

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 I**

Протвино 1994

# Статус специализированного источника СИ СИБИРЬ-2

Корчуганов В.Н.  
ИЯФ СО РАН, Новосибирск, РОССИЯ

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ИЯФ СО РАН (г.Новосибирск) заканчивает сооружение комплекса источников синхротронного излучения в РИЦ "Курчатовский институт" (г.Москва) [1]. Комплекс предназначен для проведения экспериментов с использованием синхротронного излучения (СИ) в области физики твердого тела, кристаллических структур, EXAFS-спектроскопии Краев, элементного анализа, мессбауэровских экспериментов с высоким временным разрешением, комptonовской и ядерной спектроскопии. Эти задачи определяют область длин волн СИ в пределах 0.1-2000 Å

Схема специализированного источника синхротронного излучения Сибирь приведена на рис.1.

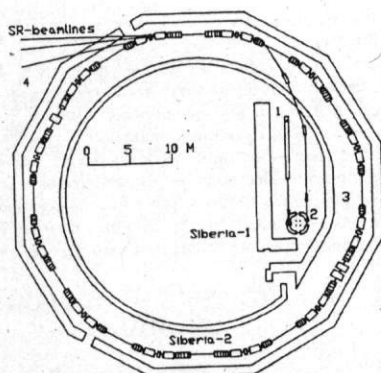


Рис. 1: Схема специализированного источника синхротронного излучения Сибирь.

В состав комплекса входят: специализированный накопитель Сибирь-2 на энергию накопленных электронов  $E = 2.5$  ГэВ, накопитель Сибирь-1 на максимальную энергию электронов  $E = 450$  МэВ. Инжекционная часть включает в себя линейный ускоритель с энергией электронов  $E = 80$  МэВ и два канала транспортировки электронных пучков ЭОК-1 и ЭОК-2.

## 2 ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРТЕЛЬ-ПРЕДИНЖЕКТОР

Ускоряющая структура линка представляет собой модифицированную структуру Андреева с шайбами и диафрагмами (DAW structure) [2], обладающую рядом достоинств при работе в режиме запасенной энергии [3], главное из которых - это возможность достижения большей энергии благодаря высокому шунтовому импедансу. Структура состоит из шести регулярных секций. Каждая секция имеет длину 1 м и спаяна из 18 ячеек. Пучок электронов, сформированный диодной пушкой ( $E = 40$  КэВ,  $I = 4$  А), инжектируется без предварительной группировки непосредственно в первую полость ускоряющей структуры, образуемой регулярной полужайкой. Продольная фокусировка и формирование поперечных размеров происходят в ВЧ-поле линка в процессе ускорения. На рис.2 показаны последние секции линка и начальный участок канала инжекции в накопитель Сибирь-1.

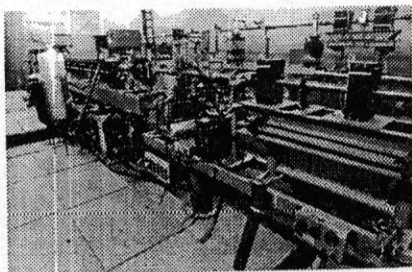


Рис. 2: Выходная часть линка и начальный участок ЭОК-1.

Источником питания структуры ЛУ служит клистронная станция, работающая на частоте 2.797 ГГц с длительностью импульса 8 мкс и выходной мощностью до 18 МВт. СВЧ-питание структуры осуществляется через специальный коаксиальный резонатор, установленный в ее середине. Такой симметричный ввод мощности вдвое увеличивает частотный диапазон свободный от паразитных мод. Рабочей является мода типа  $TM_{02\pi}$ , причем в полосе частот  $\pm 20$  МГц высшие моды отсутствуют. Основные электрические характеристики ускоряющей структуры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочая частота	2797.2 МГц
Эффективный шунтовый импеданс	92 МОм/м
Добротность	28000
Характеристический импеданс	3.5 кОм/м
Отношение макс. напряженности поля к ускоряющей	5.5
Групповая скорость,	0.4 с

Медный волновод с сечением 90 × 45 мм, соединяющий клистрон и ускоряющую структуру, состоит из газовой и вакуумной секций. Газовая секция, примыкающая к клистрону, заполнена азотом при давлении 6 атм. Ее назначение состоит в предотвращении пробойных явлений вблизи и на поверхности керамического окна клистрона [4]. Газовая секция отделяется от вакуумной посредством специального разделительного керамического окна.

В феврале - марте 1994 года были проведены измерения с целью установления оптимальной связи (длины волновода) между клистроном, волноводом и линаком. В результате длина волновода была подогнана с точностью до  $(2n + 1)\lambda/8$ , где  $\lambda$  - длина волны. При этом, в случае пробоя в структуре или ее расстройки при изменении температуры, возникающие в волноводе перенапряжения будут минимальны. На рис.3 показаны осциллограммы ВЧ - сигналов: 1) напряжение падающей волны в волноводе; 2) напряжение отраженной волны в волноводе; 3) напряжение в структуре линака.

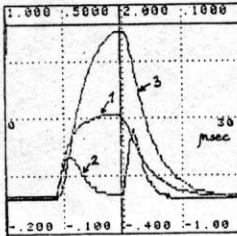


Рис. 3: Осциллограммы ВЧ - сигналов.

Проектные характеристики пучка электронов на выходе линака и измеренные с помощью цилиндра Фарадея и вторично-эмиссионных сеточных датчиков, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Измерено	Проект
Максимальная энергия $E$ , МэВ	75	80
Ток электронов в импульсе при $\frac{\Delta E}{E} = 7\%$ , мА	600	-
$\frac{\Delta E}{E} = 1\%$ , мА	65	200
Длительность импульса $t$ , нс	18	15
Частота повторения импульсов $f$ , Гц	1 ÷ 5	1
Поперечный размер пучка $d$ , мм	3	-
Эмиттанс пучка $\epsilon$ , см-мрад	0.03	0.1

Поперечный размер пучка измерялся на расстоянии  $L = 1600$  мм от выходной апертуры линака.

Экспериментальные энергетические спектры, то есть распределение электронов по энергии внутри ускоренного пучка на выходе линейного ускорителя, для разных значений напряжения на аноде клистрона приведены на рис.4.

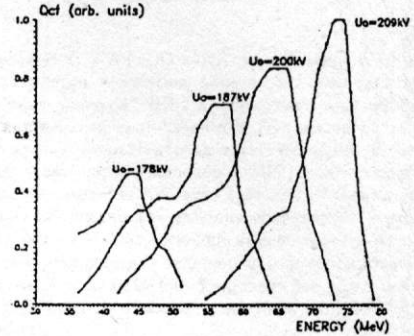


Рис. 4: Энергетические спектры электронов на выходе линейного ускорителя для напряжений на аноде клистрона в диапазоне 178 - 209 кВ.

В настоящее время линак инжектирует 75 МэВ электронный пучок в накопитель Сибирь-1. Ток разового захвата при инжекции в Сибирь-1 достигает 23 мА на равновесной орбите. Работы на линаке будут продолжаться в направлении увеличения энергии выпущенного пучка. Как видно из приведенных графиков, увеличение энергии выпускаемого пучка из линака приведет к увеличению количества электронов в заданном энергетическом интервале вблизи максимальной энергии и облегчит инжекцию в Сибирь-1 благодаря еще и уменьшению времени радиационного затухания.

### 3 НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ СИБИРЬ-1

Накопитель Сибирь-1, является бустером на энергию 450 МэВ для накопителя Сибирь-2 [5]. Сибирь-1 представляет из себя слабофокусирующий накопитель с длиной орбиты 8.68 м и состоящий из 4-х 90° поворотных магнитов и разделяющих их 60 см прямолинейных промежутков, где располагаются линзы, корректора, впускные и выпускные магниты, пластины прединфлектора, инфлектора (дефлектора), ВЧ-резонатор и системы наблюдения за пучком. Частоты бетатронных колебаний  $\nu_x = 0.793$ ,  $\nu_z = 0.895$ .

Накопленный и ускоренный пучок в накопителе Сибирь-1 впервые, после установки накопителя в новом здании, получен в декабре 1992 г. Энергия инжектируемого из линака пучка была 67.7 МэВ, ток разового захвата 1 мА, время жизни на инжекции составляло око-

до 1 мин и определялось гашением вакуумной камеры под действием СИ. После этого были проведены работы по улучшению откачки вакуумной камеры Сибирь-1. В это же время сделан дополнительный порт для вывода пучка СИ из центральной части магнита и, также, сделан дополнительный порт для наблюдения излучения из краевых полей второго и третьего магнитов. Прделана подготовительная работа по выпуску электронов из Сибирь-1.

Первый выпуск электронов из Сибирь - 1 на энергии 400 МэВ и наблюдение выпущенного пучка на первом люминоформном датчике был осуществлен в июне 1993 г. Работа на выпуск велась с токами порядка 10 мА, получаемыми при однократном впуске.

Очередные работы с пучком электронов проводились в апреле 1994 г. Целью работ являлись получение режима накопления электронов, выпуск электронного пучка из Сибирь-1 в ЭОК-2 с последующей проводкой пучка до впускного магнита Сибирь-2. Была проведена тщательная геодезическая выставка магнитных элементов Сибирь-1. В результате этой работы минимизированы искажения горизонтальной орбиты на энергии инжекции, так, что для накопления не требовалось введения горизонтальных коррекций. Горизонтальная апертура максимальна и равна 30 мм. Вертикальная апертура также максимальна и составляет в поворотных магнитах 23 мм, что равно зазору между верхней и нижней поверхностями вакуумной камеры.

Для улучшения процесса накопления и устранения влияния временных нестабильностей в работе генераторов пушки линейного ускорителя и генератора прединфлектора Сибирь-1, мы увеличили длину формирующей линии генератора прединфлектора, тем самым, увеличили длину импульса прединфлектора на 6 нс, доведя длительность его вершины до 25 нс. Этого оказалось достаточным, чтобы иметь устойчивое накопление до 100 мА даже в условиях относительно низкого вакуума, со средним разовым захватом до 10 мА.

В настоящее время отлажен процесс ускорения электронов до 450 МэВ с управлением от ЭВМ. Процесс ускорения электронов от энергии инжекции до 450 МэВ занимает около 40 сек. Время жизни пучка на энергии 450 МэВ при токе 1.5 мА составляло 5000 сек и определялось давлением остаточных газов, выделяющихся со стенок вакуумной камеры под действием синхротронного излучения.

Система наблюдения за пучком при помощи синхротронного излучения позволяет наблюдать пучок в 3-х поворотных магнитах из 4-х, с одновременным выводом телевизионных изображений пучка на мониторы и, кроме того, измерять поперечные и продольные размеры пучка.

Работа по выпуску электронов и проводке по каналу ЭОК-2 проводилась в апреле 1994 года. Выпуск электронов из Сибирь-1, как и впуск, производится в вертикальной плоскости. Впускной промежуток, включающий впускной магнит и начальный впускной участок канала ЭОК-2 показан на рис.5.

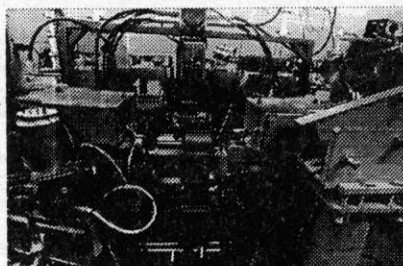


Рис. 5: Впускной промежуток накопителя Сибирь-1.

Орбита пучка электронов при помощи трех вертикальных корректоров подводится к ношу впускного магнита на расстояние 3 мм, после чего электрические и магнитные поля, создаваемые на время 20 наносекунд между пластинами дефлектора, отклоняют траекторию электронов, направляя их во входное отверстие импульсного безжелезного впускного магнита, имеющего эффективную длину 17.5 см и вертикальную апертуру 4 мм. Электроны отклоняются впускным магнитом вверх на угол 20° и далее движется по каналу ЭОК-2.

Длительность импульса тока возбуждения впускного магнита от его начала до максимального значения, соответствующего моменту выпуска (четверть "синусоиды"), составляет 55 мкс при амплитуде тока 180 кА и амплитуде магнитного поля 3 Т. При этих параметрах импульса и в данной геометрии магнита гарантируется пренебрежимо малая напряженность рассеянного магнитного поля на орбите до момента выпуска пучка. Периодичность выпуска ускоренных электронов в канал ЭОК-2 составляет около 40 сек. С уменьшением гашения стенок вакуумной камеры под действием СИ выпускаемый ток будет увеличен до значений порядка 100 мА при той же периодичности. Параметры выпускаемого пучка приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Энергия пучка $E$	450 МэВ
Ток пучка $I$	100 мА
Длительность импульса $2\sigma_z$	2 нс
Горизонтальный эмиттанс $\epsilon_x$	$8.6 \times 10^{-8}$ м-рад
Вертикальный эмиттанс $\epsilon_z$	$8.6 \times 10^{-10}$ м-рад
Энергетический разброс $2\sigma_E/E$	$8.0 \times 10^{-4}$

Канал ЭОК-2 имеет длину около 21 м и, кроме квадрупольных линз и корректоров, включает один вертикальный и два горизонтальных 20-градусных магнита, люминоформные датчики и датчики положения пучка трансформаторного типа и, кроме того, бериллиевую фольгу перед впускным магнитом Сибирь-2. Перед началом работ по выпуску электронов из Сибирь-1, элементы начального наклонного участка канала ЭОК-2 были выставлены с точностью  $\pm 0.2$  мм.



Проводка пучка вдоль канала ЭОК-2 до впускного магнита Сибири-2 была осуществлена за две смены. Разброс поперечных координат пучка при наблюдении пучка в ЭОК-2 по люминоформным датчикам и по четырём датчикам положения на всей длине малы и не превышают  $\pm 0.5$  мм от выстрела к выстрелу.

Таким образом, на данном этапе инжекционная часть комплекса готова к инжекции пучка в Сибирь-2. Основной задачей сейчас является улучшение времени жизни пучка в Сибири-1 и увеличение выпускаемого тока, что будет следствием улучшения вакуума в накопителе после обезгаживания стенок вакуумной камеры пучком синхротронного излучения при работе на 450 МэВ.

## 4 НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ СИБИРЬ-2

### 4.1 Магнитная система

Магнитная структура Сибири-2 оптимизирована для получения электронного пучка с малыми эмиттантами, большого спектрального потока и достижения высокой спектральной яркости источника излучения [5]. Она состоит из шести зеркально-симметричных ячеек, каждая из которых содержит горизонтальный ахроматический поворот и промежуток с зануленной дисперсионной функцией. Основные параметры накопителя Сибири-2 приведены в таблице 4.

Таблица 4

Энергия $E$	2.5 ГэВ
Периметр $C$	124.13 м
Число суперпериодов $N$	6
Бетатронные числа $\nu_x, \nu_z$	7.75, 7.72
Горизонтальный эмиттанс $\epsilon$	$7.9 \times 10^{-8}$ м-рад
Кратность ВЧ $q$	75
Частота ВЧ $F$	181.14 МГц
Макс. ток (многосуст. режим) $I$	300 мА
Время жизни $\tau$	5 час

В настоящее время все магнитные элементы накопителя, включающие 24 поворотных магнита, 72 квадрупольных линзы, 36 секступольных линзы, 12 октупольных линзы и 96 корректоров орбиты прошли электрические и магнитные испытания и установлены на кольце Сибири-2. На рис.6 показан промежуток впуска в Сибирь-2 с прилегающей частью канала ЭОК-2. На рис.7 показана часть кольца Сибири-2 внутри биоэащиты.

Продолжается работа на системах управления комплексом, ведется наладка систем наблюдения за пучком в накопителе. Системы наблюдения состоят: из 6 подвижных карманов - пробников с люминоформными экранами и ТВ-камерами, выводящими изображения пучка на пульт и позволяющих наблюдать процесс инжекции и первый оборот; 24 датчиков положения пучка, пригодных для измерения координат электронного пучка как на стационарной орбите, так и за один пролет, а также используемых для измерения

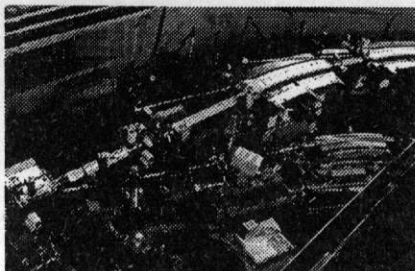


Рис. 6: Промежуток впуска в Сибирь-2.

частот бетатронных колебаний при импульсном возбуждении электронного пучка; двух оптических станций, включающих фотоэлектронные умножители с высоким временным разрешением, диссекторы для наблюдения продольного и поперечных размеров пучка по синхротронному излучению, и, кроме того, используемых для пооборотного наблюдения за пучком при отладке инжекции в накопитель на этапе запуска. Частоты бета-

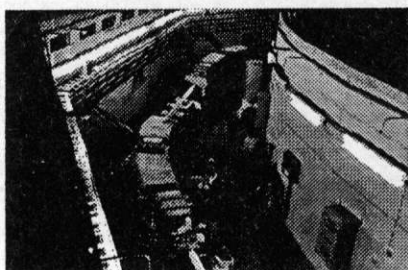


Рис. 7: Суперпериод магнито-вакуумной системы электронного накопителя Сибири-2 в сборе внутри биоэащиты.

тронных колебаний измеряются при помощи специальной станции в полуавтоматическом и, впоследствии, в автоматическом режиме при резонансном возбуждении бетатронных колебаний. Кроме того, предусмотрена возможность, с помощью импульсного наносекундного генератора и специальных пластин, "мгновенно" возбуждать поперечные колебания и, с помощью быстрого пикапа, получать спектр этих колебаний за время раскогеренчивания. Для апертурных измерений в поперечных координатах имеются подвижные дистанционно управляемые скреперы.

### 4.2 Вакуумная система

Вакуум в большом накопителе должен обеспечивать время жизни пучка на уровне 10 часов при токе 0.3 А. Это соответствует среднему давлению в накопителе

при наличии пучка  $3 \times 10^{-9}$  Торр (в азотном эквиваленте,  $Z \sim 7$ ). Получение высокого вакуума на кольце накопителя обеспечивается 62 сосредоточенными комбинированными насосами (состоящими из магниторазрядного насоса и титанового испарительного насоса) со скоростями откачки 1000 л/с. Откачка ВЧ-резонаторов осуществляется двумя специальными титановыми испарительными насосами со скоростью откачки 3000 л/с каждый и двумя магниторазрядными насосами со скоростью откачки около 700 л/с.

Вакуумная камера в поворотных магнитах и в линзах изготовлена из алюминиевого сплава АМгС методом экструзии. Корпуса для установки откачного оборудования, манометрических преобразователей, датчиков положения пучка, неподвижных и подвижных приемников синхротронного излучения и начальных участков каналов вывода синхротронного излучения изготовлены из нержавеющей стали. Соединения между соседними элементами вакуумной камеры, выполненных из разных металлов, осуществляется через биметаллические фланцы при помощи аргонодуговой сварки.

Первый вакуумный шов на накопителе Сибирь-2 был произведен 16 июня 1993г. 25 июня 1993 г. первым был собран и откачан на вакуум впускной участок ( $\frac{1}{2}$  первого суперпериода и  $\frac{1}{2}$  шестого суперпериода), включающий впускной магнит, шифлдектор и предшифлдектор. Второй этап монтажа вакуумной камеры был проведен за период с 27 октября по 15 ноября 1993 г. Проведена работа по геодезической выставке элементов магнитной системы Сибирь-2, собраны и сварены элементы вакуумной камеры сверхпроводящего вигглера и вакуумная камера второго и третьего суперпериодов. Проведена черновая откачка.

Окончание монтажа вакуумной камеры Сибирь-2 было проведено с 13 по 23 декабря 1993 года. Тогда на кольцо был установлен только один резонатор 181 Мгц. Второй резонатор был установлен в марте 1994 года. 5 апреля 1994 года приступили к прогреву и получению глубокого вакуума в резонаторах и отдельных суперпериодах Сибирь-2. Эта работа, в основном, была окончена к концу июля 1994 года.

Прогрев алюминиевых вакуумных камер осуществляется при  $160^\circ \text{C}$  в течение 24 часов, а корпусов и участков из нержавеющей стали - при  $300^\circ \text{C}$ . В настоящее время вакуум в кольце соответствует давлению около  $2 \times 10^{-9}$  Торр. Дальнейшая очистка поверхности вакуумной камеры накопителя будет осуществляться под действием СИ. Интеграл на уровне 50 А-час электронного пучка обеспечит возможность достижения времени жизни по вакууму около 10 час.

#### 4.3 ВЧ - система

Мощная часть ВЧ-системы накопителя Сибирь-2 [7] состоит из двух ускоряющих резонаторов, двух волноводов и двух ВЧ - генераторов, работающих на частоте 181.14 МГц, что соответствует 75 гармонике частоты

обращения. Для разведения частот синхротронных колебаний в соседних густках и предотвращения возбуждения коллективных колебаний в режиме работы со многими густками в кольце накопителя будут установлены 2 дополнительных резонатора с кратностями 224 и 226, т.е. с частотами 541.42 МГц и 546.42 МГц соответственно. Дополнительная ВЧ-система содержит два отдельных маломощных генератора по 5 кВт, соединенных через коаксиальный фидер со своим резонатором.

Генераторы, работающие на частоте 181.14 МГц, обеспечивают напряжение на основных резонаторах 1.8 МВ (ускоряющее напряжение с учетом коэффициента пролета около 1.5 МВ). При максимальном накопленном токе 0.3 А и энергии 2.5 ГэВ мощность, необходимая для компенсации радиационных потерь, с учетом сверхпроводящих вигглеров составляет около 300 кВт. Мощность потерь в стенках резонаторов 90 кВт. Таким образом, выходная мощность генератора составляет 400 кВт. Для повышения надежности ВЧ система выполнена двухканальной с автономным охлаждением, питанием, защитой и управлением каждого канала.

Ускоряющие резонаторы - медные, цилиндрические - возбуждаются на типе колебаний  $E_{010}$ . Настройка резонаторов проводится путем прогиба торцевых стенок с помощью электромеханизмов. В декабре 1993 года в ИЯФ, до отправки в ИАЭ, были проведены успешные полномасштабные испытания на резонаторе 181 МГц (втором). При этом было достигнуто максимальное напряжение 1.5 МВ при коэффициенте пролета 0.82. Ранее аналогичные измерения были проведены и на первом резонаторе.

1 апреля 1994 г. на кольцо Сибирь-2 установлены оба основных резонатора 181 Мгц, после чего они были прогреты и откачаны до глубокого вакуума. На рис. 8 показаны мощные 181 МГц резонаторы, установленные на кольце Сибирь-2 до подключения питающих фидеров.

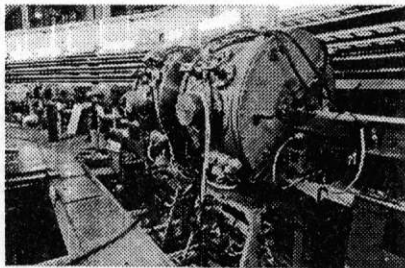


Рис. 8: Мощные 181 МГц резонаторы на кольце Сибирь-2.

Механический монтаж ВЧ-генераторов закончен, в стадии окончания находится электрический монтаж. Монтаж волноводов практически завершен. Таким образом, имеется возможность начать электрические включения ВЧ-мощности в конце 1994 года.

#### 4.4 Геодезия

В настоящее время точность выставки геодезической сети Сибирь-2 определяется по двум диаметрально противоположным геознакам так, что среднеквадратичная ошибка в определении положения реперов геодезической сети в радиальном направлении равна 0.27 мм, а в продольном направлении 0.40 мм. Среднеквадратичная ошибка выставки реперных знаков магнитных элементов относительно реперов геодезической сети в плане равна 0.14 мм. Более точная выставка предстоит перед началом работ по инжекции электронного пучка в Сибирь-2.

#### 4.5 Планы

На накопителе Сибирь-2 в ноябре 1994 года планируется окончить электромонтаж и подключение нагрузок к силовым электрическим цепям, включить мощные и слаботочные источники питания магнитной системы, вакуумной системы, ВЧ-системы. Обеспечить биологическую защиту всего комплекса. Провести точную выставку элементов кольца Сибирь-2. Завершить работы по программному обеспечению запуска Сибирь-2: управление и контроль систем комплекса, опрос датчиков положения пучка, построение  $x, z$  - орбиты, коррекция орбиты, автоматическое измерение частот бетатронных колебаний, измерение оптических функций и настройка структуры и т.д. Инжекцию электронов в Сибирь-2 планируется осуществить до конца 1994 г.

### 5 REFERENCES

- [1] V.V. Anashin et al., NIM, A282, p.369-374,(1989).
- [2] G.V.Andreev, Zh.T.Ph., vol. 41, p.788-796, 1971.
- [3] V.Korchuganov et al. PAC-93, Washington,D.C., May 17-20, 1993. Vol.1.p.564-566.
- [4] V.N.Korchuganov, M.M.Samorukov, EPAC-92, Berlin, March 24-28, 1992, Vol.1. p.474-476.
- [5] В.В. Анашин и др. Труды 7 Всесоюзного совещания по физике заряженных частиц. Дубна, 1980, т.1, с.306.
- [6] В.В. Анашин и др. Труды 11 Всесоюзного совещания по физике заряженных частиц. Дубна, 1988, т.2, с.281-284.
- [7] П.Ю.Абрамский и др. Труды 11 Всесоюзного совещания по физике заряженных частиц. Дубна, 1988, т.1, с.227-229.

# Расчет параметров накопителя СИБИРЬ-2 с учетом результатов измерений магнитных элементов

В.Н.Корчуганов, Е.Б.Левичев, В.В.Сажаяев, А.В.Филипченко  
Институт ядерной физики СО РАН им.Г.И.Будкера  
630090 Новосибирск

## Аннотация

Накопитель электронов СИБИРЬ-2 оптимизирован для получения малого эмиттанса пучка и высокой яркости синхротронного излучения. Известно, что такие специализированные источники СИ весьма чувствительны к различного рода возмущениям. В докладе описывается методика обработки магнитных измерений элементов накопителя и учет реального распределения магнитного поля для расчета динамики пучка и параметров ускорителя.

## 1 Введение

Магнитная структура специализированного источника СИ СИБИРЬ-2, созданного в ИЯФ СО РАН и находящегося в стадии запуска в ИАЭ им.И.В.Курчатова [1], содержит 24 дипольных магнита, 72 квадрупольные линзы трех модификаций, объединенные в 6 семейств, 36 секступольных линз, 12 октупольных и skew-квадрупольных линз и различные корректирующие элементы [2]. Т.к. источники СИ с малым эмиттансом чувствительны к различным неидеальностям магнитной структуры, особенно в начальный период работы, задача расчета параметров и характеристик пучка, динамики электронов с учетом реального распределения магнитных полей элементов весьма актуальна.

В докладе приводятся результаты статистической обработки результатов измерений магнитных элементов и построение на их основе модели структуры, пригодной для учета различных возмущений как линейной, так и нелинейной динамики пучка, изучение полученной модели и сравнение с "идеальной" структурой, использовавшейся ранее для проектирования ускорителя.

## 2 Магнитные измерения элементов

Магнитные измерения проводились матрицей датчиков Холла, размещенной в апертуре элемента перпендикулярно его оси и перемещаемой вдоль оси прецизионным механизмом с регулируемым шагом [3]. Поперечное расстояние между центрами датчиков определялось с точностью  $\leq 5\mu\text{м}$ , что



позволило аккуратно измерять профиль поля и вычислять мультипольные коэффициенты разложения поля.

Измерения поворотного магнита показали высокую поперечную однородность поля: при  $E = 2.5$  ГэВ его относительное отклонение в области  $\pm 3.1$  см не превышает  $\pm 5 \times 10^{-4}$ , а систематическая квадратичная нелинейность  $\leq 2.5$  Гс/см<sup>2</sup>. Угол поворота всех магнитов выдержан в пределах  $\frac{\Delta\phi}{\phi_0} \leq \pm 10^{-3}$ .

Особенностью азимутального распределения поля поворотного магнита является наличие двух участков: основного и дополнительного короткого участка на краю магнита с полем, равным 1/4 основного. В прямолинейном промежутке за магнитом предполагается установить ондулятор или сверхпроводящую змейку, и такое распределение поля позволит разделить излучение из магнита и ондулятора, а также избежать нежелательного нагрева охлажденных частей камеры змейки излучением.

Изучение зависимости магнитных характеристик диполей СИБИРЬ-2 от уровня тока возбуждения показало, что относительное изменение эффективной длины магнитов в рабочем диапазоне токов не превышает  $\pm 0.05\%$ . В табл.1 приводятся основные измеренные параметры магнитов при токе, соответствующем энергии 2.5 ГэВ.

Таблица 1. Параметры поворотного магнита СИБИРЬ-2.

Параметр	Осн. полюс	Промежуток	Малый полюс
$\phi$ (град)	14.493	-	0.507
$\sigma_\phi/\phi$	$9.6 \times 10^{-4}$	-	$2.4 \times 10^{-3}$
$B_0$ (кГс)	16.983	-	4.246
$R_0$ (см)	491.08	-	1964.2
$l_m$ (см)	124.22	5.2	17.5

Здесь  $\sigma_\phi/\phi$  - относительный среднеквадратичный разброс угла поворота,  $B_0, R_0, l_m$  - амплитуда поля, радиус поворота и эффективная длина. Далее введем обозначения:  $B_0 = B_{0z}$  - дипольная компонента поля,  $B_n = \frac{\partial^n B_z(x)}{\partial x^n}$  - соответствующая компонента поля ( $B_1$  - градиент,  $B_2$  - секступоль и т.д.). Систематические значения обозначаются чертой сверху, а среднеквадратичное отклонение - угловыми скобками.

Известно, что краевое поле дипольного магнита содержит "псевдосекступольную" компоненту, которая входит только в уравнение горизонтального движения, и равна  $B_{2e} = \frac{\partial^2 B_0(s)}{\partial s^2}$  [4]. Данная величина вычислялась по продольному распределению поля и учитывалась при моделировании нелинейного движения.

Для всех квадрупольных линз размеры и конфигурация поперечного сечения полюсов одинаковы. Однако, по конструкции различаются линзы с замкнутым магнитопроводом (O-типа) и с разомкнутым в медианной плоскости (C-типа). Последние нужны для пропуска каналов вывода излучения. В свою очередь, линзы O-типа имеют две модификации по длине.

Линзы объединены в семейства по 12 в каждом, которые питаются отдельным источником. Обработка измерений проводилась по семействам. Основными изучаемыми параметрами были: интеграл градиента вдоль оси линзы,  $B_2(s)$  и  $B_3(s)$  внесенные из-за особенностей изготовления, а также, нелинейности, вносимые краевыми полями линз - "псевдооктупольная" компонента  $B_{3e} = \frac{\partial^2 G(s)}{\partial s^2}$  [4], вычислявшаяся из измерений распределения градиента линзы вдоль оси.

Измерения проводились на трех уровнях тока: 0.25 кА, 0.5 кА и 0.75 кА. В табл.2 приведены основные измеренные параметры линз при токе возбуждения 0.75 кА.

Таблица 2. Измеренные параметры квадрупольных СИБИРЬ-2.

Тип линзы	$O_1$	$O_2$	C
$l_m$ (см)	29.17	38.86	32.60
$J_0$ (кГс)	98.898	133.006	100.989
$\frac{J}{J_0} \times 10^3$	2.4	2.0	0.8

В таблице приведены:  $l_m$  - эффективная длина линзы,  $J_0$  - интеграл градиента вдоль оси и относительное среднеквадратичное отличие интеграла от среднего для линз данной модификации.

Кроме основных элементов, были проведены магнитные измерения секступольных, октупольных и skew-квадрупольных линз, а также различных корректирующих элементов. Результаты этих измерений использованы при моделировании динамики пучка.

### 3 Результаты моделирования

#### 3.1 Модель магнитной структуры

Для расчетов использовалась магнитная структура с параметрами, приведенными ниже ( $E = 2.5$  ГэВ). Чтобы учесть отличие параметров от средних, моделирование проводилось для 50 вариантов структуры ошибками, распределенными по нормальному закону, ограниченному в пределах  $\pm 2\sigma$ , где среднеквадратичный разброс  $\sigma$  определялся по результатам магнитных измерений и приведен в таблицах ниже.

Таблица 3. Параметры поворотных магнитов.

Параметр	Осн. полюс	Промежуток	Малый полюс
$B_0$ (кГс)	16.983	-	4.246
$l_m$ (см)	124.22	5.2	17.5
$B_2$ (гс/см <sup>2</sup> )	2.5	-	-

Нелинейности краевого поля магнита представлялись двумя "тонкими" линзами, размещенными на расстоянии  $\Delta s = -1.6$  см и  $+4.5$  см от края

магнита и интегральной силой  $B_{2e}l = \pm 1.2$  кГс/см ("-" для линзы вне магнита).

Таблица 4. Параметры квадрупольных линз.

Линза	$\bar{J}$	$L$	$B_1$	$\frac{\langle B_1 \rangle}{B_1}$	$\bar{B}_2$	$\langle B_2 \rangle$	$\bar{B}_3$
	кГс	см	кГс/см	$\times 10^{-3}$	Гс/см <sup>2</sup>	Гс/см <sup>2</sup>	Гс/см <sup>3</sup>
$F_1$	66.60	29.3	2.2730	2	-	1.1	1.6
$D_1$	-82.56	29.3	-2.8177	2	-	1.1	1.6
$F_2$	91.50	32.6	2.8067	1	2.5	1.2	1.5
$D_2$	-90.39	29.0	-3.1169	1	-	1.3	1.2
$F_3$	134.68	39.0	3.4305	1	-	1.3	1.2
$D_3$	-92.37	29.0	-3.1428	1	-	1.3	1.2

Аналогично магниту, нелинейности краевого поля линз представлялись парой "тонких" мультиполей на расстоянии от края линзы  $\Delta s = -2.5$  см и  $+1.2$  см. Интегральная сила этих нелинейностей вычисляется по формуле  $B_{3e} = \frac{1}{4.5} B_1$  (Гс/см); здесь  $B_1$  - значение градиента в центре линзы.

Особенностью специализированных источников СИ является наличие сильных секступольных линз, служащих для компенсации большого естественного хроматизма.

Таблица 5. Параметры секступольных линз.

Линза	$L$	$\frac{\langle L \rangle}{L}$	$B_2$
	см	$\times 10^{-3}$	кГс/см <sup>2</sup>
$SF$	11.3	6	0.21
$SD$	11.3	6	-0.53

Влияние высших гармоник, присутствующих в поле секступольной линзы мало и здесь не рассматривается.

### 3.2 Возмущение линейной оптики

Моделирование проводилось с помощью программы MAD [5] и с помощью пакета, разработанного авторами в ИЯФ СО РАН [6].

Прежде всего, возмущение линейной оптики вызвано разбросом интеграла градиента квадрупольных линз. Для расчета искажения оптических функций было промоделировано 100 вариантов магнитной структуры; при этом рассматривались следующие величины, существенно влияющие на потребительские характеристики ускорителя (табл.6): бетатронные частоты  $\nu_{x,z}$ , максимальные амплитудные функции  $\beta_{mx,mz}$ , амплитудные функции в центре промежутков, предназначенных для постановки вилглеров/ондуляторов  $\beta_{w,u}$  и максимальная дисперсионная функция в месте

постановки вигглера  $\eta_{wm}$ . Используемые обозначения: *Nom* - проектное, *Max/Min* - максимальное/минимальное значения параметра, а *Rms* - среднеквадратичное отклонение от проектного. На рис. 1 показан разброс  $\nu_{x,z}$  на диаграмме частот: здесь же показаны ближайшие резонансы. Рис. 2 демонстрирует один из вариантов искажения оптических функций.

Таблица 6. Моделирование линейной оптики

	$\nu_x$	$\nu_z$	$\beta_{xm}$	$\beta_{zm}$	$\beta_{xu}$	$\beta_{zu}$	$\beta_{zw}$	$ \eta_w $
			М	М	М	М	М	М
<i>Nom</i>	7.784	7.733	16.4	13.0	14.9	4.6	0.26	0
<i>Max</i>	7.842	7.781	26	20	20	6.5	0.36	0.2
<i>Min</i>	7.719	7.685	19	14	11	3.6	0.18	0
<i>Rms</i>	0.025	0.023	1.7	1.1	2.3	0.7	0.03	0.04
$(\frac{Rms}{Nom})$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0.1	0.08	0.15	0.15	0.12	

### 3.3 Нелинейная динамика с учетом возмущений.

Основными нелинейностями, влияющими на динамику частиц, являются секступольные линзы, компенсирующие хроматизм [6], именно они ограничивают динамическую апертуру. Однако, малые ошибки, нарушающие симметрию магнитной структуры могут дополнительно уменьшать область устойчивости частицы. При этом нужно различать несколько эффектов: искажение амплитудных функций и, вследствие этого, изменение фазы бетатронных колебаний в местах размещения сильных хроматических секступолей, наличие собственных нелинейностей в полях магнитов и линз и нелинейные компоненты краевых полей.

На рис. 3 показано влияние этих эффектов на размер динамической апертуры. Первый эффект - искажение амплитудных функций - приводит к небольшому ( $\leq 15\%$ ) уменьшению области устойчивости, в то время, как собственные малые нелинейности практически не влияют на ее размер (их вклад даже не заметен на приведенном рисунке). Краевые нелинейности изучались при помощи пакета программ *SumaRap* разработанного в ИЯФ СО РАН, т.к. *MAD* не имеет моды, учитывающей мультипольные составляющие краевых полей. Значения тонких линзы, приведенные в предыдущем разделе, были расставлены на нужных азимутах и проведено численное моделирование апертуры. Разброс значений от элемента к элементу при этом считался малым. Результаты моделирования приведены также на рис. 3, штрихованная линия. Видно, что влияние краевых нелинейностей на динамическую апертуру пренебрежимо.



## 4 Выводы и заключения

В докладе приведены основные результаты серийных магнитных измерений элементов структуры источника СИ, а также их статистического анализа. Эти результаты были использованы для изучения влияния погрешностей магнитного поля на параметры структуры. Уменьшение динамической апертуры незначительно и не должно существенно ограничивать эксплуатационные качества установки. Вместе с тем, искажение амплитудных функций может быть весьма нежелательным, особенно после постановки ондуляторов и сверхпроводящих змеек (например, значение горизонтальной  $\eta$ -функции может достичь значения  $10 \div 20$  см, что может привести к увеличению эмиттанса. Поэтому, такие эффекты требуют тщательного изучения и коррекции.

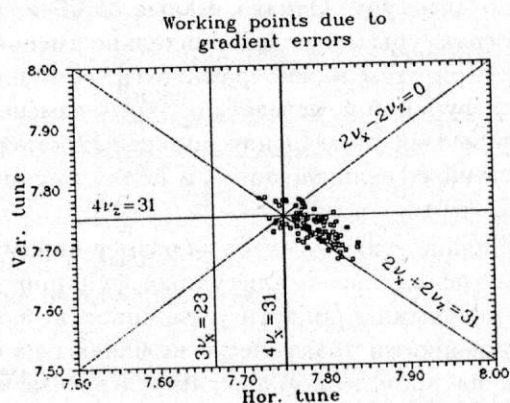


Рис. 1: Разброс  $\nu_{x,z}$  из-за ошибок градиентов

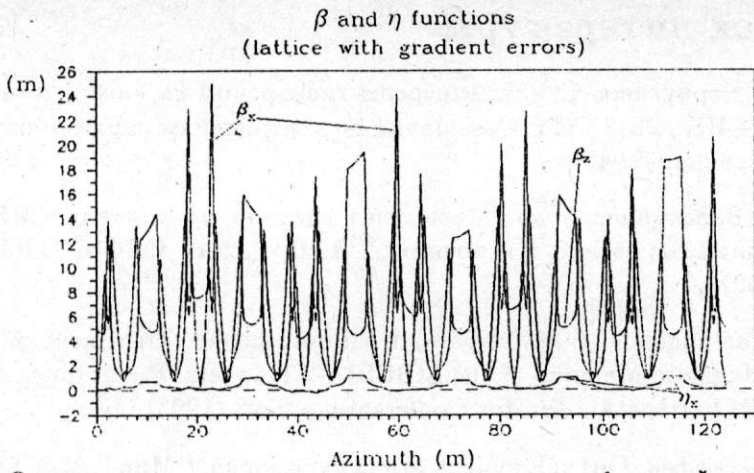


Рис. 2: Один из вариантов искажения амплитудных функций из-за ошибок градиентов

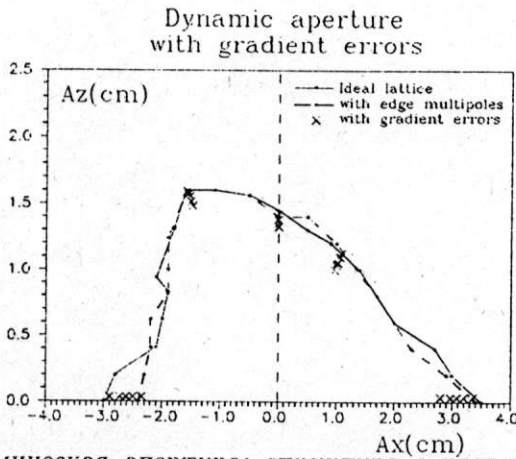


Рис. 3: Динамическая апертура: структура с реальными параметрами - сплошная линия; структура с краевыми нелинейностями - штрихованная линия; точки - структура с ошибками градиентов и собственными нелинейностями элементов.

## Список литературы

- [1] В.Н.Корчуганов Статус и перспективы работ на накопителе электронов СИБИРЬ-2. XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино (1994)
- [2] А.Г.Валентинов и др. Магнитная система накопителя СИБИРЬ-2 - специализированного источника СИ. Препринт ИЯФ СО РАН 89-174 (1989)
- [3] V.Korchuganov, E.Levichev, and A.Philipchenko. Treatment of the result of Magnetic Mapping of the SIBERIA-2 Magnets. Proceeding of the 1993 IEEE Particle Accelerator Conference, p.2793 (1993)
- [4] К.Штеффен. Оптика пучков высоких энергий. "Мир", М. с.58 (1969)
- [5] H.Grote, F.C.Iselin. The MAD Program (User's Reference Manual). CERN/SL/90/13(AP).
- [6] В.Н.Корчуганов, Е.Б.Левичев, В.В.Сажаев. Компенсация хроматизма и динамическая апертура накопителя электронов СИБИРЬ-2 (численное моделирование). Препринт ИЯФ 93-27 (1993).

## ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Б. И. Гришанов, А. И. Бутаков, Ю. А. Немков, А. Р. Фролов  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера  
Сибирское отделение РАН, г. Новосибирск

Электрон-позитронные коллайдеры на энергии порядка сотен МэВ обычно имеют периметр несколько десятков метров, что соответствует периоду обращения частиц порядка 100 нс и меньше. Для достижения предельной светимости требуется накопление в коллайдерах больших токов, предпочтительным может быть многосгустковый режим работы. При этом при накоплении частиц одного знака желательно не возмущать движение частиц как встречного пучка, так и соседних сгустков. Такие условия можно обеспечить при использовании кикеров, выполненных на основе отрезков симметричных полосковых линий, работающих в режиме встречной бегущей волны и питаемых парами одинаковых по форме и амплитуде разнополярных импульсов. Предпочтительно иметь форму импульсов, близкую к прямоугольной, их длительность должна быть порядка десятков наносекунд при наносекундном фронте и спаде а также при наносекундной синхронизации. Чаще всего требуются импульсы амплитудой в десятки киловольт, представляется нерациональным переходить границу района 100 кВ.

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО АН России ведется разработка фи-фабрики – электрон-позитронного коллайдера сверхвысокой светимости на энергию района 510 МэВ /1/. В рамках этой программы в ИЯФ ведется разработка генератора пар разнополярных импульсов для питания кикеров, основные параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Форма импульсов	прямоугольная
Амплитуда импульсов	регулируемая до $\pm 100$ кВ
Длительность на полувысоте	13 нс
Время нарастания, время спада	около 3 нс
Синхронизация с запуском	не хуже $\pm 3$ нс
Сопrotивление нагрузки	50 Ом

Схема генератора приведена на рис. 1. Основа построения формирующей



части схемы – две двойные формирующие линии ДФЛ1 и ДФЛ2, коммутируемые одним разрядником P1. Поясним работу этой части схемы. В классической схеме формирователя на основе ДФЛ /2/ (такая схема часто называется схемой с последовательным включением формирующих линий, предложена Блюмлайном) коммутатор закорачивает на "землю" свободный конец одной из двух предварительно заряженных формирующих линий ФЛ, которые и образуют ДФЛ. В момент коммутации потенциал ФЛ в месте подсоединения коммутатора становится нулевым, в схеме начинаются волновые процессы, в результате которых на нагрузке формируется импульс прямоугольной формы. Длительность импульса равна удвоенному времени пробега волны в ФЛ, амплитуда – зарядному напряжению, а полярность противоположна полярности последнего. (Заметим, что возможен и другой вариант подключения коммутатора к ФЛ, при котором формируемый импульс имеет ту же полярность, что и зарядное напряжение.) В нашей схеме в исходном состоянии ДФЛ заряжаются одинаковыми по величине напряжениями противоположной полярности. После пробоя разрядника обе ДФЛ оказываются закороченными друг на друга, а поскольку они предварительно заряжаются до одинаковых напряжений противоположного знака и имеют равные волновые сопротивления, после пробоя потенциал в месте коммутации становится равным нулю. Это означает, что в каждой ДФЛ происходят те же процессы, что и в классическом варианте формирователя, каждая половина генератора работает как бы независимо. Однако выходные импульсы здесь имеют жесткую взаимную синхронизацию, поскольку коммутация осуществляется одним разрядником.

В качестве высоковольтного наносекундного коммутатора в схеме используется трехэлектродный последовательный искровой разрядник, работающий в атмосфере сжатого азота при давлении до 20 атм. Многолетний опыт эксплуатации разрядников такого типа в ИЯФ показал их высокую надежность при работе в составе ускорительно-накопительных комплексов, возможность обеспечения синхронизации с запуском не хуже нескольких наносекунд. Для работы в режиме наносекундной синхронизации на средний (запускающий) электрод разрядника подается зарядное напряжение такой величины, чтобы соотношение зарядных напряжений на зазорах составляло 2:1. Запуск разрядника осуществляется подачей импульса на средний электрод. Для надежной и стабильной работы амплитуда запускающего импульса  $V_{зап}$  должна составлять приблизительно  $2/3$  от величины коммутируемого напряжения, т.е. при зарядном напряжении ДФЛ



$\pm 100$  кВ нужно обеспечить  $V_{\text{зап}} = 100 \dots 130$  кВ. Это обычные требования к запуску разрядников такого типа.

Поскольку стартовый сигнал на запуск генератора вырабатывается низковольтной электроникой и обычно имеет амплитуду максимум десятки вольт, понятна проблема получения перепада порядка 100 кВ, привязанного к такому импульсу с наносекундной точностью.

Для формирования импульса запуска обычно применяются импульсные водородные тиратроны, обеспечивающие время переключения не менее нескольких десятков наносекунд. До пробоя первого промежутка разрядника запускающий электрод нагружен только собственной емкостью на корпус разрядника и на крайние электроды. Выходное сопротивление схемы запуска может быть достаточно большим, а мощность источника запускающих импульсов сравнительно невысокой. Это позволяет применить в цепи запуска тиратрон средней мощности в сочетании с повышающим импульсным трансформатором. В настоящей схеме применен тиратрон Т1 типа ТГИ1-1000/25 и ступенчатый трансформатор импульсов на отрезках однородных линий. Трансформатор имеет три ступени. Первая ступень L1 выполнена из трех соединенных в параллель отрезков кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом, вторая ступень L2 - один отрезок такого же кабеля; третья ступень L3 представляет собой спиральную линию с волновым сопротивлением около 450 Ом /3/. Запуск генератора осуществляется подачей управляющего импульса на сетку тиратрона, который при этом пробивается и закорачивает подключенные к его аноду предварительно заряженные кабели первой ступени трансформатора. В результате на входе трансформатора формируется бегущая волна, амплитуда которой (за вычетом падения напряжения на открытом тиратроне) равна величине зарядного напряжения этих кабелей. С учетом выбранных волновых сопротивлений ступеней и удвоения напряжения на открытом конце последней ступени коэффициент трансформации  $K=5,4$ . Длина ступеней трансформатора выбрана так, чтобы удвоенное время пробега волны в каждой ступени было больше длительности фронта импульса, формируемого тиратроном. Наличие в этой цепи разделительных конденсаторов С1 и С2 несколько снижает эту величину, однако при зарядном напряжении тиратрона 25 кВ перепад напряжения непосредственно на запускающем электроде разрядника превышает 100 кВ, что достаточно для запуска разрядника с наносекундной точностью.

Осциллограмма выходного импульса отрицательной полярности, снятая

при помощи емкостного делителя Д1, приведена на рис.2. Импульс положительной полярности имеет такую же форму. (Емкостные делители слабо дифференцируют импульсы, постоянная дифференцирования  $\tau \approx 1 \text{ мкс.}$ )

При отладке генератора мы столкнулись с проблемой подавления паразитных осцилляций на осциллограмме формируемых импульсов, которые возникают за счет ударного возбуждения колебаний в объеме разрядника при его пробое. Величина этих осцилляций достигала  $\pm 20\%$  и более от амплитуды импульса и зависела от режима. Подавить колебания удалось путем оптимизации геометрии разрядника, сильнее всего помогает минимизация паразитной емкости запускающего электрода. В более высокоомных генераторах такие эффекты обычно не проявляются или выражены гораздо слабее (в этом генераторе разрядник коммутирует линии с волновым сопротивлением  $25 \text{ Ом}$ ).

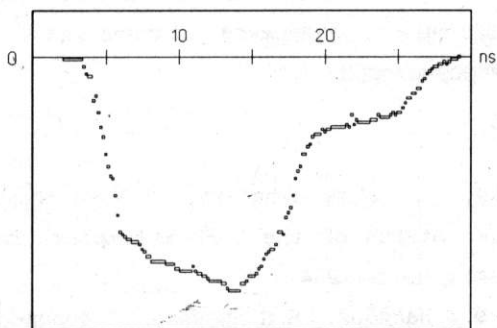


Рис.2. Осциллограмма выходного импульса.

Генератор имеет коаксиальное исполнение. ДФЛ изготовлены из труб из нержавеющей стали, наружная труба имеет проходной диаметр 150 мм, как и разрядник в направлении коммутации, корпус которого изготовлен фрезерованием и расточкой из дюралюминиевой плиты. От объема разрядника линии отделены герметичными вводами и заполнены элегазом при давлении до 5 ати. Подача зарядных напряжений производится из атмосферы, вводы также заполнены элегазом. Из соображений безопасности вводы отделены от объема линий дополнительными проходными герметичными изоляторами. Материал всех изоляторов – оргстекло. Спиральная линия находится в объеме разрядника. В ступенчатом трансформаторе используются отрезки кабеля РК50-17-17. Выходные импульсы передаются к нагрузкам по кабелям РК50-44-17. Для повышения электрической прочности центральные жилы



кабелей (они имеют многопроволочную конструкцию) заполняются элегазом при давлении до 5 ати, внешняя оболочка кабеля РК50-44-17 также заполняется элегазом при давлении до 1 ати.

Крайние электроды разрядника имеют полусферическую форму, средний электрод плоский. Все электроды изготовлены из алюминиевого сплава. В электродные узлы вмонтированы механизмы регулировки, которые позволяют регулировать зазоры с пульта управления в процессе работы генератора с помощью маломощных электроприводов, установленных непосредственно на корпусе разрядника, что позволяет в широких пределах перестраивать генератор по напряжению, а также производить тонкую подстройку для получения наносекундной синхронизации.

Обе ДФЛ вместе с разрядником и корпусами разделки выходных кабелей образуют в собранном виде единую жесткую конструкцию длиной около 6 м, с учетом допустимого радиуса изгиба выходных кабелей для размещения генератора требуется помещение длиной около 8 м.

В настоящее время генератор испытан по напряжению до 90 кВ, ограничения связаны с задержкой изготовления штатных зарядных импульсных трансформаторов.

#### Литература

1. N. S. Dikansky, A. V. Novokhatsky, V. V. Parkhomchuk, A. N. Skrinisky, Yu. M. Shatunov. Status of the VEPP-5 complex. Доклад на конференции EPAC-94, Лондон, июль 1994.
2. Г. А. Месяц, Ф. С. Насибов, В. В. Кремнев. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения, с. 64. М., "Энергия", 1970.
3. Б. И. Гришанов. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов. Авт. свид. N 518939, 1974.

## Измерение удлинения электронного сгустка, полученного с арсенид-галлиевого фотокатода.

М.С.Авилов, А.В.Александров, Н.С.Диканский, П.В.Логачев, А.В.Новохатский.  
Институт Ядерной Физики СОРАН,  
630090 Новосибирск, Россия.

R.Calabrese, V.Guidi and P.Lenisa  
Dipartimento di Fisica dell'Universita' and INFN,  
I-44100 Ferrara, Italy.

G. Lamanna, G.Ciullo and B.Yang.  
Laboratori Nazionali di Legnaro,  
I-35020 Legnaro, Italy.

L.Tecchio.  
Dipartimento di Fisica Sperimentale dell'Universita' and INFN,  
Torino, Italy.

### Аннотация

Идея использования СВЧ-фотопушки в качестве инжектора для линейных ускорителей прорабатывается и воплощается практически во всех крупных ускорительных лабораториях мира, поскольку такой источник электронов позволяет получить короткий интенсивный сгусток с малым эмиттансом. С другой стороны, значительный интерес к источникам поляризованных электронов сильно продвинул в последние годы технологию приготовления и использования арсенид-галлиевого фотокатода, имеющего высокую квантовую эффективность и степень спин-поляризации эмиттируемого пучка. Поэтому применение такого фотокатода в СВЧ-фотопушке является очень интересной задачей. Одной из важных проблем, возникающих при ее решении, является существенное увеличение длительности электронной эмиссии с арсенид-галлиевого фотокатода по сравнению с длительностью лазерного импульса в пикосекундном диапазоне времен. Если такое удлинение сравнимо с периодом ускоряющего ВЧ, то фотокатод будет быстро разрушен возвращенными на него электронами. Для экспериментального изучения этой проблемы была создана установка, измеряющая длину электронного сгустка, полученного с арсенид-галлиевого фотокатода, который освещается импульсным лазером (98 пс - ширина на полувы-

соте). Метод измерения основан на круговой развертке электронного пучка в СВЧ резонаторе. Пучок ускоряется в электронной пушке постоянного напряжения (50 кВ). Минимальная измеренная длина сгустка составила  $106 \pm 20$  пс (ширина на полувысоте) для  $4.5 \cdot 10^8$  электронов в сгустке. В этом докладе мы приводим описание экспериментальной установки и полученные результаты.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Будущие электрон-позитронные фабрики должны обеспечивать очень высокую светимость, а потому требуют большого числа инжектируемых частиц в сгустке. И в этом смысле лазерная СВЧ-фотопушка является наиболее подходящим источником электронов, поскольку она способна сформировать высокоинтенсивный и короткий сгусток. На инжекционном комплексе для Ф-фабрики в Новосибирске [1] планируется использовать такой источник электронов, обладающий рядом преимуществ:

1. Изначально короткий электронный сгусток, это позволит обойтись без громоздкой системы субгармонического группирователя.
2. Лазерная СВЧ-фотопушка обеспечивает требуемое число электронов в коротком сгустке.
3. Такая пушка способна производить поляризованный электронный пучок.

Арсенид-галлиевый фотокатод в принципе обладает всеми необходимыми свойствами:

- Очень высокая плотность тока - до  $800 \text{ A/cm}^2$ .
- Высокая квантовая эффективность - до 20%.
- Высокая степень поляризации (80%).
- Приемлемое время жизни - до нескольких недель без регенерации.

Однако на пути использования арсенид-галлиевого фотокатода в СВЧ-фотопушке стоит ряд проблем. Бомбардировка поверхности фотокатода возвращенными электронами - одна из них. Отсутствие возвращенных электронов можно гарантировать при длительности эмиссии меньшей, чем четверть периода СВЧ. Верхний предел длительности эмиссии для используемой нами частоты ВЧ (2856 МГц) составляет 50пс на уровне 10% от максимума. Результаты измерения удлинения электронного сгустка, полученного с арсенид-галлиевого фотокатода, представлены в данном докладе.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Арсенид-галлиевый фотокатод - это полупроводник типа p, легированный цинком с концентрацией  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , поверхность которого активирована Cs и  $\text{O}_2$  по стандартной технологии [2] для достижения состояния отрицательного электронного сродства. По окончании активации катодный узел переносится из активационной камеры и вставляется в пушку при помощи манипулятора (см. рис. 1). Активация в отдельной камере позволяет избежать попадания цезия на электроды пушки и изолятор, что сохраняет электрическую прочность ускоряющего зазора. Катод пушки находится под отрицательным потенциалом, изменяемым в пределах от 0 до 50 кВ, диаметр катода, освещаемый лазером, равен 2 мм, при этом первенс пушки равен  $1.5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{кВ}^{3/2}}$ .

В этом эксперименте использовалось два лазера: постоянный 75 мВт  $\text{Ar}^+$  для активации и импульсный (532 нм) Nd:YLF с инъекцией от постоянного Nd:YLF лазера с синхронизацией мод. Импульсная лазерная система обеспечивала длительность лазерного импульса 98 пс (ширина на полувысоте) и 1.5 мДж в импульсе с максимальной частотой повторения 10 Гц. Длительность лазерного импульса (ширина на полувысоте) измерялась автокорреляционным методом с точностью 10 пс.

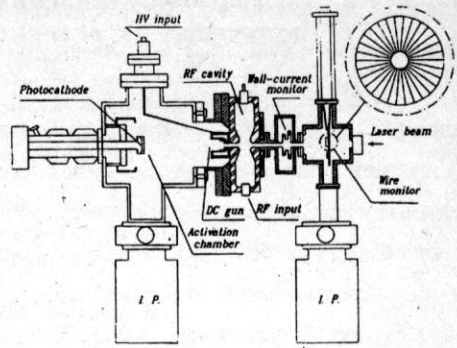


Рис. 1: Экспериментальная установка.

Для измерения длины электронного сгустка нами было предложено и создано устройство, основанное на круговой развертке электронного пучка прошедшего через вращающееся поперечное магнитное поле СВЧ резонатора. Электроны, проходящие через резонатор вдоль его оси, преобретают поперечный угол в направлении, зависящем от продольной координаты электронов в сгустке. Таким образом, продольная координата трансформируется в азимутальную в плоскости ортогональной к оси системы.

Круговая развертка электронного пучка в резонаторе осуществляется поперечным магнитным полем моды  $TM_{110}$  с круговой поляризацией. Круговая поляризация обеспечивается возбуждением двух пространственно ортогональных мод, сдвинутых на  $\frac{\pi}{2}$  по фазе.

Максимальное отклонение пучка в резонаторе достигается при пролетном угле, равном  $\frac{\pi}{2}$ . В этом случае пучок длительностью  $\Delta\tau$  заметает в ортогональной к оси системы плоскости дугу окружности с размерами:

$$R = \frac{eH_0\lambda \cdot L}{\pi\gamma mc^2}$$

$$\Delta\theta = w \cdot \Delta\tau,$$

где  $\lambda$  - длина волны ВЧ,  $w$  - частота и  $H_0$  - амплитуда магнитного поля на оси резонатора.

Длительность пучка  $\Delta\tau$  можно определить, измеряя угловой размер  $\Delta\theta$  его изображения на перпендикулярном к оси системы экране. Теперь рас-

смотрим основные источники возникающих при этом ошибок.

1. Конечный размер пучка. Если пучок имеет на экране поперечный размер  $d$ , то связанная с ним ошибка в определении длительности  $\delta\tau$  составит:

$$\frac{\delta\tau}{T} = \frac{d}{2\pi R} \quad (1)$$

где  $T$  - период ВЧ.

2. Энергетический разброс в пучке дает ошибку:

$$\frac{\delta\tau}{T} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2 + \frac{3U}{W_0} + \left(\frac{U}{W_0}\right)^2} \cdot \frac{\delta U}{U} \quad (2)$$

где  $U$  - ускоряющее напряжение,  $W_0 = 511$  keV.

3. Если пространственно ортогональные моды в резонаторе имеют различие в амплитуде  $\delta H$  и сдвиг фазы между ними отличается от  $\frac{\pi}{2}$  на  $\delta\phi$ , то поляризация магнитного поля на оси резонатора становится эллиптической. В этом случае ошибка в определении длины сгустка зависит как от длительности последнего, так и от фазы его влета в резонатор, но в любом случае не превышает величины:

$$\frac{\delta\tau}{T} \leq \sqrt{\left(\frac{\delta H}{H_0}\right)^2 + (\delta\phi)^2} \quad (3)$$

Резонатор был оптимизирован с целью достичь максимального отклонения пучка на энергии 50 кэВ при данной мощности ВЧ. Измеренная резонансная частота составила 2.46 ГГц, а ненагруженная добротность 17000. Резонатор имеет две перпендикулярно расположенные по периметру петли для ввода ВЧ мощности и два поршня для настройки частоты каждой моды в полосе 0.5 МГц. Источником СВЧ мощности служил импульсный магнетрон. Его мощность и частота могла изменяться в небольшом диапазоне при изменении амплитуды импульса с модулятора. Максимальная импульсная мощность составила 1.5 кВт. Стабильная работа магнетрона обеспечивалась ферритовым циркулятором, развязывающим его с резонансной нагрузкой. Настройка резонатора производилась на пучке длительностью в 15 нс. При круговой поляризации пучок описывал на экране полный круг и давал однородное распределение заряда по каналам азимутального датчика (см. Рис. 1).

Азимутальный датчик состоит из 30 танталовых секторов, расположенных перпендикулярно к оси системы, и имеет дырку на оси для пропуска лазерного пучка. Каждый сектор работает как цилиндр Фарадея, принимая часть заряда пучка. Максимальное разрешение такого датчика на данной частоте развертки составит  $400/30=13.3$  пс, а уровень шума одного канала регистрирующей электроники  $10^6$  электронов на канал. Суммарный вклад в ошибку отмеченных выше факторов (1),(2),(3) не превышает 20 пс.

Для измерения суммарного заряда в пучке мы использовали цилиндр Фарадея и резистивный датчик.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 2 (а,б,в) представлены временные зависимости тока в электронном сгустке для различных энергий, полученные с азимутального датчика. Этот же рисунок содержит сплошные кривые лоренцевской формы, подогнанные к экспериментальным точкам:

$$I = I_{max} \cdot \frac{\delta^2}{\delta^2 + (t - t_0)^2} \quad (4)$$

где  $\delta$  - полуширина на полувывоте,  $t_0$  - положение максимума тока. Параметры лазерного импульса не изменялись для всех трех значений энергии.

Значительное удлинение электронного сгустка с уменьшением энергии вызвано следующими эффектами.

Во-первых, удлинение в пушке. Длительность импульса в плоскости анода пушки, работающей в режиме с пространственным зарядом, очень близка ко времени пролета электрона в свободном ускоряющем зазоре пушки:

$$\tau = d \cdot \sqrt{\frac{2m}{eU}} \quad (5)$$

где  $d$  - эффективная длина ускоряющего зазора,  $U$  - напряжение на зазоре. Это верно, если длительность эмиссии меньше чем время пролета (5). В противном случае, когда длительность эмиссии превышает время пролета, длина сгустка в анодной плоскости определяется длительностью эмиссии. Другой причиной удлинения сгустка является



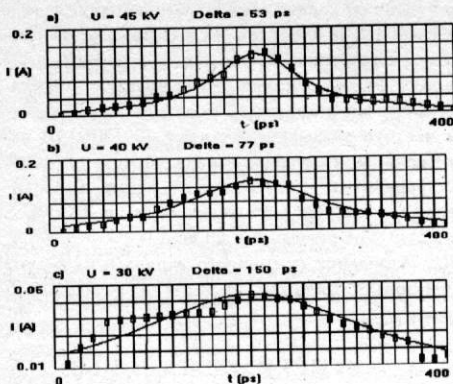


Рис. 2: Зависимость электронного тока сгустка от времени для разных энергий: 45 keV (а), 40 keV (б), 30 keV (в), параметры лазерного импульса неизменны.

ся уменьшение тока насыщения пушки с уменьшением напряжения. Иными словами, часть лазерного импульса, насыщающего по пространственному заряду пушку, становится длинее с уменьшением напряжения.

Отметим, что длительность сгустка для 45 кэВ,  $7.0 \cdot 10^8 e^-$ , и длительности эмиссии 98 пс (ширина на полувысоте), полученная с помощью программы PARMELA для нашей геометрии составила 100 пс (ширина на полувысоте). Эта величина близка к длительности лазерного импульса (98 пс) и к измеренной длительности электронного сгустка 106 пс (ширина на полувысоте) (см. Рис. 2(а)). В соответствии с этими результатами удлинение электронного сгустка за счет конечного времени отклика арсенид-галлиевого фотокатода не превышает суммарной ошибки измерений  $20+10=30$  пс.

Зависимости величины заряда в электронном сгустке от энергии и числа фотонов представлены на Рис. 3(а,б) соответственно. Для изменения числа фотонов в лазерном импульсе использовался набор калиброванных стекол, а заряд сгустка измерялся с помощью цилиндра Фарадея. Мы предлагаем простую модель для объяснения такого сорта зависимостей. Предположим, что импульс эмиссионной способности катода имеет лоренцеву форму (4), а электронная пушка не способна вытянуть все электроны из-за пространственного заряда. В таком случае вершина импульса эмиссионной способности будет срезана на уровне:

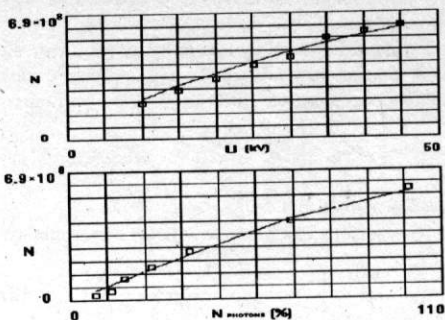


Рис. 3: Полное число электронов в сгустке как функция его энергии (а) и числа фотонов в лазерном импульсе (б).

$$I = p \cdot U^{3/2} \quad (6)$$

где  $p = 0.0015 \frac{A}{кВ^{3/2}}$  для нашей пушки. И полный заряд в обрезанном импульсе будет:

$$Q = 2\delta I_{max} \left( \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{t}{\delta}\right) \right) + 2tpU^{3/2},$$

$$t = \delta \sqrt{\frac{I_{max}}{pU^{3/2}}} - 1 \quad (7)$$

Сплошные кривые на Рис.3(а) есть результат расчета с использованием (7).

Результаты измерения заряда в сгустке для разного числа фотонов в лазерном импульсе представлены на Рис. 3(б). Сплошная кривая получена с использованием (7) при постоянном  $U$  но для различных  $I_{max}$ . Эта модель содержит три параметра:  $\delta$  - длительность эмиссионной способности, мы положили ее равной 49 пс - полуширина на полувысоте лазерного импульса,  $p = 0.0015 \frac{A}{кВ^{3/2}}$  - перванс нашей пушки, и  $I_{max}$  - максимальная эмиссионная способность для данного напряжения, которая равна 700 мА. Отметим, что такая модель очень чувствительна к форме импульса эмиссионной способности. К примеру, не удается сделать хорошей подгонки к экспериментальным данным при гауссовой форме импульса эмиссионной способности. Хорошее согласование данной модели с экспериментом дает подтверждение малости (менее 30 пс) удлинения сгустка за счет конечного времени отклика фотокатода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с полученными в эксперименте данными, фотокатод на основе толстого (толще глубины поглощения излучения лазера) кристалла GaAs имеет малое время отклика. Мы устанавливаем верхний предел на удлинение электронного пучка за счет конечного времени отклика фотокатода в 30 пс для 532 нм длины волны излучения лазера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A.V.Novokhatski, A.V.Aleksandrov, A.A.Kulakov, P.V.Logatchov, L.Tecchio. A laser-driven gun for electron-positron factories. NIM A 340(1994) p.237-240, North-Holland.
- [2] D.T.Pierce, R.J.Celotta, G.-C.Wang, W.N.Unertl, A.Galejs, C.E.Kuyatt and S.R.Mielczarek; Rev. Sci. Instrum. 51 (1980) 478.

## Some Design Considerations for Perpendicular Biased Ferrite Tuners

I.B. Enchevich, R.L. Poirier  
TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, B.C., V6T 2A3, Canada

### 1 INTRODUCTION

Ferrite materials have been used for many years to provide a frequency modulation in charged particles accelerating structures. The frequency variation is obtained by a change in the biasing current controlling the magnetic permeability of the ferrite. If the direction of the biasing magnetic field is parallel to the direction of the rf field in the structure, the biasing is known as "parallel"; if those fields are orthogonal, it is "perpendicular".

The difference in operating in the parallel or perpendicular biasing mode [1], projected on the magnetizing curve  $B(H)$ , is that in the first case the induction  $B$  changes in a range below the saturation magnetization  $B_{sat}$  and the permeability  $\mu$  is determined by the slope - the derivative  $dB/dH$  - at the working point; in the second case  $B$  changes in a range above  $B_{sat}$  and  $\mu$  is determined by the ratio  $B/H$  at the corresponding working point. For the same  $\mu$  change parallel biasing requires a bigger change in the induction flux  $\Phi$ . Because of the operation above  $B_{sat}$  the ferrite ac dynamic (hysteresis) losses are practically absent for perpendicular biasing. The non-linear effects by perpendicular biasing are also much less pronounced compared to the parallel case [2]. But the main advantage of the perpendicularly biased cavities when using yttrium garnet ferrites is their high magnetic quality factor<sup>1</sup>  $Q_m$  and their high electric quality factor  $Q_e$  [3,4,5] meaning low rf losses.

In spite of that, the rf losses in the perpendicular biased ferrite tuned cavities are not negligible for real operational conditions and due to the ferrite's poor thermal conductivity the heat removal presents a serious problem, especially in the case of a large relative frequency variation  $\Delta f/f$ .

The field  $H$  is controlled by the current  $I_b$  flowing through a biasing coil (Fig. 1). Since the ferrite is inside the resonator, the penetrating magnetizing flux induces an emf  $e$ ,

$$e = -(\Delta\Phi/\Delta t) \quad (1)$$

( $\Delta t$  is the time of modulation) and causes the flow of eddy currents in the walls. The resonator walls should have

<sup>1</sup>The magnetic quality factor  $Q_m$  is defined as a ratio of the dispersive and the dissipative (the real and the imaginary) components  $\mu'/\mu''$  of the tensor of the magnetic permeability [5].

a low resistivity to bring down the surface rf power losses and should be thick enough for mechanical and thermal stability, but they should also have high electric resistance to reduce the eddy current losses. These contradictory requirements are met differently depending on the particular designs.

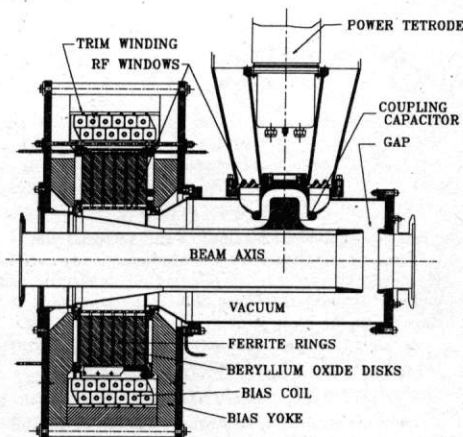


Fig. 1. Cross-section of the TRIUMF Prototype Ferrite Tuned Cavity

The resonator wall circuit acts as a secondary shorted winding coupled by a mutual magnetic flux to the primary biasing coil and loading its power supply. It determines to a large degree not only the energy consumption and the cooling requirements, but also the dynamic magnetic field distribution in the ferrite and the response time of the biasing system.

The increasing rotating frequency of the particles in ring accelerators is determined by the average magnetic field along the orbit, slightly differing from cycle to cycle. The driving frequency of the resonators follows the rotating frequency, but the self-resonant frequency of the acceler-

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТКОГО КЛИСТРОНА ДЛЯ ВЛЭПП

Н.И.Азорский, Г.В.Долбилов, Н.И.Лебедев, В.А.Петров, В.П.Саранцев,  
А.А.Фатеев, В.С.Швецов, М.В. Юрков

*Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна*

П.В.Аврахов, В.Е.Балакин, С.Ю.Казаков, Н.А.Соляк,  
В.Е.Теряев, В.И. Чашурин

*Филиал института ядерной физики, г. Протвино*

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Разработчики клистронов см-диапазона для линейных коллайдеров сталкиваются с двумя противоречивыми требованиями. Первое, выходная мощность клистрона должна быть большой (50-100 МВт), что требует достаточно большой апертуры, чтобы обеспечить большую величину рабочего тока. Второе, паразитные моды осцилляций должны быть подавлены. Первое требование накладывает сильные ограничения на минимально допустимую апертуру клистрона. В результате частоты паразитных мод становятся довольно близкими к рабочей частоте и их инкремент растет с током пучка, что делает проблему подавления паразитных осцилляций более сложной.

Мы изучили два пути решения проблемы подавления паразитных мод, а именно, использование волноводных дросселей и метод непрерывного изменения фазовой скорости паразитных мод для уменьшения области взаимодействия пучка с паразитными волнами. Однако, наш опыт показал, что эти методы не дают желаемого результата, особенно для случаев с высоким коэффициентом усиления (70-80 dB).

Идеальным способом подавления паразитных осцилляций был бы способ, когда найдена такая конструкция клистрона, где инкремент всех паразитных мод будет меньше, чем их затухание в клистроне. Для реализации этой идеи мы развили концепцию релятивистского клистрона с распределенным затуханием паразитных мод, используя поглощающие трубки дрейфа. Эксперименты с таким клистроном подтвердили обоснованность этой идеи, и полученные выходные параметры клистрона были близки к требуемым.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Мы изучали варианты 14 ГГц клистронов для ВЛЭПП с переменным (с 11 до 12,05 мм) диаметром трубок дрейфа и широкоапертурный вариант с диаметром трубок дрейфа, равным 15 мм. Основные параметры клистронов приведены в Таблице 1. Все 14 ГГц моды колебаний являются запердельными для трубок дрейфа в первом варианте клистрона. Для второго варианта рабочая мода колебаний  $E_{01}$ -запердельна, а низший тип волны не заперделен. Исследования клистронов проведены на пучке линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 в ОИЯИ (Энергия электронов-1 МэВ, ток пучка до 300 А, эмиттанс  $0,05 \text{ п.с.м.рад.}$ , длительность импульса 250 нс). Пучок согласовывался с магнитной системой клистрона с помощью фокусирующей (2) и дипольной (1) линз (Рис.1). Конусная Ti диафрагма (3) диаметром 10 или 15 мм была установлена на входе клистрона. Мониторы тока пучка (18) обеспечили возможность измерения тока пучка на выходе ускорителя, входе и выходе клистрона и потерь тока пучка в клистроне. Для получения более детальной информации о СВЧ-излучении мы использовали несколько коллекторов пучка (14) в форме круглого волновода диаметром 15-20 мм. Дипольный магнит (15) исключал возможность попадания электронов на вакуумное окно (16), выполненное из тонкой (0,1 мм) полиимидной пленки.

Таблица 1: Параметры ВЛЭПП клистронов

	Вариант 1 11 - 12.05 мм переменная апертура	Вариант 2 15 мм апертура
Основные параметры		
Энергия пучка	1 МэВ	
Ток пучка	300 (150) А	250 А
Частота	14.0 ГГц	
Кэф. усиления	70 dB	80 dB
Выходная мощность	165 (45) МВт	100 МВт
Эффективность	55 (30) %	40 %
Фокусирующая система		
Тип магнитов	Постоянные	
Максимальное магнитное поле	4.5 кГс	
Период	64 мм	
Число периодов	10	14.5
Акцентанс	0.08π см·рад	0.1π см·рад
Группирователь		
Диаметр трубок дрейфа	11 - 12.05 мм	15 мм
Длина секций дрейфа	59 мм	52 мм
Число секций дрейфа	7	10
Протяженность резонаторов	5 мм	12 мм
Число резонаторов	8	11
Рабочая мода	0	π
Выходная структура		
Рабочая мода	2π/3	π/2
Число ячеек	10	22
Длина	75 мм	110 мм
Апертура	16 мм	20 мм

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Для того, чтобы исследовать динамику пучка в фокусирующей системе, мы экранировали пучок от электромагнитной структуры клистронов тонкостенными Ti трубками. Поперечные размеры пучка мы измеряли с помощью тонких Al и Pb мишеней, расположенных внутри канала транспортировки пучка. Выбором величины экспозиции (числа импульсов) можно добиться прожигания отверстий в мишени и прохождения пучка без потерь. Размеры этого отверстия соответствуют поперечным размерам электронного пучка (Рис.2).

Измерения показали, что фокусирующие структуры обоих клистронов изготовлены с необходимой точностью. Менее 5% пучка ускорителя теряется на конусной диафрагме, потери тока пучка в группирователе и выходной структуре клистронов отсутствуют.

Однако, исследование фокусирующей системы в рабочем режиме показали, что при наличии СВЧ группировки требуется несогласованный режим инжекции пучка в клистрон. В этом случае потери сгруппированного пучка в выходной структуре минимальны. На Рис.2 приведены поперечные размеры пучка в клистроне с 11 мм апертурой в оптимальном режиме настройки системы инжекции. При проведении этих измерений СВЧ структуры клистронов были снова заэкранированы.



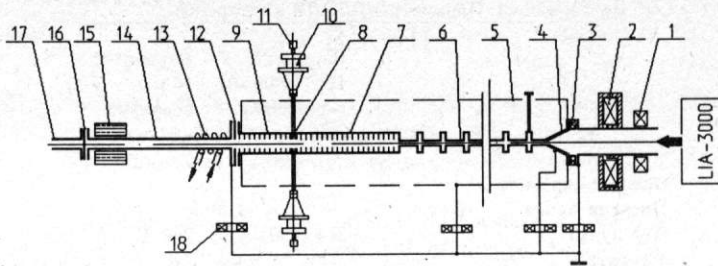


Рис. 1: Экспериментальная установка (1 – дипольный магнит, 2 – короткофокусная магнитная линза, 3 – изолятор, 4 – Ti конусная диафрагма, 5 – релятивистский клистрон, 6 – группирователь, 7 – выходная структура, 8 – трансформатор типа волн, 9 – СВЧ фильтр, 10 – СВЧ нагрузка, 11 – СВЧ детектор, 12 – изолятор (0.3 мм полиимидная пленка), 13 – охлаждение коллектора пучка, 14 – коллектор пучка, 15 – дипольный магнит, 16 – вакуумное окно (0.3 мм полиимидная пленка), 17 – круглый волновод, 18 – пояса Роговского).

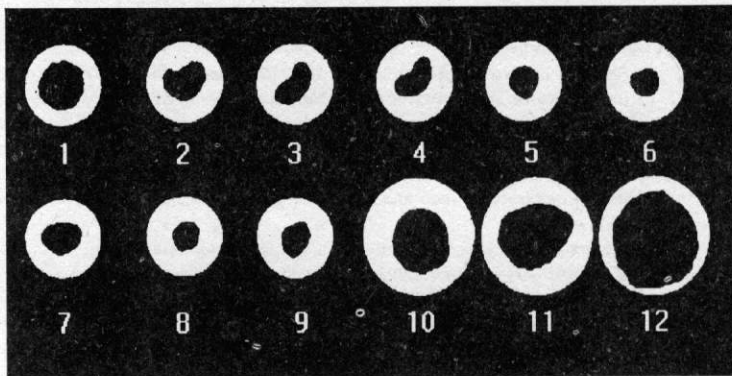


Рис. 2: Размеры пучка в фокусирующей системе клистрона с апертурой 11 мм. Положения 1-9 соответствуют группирователю (11 мм апертура), положение 10 и 11 – выходной структуре (16 мм апертура) и положение 12 – трансформатору типа волн (16 мм апертура). Где: 1 –  $z = 0$  мм; 2 –  $z = 40$  мм; 3 –  $z = 95$  мм; 4 –  $z = 154$  мм; 5 –  $z = 218$  мм; 6 –  $z = 282$  мм; 7 –  $z = 346$  мм; 8 –  $z = 410$  мм; 9 –  $z = 474$  мм; 10 –  $z = 538$  мм; 11 –  $z = 602$  мм; 12 –  $z = 645$  мм

#### 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Режим самовозбуждения исследовался поэтапно: исследование мод самовозбуждения группирователя (выходная структура заэкранирована); исследование мод самовозбуждения выходной структуры (группирователь заэкранирован) и исследование мод самовозбуждения клистрона.

Измерение спектрального состава СВЧ излучения показали, что имеется несколько полос паразитной генерации.

### Вариант 1: Клистрон с 11 мм апертурой

Группирователь возбуждается на частотах:

$$18.40 \text{ ГГц} \leq f \leq 18.80 \text{ ГГц}, \quad f_1 = 18.60 \text{ ГГц}$$

$$19.68 \text{ ГГц} \leq f \leq 19.80 \text{ ГГц}, \quad f_2 = 19.74 \text{ ГГц}$$

$$20.12 \text{ ГГц} \leq f \leq 20.28 \text{ ГГц}, \quad f_3 = 20.20 \text{ ГГц}$$

$$20.80 \text{ ГГц} \leq f \leq 21.00 \text{ ГГц}, \quad f_4 = 20.90 \text{ ГГц}$$

и их гармониках. Выходная структура самовозбуждается на частотах:

$$15.7 \text{ ГГц} \leq f \leq 16.0 \text{ ГГц}, \quad f_5 = 15.85 \text{ ГГц}$$

и их гармониках. Возбуждаются только несимметричные типы волн.

Спектр самовозбуждения клистрона есть простая комбинация спектров самовозбуждения группирователя и выходной структуры. Частоты полос возбуждения зависят от энергии электронов и тока пучка. Мода с полосой частот  $f_1 = 18,6$  ГГц имеет максимальный инкремент, мода самовозбуждения выходной структуры - минимальный. В пределах, ограниченных длительностью импульса (250 нс), мы не наблюдали порогового поведения самовозбуждения. При больших токах пучка оно возникает в начале импульса. С уменьшением тока падает инкремент возбуждения и растет задержка в регистрации СВЧ радиации.

Более полные исследования показали сложное временное поведение режима самовозбуждения. На Рис.3 представлены типичные осциллограммы. Как видно из Рис.3а имеются существенные флюктуации тока пучка на коллекторе. Это связано наличием поперечных неустойчивостей и потерь тока пучка в клистроне. Рис.3б и 3в демонстрируют зависимость от времени интенсивности СВЧ излучения клистрона, полученные с помощью широкополосного и узкополосного детекторов соответственно. Осциллограммы показывают, что спектр самовозбуждения не постоянен и существенно меняется во времени. Детальные измерения частот, проведенные с помощью перестраиваемого узкополосного детектора, показали, что процесс самовозбуждения имеет вид конкуренции мод. Самовозбуждение развивается на одной моде с некоторой частотой, затем рождаются другие моды с другими частотами. Далее эти новые моды растут и подавляют "родительские" моды.

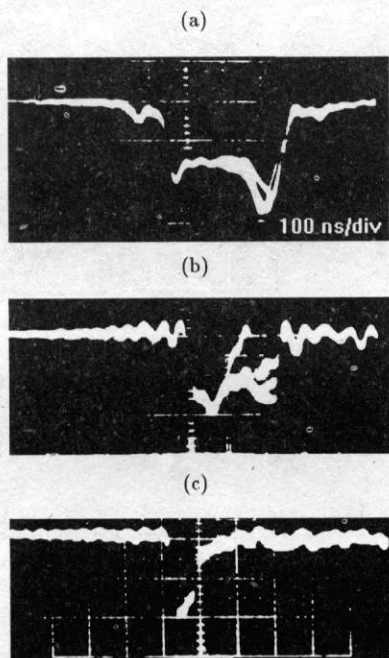


Рис. 3: Клистрон с апертурой 11 мм: осциллограммы сигналов в режиме самовозбуждения. Где (а) - ток пучка в коллекторе, (б) - СВЧ сигнал с широкополосного детектора, (в) - СВЧ сигнал с узкополосного детектора.

Наличие сигнала с задающего генератора (ЛБВ) не меняет ситуацию. При малых токах ( $I \leq 50$  А) мы получили номинальный режим усиления. При увеличении тока самовозбуждение возвращалось обратно на фронт тока пучка и длительность стадии усиления сокращалась.

**Вариант 2: Кликстрон с апертурой 15 мм**

Группирователь возбуждается на частотах:

$$\begin{aligned} 13,9 \text{ ГГц} \leq f \leq 14,15 \text{ ГГц}, & \quad f_1 = 14,04 \text{ ГГц} \\ 16,3 \text{ ГГц} \leq f \leq 16,5 \text{ ГГц}, & \quad f_2 = 16,4 \text{ ГГц} \end{aligned}$$

и их гармониках.

Собственных паразитных мод выходной структуры не обнаружено.

Как показали измерения, самовозбуждение кликстрона в 14 ГГц полосе частот обусловлено положительной обратной связью на  $H_{11}$  моде. Симметричная  $E_{010}$  мода резонаторов группирователя и несимметричная  $H_{11}$  мода трубок дрейфа связаны между собой из-за наличия радиальной нецентровки деталей кликстрона при их изготовлении и пайке. Центральная частота этих колебаний практически не зависит от энергии электронов, но существенно зависит от величины тока пучка.

Самовозбуждение в полосе частот 16,4 ГГц происходит на  $E_{01}$  моде, которая соответствует расчетной моде второго резонанса группирователя.

Так же, как и для кликстрона с 11 мм апертурой в кликстроне с апертурой 15 мм мы не наблюдали порогового поведения самовозбуждения. Возбуждение развивается на частоте 14 ГГц, имеющей больший инкремент. Нарастание  $E_{01}$  моды с частотой 16,4 ГГц приводит к уменьшению интенсивности предыдущей моды генерации. На Рис.4 приведены осциллограммы тока пучка в коллекторе (Рис.4а) и СВЧ излучения (Рис.4б). Имеются две области потерь тока пучка, которые соответствуют моментам времени, когда 14 ГГц и 16,4 ГГц моды достигают своего максимума.

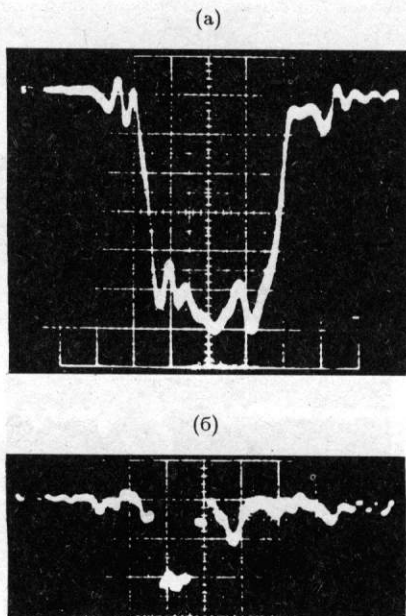


Рис. 4: Кликстрон с апертурой 15 мм: осциллограммы сигналов в режиме самовозбуждения. Где (а) - ток пучка в коллекторе, (б) - СВЧ сигнал с широкополосного детектора.

## 5 КОНЦЕПЦИЯ КЛИСТРОНА С СВЧ ПОГЛОЩАЮЩИМИ ТРУБКАМИ ДРЕЙФА

Результаты исследований, приведенные выше, показывают, что основная проблема состоит в том, как подавить самовозбуждение клистрона. Следует отметить, что в клистроне с 11 мм апертурой были приняты специальные меры для подавления паразитных мод. А именно, трубки дрейфа этого клистрона имеют переменный диаметр для того, чтобы создать переменную фазовую скорость паразитных волн и уменьшить область их взаимодействия с электронным пучком.

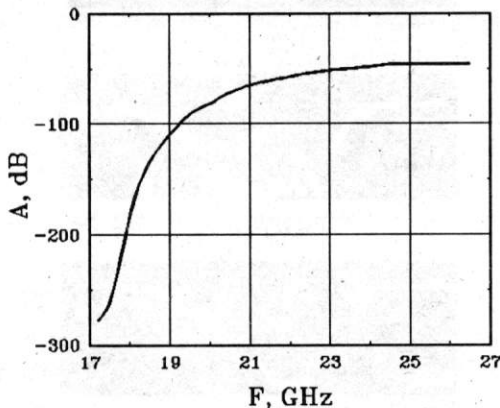


Рис. 5: Интегральная частотная характеристика распределенного подавляющего фильтра, состоящего из семи СВЧ поглощающих вставок ( $H_{11}$  мода).

Для того, чтобы решить проблему самовозбуждения, мы предлагаем в этой статье концепцию релятивистского клистрона с СВЧ поглощающими трубками дрейфа для распределенного подавления паразитных колебаний. Основная идея этой концепции в том, чтобы найти такую конструкцию клистрона, в котором инкремент паразитных мод был бы меньше, чем их затухание в клистроне. Для реализации этой концепции мы разработали технологию изготовления СВЧ поглощающих вставок и установили их внутри трубок дрейфа. Было изучено несколько методов получения поглощающего материала. Опыт показал, что композиционный стеклогуглеродный материал наиболее прост в изготовлении и использовании в наших условиях.

Такой распределенный подавляющий фильтр обеспечивает существенное затухание паразитных мод и не возмущает рабочую моду (Рис.5). Опыт эксплуатации показал, что вставки удовлетворяют вакуумным требованиям и устойчивы к тепловым и радиационным нагрузкам.

Мы предполагали также, что вставки могут быть причиной возникновения резистивной неустойчивости пучка. Однако, исследования динамики пучка не дали каких-либо доказательств наличия таких неустойчивостей.

Проведя исследование самовозбуждения 11 мм - апертурного клистрона с 7 поглощающими вставками, мы обнаружили, что все паразитные моды самовозбуждения группирователя полностью подавлены.

## 6 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА УСИЛЕНИЯ

Исследовался 11 мм - апертурный клистрон с СВЧ поглощающими вставками. Входной резонатор группирователя возбуждался лампой бегущей волны УВ-273А. Типичные осциллограммы усилительного режима приведены на Рис.6. Отсутствие флюктуаций тока в коллекторе пучка (Рис.6а) указывает на отсутствие поперечных неустойчивостей. Мы измерили спектр частот СВЧ излучения и обнаружили, что кроме рабочей частоты 14 ГГц, имеется частота самовозбуждения группирователя 15,85 ГГц. Однако, ее амплитуда мала, и она не влияет на рабочий режим клистрона.

На первом этапе работы с большой выходной мощностью мы имели СВЧ импульс короче, чем импульс тока пучка. Это связано с СВЧ разрядами в выходной структуре и выходном трансформаторе типа волн. В процессе тренировки СВЧ импульс становился длиннее (Рис.6б), после чего мы постепенно увеличивали величину рабочего тока или амплитуду входного сигнала. В начале следующего цикла



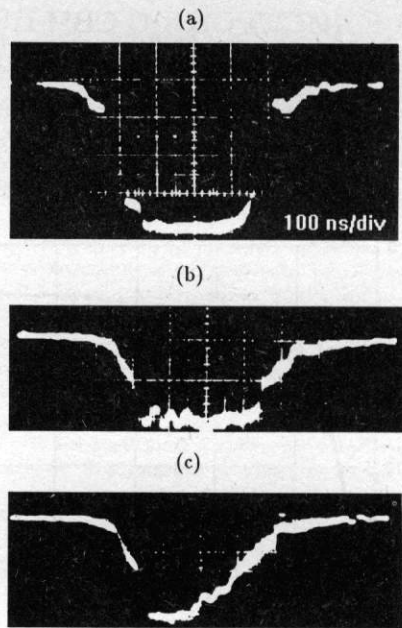


Рис. 6: Клистрон с апертурой 11 мм: осциллограммы в режиме усиления. Где (а) - ток пучка в коллекторе, (б) - СВЧ сигнал после цикла тренировки, (в) - СВЧ сигнал в начале следующего цикла тренировки.

тренировки амплитуда выходного СВЧ сигнала возрастала, в то время как СВЧ импульс становился короче (Рис.6в), и процесс СВЧ тренировки повторялся снова. На момент подготовки данной статьи процесс СВЧ тренировки еще не закончен. При длинных СВЧ импульсах (250 нс) мы получили величину выходной мощности около 45 МВт при токе пучка  $I \sim 150$  А, что соответствует эффективности клистрона  $\sim 30\%$ . Этот результат находится в хорошем согласии с расчетом. В коротком импульсе мы достигли величины пиковой мощности выходного СВЧ сигнала около 70 МВт.

Мы также модернизируем широкоапертурный (15 мм) клистрон и планируем начать его изучение с поглощающими вставками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе мы предлагаем экспериментально подтвержденную концепцию клистрона с распределенным подавлением паразитных мод. Мы полагаем, что такой подход к конструкции клистрона будет крайне плодотворным и может сформировать новое направление развития коротковолновых клистронов.

## Список литературы

- [1] N.I. Azorskiy et al., "VLEPP Klystron Activity at Dubna", Proc. of the International Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (July 5-9, 1993, Dubna, Russia), p.143

# ВЛЭПП. Экспериментальные исследования мощного клистрона.

Балакин В.Е., Казаков С.Ю., Клюев В.Ф., Лукин А.Н.,  
Пирогов О.В., Самойлов С.Л., Соляк Н.А., Теряев В.Е.,  
Хавин Н.Г., Шемелин В.Д., Яснов Г.И.

*ИЯФ им.Будкера Г.И. – ФИЯФ,  
г.Новосибирск – г.Протвино*

## ВВЕДЕНИЕ

В проекте комплекса ВЛЭПП в качестве источника СВЧ предполагается использовать усилительный релятивистский клистрон, основная схема и расчеты которого были представлены в докладе на совещании [1]. Расчетные параметры клистрона приведены в таблице 1.

Таблица 1: Расчетные параметры клистрона

Рабочая частота ГГц	Напряж. кВ	Ток пучка А	Длительность импульса мкс	КПД %	Усилен. дБ	Частота повтор. Гц	Импульс. мощность МВт
14	1000	300	0.5	50	80	150	150

## 1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

В проекте ВЛЭПП высоковольтное питание клистронов предполагается осуществлять от источника постоянного напряжения без применения мощных высоковольтных модуляторов с импульсными трансформаторами, а управление пучком – с помощью относительно небольшого импульсного напряжения на управляющем электроде электронной пушки клистрона – сетке.

Схема клистрона приведена на Рис.1.

Для формирования электронного пучка служит электронная пушка, включающая в себя ячеистый оксидный катод, управляющую сетку и ускорительную трубку.

Для фокусировки пучка в канале клистрона применена магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС) на постоянных магнитах, что снижает вес и габариты клистрона и не требует затрат мощности на питание.

Усилительная часть клистрона включает в себя входной и 7(10) пассивных резонаторов, что обеспечивает требуемый коэффициент усиления.

Для увеличения коэффициента взаимодействия с пучком и снижения напряженности электрического поля на поверхности выходная структура клистрона выполнена

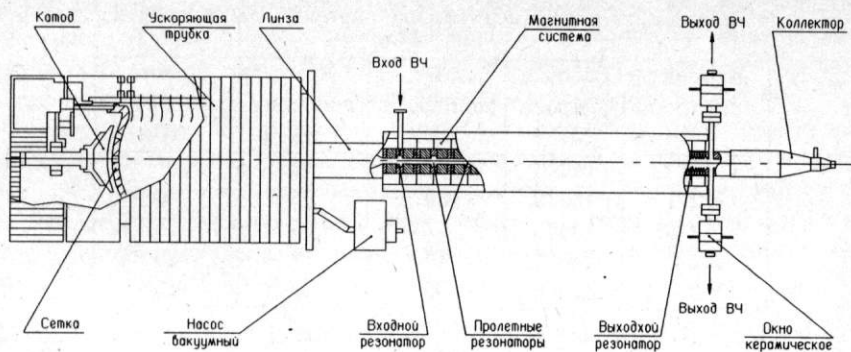


Рис. 1: Схема клистрона.

в виде диафрагмированного волновода с бегущей волной. Она состоит из 14 идентичных ячеек и трансформатора типа волны с двумя симметричными волноводными выводами мощности.

Вывод энергии предполагается производить через два вакуумноплотных керамических окна. СВЧ окно является развитием окон "баночной" конструкции. Оно содержит плавные переходы от прямоугольного волновода к круглому и увеличенный диаметр керамического диска.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментального исследования клистронов в качестве источника высокого напряжения использовался ускоритель ЭЛИТ-Л2 [2]. Это дало возможность изменять напряжение на катоде клистрона в пределах  $700 \div 1000$  кВ, а ток пучка варьировать напряжением на управляющей сетке пушки в пределах  $30 \div 200$  А при длительности импульса  $0.8$  мкс и частоте повторения - 1 Гц.

Экспериментальные результаты по прохождению пучка в ускорительной трубке и канале клистрона подробно изложены в докладе [3].

К настоящему времени испытаны несколько вариантов прибора, отличающиеся расстройками резонаторов группирователя относительно рабочей частоты клистро-на. Основные характеристики всех вариантов представлены в табл. 2.

КПД всех вариантов клистронов в зависимости от режима работы находился в пределах  $25 \div 30$  %.

Выход на рабочий режим происходил после тренировки, типичное время которой составляло 100 часов.

Средняя выходная мощность клистрона измерялась калориметрическим методом в нагрузках, подключенных к калориметрическому измерителю мощности. Выходная импульсная мощность измерялась предварительно прокалиброванными детекторными головками, подключенными к направленным ответвителям на выходах клистро-на.

Первый экземпляр клистрона **К1** имел 10 пассивных резонаторов.

Второй укороченный экземпляр клистрона **К2-1** содержал 7 пассивных резона-торов и имел несколько меньший коэффициент усиления и КПД.

Таблица 2: Экспериментальные параметры клистронов

Вариант клистрона	Рабочая частота МГц	Макс. мощность МВт	Кэф. усиления дБ	Полоса клистрона МГц
<b>K1</b>	14013	65	60	—
<b>K2-1</b>	13970	30	58	30
<b>K2-2</b>	13970	27	63	25
<b>K2-3</b>	14005	40	72	20
<b>K2-4</b>	14060	50	90	15

На варианте клистрона **K2-2** для увеличения коэффициента усиления и проверки правильности расчета параметров клистрона были изменены резонансные частоты второго и третьего резонаторов. Эксперимент показал совпадение с результатами расчета, касающихся увеличения коэффициента усиления.

На приборе **K2-3** решалась задача увеличения коэффициента усиления и настройки его на рабочую частоту 14000 МГц, чтобы иметь возможность испытания отдельных СВЧ узлов, в том числе выходных окон, на высоком уровне мощности. Оптимизация клистрона проводилась на максимальный КПД при рабочем токе 120 А путем изменения расстроек резонаторов относительно рабочей частоты прибора, равной 14000 МГц.

Согласно расчету перестроенный клистрон должен иметь при рабочем токе 120 А коэффициент усиления примерно на 7.7÷9.1 дБ больше, чем предыдущий.

Амплитудно-частотные (АЧХ) и амплитудные (АХ) характеристики этого клистрона для одного из режимов приведены на Рис.2 и Рис.3.

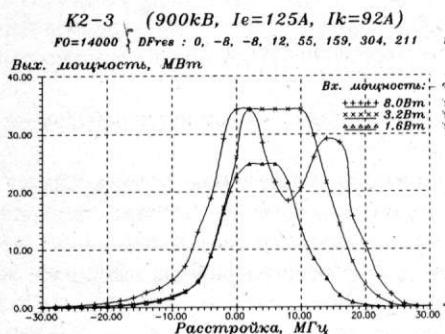


Рис. 2: АЧХ клистрона.

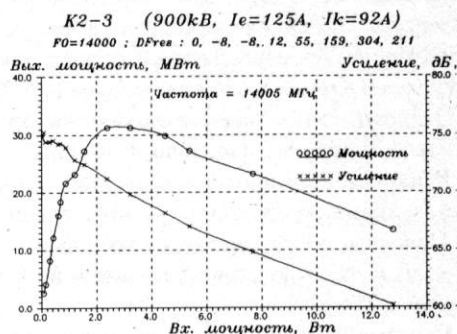


Рис. 3: Амплитудная характеристика клистрона.

АЧХ измерялись при перестройке частоты задающего генератора в диапазоне от 13970 до 14030 МГц при нескольких фиксированных уровнях мощности возбуждения. На характеристике виден провал, характеризующий режим перегруппировки электронного потока.

Амплитудные характеристики клистрона измерялись на частоте, при которой выходная мощность максимальна, а АЧХ имеет форму резонансной кривой. На ха-



рактической характеристике отчетливо видна область насыщения прибора. По оси ординат на обоих графиках указаны значения выходной мощности, равной удвоенной мощности, измеренной в одном из симметричных выходов клистрона. Отметим, что вид этих характеристик одинаков для всех исследовавшихся вариантов клистрона.

На следующем этапе работы решалась задача дальнейшего увеличения коэффициента усиления прибора путем изменения его рабочей частоты и расстроек пассивных резонаторов для исследования его характеристик при проектном  $K_u$ , равном 80 дБ. Расчеты показали, что при выборе рабочей частоты 14047 МГц и расстроек резонаторов, приведенных в таблице 3, возможно получение коэффициента усиления более 80 ÷ 85 дБ и КПД 30 ÷ 35%.

Таблица 3: Расстройки резонаторов клистрона **K2-4**

K2-4	$F_0, \text{МГц}$	$dF = F_p - F_0, \text{МГц}$							
		0	1	-2.5	5	10	114	260	164
	14047	0	1	-2.5	5	10	114	260	164

Это было реализовано в варианте клистрона **K2-4**. Клистрон работал устойчиво и отдавал в нагрузки мощность около 50 МВт при уровне мощности возбуждения 20 мВт.

На Рис.4 приведены осциллограммы огибающей СВЧ импульса выходной мощности и тока в коллекторе клистрона.

Для сравнения на Рис.5 приведена диаграмма расстроек первых пяти резонаторов для всех вариантов клистрона и полученные при этом коэффициенты усиления.

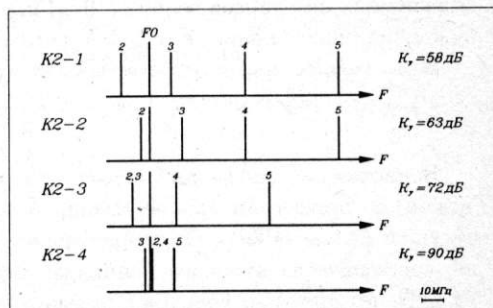
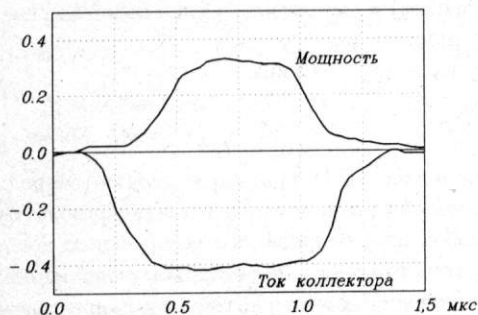


Рис. 4: Осциллограмма огибающей СВЧ импульса выходной мощности и тока в коллекторе клистрона. Рис. 5: Схема расстроек резонаторов для всех вариантов клистрона.

### 3 САМОВОЗБУЖДЕНИЕ

Уже на первом клистроне при токах в коллекторе 80 ÷ 90 А возникали паразитные автоколебания на частотах 17050 МГц (при отсутствии сигнала возбуждения) и 18450 МГц (при наличии сигнала возбуждения). Возникновение паразитных колебаний в приборе приводило к сбросу пучка на стенки прибора и укорочению импульса СВЧ мощности, тем самым ограничивая выходную мощность клистрона. В предположении, что эти колебания соответствуют несимметричной моде  $H_{11}$  в круглом

волноводе (трубки дрейфа в клистроне) с периодическими неоднородностями (резонаторы клистрона), в канале всех вариантов клистрона между четвертым и пятым резонаторами был поставлен фильтр-пробка ("чок") на эти частоты, что привело к повышению порога возбуждения до  $110 \div 120$  А. Это значение сохранилось и для всех последующих модификаций клистрона, а частоты самовозбуждения лежали в диапазоне  $17 \div 21$  ГГц.

#### 4 ВЫХОДНОЕ ОКНО

Отдельной задачей создания мощного СВЧ источника является разработка выходных окон. Вывод энергии из клистрона предполагается осуществлять через два вакуумноплотных полуволновых окна из керамики ВК-94-1. Для понижения напряженности электромагнитного поля в области диэлектрика диаметр окон был выбран в три раза больше длины волны (66 мм).

Испытания выходных окон на высоком уровне мощности были проведены на варианте клистрона К2-3. Потери мощности в окне рассчитывались по разности падающей на окно и прошедшей через него мощности. Измерения показали, что с увеличением падающей на окно мощности от 0.5 до 10 МВт потери в нем составляли  $15 \div 20$  % в первой и  $15 \div 45$  % во второй половине импульса. При этом отраженная от окна мощность менялась в пределах  $7 \div 11$ %. Нелинейный рост потерь в окне в течение импульса, по-видимому, связан с развитием разряда и пробоями на керамике окна. Следы пробоев на керамике после разборки окна имели регулярный, симметричный характер, что говорит о том, что возбуждался один из паразитных резонансов. Из-за больших по сравнению с длиной волны размеров окна, плотность паразитных резонансов велика (10 МГц/резонанс) и, вероятно, трудно избежать возбуждения близлежащих к рабочей частоте резонансов.

В настоящее время разрабатываются окна и другого типа.

#### 5 РБВ

В настоящее время для испытания элементов СВЧ тракта, в первую очередь — окон, на проектном уровне выходной мощности разработан и испытан резонатор бегущей волны (РБВ). Он представляет собой вакуумноплотное волноводное кольцо, состоящее из входного направленного ответвителя с переходным ослаблением 12.8 дБ, четырех Е-поворотов и прямого волновода, на место которого в дальнейшем будут устанавливаться испытываемые СВЧ устройства.

Испытания РБВ на высоком уровне мощности проводились на клистроне К2-4.

При испытаниях получена мощность бегущей волны в кольце до 100 МВт в отдельных импульсах при коэффициенте усиления  $10 \div 12$  раз по мощности. Сравнительно стабильная работа (примерно 1 пробой на 10 импульсов) проходила на уровне 70 МВт, что соответствует 250 кВ на зазоре 8 мм (320 кВ/см).

После разборки РБВ видны следы пробоев на внутренней поверхности медных вакуумных уплотнений и фланцев из нержавеющей стали. Внутри отрезков волновода следов пробоев не обнаружено. Следы диаметром около 1 мм имеют вид, характерный для микровзрывов, их число на нижней поверхности в несколько раз больше, чем на верхней. Это можно связать с оседанием на поверхность пыли. В дальнейшем предполагается располагать волноводы так, чтобы их широкие стенки были вертикальны, так же, как это делается для плоских керамических окон [4]. Кроме того, в

качестве финишной операции для прокладок и фланцев будет добавлена химическая обработка поверхности, не проводившаяся в данном варианте РБВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работы различных вариантов клистрона и достигнутые выходные параметры прибора доказывают принципиальную возможность создания мощного релятивистского клистрона с проектными параметрами: Для достижения этих параметров необходимо увеличение тока пучка, с ростом которого увеличивается выходная мощность прибора, коэффициент его усиления и рабочая полоса частот. Пока увеличение рабочего тока ограничено в основном возникновением паразитных колебаний в приборе, подавление которых является основной задачей дальнейшей работы.

Кроме того, остается не решенной до конца проблема выходных окон на проектную мощность.

## Список литературы

- [1] Л.Н.Арапов, В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров и др. Разработка высокочастотного источника. XII Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1990. – с.173
- [2] В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров и др. IV Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов (часть II). Томск, 1982. – с.97
- [3] В.Е.Балакин, В.Ф.Клюев и др. ВЛЭПП.Разработка элементов электронно-оптической системы клистрона. Доклад на этом Совещании
- [4] M.A.Allen et al. Reliability and lifetime predictions of SLC klystrons. SLAC-PUB-4863, March 1989 (A)

# Обработка элементов электронно-оптической системы мощного релятивистского клистрона

Балакин В. Е., Ключев В. Ф., Кузнецов Г. И.,  
Ларионов А. В., Хавин Н. Г., Яснов Г. И.

ИЯФ им. Будкера Г. И. СО РАН, г. Новосибирск  
ФИАФ СО РАН, г. Протвино

Для создания линейных коллайдеров нового поколения с темпом ускорения  $\sim 100 \text{ МэВ/м}$  требуется разработка сверхмощных источников СВЧ в сантиметровом диапазоне. Такие источники должны иметь в течении времени  $1 \text{ мкс}$  импульсную выходную мощность  $100 \text{ Мвт}$  при частоте следования импульсов  $100 - 300 \text{ Гц}$ . В зарубежных проектах для этих целей традиционно предусматривается использование клистронов с диодными пушками, требующих применения мощных высоковольтных модуляторов с импульсными трансформаторами. Последние являются сложными, материалоемкими и дорогостоящими устройствами, что заметно сказывается на стоимости всего проекта. Подход, развитый при разработке программы ВЛЭПП предусматривает использование в клистронах электронных пушек с управлением, позволяющих применять значительно более компактные и дешевые схемы высоковольтного питания с постоянным напряжением [1]. Ключевой проблемой на этом пути является проблема формирования интенсивных электронных пучков при помощи управляемых пушек. Другими словами, формируемый управляемой пушкой электронный пучок, при заданных значениях тока и энергии, должен иметь достаточно малый поперечный размер и приемлемый для работы фазовый объем.

Заметим, что хорошо известные и ставшие уже классическими схемы управляемых пушек мало пригодны для этих целей. Так, например, в электронных пушках с тонкой полупрозрачной управляющей сеткой токоперехват на сетку достигает десятков процентов, что приводит не только к ее дополнительному нагреву, но и к появлению заметной доли отраженных электронов, ухудшающих характеристики формируемого пучка. Другой тип – пушки с теневой сеткой не имеют практически токоперехвата, однако из-за своей специфики формируют сильно неламинарные потоки электронов [2]. Серьезным недостатком указанных пушек является также высокая температура сеток, что требует развития специальных технологий для подавления в них паразитной эмиссии (при постоянном высоком напряжении).

При разработке проекта ВЛЭПП были выбраны сеточные многолучевые пушки, которые не имеют описанных выше недостатков. Электронный пучок в них как бы складывается из отдельных микролучей, сформированных управляемыми микропушками с оптикой Пирса. Управляющая сетка здесь может быть сделана достаточно толстой, что позволяет организовать с нее эффективный теплоотвод и тем самым решить проблему паразитной эмиссии.

Основные проектные параметры электронно-оптической системы мощного релятивистского клистрона ВЛЭПП приведены ниже:



Энергия электронов	1000 Кэ
Управляющее напряжение	25 Кэ
Ток пучка	200 – 300 А
Катод	37 микролучей
Тип эмиттеров	оксид
Диаметр	120 мм
Радиус кривизны	110 мм
Плотность тока	до 5 А/см
Число электродов	16
Длина изоляции	320 мм
Диаметр пучка на выходе	12 – 15 мм
Темновой ток	< 100 мкА

Было разработано и испытано четыре варианта электронно-оптической системы (рис. 2). Конструктивно различные варианты отличаются друг от друга формой фокусирующих электродов в первой половине ускорительной трубки. Сильно вытянутые к катоду электроды в вариантах 3 – 4 дают возможность получать больший рабочий ток клистрона, хотя и создают проблемы по электрической прочности. Максимальная напряженность электрического поля на их поверхности достигает величины 250 – 300 Кэ/см, в то время как в вариантах 1 – 2 она на 30 – 40 процентов ниже. Цель экспериментальной отработки состояла в нахождении такой конструкции электродов, которая бы, с одной стороны, надежно держала 1 Мэ, а с другой – позволяла бы иметь максимальный рабочий ток в приборе.

Для расчета ЭОС на начальном этапе использовался модифицированный код EGUN (SLAC). Многолучевая пушка моделировалась набором концентрических эмиттирующих колец. Цель расчета состояла в достижении требуемых параметров по напряжению и току при минимальном фазовом объеме пучка. Расчеты проводились на компьютере IBM PC, а в дальнейшем уточнялись на CRAY. В последнем случае использовалась расчетная сетка  $256 \times 1024$  при числе трубок тока – 128. На рисунке 3 приведена полученная для одного из вариантов ЭОС зависимость эмиттанса пучка от тока на выходе ускорительной трубки. Как видно, расчетный оптимальный ток (по минимуму эмиттанса) составляет около 320 А, в то время как в экспериментах были получены значения примерно в 1.8 раза меньше. Аналогичная ситуация оказалась и с другими вариантами ЭОС, расчетный оптимальный ток в этой модели оказывался всегда значительно (в 1.7 – 2 раза) больше реального. Величина оптимального тока в экспериментах находилась по максимуму токопрохождения либо через диафрагму диаметром 10 мм, либо через канал клистрона. Типичная экспериментальная кривая приведена на рисунке 4. Максимально достигнутые значения коэффициентов токопрохождения для различных типов ЭОС составляют 90 – 95 % при значениях оптимального тока 120 – 170 А.

Сильное расхождение расчетных параметров и полученных в эксперименте стимулировало разработку специального трехмерного кода для численного моделирования сеточных многолучевых электронных пушек [3]. В алгоритмах кода была использована 3D модель интенсивного электронного пучка в аксиально-симметричной

геометрии фокусирующих электродов пушки. Параметры микролучей на выходе из микропушек считались заданными и заранее насчитывались другими двумерными программами. Реализованный в коде режим декомпозиции для микролучей позволил осуществлять самосогласованную "подстройку" стартовых параметров и тем самым строить самосогласованные решения.

Расчеты с использованием трехмерной модели проводились на компьютере IBM PC-486. Использовалась расчетная сетка 1 млн. узлов, при числе трубок тока 5 тыс. На рисунках 5 - 7 приведен пример такого расчета и расчетные отпечатки пучка в двух сечениях. На рисунке 3 также можно видеть расчетную кривую зависимости эмиттанса пучка от тока на выходе ускорительной трубки. Расчетное значение оптимального тока в этом случае, как видно, хорошо согласуется с экспериментом. Были рассчитаны также другие модификации электронно-оптической системы. Во всех расчетах расхождение между вычисленным и экспериментальным значением оптимального тока было не более 5 - 7 %. В настоящее время с помощью 3D кода проведена оптимизация электронно-оптической системы. Расчеты показывают возможность подъема оптимального тока клистрона на 30 процентов за счет некоторого изменения конструкции микропушек (рис. 3).

Полученное в экспериментах наилучшее токопрохождение 90 - 95 % показывает, что сформированный многолучевой пушкой пучок имеет ореол и больший, чем в расчетах фазовый объем. С целью изучения природы ореола в пучке, было испытано два типа конструкций микрокатодов (1 - 2 рис. 8). В первом случае керн микрокатада изготавливался давлением под прессом, и имел переходную область сопряжения вблизи края. Во втором случае - полностью вытачивался на токарном станке. Конструктивно края микрокатодов во всех случаях прикрывались маской, которая накладывалась на весь макрокатод. С целью уменьшения температуры маски, а отсюда и паразитной эмиссии, между маской и керном микрокатада оставлен зазор 0.2 мм.

Оценка качества формирования пучка в экспериментах осуществлялась по изменению среднего за импульс токооседания на электроды трубки. Как видно из рисунка 9, точеные микрокатоды имеют несколько лучшие параметры, хотя полностью убрать ореол не удалось и в этом случае.

Описанные выше конструкции микрокатодов имеют один существенный недостаток, а именно - тепловые деформации маски, которые трудно полностью учесть. Поэтому в настоящее время разработана и проходит испытание другая конструкция микрокатодов (3 рис. 8). Маска здесь объединена с керном, а для подавления с нее паразитной эмиссии сделано следующее:

- 1) для каждого микрокатада применен собственный подогреватель, что позволяет понизить мощности накала всей пушки на 30 %;
- 2) в качестве материала керна-маски выбран титан, обладающий антиэмиссионными характеристиками.

## Список литературы

- [1] Аврахов П. В., Балакин В. Е. и др. *Разработка и испытание элементов мощных высокочастотных систем ВЛЭПП*. XIII Конф. по уск. зар. част. Дубна, 1992 г., с. 55.

- [2] Молоковский С. И., Сушков А. Д. *Интенсивные электронные и ионные пучки*. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [3] Ларионов А.В. *MBGUN - специальный 3D код для численного моделирования сточных многолучевых электронных пушек*. Препринт ФИЯФ 94-4.

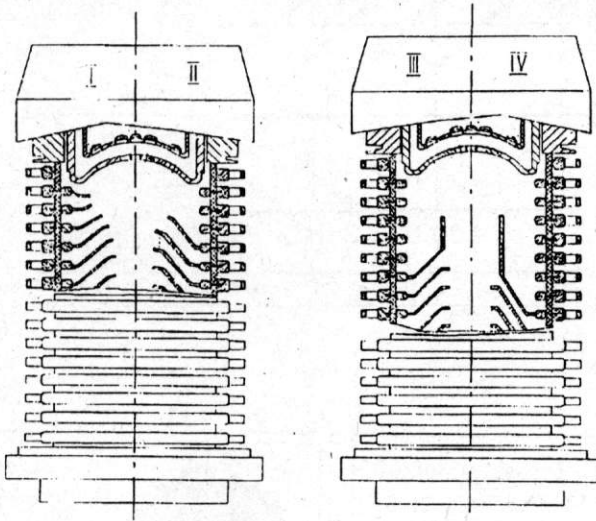


Рис. 1-2. Варианты электронно-оптической системы

Зависимость эмиттанса пучка от тока на выходе ускорительной трубки клистрона ВЛЭПП

вариант ортки 4

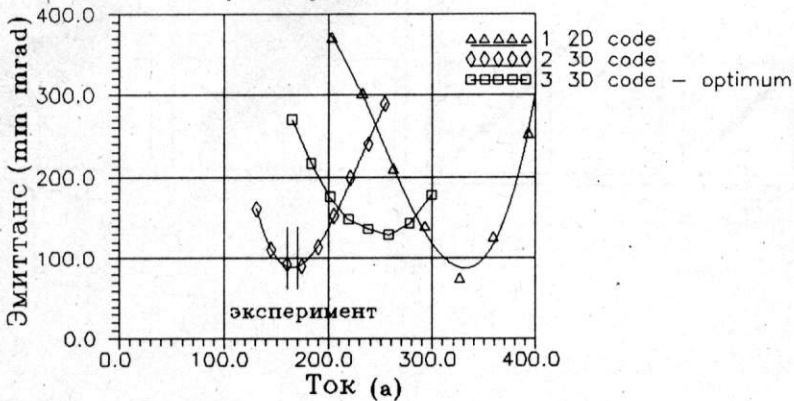


Рис. 3.

КРИВАЯ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ КАНАЛ  
КЛИСТРОНА

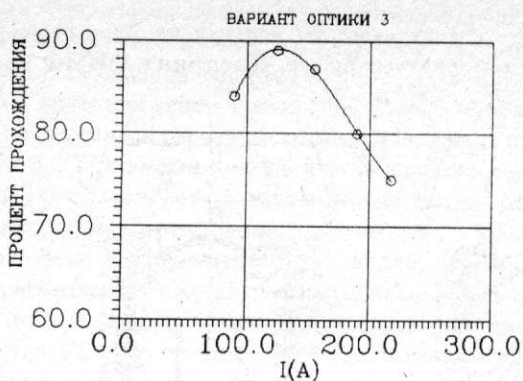


Рис. 4.

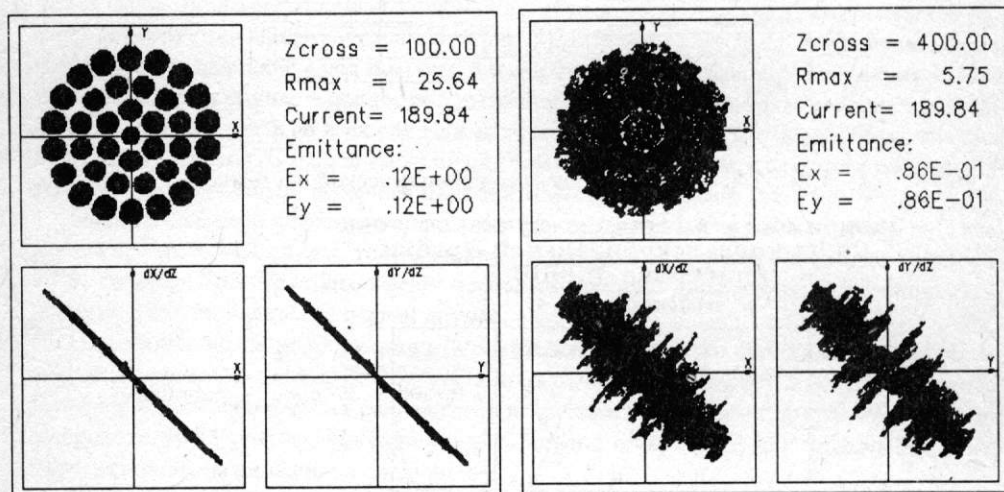


Рис. 5 - 6.



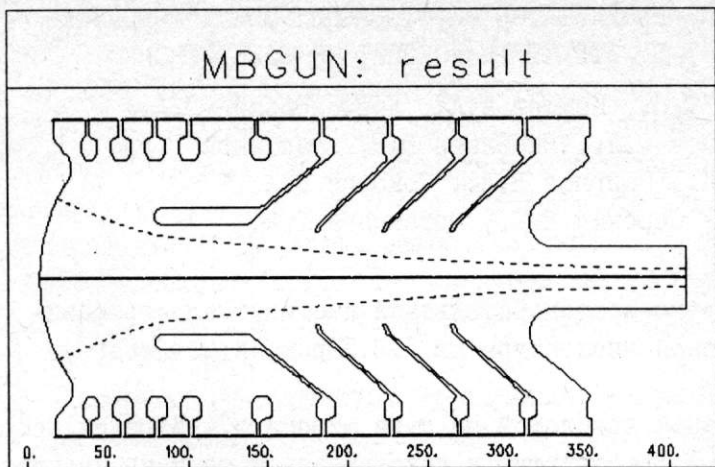


Рис. 7.

Конструкции микрокатодов.

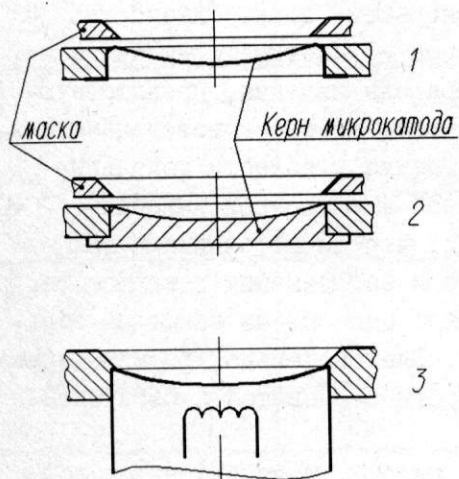


Рис. 8

ЗАВИСИМОСТЬ ТОКОСЕДАНИЯ НА  
ЭЛЕКТРОДЫ ОТ ТОКА ПУЧКА

вариант оптики 1

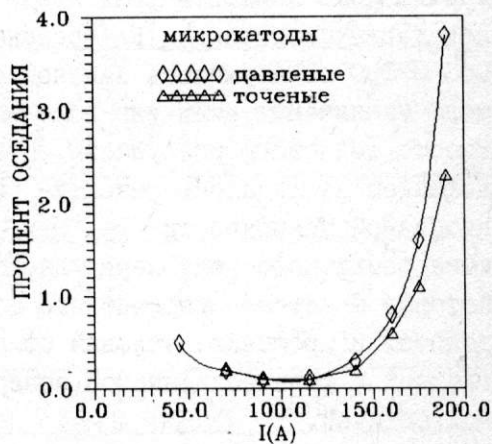


Рис 9