственно перед разрядным импульсом  $\pm 0.05\%$ . Это, наряду с другими факторами, определяет стабильность поля в магнитном элементе, что важно при питании поворотных магнитов с большим углом отклонения, нацеливающих пучок в длинный канал.

Управление генераторами – задание моментов запуска разрядных тиристорных ключей и уровней напряжений на емкостных накопителях (как следствие – токов в

нагрузках) – осуществляется от ЭВМ через блоки КАМАК [2].

Многие генераторы позволяют автоматически менять полярность выходного импульса тока, что необходимо для каналов, пропускающих поочередно заряженные частицы разного знака.

## Подход к созданию генераторов импульсов для питания физических комплексов.

Опыт эксплуатации систем импульсного питания на физических комплексах и попытка разработки новых генераторов на базе транзисторных преобразователей позволили сформулировать [1] и развить общий подход к созданию этого, казалось бы, разнородного оборудования.

1. Генераторы импульсов должны проектироваться на базе унифицированных узлов, что позволяет на основе одного набора модулей в сжатые сроки проектировать и компоновать устройства, удовлетворяющие широкому диапазону требований. Это, в частности, позволяет наращивать мощность зарядных устройств за счет параллельного включения однотипных модулей и аналогично увеличивать выходные импульсные токи за счет параллельного объединения модулей, содержащих емкости и тиристорные ключи.

2. Для достижения требуемой стабильности напряжений на емкостных накопителях генераторов их компоненты должны быть спроектированы так, чтобы работающие узлы не создавали помех друг другу. Должны быть минимизированы помехи как между узлами одного генератора, так и между элементами разных генераторов. Это достигается следующими средствами.

2.1. На интервал времени, включающий в себя импульсы токов в разрядных цепях, во всех генераторах, относящихся к данному каналу или расположенных в непосредственной близости друг от друга, должна быть прекращена зарядка. Это исключает влияние сильноточных разрядных процессов на тонкие процессы зарядки.

2.2. Транзисторные преобразователи должны проектироваться так, чтобы интервалы времени, в которые допускаются коммутации силовых приборов преобразователей, могли быть привязаны к фазе внешнего задающего генератора. Аналогичные требования должны выдерживаться при проектировании прецизионных схем управления, т.е. моменты выработки решений такими схемами должны быть также привязаны к фазе задающего генератора. Это позволяет путем синхронизации работы узлов генераторов, расположенных в непосредственной близости друг от друга, минимизировать взаимные помехи. Для пояснения обратимся к рисунку 3. На верхней диаграмме представлена кривая тока одного из силовых транзисторов зарядного преобразователя. Ниже приведены характерные кривые помех, наводимых в цепи измерения в моменты коммутаций силовых транзисторов. Характер и величина этих помех могут произвольно меняться. Из диаграмм видно, что в интервале времени Б помехи, вызванные коммутациями силовых транзисторов, минимальны. Поэтому, если силовым транзисторам в преобразователях, работающих в непосредственной близости, разрешено отпираться только в пределах интервала времени А и закрываться только в пределах интервала В, то состояние измерительных цепей, зафиксированное в течение Б, будет обладать максимальной достоверностью. Следовательно, точность, с которой будет заряжена емкость, будет максимальной.

3. Процесс зарядки накопителя необходимо разбить на три этапа: на первом этапе при максимальном токе зарядного устройства происходит передача основной энергии в емкостной накопитель, на втором – дозарядка ограниченным током, на третьем – удержание напряжения на заданном уровне с требуемой точностью.

Для зарядных преобразователей, построенных на основе управляемых выпрямителей (рисунок 4), это приводит к тому, что синхронно работающие генераторы одновременно переходят в малопотребляющие режимы дозарядки - удержания и, соответственно, при этом не создают друг другу помех по питающей сети.

Для преобразователей, построенных на основе транзисторного инвертора (рисунок 5), который синхронизируется по внешнему задающему генератору, минимальное приращение напряжения на емкости определяется выражением

$$\Delta U = I_{зар} \times T_{ген} / C_n,$$

где  $I_{зар}$  – ток зарядки емкостного накопителя,  $T_{ген}$  – период колебаний задающего генератора,  $C_n$  – емкость накопителя. Снижение зарядного тока приводит к тому, что минимальное приращение будет уменьшено и, соответственно, повысится точность установки напряжения на емкости. Кроме того, при этом снижается риск того, что случайная помеха в измерительной цепи на последнем этапе зарядки приведет к серьезным неточностям.

### Заключение

На основе предложенного подхода были построены низковольтные (до 800 В) генераторы импульсов для питания элементов модернизированного комплекса ВЭПП-2М. К настоящему времени эти генераторы проработали в составе комплекса более четырех лет.

Был разработан набор модулей, позволивший построить высоковольтные генераторы импульсов для питания впускных/выпускных магнитов специализированного источника синхротронного излучения Сибирь-2, находящегося в стадии пуска.

На фото на рисунке 6 представлен ряд радиостоек с низковольтными генераторами импульсов из состава оборудования, работающего на комплексе ВЭПП-2М.

### Литература

1. Карлинер М.М. и др. Система импульсного питания элементов комплекса ВЭПП-4 на основе унифицированного ряда генераторов модульного типа. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям. ОИЯИ, Дубна, 1978, т.1, с.337.
2. Э. А. Купер Методологические основы построения аппаратуры для систем автоматизации электрофизических установок. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям. Москва, 1990, т.1, с.74.

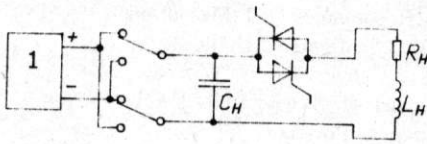


Рис.1 Схема генератора импульсов.

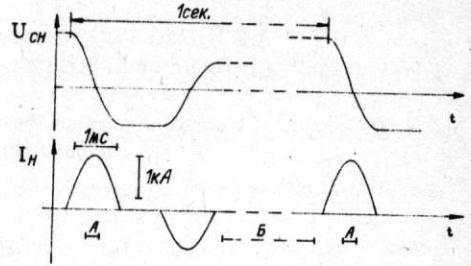


Рис.2 Кривые напряжения на емкости накопителе  $U_{CH}$  и тока в нагрузке  $I_H$

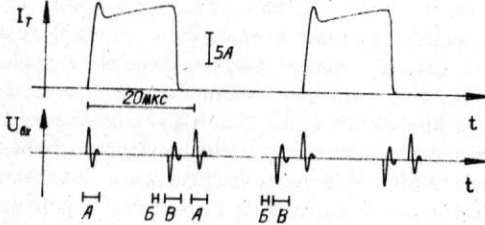


Рис.3 Характерная кривая тока силового транзистора  $I_T$  и помехи в измерительных цепях  $U_{BX}$

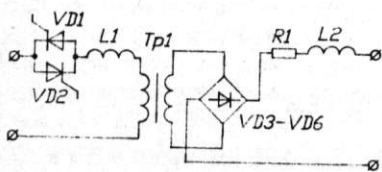


Рис.4 Схема зарядного преобразователя на основе управляемого выпрямителя.

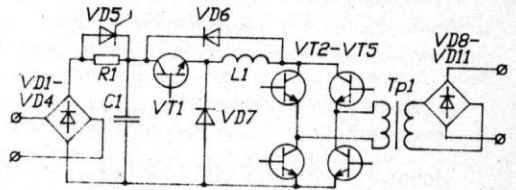
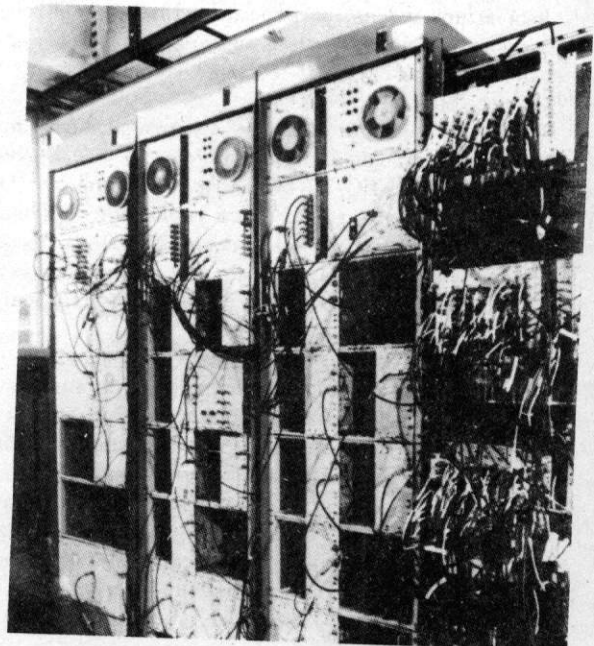


Рис.5 Схема зарядного преобразователя на основе транзисторного инвертора.

Рис.6 Фотография трех радиостоек импульсных генераторов комплекса ВЭП-2М. (Справа стойка с управляющим крейтом КАМАК.





## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИОННЫМИ ИМПЛАНТЕРАМИ.

А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, А.Н.Малыгин, Г.Г.Матюшин,  
В.П.Останин, Б.Н.Сухина, В.С.Тупиков, С.Н.Чумаков.

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

### ВВЕДЕНИЕ.

В докладе описываются две системы управления для ионных имплантеров ИОН-1500 и ИОН-300 [1,2]. Первая - на базе блоков КАМАК, вторая - распределенная система управления, разработанная специально для использования на электрофункциональных установках и состоящая из нескольких оригинальных интеллектуальных многофункциональных одноплатных управляющих станций, соединенных с центральным компьютером посредством дуплексной оптической связи (изоляция до 2 МВ). Системы адаптированы к средам с высоким уровнем электрических импульсных помех и наводок. Все подсистемы управляются центральным IBM-PC/AT совместимым компьютером с помощью однозадачного в первом и многозадачного с разделением времени во втором случае программного обеспечения и используют для вывода многооконный графический интерфейс.

### РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ.

Ионные ускорители ИОН-300 и ИОН-1500 предназначены для применения в электронной промышленности, для модификации поверхности и для других технологий с использованием заряженных ионов различных элементов с энергиями до 300 КэВ и до 1.5 МэВ соответственно. Они имеют следующий состав основных физических систем и выполняемых ими функций: ионный источник, размещенный под потенциалом до 2 МВ, высоковольтный выпрямитель, электромагнитный сепаратор, канал транспортировки пучка ионов, технологическая камера с системой загрузки/выгрузки образцов через вакуумные шлюзы; вакуумная система, система контроля и автоматического управления технологическим процессом.

Все системы установки автоматизированы. Управление для ИОН-1500 было реализовано по традиционной для института схеме ЭВМ-КАМАК. Всем процессом управляет центральный IBM-PC/AT совместимый компьютер. Он связан через КАМАК-адаптер в IBM-PC с КАМАК-контроллером и управляет следующими модулями: КАС (коммутатор аналоговых сигналов); АЦП (аналого-цифровой преобразователь); ПП (приемо-передатчик); 2 канала ШИМ-ЦАП; УР-ВР (управляющий и входной регистры).

КАС служит для коммутации и представления в цифровом виде на интегрирующем АЦП одного из сигналов:

- энергии ионов;
- токов пучка ионов и делителя трубки;
- токового сигнала профилометра;
- напряжения 1-ой секции ускорительной трубки;
- зарядного тока выпрямителя;
- напряжения и тока первичной обмотки в/в выпрямителя;
- напряжения и тока генератора питающего выпрямитель;
- тока электромагнитного сепаратора;
- тока ламелей коллиматора на внутреннем и внешнем радиусе.

Через приемо-передатчик осуществляется управление натеканием газа, отсосом и фокусировкой ионного пучка, питанием анода ВЧ генератора, и контроль за температурой, бортовыми питаниями высоковольтного терминала и мощностью высоковольтного терминала.

Первый ШИМ-ЦАП задает ток электромагнитного сепаратора а второй - энергию ускоренного пучка.

УРВР производят включение шиберов и клапанов вакуумной системы и запуск датчика профилометра.

Управляет всеми узлами системы программа, написанная на FORTRANe для PC под MS-DOS.

Для автоматизации ИОН-300 за основу были взяты распределенность системы управления и многозадачность в управляющей программе. За каждый отдельный технологический процесс в установке отвечает отдельная интеллектуальная локальная станция наделенная рядом измерительных и управляющих функций (ЦАП, АЦП, таймеры, I/O - регистры и т.д.). Эта станция обладает способностью как автономной работы после предварительной загрузки программы из центрального компьютера так и под непосредственным управлением центрального компьютера по стандартному протоколу. Функциональная разделенность процессов на аппаратном уровне а также использование многозадачного программного обеспечения (многозадачных ОС или компиляторов языков высокого уровня типа МОДУЛА-2) существенно упрощает программирование, которое сводится к написанию алгоритма функционирования отдельного узла установки в виде процедуры как в нашем случае (МОДУЛА-2) или задачи (QNX, UNIX). Причем каждая такая процедура имеет два вида связи: вниз - с интеллектуальной станцией и вверх с программным менеджером, который уже использует данные со всех узлов и раздает приказы каждой процедуре.

Основой этой распределенной системы управления является многофункциональный одноплатный помехоустойчивый контроллер ЛОКУС, который включает в себя:

- аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) с непрерывным интегрированием входного сигнала, двухпроводного типа, гальванически изолированный, с программируемым временем измерения от 0.2 до 26 мсек (разрядность от 9 до 16 бит соответственно) при диапазоне входных напряжений: от +5.16 до -5.16 В.
- аналоговый двухпроводный 32-х канальный коммутатор.
- 6 каналов 14-разрядного ШИМ-ЦАПа (диапазон выходных напряжений от +5.08 до -5.08 В). При быстрой смене кода, преобразователь имеет на выходе плавный переходной процесс без перерегулирования с длительностью 0.25 сек;
- 32 входных и 24 выходных регистра (ТТЛ);
- 5 каналов программируемых многофункциональных таймеров коммутируемых перемычками и обладающие возможностью счета импульсов, измерения интервалов времени, выдачи задержанных импульсов, импульсов управляемой частоты и длительности. Возможен как внутренний так и внешний запуск.
- защита всех входных и выходных сигналов, проходящих через разъемы связи с объектами с помощью диодно-резисторных цепочек (115 линий).
- процессор i8085;
- ПЗУ-8КВ и энергонезависимое ОЗУ-2КВ (время хранения данных не менее 2-х лет.
- дуплексная оптоволоконная связь с компьютером со скоростью до 19200 бод.

Процессор имеет автоматический рестарт после сбоя или заикливания программы а также после внезапных провалов в питающем напряжении.

Для связи РС-ЛОКУС разработаны последовательный 6-канальный интерфейс для IBM-PC и адаптер для перехода с оптической световодной линии связи на логические ТТЛ уровни (6 каналов). Адаптер имеет буферы FIFO на каждом входе/выходе емкостью по 32 байта каждый, что дает возможность увеличить скорость обращения РС к порту а также избавиться от потери данных n-го процесса во время обслуживания процессором k-го процесса. Интерфейс оснащен прерываниями на каждый вход/выход а также на ошибки связи.

Для избежания серьезных аварий на объекте в результате сбоя или ошибки программирования был разработан аппаратный модуль блокировок аварийных состояний. Этот модуль выполняет также функции усилителя для прямого привода мощных нагрузок, таких как реле, лампочки или цепь запуска оптоэлектронного тиристора. Такие тиристоры способны коммутировать нагрузки мощностью до 20 *КВт*. В системе автоматизации ИОН-300 на данный модуль блокировок возложена функция по предотвращению нештатных ситуаций, связанных с ошибкой оператора или выхода какого-либо узла из строя.

В отличие от КАМАКА эту одноплатную интеллектуальную станцию стало возможным размещать в непосредственной близости от конкретной управляемой системы. На ИОН-300:

- два ЛОКУСа работает под потенциалом до 300кВ в системе ионного источника;
- один ЛОКУС с блоком арбитра управляет вакуумно-газовой системой имплантера;
- один ЛОКУС с блоком арбитра управляет высоковольтной системой имплантера;
- два ЛОКУСа полностью управляют камерой облучения полупроводниковых пластин, включая управление двумя шаговыми двигателями и набором дозы облучения.

Для измерения заряда разработан блок, образующий совместно с ЛОКУСом, преобразователь заряд-цифра с дискретностью 10 *кулон/отсчет* и диапазоном измерения 1,6 *мА*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Более чем двухлетний опыт эксплуатации (около 1000 рабочих часов) многофункционального контроллера ЛОКУС показал хорошую его надежность. Был проведен ряд экспериментов, показавших отсутствие остановов (например в результате кратковременных замыканий на общий провод произвольного из печатных проводников на плате ЛОКУСа через конденсатор 0.01 *мкФ*). Отсутствовали остановки также в реальной обстановке при наличии высоковольтных пробоев напряжением вплоть до 300 *КВ*. Распределенная система управления оказалась удачной и в смысле написания управляющей программы для нее. Усилия программиста не расплылись теперь на охват всей системы в целом и взаимосвязей между ее узлами - теперь он сосредотачивал свои усилия на написании и отладке программных модулей ответственных за какую-то часть системы.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Н.И.Алиновский, А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, Н.С.Диканский, Н.П.Запяткин, Г.Г.Матюшин, А.Н.Малыгин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток, С.Н.Чумаков, Ионный ускоритель для промышленности ИОН-300, Труды XIV конференции по ускорителям заряженных частиц, 1994.

[2] Н.И.Алиновский, А.Д.Гончаров, Н.С.Диканский, Н.П.Запяткин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток., Ионный ускоритель для промышленности ИОН-1500, Труды XIV конференции по ускорителям заряженных частиц, 1994.

## СИСТЕМА ПИТАНИЯ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

А.Д.Гончаров, В.П.Останин, Б.Н.Сухива, И.Л.Черток, С.Н. Чумаков.

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

Описана система питания ионных источников, расположенных внутри высоковольтного терминала (до 2 Мегавольт). Система включает в себя набор унифицированных функциональных блоков с использованием высокой частоты (20 КГц) и нелинейных регулирующих магнитных элементов. Система обладает высокой удельной габаритной мощностью и предназначена для работы с высоким уровнем перегрузки. Решена важная задача передачи мощности (до 2.2 КВт, 20 КГц) через высоковольтный зазор (до 2 Мегавольт) для питания оборудования внутри высоковольтного терминала.

**ВВЕДЕНИЕ.** В состав системы питания ионных источников входит унифицированный ряд модулей питания, которые различаются своей исполнительной частью и выходными характеристиками. В качестве регуляторов используются нелинейные магнитные элементы - магнитные усилители, которые работают на повышенной частоте 20 КГц. Блоки системы характеризуются высокой удельной габаритной мощностью и устойчивостью к перегрузкам. Передача мощности через высоковольтный промежуток для питания терминала осуществляется автономно, что делает систему питания ионного источника независимой от энергии ускорителя.

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ МОДУЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЕРМИНАЛА.** По назначению, в состав терминала входят три типа блоков:

1. Блоки стабилизации - служащие для стабилизации сетевых напряжений в крейте и ограничения передаваемой избыточной мощности:

Стабилизатор параллельного типа:

(350 В 1 КВт 20 КГц, 28 В 20 КГц, +24 В, +6 В.)

Стабилизатор параллельного типа имеет две петли обратной связи: аппаратную - в качестве регулятора в цепи стабилизации используется магнитный усилитель, включенный параллельно с нагрузкой, и программную - измеренное значение о величине избыточной мощности стабилизатора передается в компьютер для коррекции выходной мощности питающего высоковольтный терминал генератора.

Стабилизатор последовательного типа:

(350 В 1 КВт 20 КГц, 28 В 20 КГц, +24 В, +6 В) -используется для варианта двух-крейтовой системы питания ионного источника. В качестве регулятора служит магнитный усилитель, включенный в цепь стабилизации последовательно с нагрузкой.

Стабилизаторы потребляют мощность через высоковольтные разделительные трансформаторы:

T1- напряжение развязки 1.5 МВ, Мощность до 2.5 КВт.- в зависимости от величины высоковольтного газового промежутка. T2- напряжение развязки 30 КВ, Мощность до 1.0 КВт.

2. Служебные (сервисные): многофункциональный одноплатный процессорный контроллер "ЛОКУС" [1] или приемо-передатчик (в более ранних разработках), совместимые по разъему и служащие для обмена данными с компьютером, выдачи управляющих напряжений-уставок и контроля параметров в блоках питания ионного источника. Связь между контроллерами крейтов и компьютером осуществляется по дуплексной оптоволоконной линии, способной выдерживать высокий потенциал ускорителя, в формате совместимом с RS232 со скоростью 19.2 Кбод.



3. Управляемые блоки, разработанные для питания некоторых типов ионных источников представлены в таблице 1:

Источник питания пьезокерамического натекателя (допускается потенциал корпуса натекателя до 200 В)	1300 В	1 мА
Источник питания супрессора	-5 КВ	3 мА
Источник питания экстрактора	10 КВ	5 мА
Источник питания экстрактора	30 КВ	20 мА
Источник питания нагревателя	500 Вт	
Источник питания электромагнита	30 В	3 А
Источник питания анода лампы ВЧ источника	1200 В	0.3 А
Источник питания накала лампы ВЧ источника	7 В	70 А
Источник питания разряда дуги (управляемый поджиг дуги от внешнего импульса)	0-150 В	8 А 500 Вт
Динамический диапазон выходных параметров	20	
Стабильность выходных параметров	+ 0.1 %	

Приведенный набор блоков пригоден для питания ВЧ ионного источника, дуоплазматрона с полым катодом, дуоплазматрона с накаливаемым катодом или иных близких к разработанным по потребляемой мощности.

**КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЕРМИНАЛА С ТРАНСФОРМАТОРОМ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ.** В конструкции реализован функционально-блочный принцип.

Электронные блоки размещены в каркасе VME-типа, собранном из алюминиевого профиля специальной конфигурации.

Управляющая часть каждого из блоков питания собрана на одинаковых платах, объединенных общей шиной со стабилизатором, приемо-передатчиком или процессорным контроллером крейта "ЛОКУС".

В качестве регуляторов на управляющих платах установлены нелинейные магнитные элементы-магнитные усилители одного из трех типоминалов: 0.1 КВт 28 В, 0.5 КВт 350 В, 1.0 КВт 350 В, которые работают на повышенной частоте 20 КГц, выполнены на ферритовых кольцах в виде компактного моноблока.

Оригинальная конструкция позволила совместить управляющую функцию обмотки подмагничивания магнитного усилителя с функцией фильтра-дресселя.

Достоинством магнитного усилителя является его высокая надежность и способность ограничивать ток короткого замыкания.

Исполнительные части блоков, в зависимости от их выходных параметров, смонтированы на управляющих платах, либо в виде отдельных модулей. Для блоков с выходной мощностью свыше 100 Вт или напряжением превышающем 10 КВ исполнительная часть выделена в отдельный модуль. Высоковольтные цепи модулей залиты компаундом типа "ВИКСИНТ".

Передача электрической мощности для питания терминала осуществляется на частоте 20 КГц резонансным трансформатором Т1 броневого типа, первичные и вторичные цепи которого индуктивно связаны и разделены высоковольтным газовым промежутком. Сердечник трансформатора изготовлен в виде двух чашек диаметром 200 мм из феррита марки М700НМ по специальной технологии. Внутри чашек уложены обмотки трансформатора проводом типа "литцендрат", выполненные из тонких изолированных жил, перевитых между собой.

Выбору материала и формы сердечников, обмоток трансформатора, предшествовал анализ по оптимизации параметров для достижения максимальных значений добротности первичного и вторичного контуров, коэффициента магнитной связи между обмотками

и минимизации потерь. В результате не требуется принудительное охлаждение вторичной обмотки трансформатора находящейся под высоким потенциалом в газе  $SF_6$ .

В таблице 2. приведены основные характеристики трансформаторов для двух ускорителей ИОН-300 и ИОН-1500 на энергию 300 КэВ и 1500 КэВ соответственно.

Тип ускорителя	ИОН-300	ИОН-1500
Высоковольтный промежуток	60 мм	105 мм
Передаваемая электрическая мощность	2.0 КВт	0.3 КВт
Коэффициент магнитной связи	0.215	0.087
Ненагруженная добротность	66.7	67.0
Коэффициент полезного действия	0.90	0.75

Для передачи мощности из первого во второй крейт служит трансформатор  $T_2$  с П-образным ферритовым сердечником. Обмотки трансформатора залиты специальным компаундом под давлением с предварительной сушкой в вакуумном объеме.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В заключение хотелось бы отметить высокие эксплуатационные характеристики системы питания с использованием магнитных усилителей, так как показатель надежности для аппаратуры, работающей в труднодоступном объеме в условиях возможных высоковольтных пробоев является определяющим.

## литература

- [1] А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, А.Н.Малыгин, Г.Г.Матюшин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, В.С.Тупиков, С.Н.Чумаков. Системы управления ионными имплантерами, Труды XIV конференции по ускорителям заряженных частиц, октябрь 1994.

## СОСТОЯНИЕ РАБОТ НА "СТЕНД 20" - 20-МЕТРОВОМ МАКЕТЕ РЕГУЛЯРНОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА ВЛЭПП.

А.В.Антипов, А.И.Бажан, В.Е.Балакин, Ю.Д.Валяев, В.Ф.Кузнецов, А.В.Ларионов, С.Ю.Петров, О.В.Проничев, А.В.Романов; В.В.Сахаров, Н.А.Соляк, А.И.Слепцов, В.Е.Теряев, К.В.Углеков, В.Ф.Фогель, В.М.Фурса, Ю.В.Хренов, В.И.Чашурин, И.В.Чаюков, В.А.Чудаков, Е.И.Шашкевич, Т.С.Щепанюк.

**Филиал Института ядерной физики СО РАН, Протвино**

Ю.Г.Бамбуров, А.Ф.Булушев, В.В.Кобец, В.В.Колмогоров, Г.С.Крайнов, Н.И.Сапутин, Г.И.Яснор.

**Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск**

В.В.Перов, С.А.Петров, С.М.Суворова, Л.Ф.Чукина.

**" ОКБ Контакт ", Саратов**

В ФИЯФ СО РАН создана установка "СТЕНД 20", предназначенная для испытания элементов регулярной части ускорительного комплекса ВЛЭПП. В работе представлены результаты испытаний системы высоковольтного питания клистронов. В отличие от традиционных клистронов с диодными электронно-оптическими системами, которые питаются импульсным напряжением, в проекте ВЛЭПП предполагается применение клистронов с сеточным управлением пучка[1], что позволяет сделать систему питания на постоянном напряжении. Стоимость такого проекта значительно ниже стоимости традиционных схем ВЧ питания линейных ускорителей. Важное значение для серийного производства имеет также относительная простота такой системы высоковольтного питания.

Проект системы высоковольтного питания комплекса ВЛЭПП описан в работе [2]. Для высоковольтного питания установки (рис. 1) применена менее мощная чем в [2] схема, в которой источником высокого напряжения является однофазный двухполупериодный каскадный умножитель напряжения (УН), работающий на частоте 20 кГц [3]. Питается УН от тиристорного преобразователя частоты (ТП). Через защитный резистор УН заряжает коаксиальную формирующую линию, соединенную через ограничительное сопротивление с ускорительной трубкой (УТ) клистрона. Формирующая линия работает в режиме частичного разряда, ее волновое сопротивление около 300 Ом. Ограничительное сопротивление величиной 20 Ом предназначено для ограничения тока в трубке во время пробоя. Объем линии заполнен элегазом под давлением 12 ата. Питание накальной цепи катода и формирование в/вольтных импульсов управления на сетке производится с помощью блока управления пушкой клистрона (БУК). Питание блока осуществляется через коаксиальный разделительный трансформатор с газовой изоляцией рассчитанной на полное рабочее напряжение. Запуск и регулирование амплитуды импульсного напряжения на сетке клистрона осуществляется оптическим каналом управления. Контроль работоспособности БУК производится через второй оптический канал. Параметры системы питания приведены в таблице 1.

Стенд полностью автоматизирован на базе четырех ЭВМ типа PC/AT, подключенных к сети NOVELL контроллерами Ethernet. ЭВМ взаимодействуют с каналами измерения и управления через оборудование, выполненное в стандарте "КАМАК" и "ВИШНЯ".

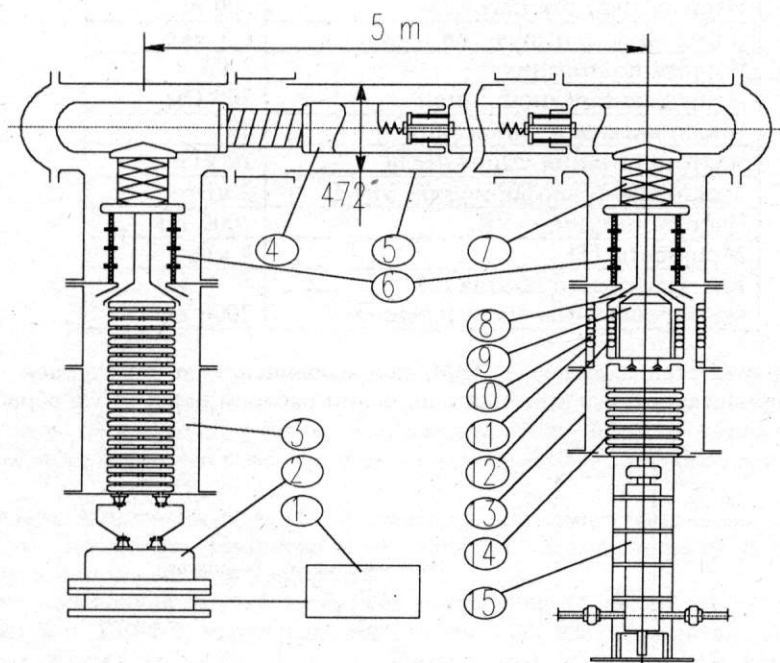


Рис. 1. Конструктивная схема стенда для испытания клистронов.

1-ТП; 2-в/вольтный трансформатор; 3-каскадный умножитель напряжения; 4-формирующая линия; 5-корпус фидера; 6-проходной изолятор; 7-ограничительное сопротивление; 8-в/вольтный ввод; 9-блок управления клистроном; 10,12-обмотки разделительного трансформатора; 11-корпус трансформатора; 13-корпус клистрона; 14-электронно-оптическая система клистрона; 15-клистрон.

Размещение электроники в непосредственной близости с ускорителем является одним из основных требований с технологической и экономической точек зрения для больших линейных коллайдеров типа ВЛЭПП. Поэтому основная часть электроники (исключая ЭВМ, систему блокировок и радиационный контроль) была расположена в защищенном зале, моделирующем тоннель ускорителя. Это потребовало помимо основной задачи управления стендом, решать проблему оптимального расположения электроники для ее электромагнитной и радиационной совместимости с установкой.

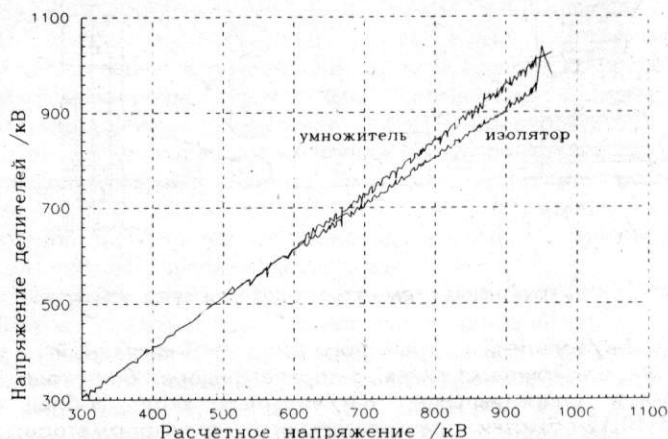


Результаты измерений основных каналов заносятся в файл - журнал, находящийся на сервере стенда. Разработанное программное обеспечение позволяет в реальном времени осуществлять обработку полученных резуль-

**Таблица 1.**

Проектное напряжение	1150 кВ
Импульсный ток нагрузки	300 А
Длительность импульсов тока	0.5 мкс
Частота повторения	2 Гц
Импеданс зарядной линии	300 Ом
Число каскадов умножения	40
Частота питания умножителя	20 кГц
Мощность трансформатора БУК	2 кВт
Частота питания БУК	1000 Гц
Мощность ТП	4 кВт
Вес элегазового объема с высоковольтным оборудованием	2000 кг

татов работы стенда с любой ЭВМ, подключенной к компьютерной сети, в виде графического представления с широким набором параметров обработки.



**Рис. 2.** Зависимость высокого напряжения на каскадном умножителе и проходном изоляторе от расчетного напряжения

Система управления включает следующее количество каналов:

- Аналоговые измерения - 56
- Импульсные АЦП - 21
- Ввод/вывод двоичных состояний - 20
- Временные - 16
- Каналы ЦАП - 24
- Радиационные измерения и контроль - 6

Первые высоковольтные испытания стенда производились без ускорительной трубки клистрона. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

Расчетное напряжение это произведение напряжения на входе каскадного умножителя на число каскадов умножения. Напряжение контролировалось в/вольтными делителями каскадного умножителя и проходных изоляторов. Нелинейное поведение высокого напряжения на делителе каскадного умножителя выше 600 кВ по всей видимости связано с коронным разрядом в

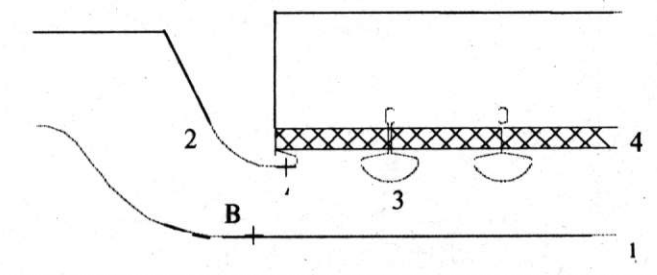


Рис. 3. Проходной изолятор клистрона.

1-центральный электрод; 2-экран; 3-экранирующий электрод; 4- керамический изолятор; А,В-точки с максимальной напряженностью на поверхности.

умножителе напряжения. На рис. 3.показан эскиз самого напряженного места проходного изолятора. Изолятор изготовлен из ультрафарфора. В точке В достигнута напряженность 230 кВ/см.

Ускорительная трубка клистрона состоит из 16 колец, изготовленных из керамики ВК94-2 наружным диаметром 205 мм и высотой 20 мм и спаянных между собой через медные прокладки, к которым с вакуумной стороны крепятся элементы электронно-оптической системы, а с газовой стороны резистивный делитель напряжения и защитный разрядник.

Включения системы высоковольтного питания с ускорительными трубками клистрона и последующая тренировка трубок выявили несколько важных проблем, связанных, в основном, с технологией их изготовления. Здесь нужно отметить, что первые высоковольтные испытания и отработка технологии вакуумной пайки проходили одновременно. Было замечено, что после изготовления УТ на некоторых кольцах, начиная с достаточно малого напряжения, появляется проводимость, которая нелинейно возрастает с ростом напряжения. Возможные механизмы образования этой проводимости описаны в [4]. В экспериментах показано, что в процессе высоковольтной тренировки удается поднять ее порог до напряжения не менее 50 кВ. При этом процесс тренировки часто сопровождается ухудшением вакуума и ток зависит величины в несколько мА. На рис. 4 приведена характерная зависимость тока утечки от напряжения на зазоре в процессе тренировки. Напряжение 50 кВ выбрано исходя из того, что некоторые керамические кольца до большего напряжения оттренировать не удастся, так как тренировка в основном происходит только при пробоях, а на этих кольцах увеличение напряжения вплоть до 100 кВ на одно кольцо сопровождается резким увеличением тока, но при этом пробои отсутствуют. В настоящее время готовы и будут испытываться трубки, изготовленные по технологии,

предложенной в [4]. В экспериментах также показано, что при напряжении выше 100 кВ (50кв/см) на зазоре происходит пробой по телу керамики, приводящий к выходу УТ из строя. Похожие результаты приведены в [5].

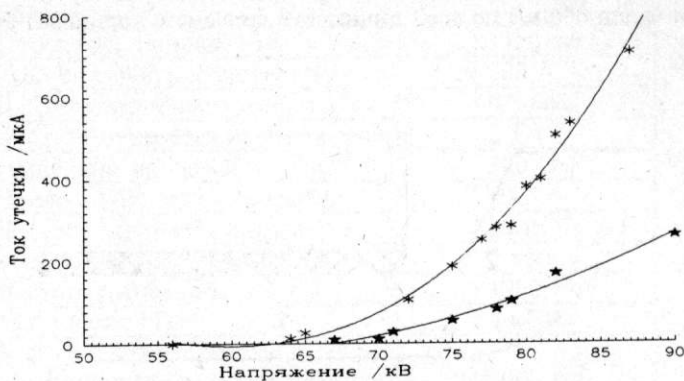


Рис. 4. Зависимость тока утечки одного высоковольтного зазора от напряжения в процессе тренировки.

Для защиты керамики от превышения напряженности поля свыше предельной-50 кВ/см, установлены защитные кольца с газовой стороны трубки.

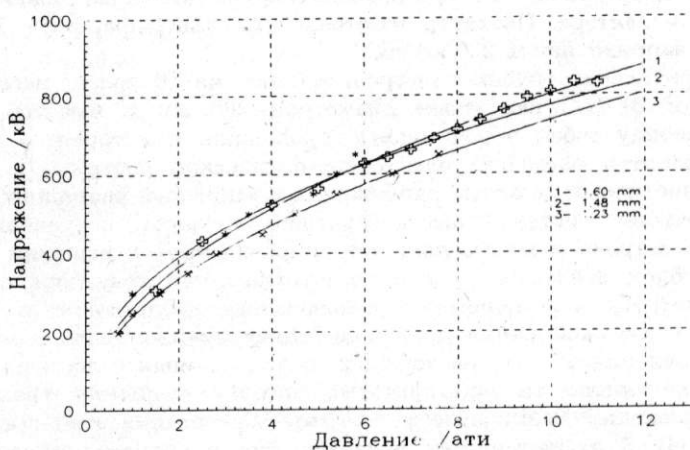


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения 16-ти последовательно включенных высоковольтных зазоров от давления элегаза при различных величинах зазора между защитными кольцами.

Схематично геометрия защитных колец показана на рис. 6, зависимость пробивного напряжения защиты от давления элегаза для трех величин зазора приведена на рис. 5. Тщательное изготовление и настройка защиты позволила в последующих экспериментах избежать пробоев приводящих к порче ускорительных трубок.

Высоковольтная тренировка ускорительной трубки клистрона показала, что есть проблемы с электрической прочностью вакуумной стороны трубки. Геометрия самого напряженного места ускорительной трубки представлена на рис. 6. Напряженность на поверхности фокусирующего электрода составляет 350 кВ/см, напряженность на экранирующем электроде 150 кВ/см при полном напряжении на трубке 1150 кВ.

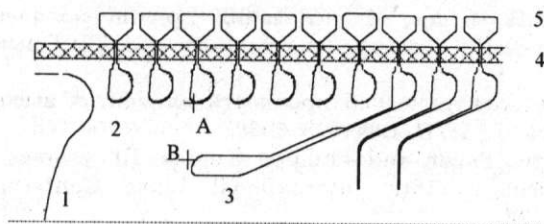


Рис. 6. Часть электронно-оптической системы клистрона

1-управляющий электрод; 2-экранирующий электрод; 3-фокусирующий электрод; 4-керамический изолятор; 5-защитные электроды; А,В-точки с максимальной напряженностью.

Равномерное распределение напряжения по всем 16-ти зазорам трубки обеспечивается резистивным делителем напряжения, ток с которого также контролируется.

Тренировка отдельно верхней половины трубки при выключенном катодном узле показала возможность достижения и устойчивой работы без пробоев при напряжении на ней не менее 400 кВ, при этом напряженность на поверхности электрода в самом критическом месте составляет 100 кВ/см. При включенном катодном узле напряжение снижалось до 360 кВ, при этом напряженность составила 90 кВ/см. Так для сравнения в клистроне ТН2143 максимальная напряженность в электронно-оптической системе 88 кВ/см [6], при импульсном напряжении длительностью 100 нс. При дальнейшем увеличении напряжения появляются автоэмиссионные токи, которые приводят к перераспределению напряжений на высоковольтных зазорах, что приводит к полному пробое системы. Выше 360 кВ происходит увеличение среднего тока в/вольтовой системы, что вызвано автоэмиссионными токами. Это также было зафиксировано радиационными измерениями.

Высоковольтная тренировка при полном включении электронно-оптической системы клистрона позволила поднять напряжение до 850 кВ при выключенном катодном узле и 750 кВ при включенном. Это позволило проводить дальнейшее тестирование электронно-оптической системы клистрона с пучком и вести работы с СВЧ.

## Литература.

1. L.N. Arapov, P.V. Avrakhov, V.E. Balakin, V.I. Chashurin et al., 14 GHz VLEPP Klystron, //EPAC92, Third European Particle Accelerator Conference, Berlin 24-28 March, 1992.



2. Балакин В.Е., Каситский В.Ф., Кобец В.В., Крайнов Г.С. и др. Проект системы высоковольтного питания комплекса ВЛЭПП. //Труды 12 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990. - ОИЯИ, Д9-92-235, Дубна, 1992, т.1, с.260.
3. Булушев А.Ф., Валяев Ю.Д., Диканский Н.С., Самойлов Л.Г. Каскадные генераторы для ускорения электронно-ионных пучков (200-600 кэВ) // Препринт ИЯФ СО АН СССР 90-79. Новосибирск, 1990.
4. Гриштутин Г.С., Зыченко Л.Н. и др., Исследования причин появления проводимостей по изолятору в ЭВП, //Электронная техника сер. СВЧ вып.10 (346), 1982.
5. Широков В.В., Исследование электрической прочности элементов высоковольтных ускорительных трубок, // ПТЭ. 1990. N5. С 38.
6. Jean-Charles Terrien, Georges Failon and Philippe Guidee, RF sources for recent linear accelerator projects, //16th International Linac Conference, Ottawa Ontario 1992 august 23-28.

# Проект мощного лазера на свободных электронах на базе разрезного микротрона-рекуператора

Н.А. Винокуров, Н.Г. Гаврилов, Э.И. Горникер, Г.Н. Кулипанов,  
И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, Г.И. Эрг, Ю.И. Левашов,  
А.Д. Орешков, С.П. Петров, В.М. Петров, И.В. Пинаев,  
В.М. Попик, И.К. Седяров, Т.В. Шафтан, А.Н. Скринский,  
А.С. Соколов, В.Г. Вещеревич и П.Д. Воблый  
Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск

## Аннотация

В Новосибирском научном центре создается лазер на свободных электронах с большой средней мощностью. Целью данного проекта является обеспечить пользовательской установкой Сибирский центр фотохимических исследований. В статье описаны характеристики установки и состояние дел по проекту.

## 1 Введение

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) по сравнению с обычными лазерами имеют преимущества и недостатки (см., например, [1, 2]). Главными преимуществами являются перестраиваемость и высокая средняя мощность, а недостатками — радиационная опасность, большие размеры и стоимость. Одной из перспективных целей является создание ЛСЭ на среднюю мощность 0.1–1 МВт.

За последние пять лет мы разработали проект такого ЛСЭ для работы в инфракрасном диапазоне [3, 4]. Отличительными чертами данного проекта являются:

- а) Использование продемонстрированной ранее рекуперации энергии электронов [5] в разрезном микротроне-рекуператоре;
- б) Низкочастотная ВЧ система [6];
- в) Использование так называемого “электронного вывода” света [7, 8].

## 2 Разрезной микротрон-рекуператор

Первый вариант проекта данного ускорителя был опубликован ранее [3]. Здесь же мы описываем вариант, модернизированный для ЛСЭ для Сибирского центра фотохимических исследований.

Таблица 1: Параметры микротрона-рекуператора

Длина волны микротрона	166.3 см
Количество ВЧ резонаторов	20
Количество дорожек	4
Амплитуда ВЧ напряжения в резонаторе	0.7 МВ
Энергия инжекции	2.1 МэВ
Конечная энергия электронов	51 МэВ
Конечный энергетический разброс	0.45%
Конечная длина электронных сгустков	20–100 пс
Конечный пиковый ток	20–100 А
Частота следования электронных сгустков	2–45 МГц
Средний ток	4–100 мА

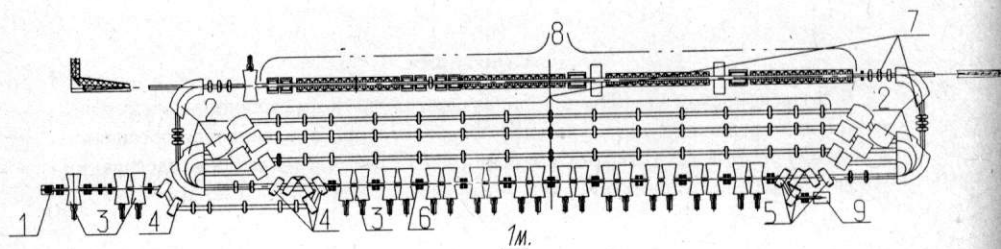


Рис. 1: Схема микротрона-рекуператора

Схема микротрона и его параметры показаны на Рис. 1 и в Таблице 1. Микротрон состоит из инжектора 1, двух магнитных  $180^\circ$  поворотных систем 2, общего прямолинейного промежутка с ВЧ резонаторами 3 (промежуток является общим для электронов с различными энергиями), магнитов инжекционной системы 4 и системы вывода 5, фокусирующих соленоидов 6, четырех прямолинейных промежутков с квадрупольными линзами 7, магнитной системы ЛСЭ 8, размещенной на четвертом промежутке и поглотителя 9.

Электронная пушка инжектора на энергию 300 кэВ служит для получения 1 нс электронных сгустков с частотой повторения 45 МГц. После прохождения модулирующего ВЧ резонатора электронный сгусток сжимается в дрейфовом промежутке до 200 пс и ускоряется до 2.1 МэВ в двух следующих ВЧ резонаторах. Электроны инжектируются на общую дорожку микротрона при помощи двух пар идентичных  $65^\circ$  поворотных магнитов с противоположными знаками. На выходе системы инжекции длина сгустка составляет 100 пс.

Все ВЧ резонаторы на общей дорожке расположены на расстоянии длины полуволны друг от друга.

Сепарирующий поворот для первых трех дорожек микротрона состоит из  $180^\circ$  магнитного зеркала с двумя  $65^\circ$  отклоняющими магнитами противоположного знака на каждой дорожке. Данная магнитная система является ахроматичной и ее вертикальная и горизонтальная оптические матрицы равны матрицам пустого проме-

жутка. Разность длин орбит между последовательными дорожками микротрона составляет примерно одну длину волны ВЧ системы. Выбор такого типа магнитной системы и ее ахроматичность позволяют проходить электронным сгусткам через ВЧ резонаторы общей дорожки, уменьшить горизонтальный размер пучка и упростить согласование  $\beta$ -функций на трех изолированных дорожках с квадрупольными линзами.

Для увеличения пространства, доступного для магнитной системы ЛСЭ,  $180^\circ$  ахроматичный поворот на четвертой дорожке состоит из двух  $90^\circ$  поворотов. Расстояние между  $90^\circ$  магнитами выбрано таким образом, чтобы длина четвертой дорожки отличалась от длины третьей на  $2\frac{1}{2}$  длины волны ВЧ системы микротрона. На выходе магнитной системы ЛСЭ стоит ВЧ резонатор для компенсации средних потерь энергии электронного пучка в ЛСЭ. ВЧ резонатор и датчик горизонтального смещения пучка, установленный за  $90^\circ$  поворотным магнитом, служат для стабилизации энергии электронов на выходе четвертой дорожки. Вновь попадая на общую дорожку, но теперь в замедляющей фазе, электроны отдают свою энергию в ВЧ систему. Далее электроны экстрагируются магнитами системы вывода (тождественными магнитам системы инжекции) и направляются в поглотитель.

Для обеспечения нужной фокусировки ускоряемого и замедляемого электронных пучков магнитная система (за исключением четвертой дорожки) зеркально симметрична относительно оси проходящей через центры прямолинейных промежутков. Согласованные  $\beta$ -функции имеют такую же симметрию.

Для минимизации длины электронного сгустка (максимизации пикового тока электронов) в магнитной системе ЛСЭ было оптимизировано продольное фазовое движение электронного пучка в микротроне посредством малых вариаций значений равновесных энергий на каждой дорожке (и, соответственно, геометрии микротрона) [9]. Равновесные фазы четырех проходов через ВЧ систему равны  $\phi_1 = \phi_2 = 25.3^\circ$ ,  $\phi_3 = 47.2^\circ$  и  $\phi_4 = 0^\circ$ . Энергетический разброс на четвертой дорожке при этом составил 0.45%.

Длина прямолинейных промежутков выбрана таким образом, что при инжекции электронных сгустков в каждый четвертый период напряжения ВЧ (т.е. с частотой 45 МГц) ускоряемые и замедляемые сгустки не перекрываются на общей дорожке. В этом случае взаимодействие электронных сгустков с различными энергиями значительно уменьшается.

Моделирование продольной и поперечной динамики электронов показало, что микротрон-рекуператор может работать в стабильном режиме при среднем токе выше 0.1 А. Окончательная группировка происходит на последней дорожке, что позволяет получить высокий пиковый ток (около 100 А) при сохранении малого поперечного эмиттанса пучка.

Для уменьшения эмиттанса и энергетического разброса мы планируем заменить термоэлектронную пушку на разрабатываемый в настоящее время фотоинжектор [10, 11].

### 3 ЛСЭ

Магнитная система ЛСЭ состоит из четырех ондуляторов, двух группирователей и ахроматического поворота. Первые три ондулятора и группирователи образуют



оптический клистрон, используемый в качестве задающего генератора. Оптический резонатор длиной 79 м состоит из двух зеркал. Количество периодов в каждом ондуляторе равно 40, а длина периода — 9 см. Для облегчения настройки мы используем электромагнитные ондуляторы, что позволяет изменять коэффициент ондуляторности  $K$  от 1 до 2. Причина по которой используется два группирователя заключается в получении хорошей частотной селективности. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим обычный оптический клистрон, в котором максимум усиления соответствует условию  $s = (n - \frac{1}{4})\lambda$ , ( $\lambda$  — длина волны,  $n$  — целое,  $s$  — запаздывание электрона при движении от середины первого ондулятора до середины второго). В случае двух группирователей мы должны удовлетворить двум таким условиям одновременно (для различных  $s_1$  и  $s_2$ ) и, поэтому максимумы будут существовать реже. Данная конфигурация магнитной системы позволяет быструю и точную настройку длины волны. Необходимо подчеркнуть, что многоэлементная магнитная система задающего генератора оптимизирована на минимум внутррезонаторной мощности при достаточной группировке электронного пучка и малом энергетическом разбросе в четвертом ондуляторе (излучателе).

Магнитная система ахроматического поворота аналогична описанной и испытанной ранее [7, 8]. Учитывая угловые расходимости фундаментальной моды оптического резонатора и когерентного ондуляторного излучения, мы выбрали угол поворота равным 4 миллирадиана, при этом расстояние между центром зеркала и осью выходного излучения равно 14 см. Первоначально будет использоваться простейший оптический резонатор. Его большая длина позволяет уменьшить интенсивность света на поверхности зеркал и получить генерацию с малой частотой повторения (менее 2 МГц). Поэтому мы будем иметь малую среднюю мощность (и малый нагрев зеркал) при заданной пиковой мощности, что позволит сосредоточиться на тщательном настройке всех систем. После этого мы сможем увеличить выходную мощность увеличением частоты инжектируемых электронных сгустков.

Излучение ЛСЭ будет состоять из 10–30 пс импульсов с частотой повторения 2–45 МГц на длине волны 7–14 мкм. Изменяя энергию электронов от одного сгустка к другому с периодом равным времени прохождения резонатора мы можем модулировать длину волны.

## 4 Состояние и перспективы

Механическое конструирование установки должно быть окончено в этом году. Произведено оборудование для ВЧ генераторов. Существующее здание Сибирского центра фотохимии в настоящее время реконструируется. Установка станет доступной для пользователей в 1996 г.

Выполняется моделирование и оптимизация ЛСЭ [12, 13].

В заключение необходимо подчеркнуть, что установка предназначена для удовлетворения требований пользователей Центра фотохимических исследований. Но наш подход позволяет обеспечить существенно большие мощности для других применений и, используя те же компоненты (ВЧ генераторы, ускоряющие резонаторы, ондуляторы и т.д.), можно создать ЛСЭ с мегаваттной выходной мощностью.

## Литература

- [1] R.H. Pantell, "Comparisons between the FEL and the conventional laser", Nucl. Instr. and Meth., vol. A304, pp. 798-803, 1991.
- [2] O. Svelto, Principles of Lasers, New York: Plenum Press, 1976.
- [3] N.G. Gavrilov et al., "Project of CW Race-Track Microtron-Recuperator for Free-Electron Laser", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 2626-2628 December, 1991.
- [4] G.I. Erg et al., "The Project of High Power Free-Electron Laser Using Race-Track Microtron-Recuperator", Budker Institute for Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia, Preprint 93-75, 1993.
- [5] T.I. Smith et al., "Development of the SCA/FEL for use in biomedical and material science experiments", Nucl. Instr. and Meth., vol. A259, pp. 1-7, 1987.
- [6] V.S. Arbuzov et al., "RF System of the Race-Track Microtron-Recuperator for FELs", in "BINP reports submitted to PAC-93", Novosibirsk, Russia, Preprint 93-58, 1993.
- [7] G.N. Kulipanov et al., "On Mutual Coherency of Spontaneous Radiation from Two Undulators Separated by Achromatic Bend", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 2566-2568 December, 1991.
- [8] N.G. Gavrilov et al., "Observation of Mutual Coherency of Spontaneous Radiation from two Undulators Separated by Achromatic Bend", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 2569-2571 December, 1991.
- [9] A.S. Sokolov and N.Á. Vinokurov, "Computations of longitudinal electron dynamics in the recirculating cw RF accelerator-recuperator for the high average power FEL", Nucl. Instr. and Meth., vol. A341, pp. 398-401, 1994.
- [10] N.G. Gavrilov et al., "Project of High Brightness Photoinjector for Free Electron Laser", Nucl. Instr. and Meth., vol. A331, pp. ABS17-ABS19, 1993.
- [11] N.G. Gavrilov et al., "Project of CW Photoinjector for the High Power Free Electron Laser", to be published in the EPAC-94 Proceedings.
- [12] D.D. Quick., J. Blau, R.K. Wong, W.B. Colson, "Phase space simulations of the electron bunching and power output in the Novosibirsk/SELENE FEL", Nucl. Instr. and Meth., vol. A341, pp. ABS92-ABS93, 1994.
- [13] J. Blau, R.K. Wong, D.D. Quick, W.B. Colson, "Three dimensional simulations of the Novosibirsk/SELENE FEL", Nucl. Instr. and Meth., vol. A341, p. ABS94, 1994.

# Проект фотоинжектора для лазера на свободных электронах с большой средней мощностью

Н.Г. Гаврилов, А.Д. Орешков, И.В. Пинаев,  
А.С. Соколов, А.В. Тулубенский и Н.А. Винокуров  
Сибирское Отделение Российской Академии Наук  
Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск

## Аннотация

Описывается проект фотоинжектора большой яркости для мощного лазера на свободных электронах (ЛСЭ) Сибирского центра фотохимических исследований. Данный фотоинжектор обеспечит электронный пучок со средним током 100 мА и энергией 300 кэВ для инъекции в разрезной микротрон.

## 1 Введение

В настоящее время в Новосибирске сооружается инфракрасный ЛСЭ с большой средней мощностью [1, 2]. Как и другие ЛСЭ, он требует электронный пучок с большим пиковым током, малыми эмиттансом и энергетическим разбросом. Одной из возможностей удовлетворения предъявленным требованиям является использование фотоинжектора [3, 4]. В настоящее время многие лаборатории в мире исследуют фотоэлектронные пушки с использованием лазерного излучения [5], в которых ускоряющее поле создается ВЧ напряжением.

Однако, все данные фотоинжекторы работают в импульсном режиме и, поэтому, не могут быть использованы для ЛСЭ с большой средней мощностью. В связи с этим мы решили разработать инжектор, питаемый постоянным напряжением [6]. Данный подход должен обеспечить лучшие вакуумные условия (и большую долговечность фотокатода), меньший энергетический разброс и отсутствие ухудшения эмиттанса, присущего пушкам с ВЧ полем [7].

## 2 Описание установки

Фотоинжектор состоит из загрузочного модуля, камеры изготовления фотокатодов, двух манипуляторов, источника постоянного высокого напряжения, пушки, лазера-осветителя и системы управления (см. Рис. 1).

Катододержатель помещается в загрузочный модуль, в котором он предварительно отжигается для обезгаживания. Во избежание загрязнения высоковакуумного объема загрузочный модуль отделен от него шибером. После обезгаживания катододержатель с помощью манипулятора переносится в камеру изготовления фотокатодов.

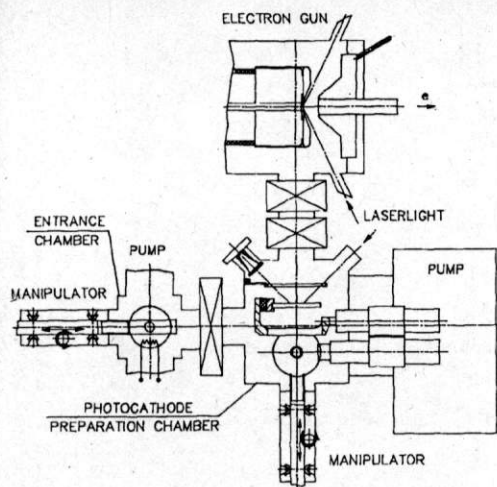


Рис. 1: Схема фотоинжектора

Перед установкой фотоинжектора на ускоритель будут проведены эксперименты с целью отработки технологии изготовления фотокатода, возможной легкой смены и/или изготовления фотокатода, измерения параметров электронного пучка, квантового выхода, времени жизни фотокатода.

## 2.1 Фотоэлектронная пушка

Фотоэлектронная пушка диодного типа имеет активную поверхность  $0.5 \text{ cm}^2$ . Ее сечение показано на Рис. 2. Для улучшения вакуумных условий анод охлаждается жидким азотом. Поверхность фотокатода освещается лазерным излучением с углом падения  $70^\circ$ .

В качестве источника высокого постоянного напряжения используется блок пита-

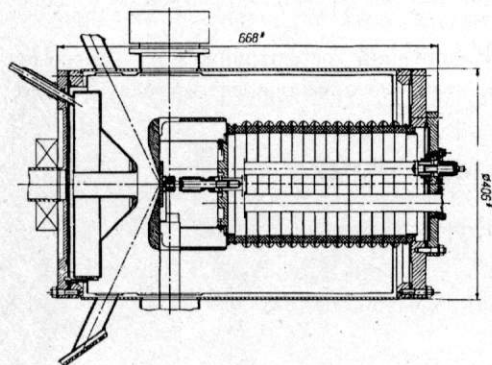


Рис. 2: Сечение фотоэлектронной пушки



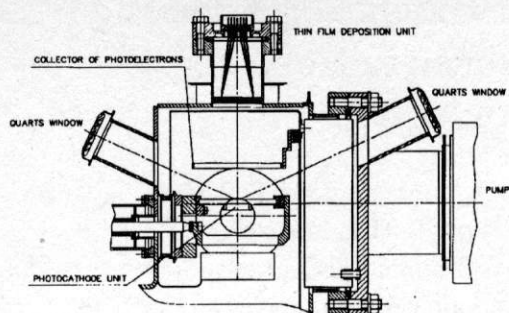


Рис. 3: Камера изготовления фотокатодов

ния промышленного ускорителя “Малютка”, обеспечивающий ток 100 мА при напряжении до 300 кВ.

## 2.2 Камера изготовления фотокатодов

Камера изготовления фотокатодов (см. Рис. 3) состоит из двух отсеков: в первом происходит финишная очистка поверхности фотокатода, а во втором активация фотокатода. Для измерения квантового выхода во время изготовления фотокатода служит коллектор фотоэлектронов, при этом подсветка происходит через специальное кварцевое окно.

## 2.3 Лазер-осветитель

Аргонный лазер-осветитель с активной синхронизацией мод, изготовленный Институтом автоматики и электрометрии (Новосибирск), имеет следующие параметры

Длина волны	458 нм
Средняя мощность	10—15 Вт
Частота повторения	45 МГц
Длительность импульсов	200 пс

Лазер-осветитель питается модифицированным промышленным источником, способным обеспечить ток до 500 А и напряжение до 600 В и имеющим систему подавления дугового разряда.

Учитывая, выходную мощность лазера и средний ток фотоинжектора, легко получить минимальное приемлемое значение квантового выхода фотокатода — 2.5%.

## 3 Параметры электронного пучка

Мы ожидаем получить следующие параметры электронного пучка:

Эмиттанс	$10^{-3}$ см рад
Энергия электронов	300 кэВ
Энергетический разброс	< 1 кэВ

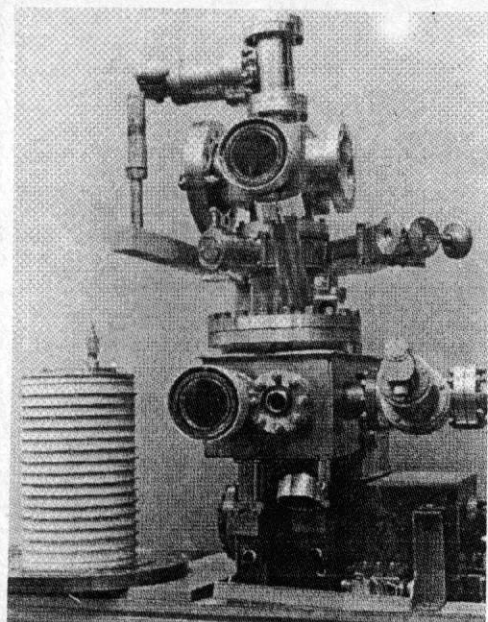


Рис. 4: Камера изготовления фотокатодов и высоковольтный изолятор

## 4 Состояние дел

В настоящее время изготовлены и будут собраны в ближайшем будущем: загрузочный модуль, камера изготовления фотокатодов, лазер-осветитель. На Рис. 4 показаны камера изготовления фотокатодов и высоковольтный изолятор пушки.

## Литература

- [1] N.G. Gavrilov, E.I. Gorniker, G.N. Kulipanov, I.V. Kuptsov, G.Ya. Kurkin, A.D. Oreshkov, V.M. Petrov, I.V. Pinayev, I.K. Sedlyarov, A.N. Skrinsky, A.S. Sokolov, V.G. Vesherevich, N.A. Vinokurov, and P.D. Vobly, "Project of CW Race-Track Microtron-Recuperator for Free-Electron Lasers", *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. QE-27, pp. 2626-2628 December, 1991.
- [2] G.I. Erg, N.G. Gavrilov, E.I. Gorniker, G.N. Kulipanov, I.V. Kuptsov, G.Ya. Kurkin, Yu.I. Levashov, A.D. Oreshkov, S.P. Petrov, V.M. Petrov, I.V. Pinayev, I.K. Sedlyarov, A.N. Skrinsky, A.S. Sokolov, V.G. Vesherevich, N.A. Vinokurov, and P.D. Vobly, "The Project of High Power Free-Electron Laser Using Race-Track Microtron-Recuperator", to be published in the EPAC-94 Proceedings.
- [3] J.S. Fraser, R.L. Sheffield, E.R. Gray, and G.W. Rodenz, "High-Brightness Photoemitter Injector for Electron Accelerators", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. NS-32, pp. 1791-1793 October, 1985.

- [4] C.H. Lee, P.E. Oettinger, E.R. Pugh, R. Klinkovstein, J.H. Jacob, J.S. Fraser, and R.L. Sheffield, "Electron Emission of over 200 A/cm<sup>2</sup> from a Pulsed-Laser Irradiated Photocathode", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-32, pp. 3045-3047 October, 1985.
- [5] C. Travier, "Rf guns: bright injectors for FEL", Nucl. Instr. and Meth., vol. A304, pp. 285-296, 1991.
- [6] N.G. Gavrilov, A.D. Oreshkov, I.V. Pinayev, A.S. Sokolov, A.V. Tulubensky, and N.A. Vinokurov, "Project of high brightness cw photoinjector for a free electron laser", Nucl. Instr. and Meth., vol. A331, pp. ABS17-ABS19, 1993.
- [7] K.J. Kim, "Rf and space charge effects in rf electron guns", Nucl. Instr. and Meth., vol. A275, pp. 201-204, 1989.

## УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИОН-300.

Н.И.Алиновский, А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, Н.С.Диканский, Г.Г.Матюшин,  
А.Н.Малыгин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток, С.Н.Чумаков, Н.П.Запяткин.

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

**ВВЕДЕНИЕ.** Ускоритель ионов ИОН-300, разработанный и построенный в Институте Ядерной Физики им. Будкера СО РАН, является одним из серии высоковольтных ионных ускорителей для промышленности [1]. Ускоритель предназначен для использования в производстве элементов микроэлектроники, микрофотозлектроники, для модификации поверхности и иных технологий.

Ускоритель имеет сепарацию пучка на полной энергии, безмасляный вакуум, управление от микрокомпьютера типа IBM PC. Высоковольтная изоляция - элегаз.

ИОН-300 характеризуется горизонтальным расположением ионного пучка. Модульность конструкции и небольшая высота ускорителя (менее двух метров) позволяют размещать ее практически в любом производственном помещении. Компоновка ускорителя и расположение основных функциональных узлов приведены на рис.1.

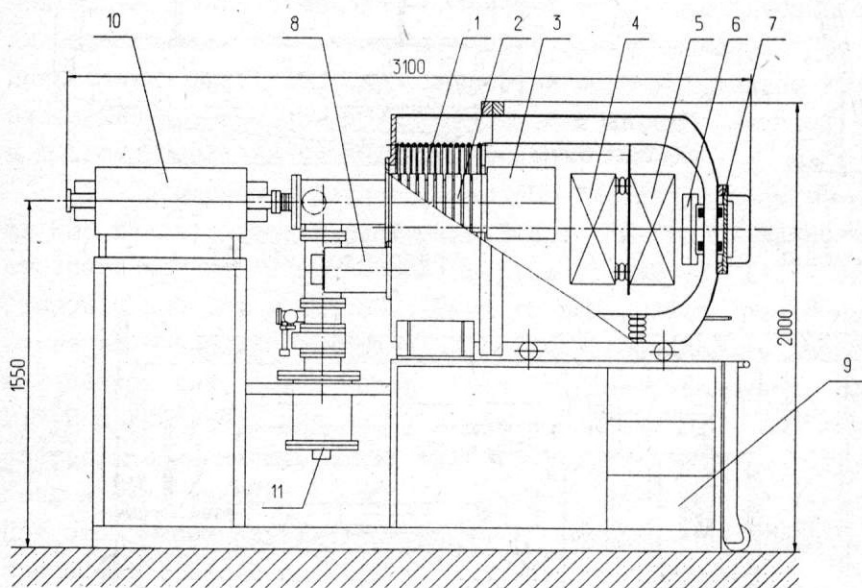


Рис.1 УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИОН-300.

1 - Высоковольтный выпрямитель; 2 - ускорительная трубка; 3 - ионный источник; 4,5 - два креста системы питания и управления (высоковольтный терминал); 6,7 - вторичная и первичная катушки трансформатора передачи мощности; 8 - повышающие высоковольтные трансформаторы; 9 - инверторы 20 кГц., станции управления и другое радиоэлектронное оборудование; 10 - масс-сепаратор; 11 - вакуумный насос.



Ниже приведены основные технические и физические параметры ускорителя.

Таблица 1 - ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ ИОН-300

Диапазон энергий однозарядных ионов, $КэВ$	100-300
Максимальный полный ток ускоренных ионов, $мА$ до	5
Диаметр пучка на выходе сепаратора, около $мм$	10
Радиус сепарирующего магнита, $мм$	600
Диапазон сепарируемых масс на полной энергии, $А.Е.М.$	1-80
Максимальное давление газа в сосуде, $МПа$	0.07
Рабочий габарит, $L * B * H$ , $мм$	3000*1500*2000

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.** Основной высоковольтный выпрямитель, применяемый в ускорителе ИОН-300, работает на частоте  $20 КГц$ . Выпрямитель представляет собой емкостный умножитель напряжения с последовательным питанием каскадов.  $20 КГц$  питание осуществляется от 3-фазного преобразователя, так как в/в выпрямитель имеет 6-фазную схему. Частота пульсаций выпрямленного напряжения при трехфазном питании составляет  $120 КГц$  (при условии симметрии фазных напряжений). Это позволило существенно снизить энергию, накопленную в конденсаторах выпрямительных колонн при заданном токе нагрузки и величине пульсаций выпрямленного напряжения. Малая величина накопленной энергии важна с точки зрения долговечности ускорительной трубки, так как при неизбежных высоковольтных вакуумных пробоях степень деградации электродов и изоляторов трубки прямо связана с выделившейся при пробое энергией.

Для защиты элементов умножителя и высокочастотного преобразователя предусмотрено быстрое автоматическое отключение системы питания выпрямителя при развитии пробоя на начальной стадии или превышении заранее установленного уровня энергии. Стабилизация и регулирование энергии осуществляется на переменном токе с помощью магнитных усилителей. Имеется возможность аппаратной настройки АЧХ и ФЧХ замкнутой системы автоматического регулирования с учетом особенностей конкретного экземпляра высоковольтного умножителя. стабильность высокого напряжения не хуже 0.05

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ТЕРМИНАЛ.** Одной из существенных особенностей этого ускорителя является система питания устройств, находящихся под высоким электрическим потенциалом, управляемая независимо от основного высоковольтного выпрямителя. Режим ионного источника при этом может оставаться постоянным при любой энергии ускорителя. Ключевым моментом этой системы является использование основной частоты  $20 КГц$  в сочетании с магнитными нелинейными регулирующими элементами.

В эту систему органично вписывается передача электрической мощности (до  $2,5 КВт$ ) на той же частоте при помощи резонансного трансформатора с первичной и вторичной катушками, разделенными высоковольтным зазором. Эти катушки совместно с конденсаторами представляют собой два высокодобротных резонансных контура, катушки которых связаны между собой магнитной связью с типичным коэффициентом связи около  $0,1 - 0,3$ . В ускорителе ИОН-300 используется трансформатор, имеющий размеры первичной и вторичной катушек  $220 мм$  в диаметре и  $30 мм$  высотой. При зазоре между катушками  $60 мм$  такой трансформатор обеспечивает передачу мощности  $2,5 КВт$  при КПД около  $0,9$  [3].

Для запитывания устройств, находящихся под высоким потенциалом (ионный источник, система подачи рабочего вещества) и стабилизации режимов их работы разработана,

изготовлена и отлажена унифицированная двухкрейтовая система питания и управления [3], которая содержит два развязанных на потенциал до 30 КВ стабилизатора сети 20 КГц, две станции управления и набор исполнительных электронных узлов - источников тока и напряжения. Возможность независимого управления двумя развязанными крейтами с общей мощностью в нагрузке до 1,5 КВт позволяет устанавливать ионные источники различных систем. Сейчас имеется и опробован набор электронных узлов для питания источника с в/ч разрядом и дуоплазматрона с холодным катодом.

В настоящее время на ускорителе установлен источник с в/ч разрядом. Его потребляемая мощность лежит в пределах 200-250 Вт, а ток однозарядных ионов на выходе из ускорительной трубки составляет величину до 1 мА. Анодное напряжение генераторной лампы, а также напряжения отсоса и доускорения стабилизируются внутренними замкнутыми контурами автоматического регулирования. Станции управления позволяют устанавливать уставки регулируемых величин, а также передавать в управляющую ЭВМ измеренные значения всех режимов ионного источника и системы управления в целом.

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.** Система автоматизированного управления, примененная в ускорителе ИОН-300, разработана специально для применения в сложных электрофизических установках, имеющих мощные электрические помехи (в том числе от высоковольтных пробоев) и, возможно, имеющих сложные подсистемы, размещенные под высоким потенциалом до 2 МВ [2].

Система управления распределенного типа. Она состоит из центральной ЭВМ типа IBM PC AT и 3 - 6 интеллектуальных многофункциональных станций управления. Каждая из станций непосредственно управляет одной из подсистем установки, выделяемых по функциональному назначению и конструктивному расположению (в том числе под высоким потенциалом). Все станции связаны с центральной ЭВМ дуплексной оптоволоконной связью, допускающей развязку на потенциал до 2 МВ. Программа в центральной ЭВМ состоит из нескольких программных процессов, работающих независимо в режиме разделения времени. Центральный процесс-менеджер управляет периферийными процессами, каждый из которых управляет в свою очередь (при помощи локальных станций управления) одной из физических подсистем установки [2].

Для реализации алгоритмов управления и стабилизации аналоговых величин (энергия, режимы ионного источника, ток магнитосепаратора и др.) используются замкнутые контуры автоматического регулирования, имеющие высокие статические и динамические параметры.

**ИОННЫЙ КАНАЛ, ПРИЕМНАЯ КАМЕРА.** Для очистки ионного пучка от примесей применяется магнитный сепаратор, причем сепарируется пучок, ускоренный до полной энергии. Радиус поворотного магнита на установке ИОН-300 - 0,6 м, угол поворота - 90 град., на выходе имеется регулируемый коллиматор. Сепарирующий магнит стыкуется с приемной камерой, в которой установлена система двойного механического сканирования, обеспечивающая одновременное облучение 5 полупроводниковых пластин диаметром 150 мм. Привод системы сканирования осуществляется с помощью двух шаговых двигателей. Программа управления сканированием обеспечивает точное позиционирование пластин, а также плавный разгон и торможение вращательного и поступательного движения системы сканирования. Приемная камера имеет отдельную откачку турбомолекулярным насосом.

Ионный ток измеряется бесконтактными датчиками тока, установленными до и после сепарирующего магнита. Для измерения полного тока (до сепарации) имеется также подвижный цилиндр Фарадея, установленный перед входом в сепарирующий магнит. Автоматический набор дозы на пластине обеспечивается измерителем дозы на базе преобразователя заряд - частота, входящим в состав станции управления приемной камеры.

Предусмотрена возможность установки дополнительных средств измерения и диагностики пучка, например, системы измерения распределения плотности тока по сечению пучка.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** К настоящему времени на установке ИОН-300 проведены испытания и отладка всех систем ускорителя и приемной камеры, получены пучки ионов  $Ar^+$ ,  $B^+$  с энергией до 210 КэВ и полным током до 1 мА. Полностью реализована и отлажена распределенная автоматизированная система управления.

## литература

- [1] Н.А.Алиновский, А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, Н.С.Диканский, Г.Г.Матюшин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток, С.Н.Чумаков, В.Г.Шамовский. Серия высоковольтных ионных ускорителей для промышленности. Тезисы докладов 7 совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, Санкт-Петербург, 16-18 июня 1992
- [2] А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, А.Н.Малыгин, Г.Г.Матюшин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, В.С.Тупиков, С.Н.Чумаков. Системы управления ионными имплантерами, Труды XIV конференции по ускорителям заряженных частиц, октябрь 1994.
- [3] А.Д.Гончаров, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток, С.Н.Чумаков. Система питания ионных источников. Труды 14 совещания по ускорителям заряженных частиц, октябрь, 1994

# ИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИОН-1500.

Н.И.Алиновский, А.Д.Гончаров, Н.С.Диканский, Н.П.Запяткин,  
В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток.

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

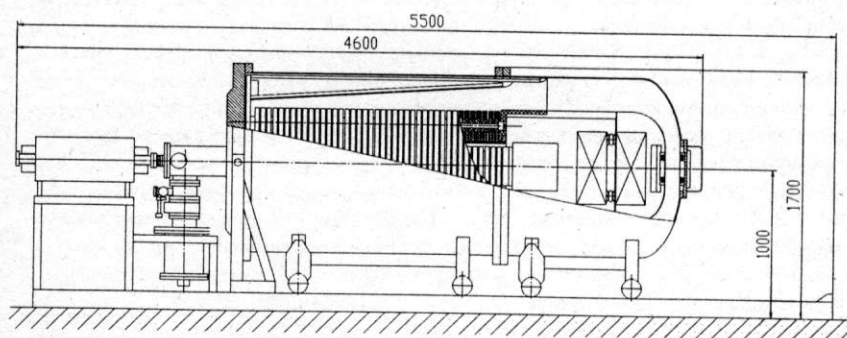
Ионный ускоритель ИОН-1500 предназначен для применения в электронной промышленности, для модификации поверхности и для других технологий. ИОН-1500 имеет сепарацию пучка на полной энергии, безмасляный вакуум, систему управления на базе персональной ЭВМ типа IBM PC и блоков КАМАК. Высоковольтная изоляция элегаз под давлением до 10 атм. ИОН-1500 имеет горизонтальный выход пучка. Получены пучки однозарядных ионов с током до 1.5 мА и энергией до 1500 КэВ.

**ВВЕДЕНИЕ.** ИОН-1500 является одним из ускорителей с горизонтальным расположением ионного пучка постоянного действия для промышленных технологий, разработанных и испытанных в Институте Ядерной Физике СО РАН.

Таблица 1 - ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ ИОН-1500

Диапазон энергий однозарядных ионов, КэВ	500-1500
Нестабильность энергии, %	+0.1
Пульсации ускоряющего напряжения, %	0,05
Максимальный полный ток ускоренных ионов, мА	1.5
Диаметр пучка на выходе сепаратора, около мм	10
Радиус сепарирующего магнита, мм	1300
Максимальный ток сепарирующего магнита, А	170
Максимальная индукция поля в зазоре магнита, Тл	1.0
Диапазон сепарируемых масс на полной энергии, А.Е.М.	1-80
Максимальное давление газа в сосуде, МПа	0.6
Рабочий габарит, L * B * H, мм	5495*3000*1722

**КОНСТРУКЦИЯ.** Общий вид установки показан на рис.1.



Основными узлами и системами ускорителя являются: высоковольтный выпрямитель; ускорительная трубка и ионный канал; ионный источник, находящийся под потенциалом



выпрямителя; высоковольтный терминал с трансформатором передачи мощности; магнитосепаратор с источником питания; система вакуумной откачки; система питания, управления и контроля ускорителя.

Высоковольтные узлы ускорителя размещены в сосуде высокого давления. Сосуд заполнен газом  $SF_6$  под давлением до 0.6 МПа. Благодаря горизонтальному размещению ускорительной трубки и ионного канала текущее техническое обслуживание производится находящимся на уровне пола одним человеком без применения грузоподъемных механизмов.

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.** Питание на ускорительную трубку подается с высоковольтного выпрямителя, в качестве которого используется однофазный каскадный умножитель с индуктивной связью, который обладает высокой нагрузочной способностью (до 25 ма), что позволяет легко применить его в новых разработках, и малым коэффициентом пульсаций. Питание выпрямителя осуществляется на частоте 1 Кгц от управляемого машинного генератора. Применение повышенной частоты приводит к снижению массы выпрямительной колонны и упрощает конструкцию горизонтально расположенного выпрямителя, который составлен из включенных в последовательную цепь одинаковых секций выполненных в виде дисков. Каждая секция содержит вторичную обмотку трансформатора, схему удвоения напряжения, балластные и измерительные резисторы. Первичная обмотка трансформатора включена в резонансную цепь, является общей для всех секций и отделена от них газовым высоковольтным зазором с переменным шагом с целью оптимизации индуктивной связи. Напряжение выпрямителя имеет линейную характеристику от числа секций. Высокая нагрузочная способность соответствует большой запасенной энергии в конденсаторах выпрямительной колонны, поэтому приняты меры для ее быстрого отключения от источника питания в случае развития пробоя.

**УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА.** Ускорительная трубка установлена горизонтально и соосно со вторичными обмотками высоковольтного выпрямителя. Для исключения механических напряжений ускорительная трубка размещена в пенале из стеклопластика, консоль которого опирается на изолятор, и изготовлена из чередующихся керамических и металлических колец, соединенных между собой диффузионной пайкой. Трубка собрана из пяти секций. Между секциями установлены постоянные магниты, которые отклоняют от прямолинейного пути вторичные электроны, следовательно, снижают максимальную энергию, набираемую вторичными электронами и таким образом уменьшают радиационный фон. Металлические электроды ускорительной трубки, формирующие ускоряющее электрическое поле, имеют форму шеврона, поэтому между пучком и керамическими изоляторами трубки нет прямой видимости. Тем самым ослабляется процесс фотогенерации зарядов и исключается возможность оседания на поверхности изоляторов заряженных ионов. Трубка не содержит органических материалов. В результате существенно увеличивается ее электрическая прочность и долговечность. Для пропорционального распределения высокого потенциала вдоль ускорительной трубки служит высоковольтный делитель. Измеренные значения тока делителя трубки отнесенные к энергии ускорителя позволяют судить о доле пучка, оседающего на электродах трубки. Эта информация используется для оптимальной фокусировки пучка.

**ИОННЫЙ КАНАЛ.** Ионный канал оборудован устройствами измерения параметров пучка: Магнитомодуляционные бесконтактные измерители среднего тока пучка [1]. Выдвижной измеритель полного тока пучка (цилиндр фарадея). Измеритель профиля тока пучка.

**В.Ч. ИОННЫЙ ИСТОЧНИК.** На ускорителе установлен в.ч. источник со следующими параметрами:

Таблица 2 - ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ В.Ч. ИОННОГО ИСТОЧНИКА

Энергия ионов, <i>КэВ</i> до	10
Ток ионов, <i>мА</i> до	1.5
Потребляемая мощность, <i>Вт</i> не более	300
Расход газа, <i>норм.см<sup>3</sup>/час</i> не более	15
Частота генератора, <i>МГц</i>	50

Основными элементами источника являются :

- 1) Кварцевая колба с уплотнением из силиконовой резины,
- 2) Ионно - оптическая система, смонтированная в металло-керамическом корпусе с вытягивающим электродом из ферромагнитного материала для концентрации магнитного поля,
- 3) В.Ч. контур расположенный перпендикулярно оси кварцевой колбы.

Магнитное поле, параллельное направлению вытягивания ионов, создается двумя керамическими кольцевыми магнитами. Потребление в.ч. мощности в разряде носит резонансный характер и ее оптимальное значение устанавливается взаимным расположением магнитов. В.Ч. генератор собран по одноконтурной схеме с общей сеткой на одной лампе. Генератор, газовый пьезонатекатель и баллон с рабочим газом находятся под потенциалом высоковольтного кондуктора и изолированы от ускоряющего потенциала источника металлокерамической трубкой с наполнителем из кварцевого песка, по которой подается в колбу рабочий газ.

Для устранения в.ч. наводок источник и генератор экранированы. Все элементы конструкции выдерживают температурный режим источника, повышенное давление элегаза в сосуде и не требуют принудительного охлаждения.

Предварительно работа источника исследовалась на стенде на следующих газах :  $H_2$ ,  $He$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $Ar$ ,  $BF_3$ ,  $SF_6$ . Доля выхода атомарных ионов при работе с двухатомными газами достигала 50 %, а суммарная наработка на отказ при работе на кислороде составила более 300 часов.

**ТЕРМИНАЛ С ТРАНСФОРМАТОРОМ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ.** Для питания ионного источника служит терминал с трансформатором передачи мощности. Система питания ионного источника находится под высоким электрическим потенциалом, управляется независимо от основного высоковольтного выпрямителя, поэтому режим ионного источника может оставаться стабильным при любой энергии ускорителя. Передача электрической мощности (до 0.3 Квт) для питания терминала осуществляется на частоте 20Кгц резонансным трансформатором броневого типа, первичные и вторичные цепи которого индуктивно связаны и разделены высоковольтным газовым промежутком. При существующем высоковольтном промежутке 105 мм, и диаметре ферритовых магнитопроводов 210 мм трансформатор имеет следующие характеристики:

Таблица 3 - ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА ПЕРЕДАЧИ  
МОЩНОСТИ

Коэффициент связи	0.087
Ненагруженная добротность	67
Коэффициент полезного действия	75 %

Вторичная катушка трансформатора не нуждается в принудительном охлаждении ввиду высокой теплопроводности элегаза.

В состав терминала входит необходимый набор управляемых функциональных модулей [2], связанных с компьютером дуплексной оптоволоконной линией связи, допускающей высоковольтную развязку.

Важным моментом является использование повышенной частоты питания в сочетании с магнитными нелинейными регулирующими элементами - магнитными усилителями, которые характеризуются высоким КПД ( 98 % при выходной мощности 1Квт ), высокой удельной мощностью (до 3Квт/Кг), способностью стабилизировать и ограничивать в случае перегрузки выходной ток. Имеющийся разработанный набор унифицированных блоков питания ионного источника позволяет использовать и иные ионные источники, близкие к разработанным по потребляемой мощности.

**МАГНИТ-СЕПАРАТОР.** Для сепарации ионного пучка, ускоренного до полной энергии, применен дипольный электромагнит с показателем спада магнитного поля  $n = 0$ . При сепарации пучка на полной энергии, в отличии от сепарации пучка на небольшой энергии с последующим ускорением очищенных ионов до полной энергии, не требуется передача дополнительной мощности на высокий потенциал для питания магнита-сепаратора. Недостатком выбранной схемы сепарации является нагрузка полным током пучка ускорительной трубки и высоковольтного выпрямителя а также высокая потребляемая мощность магнита. Питание магнита-сепаратора осуществляется от управляемого машинного генератора работающего на частоте 1КГц с последующим преобразованием в постоянный ток.

**СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ.** Для вакуумной откачки ускорительной трубки и ионного канала используется турбомолекулярный насос. Предварительная откачка вакуумного объема осуществляется двумя форвакуумными насосами, снабженными азотными ловушками. Питающие напряжения на запорные клапаны, шибер и насосы поступают через оптоэлектронный коммутатор. Рабочий вакуум на выходе из ускорительной трубки порядка  $10^{-4}$  Па.

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УСКОРИТЕЛЯ.** Система управления и контроля обеспечивает: Контроль и управления параметрами непосредственно ускорителя. Контроль и управление параметрами ионного источника. Измерение параметров ионного пучка. Аварийное отключение при перегрузках или высоковольтном пробое.

Система управления [3] состоит из центральной ЭВМ типа IBM PC/AT , набора функциональных модулей в стандарте КАМАК и ряда специализированных исполнительных электронных блоков, находящихся непосредственно на установке. Высокая помехозащищенность системы управления достигается за счет тщательных потенциальных развязок цифровых и аналоговых цепей в функциональных блоках КАМАК, а управление высоковольтным терминалом осуществляется по дуплексной оптоволоконной линии связи импульсным широтно-модулированным сигналом. Бесконтактные непрерывные измерения тока ионного пучка до и после магнита - сепаратора осуществляются магнитомодуляционными измерителями среднего тока.

Профиль ионного пучка измеряется с помощью перемещающегося датчика (тонкой нити) методом "токооседания".

Имеется возможность измерения спектра масс на выходе магнита-сепаратора и вывода результата на экран монитора.

Быстрое аварийное выключение высоковольтного выпрямителя осуществляется тиристорным ключом за времена существенно меньшие периода питающей сети с целью предупреждения необратимых процессов в его элементах.

## литература

- [1] А.А.Литвинов и др. Магнитомодуляционный измеритель тока пучка, ПТЭ No 3, 1979
- [2] А.Д.Гончаров, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, И.Л.Черток, С.Н. Чумаков. Система питания ионных источников. Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, октябрь 1994
- [3] А.В.Бублей, А.Д.Гончаров, А.Н.Малыгин, Г.Г.Матюшин, В.П.Останин, Б.Н.Сухина, В.С.Тупиков, С.Н.Чумаков. Системы управления ионными имплантерами, Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, октябрь 1994