



Б.20

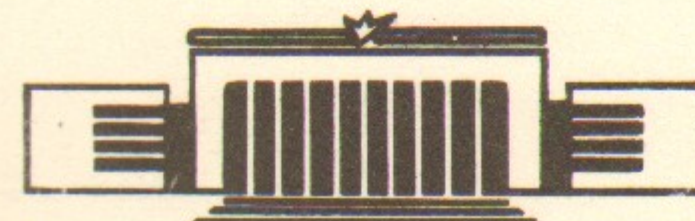
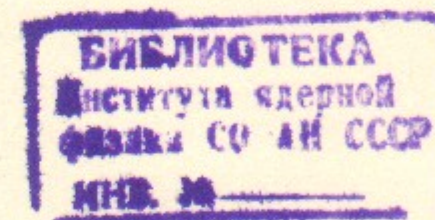
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

37

В.Е.Балакин, В.М.Долгушин, И.В.Казарезов,
В.Ф.Клюев, А.В.Кожемякин, Г.С.Крайнов,
Г.И.Кузнецов, Н.Г.Хавин, В.В.Широков,
Г.И.Яснoв

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛИТ-Л2

ПРЕПРИНТ 84-78



НОВОСИБИРСК

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛИТ-Л2

В.Е.Балакин, В.М.Долгушин, И.В.Казарезов, В.Ф.Клюев,
А.В.Кожемякин, Г.С.Крайнов, Г.И.Кузнецов, Н.Г.Хавин,
В.В.Широков, Г.И.Яснoв

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследования электронно-оптической системы (ЭОС) ускорителя ЭЛИТ-Л2 со сферическим катодом диаметром 120 мм. Описана конструкция разборной ускорительной трубки (УТ).

На ускорителе получено напряжение 2 МВ. С использованием оксидного катода ускорен максимальный ток 390 А до энергии 1,5 МэВ в импульсе длительностью 1 мкс. Ускоритель используется для питания генераторов СВЧ, разрабатываемых по программе ВЛЭШ.

В Институте ядерной физики СО АН СССР для питания СВЧ приборов, создаваемых по программе ВЛЭПП, разработан и с 1981 года эксплуатируется генератор электронного пучка на основе трансформатора Тесла ЭЛИТ-Л2 с проектной импульсной мощностью до 10^9 Вт в импульсе длительностью 1 мксек [1]. При его разработке большое внимание было уделено созданию ЭОС и УТ, так как разрабатываемые СВЧ приборы требуют мощных пучков с хорошими геометрическими параметрами.

В первоначальном варианте ЭОС ускорителя был применен катод из гексаборида лантана (LaB_6) диаметром 50 мм [1]. Управляющим элементом являлась сетка, на которую подавалось напряжение до 100 кВ. С таким катодом был получен пучок с током 300 А и энергией 1,5 МэВ, а через диафрагму диаметром 10 мм и длиной 40 мм (акцептанс $0,07 \times \pi$ см.рад) проходило более 200 А. С описанной ЭОС ускоритель проработал около 1000 часов, в течение которых был проведен цикл исследований одного из типов СВЧ-прибора и на секции ускоряющей структуры ВЛЭПП длиной 30 см был получен темп ускорения 55 МэВ/м [2].

Для увеличения мощности электронного пучка без ухудшения его геометрических параметров решено было перейти к ЭОС с катодом большего размера.

Исходные параметры при расчете ЭОС:

Ускоряющее напряжение - 1,5 МВ, средняя напряженность электрического поля - 30 кВ/см, максимальная - 60 кВ/см, диаметр катода - 12 см. Самосогласованный расчет траекторий движения релятивистского пучка проводился по методике, изложенной в [3].

Оптимальный для исходных параметров вариант ЭОС приведен на рис.1. Согласно расчетам, такая система позволяет получить ток пучка 400 А, а его диаметр на входе в СВЧ-прибор $\sim 1,5$ см.

Система состоит из сферического катода с радиусом сферы 10 см (1), фокусирующего электрода (2), управляющей сетки (3), ускоряющих электродов (4), магнитной линзы (5), канала транспортировки (6), коллектора - приемника пучка (7).

При токе 400 А расчетный диаметр пучка на выходе ускорительной трубки на расстоянии 57 см от катода составляет 8 см. Расчетный диаметр пучка в кроссовере (вход в СВЧ-прибор) для линзы с фокусным расстоянием 70 см равен 1,4 см. Параметры линзы выбира-

лись из соображений минимальной сферических aberrаций пучка. На рис.2 приведено расчетное преобразование формы эффективного эмиттанта пучка при прохождении его через линзу. Увеличение эффективного эмиттанта незначительно.

Форма пучка вблизи кроссовера ($Z = 124$ см) имеет явно выраженную кольцевую структуру. Такая структура обусловлена начальной неравномерностью плотности тока с катода, действием собственного заряда пучка и aberrациями магнитной линзы. Плотность тока с катода определяется действием электрических полей первого и близлежащих ускоряющих электродов и в центре катода в 4 раза ниже, чем на краю его. Максимальная плотность тока -6 А/см². Управляющая сетка, помещенная на одну из эквипотенциалей системы, рассчитанной с учетом поля пучка, минимально искажает геометрические характеристики пучка.

Элементы ЭОС ускорителя были разработаны и изготовлены в соответствии с расчетом. Из-за отсутствия гарантированной технологии неразъемного соединения электрод-изолятор при больших диаметрах УТ была сделана разборной. Следует заметить, что в экспериментальных установках разборная конструкция имеет свои преимущества. При конструировании УТ ускорителя ЭЛИТ-Л2 за основу был принят изолятор УТ ускорителя ЭЛИТ-3А, работающего в позитронном источнике комплекса ВЭП-4 [4]. Однако, в данной конструкции необходимо было решить новые задачи:

- 1) ускорить гораздо больший импульсный ток, что потребовало увеличения площади катода и уменьшения длины ускоряющего зазора;
- 2) уменьшить влияние тепловыделения электронной пушки, которое сильно возрастает при переходе к катоду большого диаметра;
- 3) улучшить вакуумные условия для успешной работы катода.

Аналогичные задачи решались в ускорителе ЭЛИТ-Л [5].

В результате разработки удалось уменьшить длину ускоряющей трубки как за счет удаления промежуточных фланцев, так и повышения допустимого уровня напряженности электрического поля, возможность чего была показана предварительными экспериментами. Электрическая прочность повысилась также за счет применения ускоряющих электродов только с центральным отверстием для пучка.

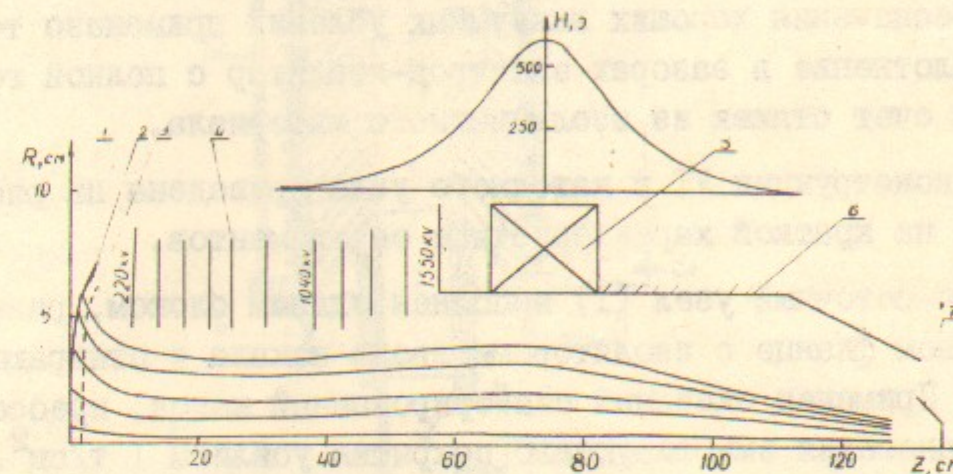


Рис.1. Схема ЭОС ускорителя ЭЛИТ-Л2

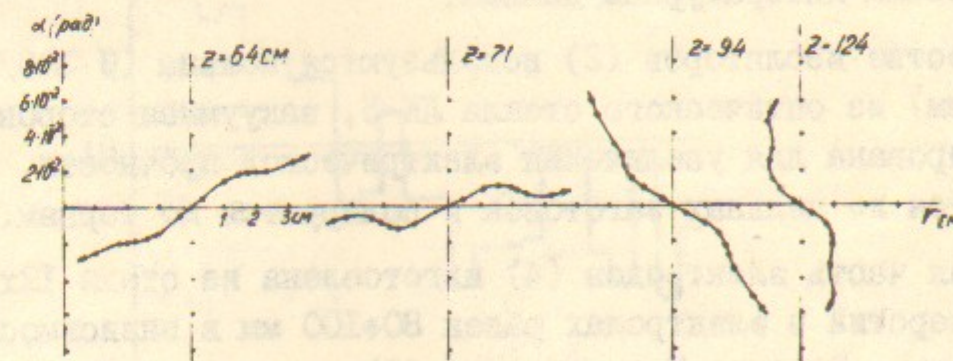


Рис.2. Изменение формы эффективного эмиттанта пучка при транспортировке

Для уменьшения тепловыделения был применен оксидный катод, имеющий рабочую температуру около 1000°C . Возможность его работы в подобных условиях была показана на стенде и на ускорителе ЭЛИТ-Л [6]. Наиболее нагреваемые электроды изготовлены из материала с хорошей теплопроводностью и меньшим коэффициентом линейного расширения и дополнительно охлаждаются.

Для обеспечения хороших вакуумных условий применено только индиевое уплотнение в зазорах электрод-изолятор с полной герметизацией за счет стяжек из изоляционного материала.

Схема конструкции УТ и катодного узла приведена на рис.3. Остановимся на краткой характеристике ее элементов.

Катодно-сеточный узел (1) выполнен единым блоком, размещенным на съемном фланце с изоляторами ввода накала и отпирающего напряжения. Применен оксидный синтерированный катод, прессованный после нанесения эмиттирующего покрытия усилием 1 т/см^2 . Керн катода сделан из никеля НПОЭ толщиной $1,5 \text{ мм}$. Бифилярный подогреватель из молибденовой проволоки укреплен на изоляторах из алунда. Паркетная сетка выполнена по шаблону, соответствующему профилю расчетной эквипотенциали 23 кВ . Обезгаживание катода проводится вне УТ, а разложение карбонатов в ускорительной трубке при давлении $10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$ Стендовые испытания показали, что поверхность катода нагрета при рабочей температуре с однородностью не хуже 10°C . Катодный узел в течение 100 часов испытывался на стенде. Эмиссия катода в широком диапазоне температур соответствовала литературным данным.

В качестве изоляторов (2) используются кольца ($\varnothing 320/280$, высота 25 мм) из оптического стекла ЛК-5, вакуумная сторона которых гофрирована для увеличения электрической прочности. Кольца вырезаются из цельных заготовок и полируются по торцам.

Большая часть электродов (4) изготовлена из стали 12х18Н10Т. Диаметр отверстий в электродах равен $80 \pm 100 \text{ мм}$ в зависимости от размеров пучка. Верхние 7 электродов (3) сделаны из стали 20 из-за значительных тепловых нагрузок на них от излучения катода. Использование стали 20 с присущими ей при работе в вакууме недостатками - повышенное газоотделение и образование пленок окислов при напуске атмосферы - обусловлено более высокой ее теплопроводностью и более низким коэффициентом линейного расширения,

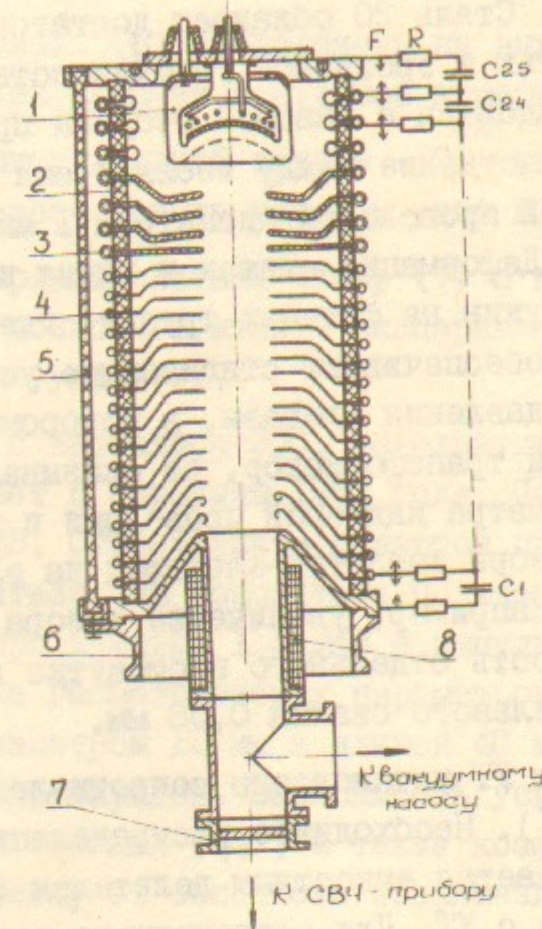


Рис.3. Схема конструкции ускорительной трубки.

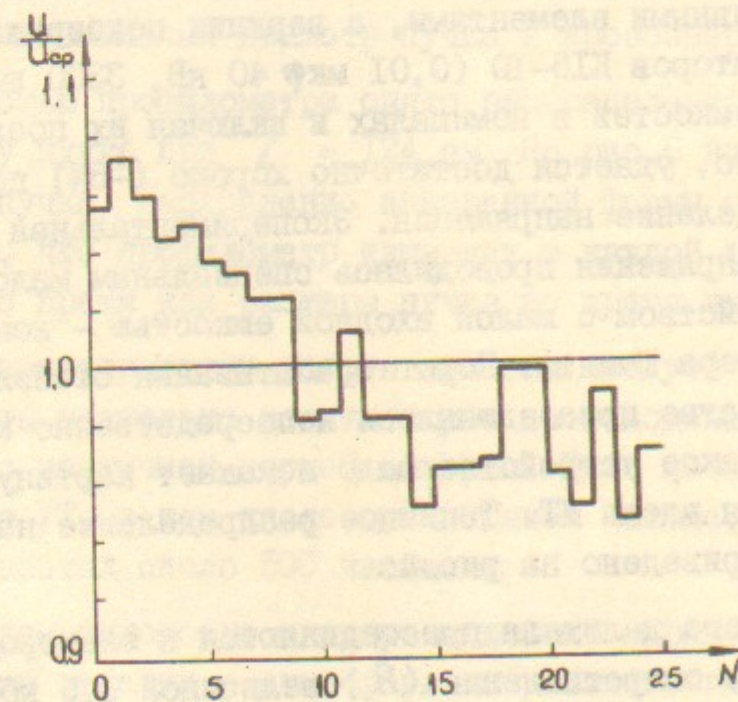


Рис.4. Гистограмма распределения напряжения на секциях ускорительной трубки.

чем у стали 12Х18Н10Т. Сталь 20 обладает достаточно высокой электрической прочностью и эрозийной устойчивостью при пробоях. Эти 7 электродов охлаждаются с газовой стороны прокачкой масла через каналы в них. Уплотнение между изоляторами и электродами обеспечивается индиевой проволокой диаметром 1 мм с помощью стяжек (5) из оргстекла. Деформация стяжек и индия компенсирована набором тарельчатых пружин на фланцах трубки, где крепятся стяжки. Пружины постоянно обеспечивают стягивающее усилие. Усилие таково, что изменение давления элегаза, в котором находится трубка и высоковольтный трансформатор, не сказывается на вакууме УТ. При выборе диаметра индиевой проволоки и усилия сжатия учитывалось влияние зазора изолятор-электрод на электрическую прочность промежутка. Например, увеличение зазора с 0,05 мм до 0,3 мм уменьшает прочность отдельного промежутка на 30%. Толщина индия после окончательного сжатия 0,06 мм.

С наружной стороны УТ установлены сопротивления утечки и защитные разрядники (F). Необходимое распределение напряжения по секциям УТ обеспечивается емкостным делителем ($C_1 - C_{25}$), установленным коаксиально с УТ. Для равномерного распределения напряжения вдоль УТ значения емкостей секций делителя изменяются по квадратичному закону. Величина емкости нижних секций задавалась конструктивными элементами, а верхних подбирались из комбинации конденсаторов КИ5-10 (0,01 мкФ 40 кВ, 3300 пФ 30 кВ). Используя разброс емкостей в номиналах и включая их последовательно - параллельно, удается достаточно хорошо ($\pm 5\%$) подобрать равномерное распределение напряжения. Экспериментальная проверка распределения напряжения проводилась специальным малогабаритным пороговым устройством с малой входной емкостью - компаратором на основе триггера Шмидта. Порог срабатывания стабилен с точностью 0,5%. Устройство присоединялось непосредственно к измеряемому промежутку. Такое устройство мало искажает картину распределения напряжения вдоль УТ. Типичное распределение напряжения по секциям УТ приведено на рис.4.

Секции емкостного делителя присоединяются к электродам УТ через ограничивающее сопротивление (R) величиной 1,5 кОм. Оно позволяет ограничить энергию, выделяющуюся при пробое секции трубки, не мешая срабатыванию защитных разрядников.

Магнитная линза (8) расположена на выходе ускорительного тракта и размещена снаружи вакуумной камеры.

Вакуум в ускорительной трубке $\sim 10^{-7}$ мм рт.ст. на нижнем фланце обеспечивается одним насосом типа НОРД-250.

Вакуумный прямопролетный шибер (7) с проходным отверстием диаметром 80 мм позволяет менять экспериментальные СВЧ-приборы без нарушения вакуума в УТ.

Ускоритель с вариантом ЭОС, использующим катод большого диаметра, работает с середины 1982 года. Получено напряжение холостого хода 2 МВ. Ограничением являются пробои как в УТ, так и в емкостном делителе. На ускорителе получен пучок электронов с током до 390 А при энергии 1,5 МэВ в импульсе длительностью 1 мксек. Для оценки геометрических параметров пучок проводился через диафрагму диаметром 15 мм и длиной 40 мм (акцептанс 0,147 рад.см) на цилиндр Фарадея. Зависимость ускоренного тока I_y и тока на цилиндры Фарадея I_{φ} , а также коэффициент прохождения тока через диафрагму от сеточного напряжения приведены на рис.5. Максимальный ток, полученный на ускорителе - 390 А, через диафрагму проходит 350 А, что соответствует расчету, так как расчетный эффективный эмиттанс в этом случае 0,05 рад.см. При таком эмиттансе минимальный диаметр пучка в кроссовере - 1,4 см.

С помощью профилометра снято распределение плотности тока по диаметру пучка при $Z = 124$ см. На рис.6 видна кольцевая структура пучка. Расхождение измеренной формы с расчетной объясняется тем, что профилометр измеряет в каждой точке суммарный заряд, в то время как размеры пучка во время импульса меняются.

Для характеристики работы системы следует сказать, что за время работы несколько десятков раз производилась смена приемников пучка с частичной порчей вакуума. Было несколько напусков атмосферы в УТ, в том числе при горячем катоде. В этих условиях катод проработал около 500 часов.

Приведем некоторые эксплуатационные характеристики:

- время откачки с атмосферы до рабочего вакуума - 4-5 часов.
- время выхода УТ на рабочий режим после вскрытия и получения вакуума - 2+3 часа.
- число пробоев при работе с частотой повторения 1 Гц - 2+3 в сутки.

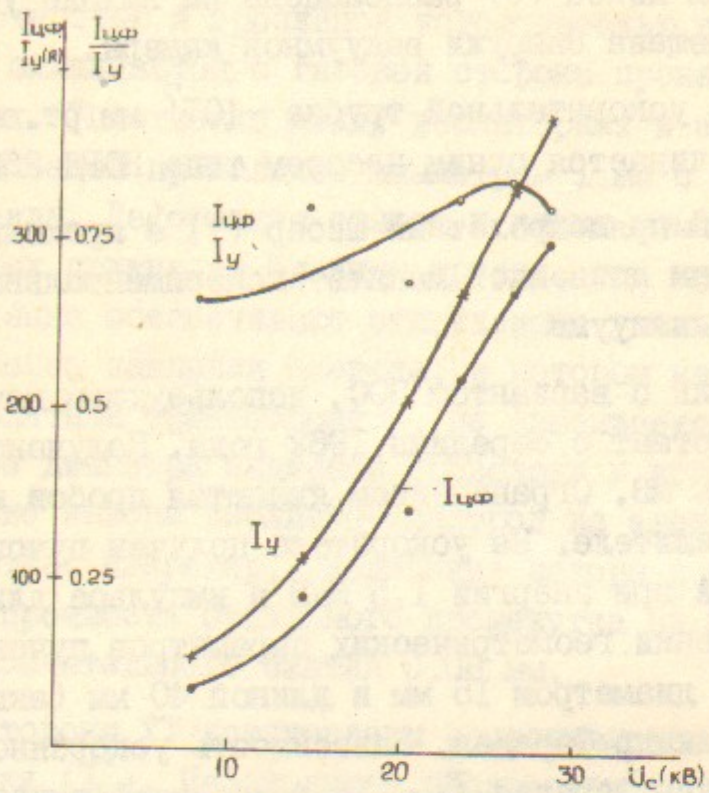


Рис.5. Зависимости $I_{цф}$, I_y , $I_{цф}/I_y$ от сеточного напряжения

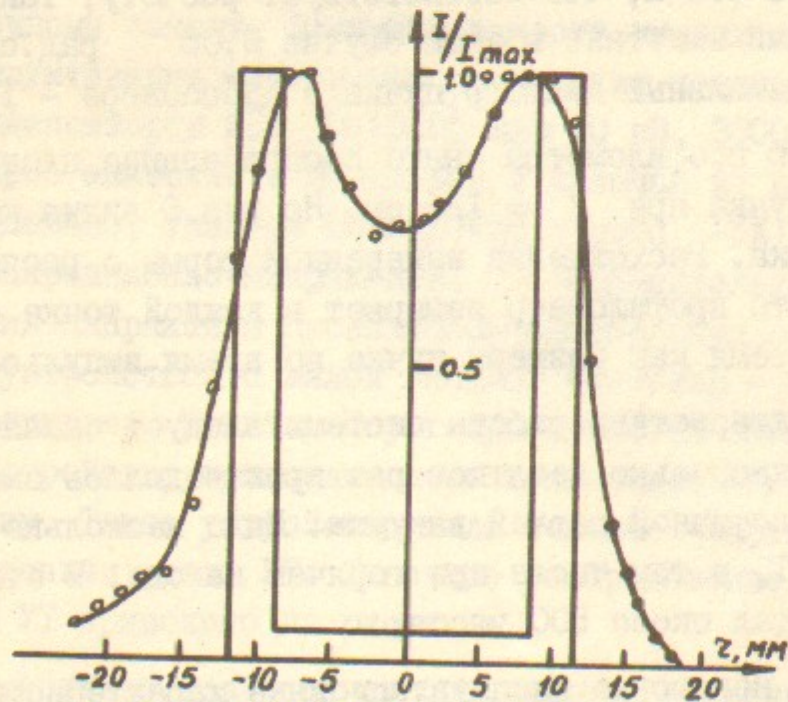


Рис.6. Распределение тока по диаметру пучка

1 - расчет
2 - эксперимент

- время выхода катода на эксплуатационный режим - 10 ± 20 часов.

Аварийные напуски атмосферы происходили только при аварии в приемниках пучка.

Опыт эксплуатации в течение полутора лет показал хорошую работоспособность системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генератор электронного пучка ЭЛИТ-Л2.
Балакин В.Е., Бамбуров Ю.Г., Долгушин В.М. и др. - в кн.:
IV Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике.
Тез. докл., Новосибирск, 1982, Томск, 1982, т.2, с.97-100.
2. Испытание ускоряющей секции линейного ускорителя ВЛЭШ.
/В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, О.Н.Брежнев и др. - В кн. Труды
восьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных
частиц, Протвино 1982, Дубна, 1983, т.П, с.410-413.
3. Иванов В.А., Хавин Н.Г. Численное решение уравнений движе-
ния релятивистских заряженных частиц в самосогласованном
поле. - Новосибирск, 1978, 12с. - (Препринт/ВЦ СО АН СССР;
78-129).
4. Вассерман С.Б., Глазков И.И., Радченко В.М., Широков В.В.
Ускорительная трубка генератора электронного пучка ЭЛИТ-3А.
-Новосибирск, 1983. - 58с. - (Препринт/Ин-т ядерной физики
СО АН СССР; ИЯФ 83-III).
5. Генератор электронного пучка для макета СВЧ-генератора
ВЛЭШ/В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, С.Б.Вассерман и др. -
-В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Техника
физического эксперимента", Харьков, 1982, вып. I (10), 1-92,
с.6-8.
6. Повышение параметров ускорителя ЭЛИТ-Л: источника питания
СВЧ-генератора/В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, В.М.Долгушин и
др. - В кн.: IV Всесоюзный симпозиум по сильноточной электро-
нике: Тез. докл., Новосибирск, 1982, Томск, 1982, т.2,
с.101-104.

В.Е.Балакин, В.М.Долгушин, И.В.Казарезов,
В.Ф.Клюев, А.В.Кожемякин, Г.С.Крайнов,
Г.И.Кузнецов, Н.Г.Хавин, В.В.Широков,
Г.И.Яснов

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛИТ-Л2

Препринт
№ 84-78

Работа поступила - 17 мая 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 11.06-1984 г. МН 04349
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,9 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 78.

Ротап rint ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90