

Сердобинцев

к 422

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

48-21 Аджарский

Алматы

В.Е. Акимов, П.Д. Воблый, М.М. Карлинер,
Е.В. Козырев, И.Г. Макаров, Н.В. Матяш,
О.А. Нежевенко, А.А. Никифоров, Г.Н. Острейко,
Б.З. Персов, С.И. Рувинский, Г.В. Сердобинцев,
В.П. Яковлев

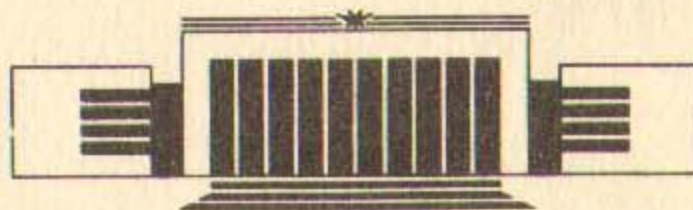
УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА
РАЗРЕЗНОГО МИКРОТРОНА

фотонно-кристаллические пленки

45-51 Самарцев Виктор Константинович

~~13-135~~ ↑

ПРЕПРИНТ 89-162



НОВОСИБИРСК

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.Е. Акимов, П.Д. Воблый, М.М. Карлинер,
Е.В. Козырев, И.Г. Макаров, Н.В. Матяш,
О.А. Нежевенко, А.А. Никифоров, Г.Н. Острейко,
Б.З. Персов, С.И. Рувинский, Г.В. Сердобинцев,
В.П. Яковлев

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА
РАЗРЕЗНОГО МИКРОТРОНА

ПРЕПРИНТ 89-162

НОВОСИБИРСК
1989

Ускоряющая система разрезного микротрона

*В.Е. Акимов, П.Д. Воблый, М.М. Карлинер,
Е.В. Козырев, И.Г. Макаров, Н.В. Матяш,
О.А. Нежевенко, А.А. Никифоров, Г.П. Острейко,
Б.З. Персов, С.И. Рувинский, Г.В. Сердобинцев,
В.П. Яковлев*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Описана ВЧ-система разрезного десятиоборотного микротрона на энергию 30 МэВ с током 50 мА в импульсе. ВЧ-система состоит из следующих элементов: магнотрона — ВЧ-генератора мощностью 2.5 МВт и КПД 73% на частоте 915 МГц; ускоряющей структуры, представляющей собой цепочку резонаторов, связанных общим коаксиальным резонатором («Корнельская» структура); коаксиально-волноводного тракта для передачи ВЧ-мощности от магнотрона в ускоряющую структуру и инжектора сгруппированных в короткие сгустки электронов с энергией 40 кэВ. Изложены соображения по выбору режима работы ускоряющей структуры и низковольтного инжектора. Отмечены особенности работы магнотрона на высокодобротную нагрузку. Приведены результаты измерений параметров структуры и измеренные значения ускоренного до 6 МэВ пучка с током 50 мА в импульсе.

Не пугать с 430 МГц

В Институте ядерной физики СО АН СССР разработан 10-оборотный разрезной микротрон на энергию 30 МэВ с током 50 мА в импульсе 30 мкс [1]. Его высокочастотная система включает в себя ускоряющую структуру, инжектор сгруппированных в короткие сгустки электронов, фидерный тракт и генератор ВЧ-мощности магнискон.

Схематически ВЧ-система изображена на рис. 1. Внешний вид структуры показан на рис. 2, а ее фрагмент на рис. 3.

1. В качестве ускоряющей структуры микротрона выбрана структура с параллельно связанными резонаторами, аналогичная так называемой «Корнельской» [3]. Она состоит из 9 ускоряющих резонаторов и связывающего их коаксиального резонатора. Связь осуществляется посредством отверстий, расположенных вдоль коаксиала с интервалом $\lambda/2$. При типе колебаний в ускоряющих резонаторах E_{010} и ТЕМ-колебаний в коаксиальном, каждый ускоряющий резонатор возбуждается общим током коаксиального резонатора. В этом случае структура может быть представлена эквивалентной схемой, показанной на рис. 4 (а, б, в).

Собственные частоты этой структуры определяются выражением

$$\omega_{в,н} = \left\{ \left[\omega_y^2 + \frac{\omega_k^2}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi q}{N-1} \right) \right] \pm \sqrt{\left(\omega_y^2 + \frac{\omega_k^2}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi q}{N-1} \right) \right)^2 - 2\omega_y^2 \omega_k^2 \left(1 - \cos \frac{\pi q}{N-1} \right) (1 - k^2)} \right\} \times \times [2(1 - k^2)]^{-1} \}^{1/2}, \quad (1.1)$$

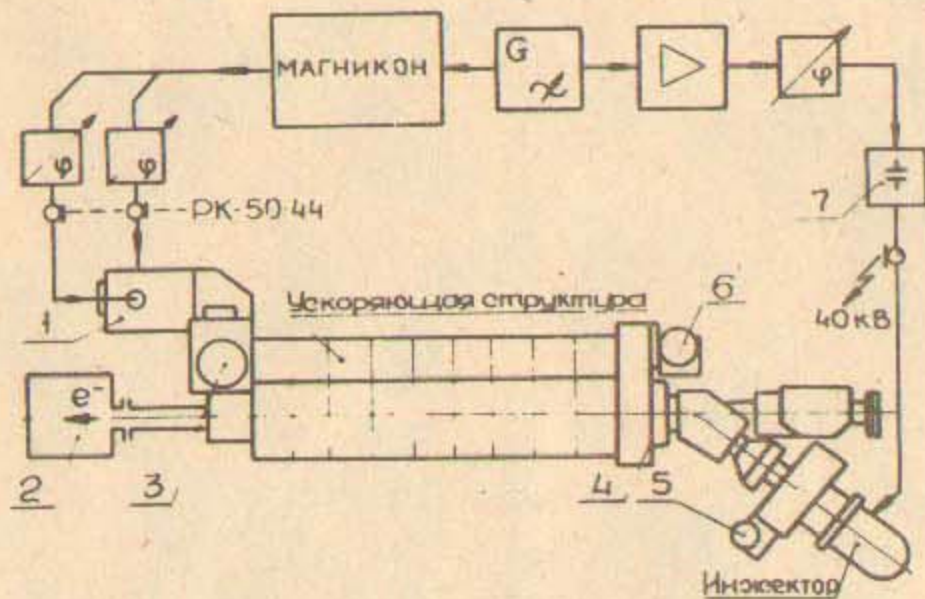


Рис. 1. Блок-схема ВЧ-системы:
 1 — в/в коакс. тройник ВКТ, 2 — устройство диагностики пучка; 3, 5, 6 — приводы перестройки на шаговых двигателях; 4 — линза входная; 7 — высоковольтный ВЧ-разделитель.

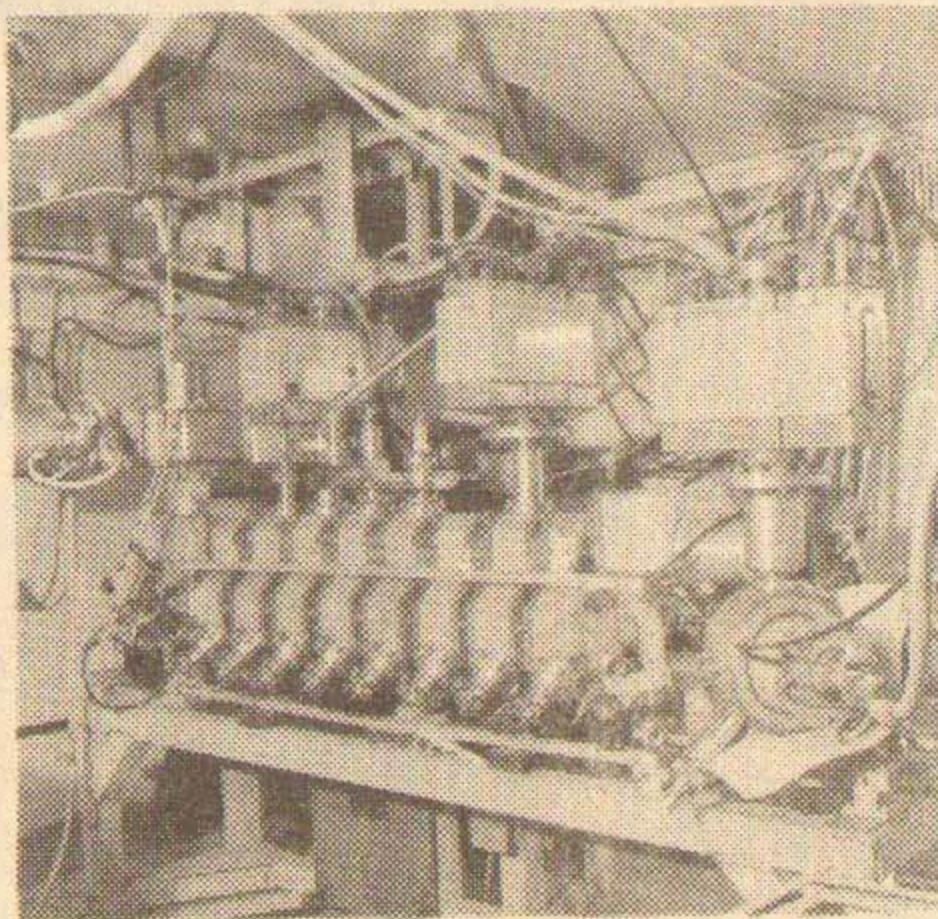


Рис. 2. Внешний вид структуры.

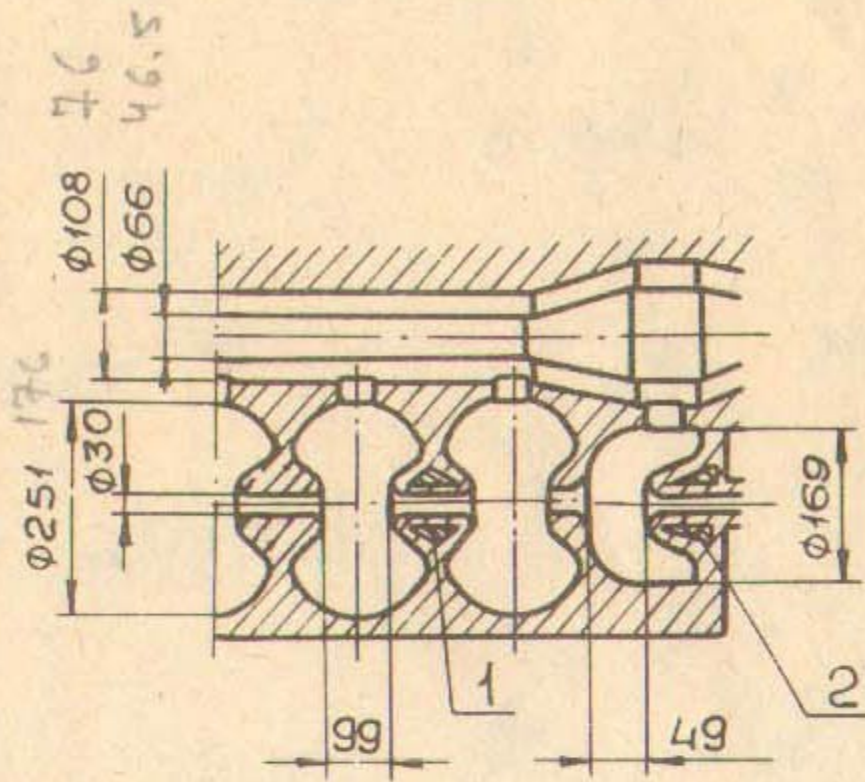


Рис. 3. Фрагмент структуры:
1 — линза из самарий-кобальта, 2 — входная линза.

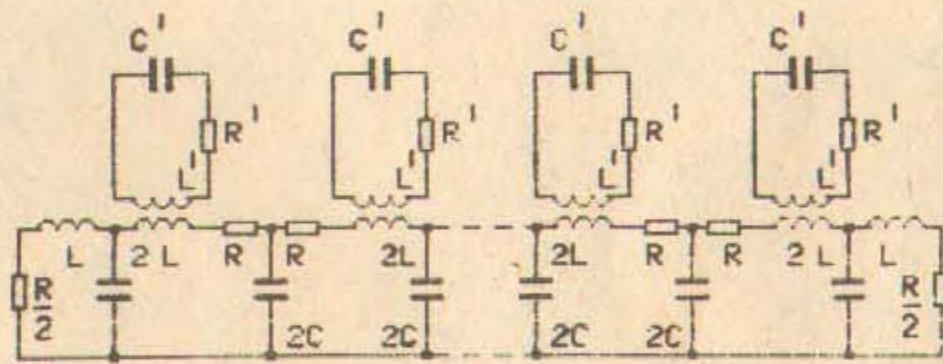


РИС. 4 А

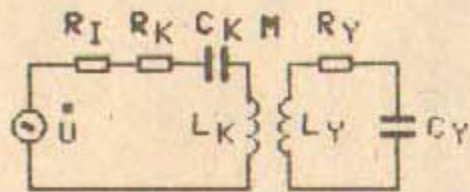


РИС. 4 Б

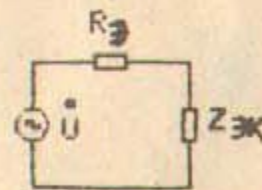
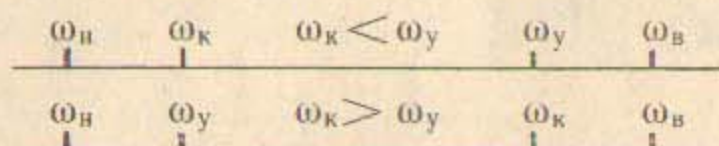


РИС. 4 В

Рис. 4. Эквивалентная схема ускоряющей структуры.

где N — число ускоряющих резонаторов структуры, ω_n — верхняя рабочая частота, ω_n — нижняя рабочая частота, любая из двух этих резонансных частот может быть рабочей; k — коэффициент связи, определяемый отверстиями в коаксиале; q — номер моды колебаний. При $q = N - 1$ колебания в соседних ячейках имеют сдвиг фазы равный π . Для этого типа колебаний положение частот соответствует диаграмме:



ω_k, ω_y — собственные частоты коаксиального и ускоряющих резонаторов.

В описываемой структуре работа производится на нижней частоте. Поступающая из магнотрона в структуру ВЧ-мощность распределяется между коаксиальным и ускоряющими резонаторами. Передача мощности в ускоряющие резонаторы (с учетом мощности, затрачиваемой на ускорение пучка) определяется параметрами резонаторов, их взаимной настройкой и коэффициентом связи k . Эффективность передачи мощности α , как отношение мощности в ускоряющих резонаторах P_y к мощности потерь в коаксиальном P_k , может быть представлена как

$$\alpha = \frac{P_y}{P_k} = \frac{2\beta(1 + \zeta_{y,k})}{1 + \beta + \zeta_{y,k}} - 1, \quad (1.2)$$

где

$$\zeta_{y,k} = \frac{k^2 \omega_0^2 Q_y Q_k}{\omega_k \omega_y (1 + a_{y,k})}; \quad (1.3)$$

ω_0 — рабочая частота; ω_k, ω_y — частоты настройки резонаторов; $\beta = r_3 / r_k$ — параметр связи с генератором с эквивалентным внутренним сопротивлением r_3 ; r_k — сопротивление потерь коаксиального резонатора; $a_{y,k}$ — обобщенная расстройка коаксиального и ускоряющих резонаторов относительно рабочей частоты ω_0 с учетом взаимного влияния при расстройках; Q_k, Q_y — нагруженные добротности резонаторов. $\zeta(\nu_k) = r_{вн} / r_k$ характеризует отношение актив-

ной составляющей вносимого из ускоряющей структуры сопротивления к сопротивлению потерь в коаксиале, $v_k = \omega_k / \omega_0$ ^{*}).

Условия эффективности передачи мощности в ускоряющие резонаторы могут быть оценены из графика рис. 5, устанавливающего зависимость α от расстроек коаксиального и ускоряющих

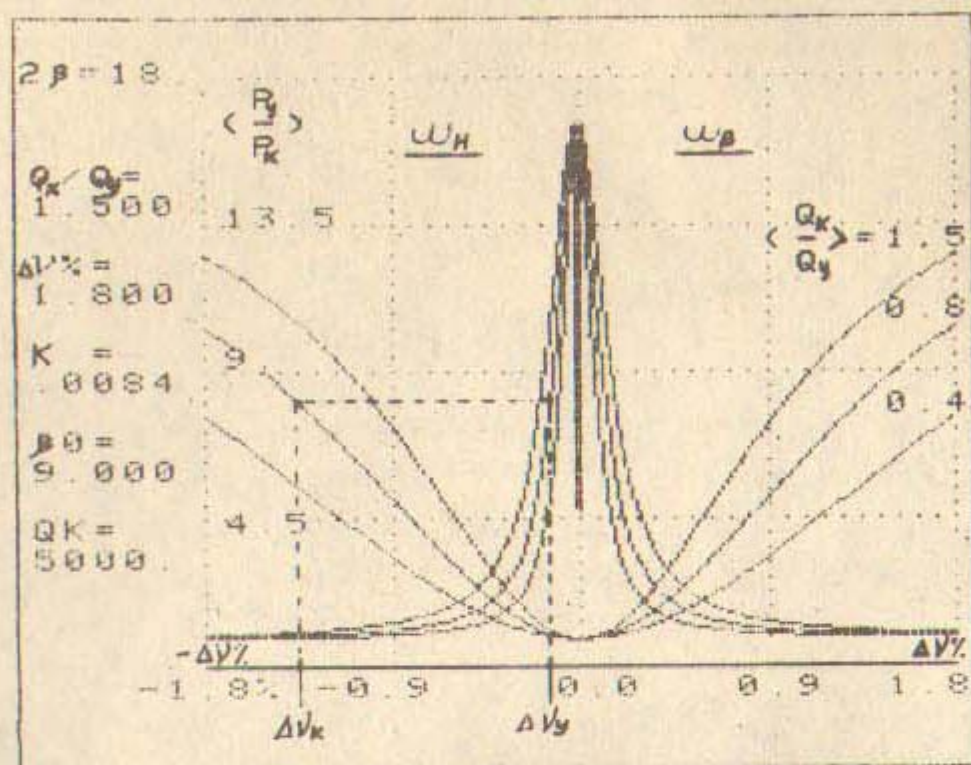


Рис. 5. Эффективность передачи ВЧ-мощности $\alpha = P_y / P_k$ в ускоряющие резонаторы в зависимости от расстроек $v_{k,y}$.

резонаторов по известным параметрам связи k и β , при различной нагрузке пучком ускоряющих резонаторов.

Тепловой нагрев структуры заметно уменьшает собственную частоту ускоряющих резонаторов и, как следствие, вызывает смещение рабочих частот. Для π -моды влияние расстройки резонаторов на отклонение собственной частоты структуры имеет вид [4]

$$\left| \frac{\Delta \omega_d}{\omega_d} \right| \approx \frac{1}{N-1} \sum_0^{N-1} \left| \frac{\Delta \omega_{yn}}{\omega_{yn}} \right|, \quad (1.4)$$

$$^*) \zeta(v_k) = \frac{k^2 Q_k Q_y}{v_k} \sqrt{\frac{v_k^2 - 1}{v_k^2 + k^2 - 1}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Q_y^2 k^4}{(v_k^2 - k^2 - 1)(v_k^2 - 1)}}, \text{ здесь учтена зависимость вза-}$$

имной расстройки при конечном коэффициенте связи $v_k^2 = \frac{v_y^2 + k^2 - 1}{v_y^2 - 1}$,

$$\zeta(v_y) = \frac{k^2 Q_k Q_y}{v_y} \sqrt{\frac{v_y^2 - 1}{v_y^2 + k^2 - 1}} \left[1 + Q_y^2 \frac{(1 - v_y^2)^2}{v_y^2} \right]^{-1}.$$

из этой формулы следует, что относительная расстройка рабочей частоты в N раз меньше относительной расстройки частоты отдельного ускоряющего резонатора. На основе приведенных соотношений была рассчитана амплитудная и фазовая стабильность ускоряющего напряжения при нагреве структуры. Эта зависимость приведена на рис. 6, 7. При работе структуры на верхней рабочей частоте ω_a режим более стабилен, но для полной оценки амплитудной и фазовой стабильности при выборе рабочей частоты необходимо учесть распределение амплитуд поля в каждом резонаторе вдоль структуры по ходу ускорения пучка, которое зависит от элементов связи с коаксиальным резонатором. В регулярной части структуры ускоряющие резонаторы расположены через $\lambda_0/2$. Соответственно, отверстия связи распределены вдоль коаксиала с этим же интервалом. Для обеспечения равномерного темпа ускорения необходимо обеспечить равенство ускоряющих полей в резонаторах структуры. Если отверстия связи одинаковы, то в этом случае условия равного возбуждения ускоряющих резонаторов в основном зависят от распределения магнитного поля вдоль коаксиала и при выборе рабочей частоты структуры (нижней или верхней) необходимо учитывать характер смещения узлов тока в коаксиале относительно центра отверстий связи при перестройке коаксиала.

Рассматривалось два варианта перестройки, когда изменение резонансной длины коаксиала производится с обоих концов при сохранении симметрии относительно центрального ускоряющего резонатора и с одной стороны при смещенном коаксиале. В первом случае изменение равновесной фазы ускоряющего поля вдоль структуры может быть усреднено как для первого оборота, так и для последующих оборотов ускоряемых частиц и практически одинаково при работе структуры на нижней или верхней рабочей частоте. При перестройке коаксиала с одной стороны зона перемещения короткозамыкателя (в структуре применен бесконтактный поршень) должна быть смещена таким образом, чтобы расстройка ускоряющих резонаторов, вносимая реактивным сопротивлением связи с коаксиалом, была одного знака. На нижней рабочей частоте расстройка носит емкостной характер, на верхней индуктивный. Коаксиальный резонатор на нижней рабочей частоте должен быть настроен на более высокую частоту, его геометрическая длина уменьшается. При этом в области отверстий связи распределение магнитного поля значительно отличается от распределения поля невозмущенного коаксиала, а расстояние между узлами тока будет меньше $\lambda_0/2$ рабочей частоты. Максимум магнитного поля,

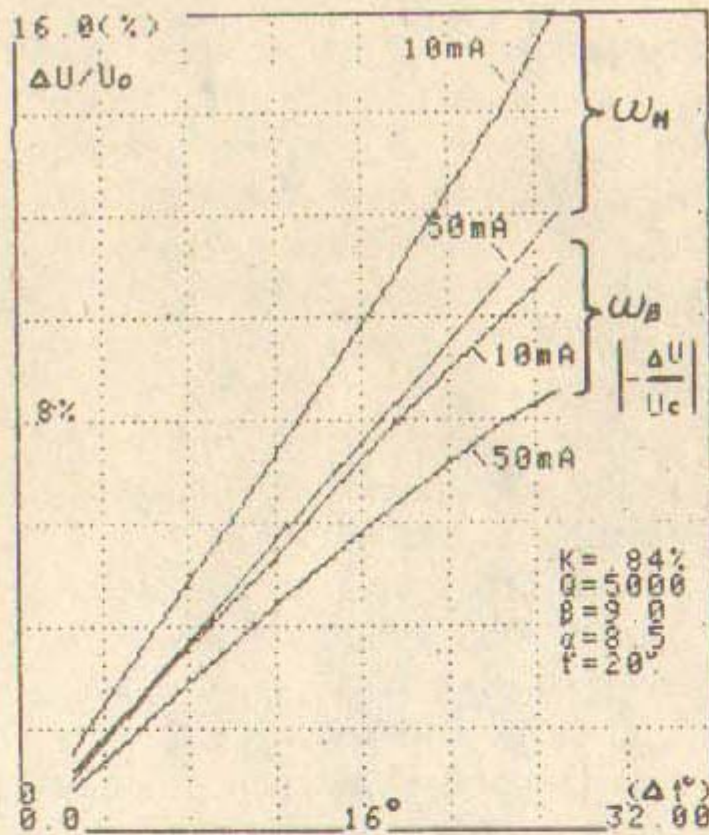


Рис. 6. Изменение ускоряющего напряжения при нагреве структуры при работе на верхней ω_n или нижней ω_b рабочей частоте.

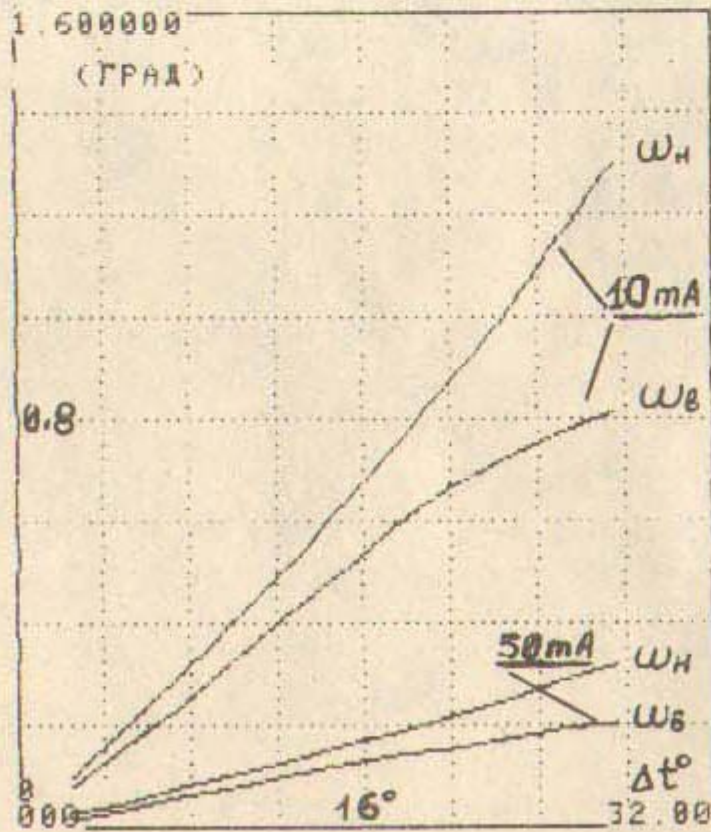


Рис. 7. Изменение фазы ускоряющего напряжения при нагреве структуры.

сопряженный с отверстием связи, например с первым, для последующих отверстий будет смещен нелинейным образом, так как они расположены с интервалом $\lambda_0/2$ невозмущенной длины волны. Это приводит к изменению равновесной фазы ускоряющего поля структуры и должно быть учтено как при расчете динамики пучка, так и при конструировании структуры. Если структура настроена на верхнюю рабочую частоту, коаксиальный резонатор должен быть настроен на более низкую частоту, его длина становится больше, чем при работе на нижней частоте. Зона, занимаемая магнитным полем в области отверстий связи в коаксиале, при этом становится шире, а набег фазы поля вдоль структуры несколько меньше. Таким образом, работа структуры на верхней частоте более предпочтительна. Амплитуды полей в ускоряющих резонаторах зависят от условий связи с коаксиалом и независимо от выбора рабочей частоты и способа перестройки коаксиала распределение полей в резонаторах вдоль структуры будет не одинаковым. В этом случае равенство ускоряющих полей в резонаторах устанавливается подстройкой в небольших пределах отдельных резонаторов.

Вариант двусторонней перестройки коаксиала технически сложен (один из элементов должен быть сопряжен с перестраиваемым вводом мощности), а при больших уровнях мощностей может быть неоправданным, так как требуется охлаждение контактов. В действующей установке применена односторонняя перестройка коаксиала бесконтактным поршнем. Было принято решение начать работу на нижней рабочей частоте с последующим переходом, после доработки резонаторов структуры, на верхнюю рабочую частоту.

Значения параметра β являются важными при проектировании ввода мощности в коаксиальный резонатор и устройств согласования с источником ВЧ-мощности — магнитоном. β устанавливает связь между прошедшей в структуру мощностью и мощностью потерь в коаксиале, а также зависимость коэффициента отражения мощности Γ на входе структуры при загрузке ее пучком с разным током в режиме ускорения:

$$\beta_0 = \frac{r_i}{r_k} \approx \frac{2(1+\alpha)}{1-\Gamma_0} - (1+\zeta_0), \quad (1.5)$$

$$|\Gamma| = \left| \frac{1+\zeta(\nu) - \beta_0}{1+\zeta(\nu) + \beta_0} \right|. \quad (1.6)$$

На рис. 8 показана зависимость Γ_0 при загрузке ускоряющей

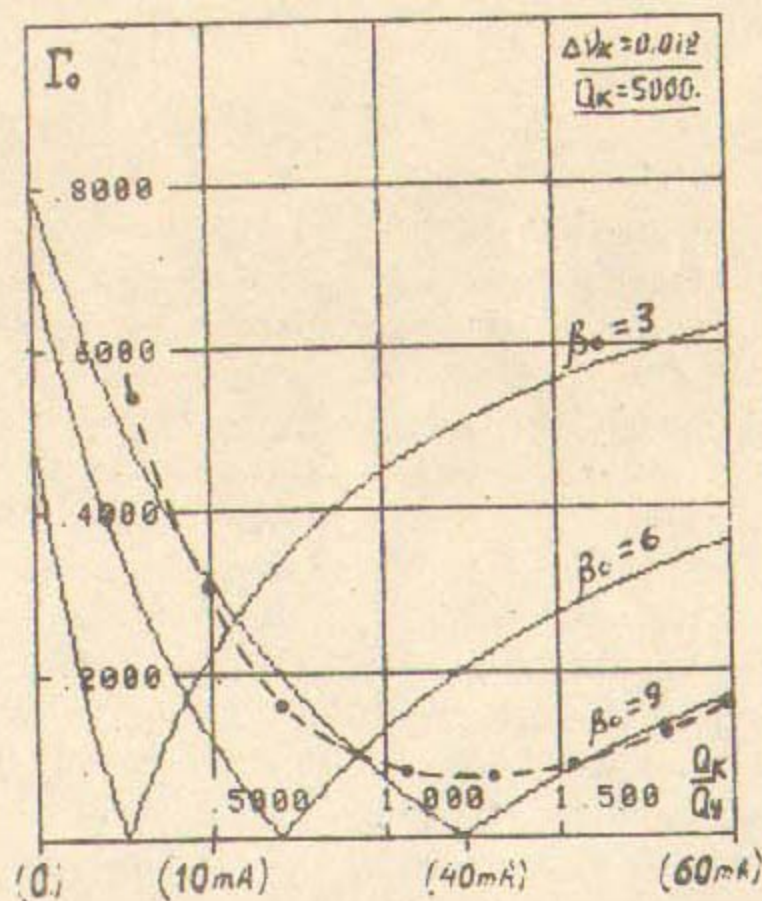


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения Γ_0 в ВЧ-тракте магнотрона при нагрузке ускоряющей структуры пучком для различных условий связи с генератором β_0 . — — — измеренное значение Γ_0 .

структуры пучком для различных связей с генератором β_0 . Следует отметить, что максимальное значение $\alpha_{\max} < 2\beta_0$. По параметру β_0 можно оценить волновое сопротивление согласующего четвертьволнового трансформатора на входе в коаксиальный резонатор. Так, например, в описываемой структуре $\beta_0 \approx 8$, характеристическое волновое сопротивление ячейки коаксиального резонатора $Z_k \approx 38$ Ом, четвертьволновый коаксиальный резонатор $Z_{тр} \sim 4.8$ Ом. Запасенная энергия в коаксиальном резонаторе соизмерима с накопленной энергией в ускоряющих резонаторах. Даже в настроенной структуре при больших значениях $\alpha \sim (9 \div 15)$, когда основная доля мощности ($> 80\%$) потребляется в ускоряющих резонаторах, электрическая прочность структуры зависит от напряженности поля в коаксиальном резонаторе и элементах согласования на вводе мощности.

Соотношение амплитуд напряжений в ускоряющих и коаксиальном резонаторах для настроенной структуры можно оценить по формуле

$$\frac{U_y}{U_k} = \sqrt{\frac{Q_y \rho_y}{Q_k \rho_k} \frac{\alpha}{1 + \eta}} \quad (1.7)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{пучка}}}{NP_{y0}}, \quad 1 + \eta = \frac{Q_{y0}}{Q_y}$$

P_{y0} — мощность потерь в резонаторе; ρ_y , ρ_k — характеристическое сопротивление ускоряющего и коаксиального резонаторов; Q_{y0} — добротность не нагруженного ускоряющего резонатора.

При возбуждении структуры короткими ВЧ-импульсами, помимо рабочего вида колебаний, могут возбуждаться и другие моды, если их частоты близки к рабочей. Расстояние до соседних резонансных частот зависит от количества резонаторов в структуре N и коэффициента связи k , его значение определяет крутизну дисперсионной характеристики. В данной структуре с вынесенным распределенным коаксиальным резонатором, отверстия связи расположены с интервалом $\lambda_0/2$, возбуждение других видов колебаний (кроме π -вида) носит вырожденный характер. Действительно, для 0-вида колебаний, могут быть возбуждены только четные ускоряющие резонаторы, для вида $\pi/2$ только нечетные и т. д. Резонансные частоты этих колебаний лежат в области, близкой к собственным частотам резонаторов, и находятся внутри интервала, определяемого нижней рабочей частотой и верхней рабочей частотой π -вида. Величина коэффициента связи в этом случае в значительной степени определяется из соображения селекции рабочего типа колебаний и составляет 1—2%. Коэффициент связи менее 0.5% увеличивает чувствительность структуры к малым изменениям параметров при ее настройке и работе, что приводит к неустойчивости режима ускорения. При сильной связи ($> 4\%$), запасенная энергия в коаксиале увеличивается и требуется значительная расстройка коаксиала $\nu_k \approx 4\%$, (зона перемещения короткозамыкателя становится близка к $\lambda_0/2$).

2. При проектировании структуры были проведены расчеты динамики пучка в микротроне с темпом ускорения 3 МэВ на один оборот. Инжекция в ускоряющую структуру производится предварительно «приготовленными» сгустками электронов на низкой энергии (40 кэВ). Поэтому параметры пучка после первого пролета ускоряющей структуры в значительной степени определяются его динамикой в первом и втором резонаторах, где на движение электронов сильное влияние оказывают ВЧ-поля и поле пространственного заряда. Оптимизация резонаторов проводилась

путем численного моделирования. В первом ускоряющем резонаторе (см. рис. 3) зазор и форма поверхности в приосевой области рассчитаны так, чтобы при сохранении значений напряженности полей, как и в регулярных, иметь минимальные дефокусирующие поля. Кроме того, для согласования по фазе первого резонатора и регулярной части структуры два последующих промежутка между резонаторами укорочены за счет уменьшения толщины стенок. Дополнительная фокусировка пучка в ускоряющем канале производится двумя магнитными линзами, встроенными в пролетные промежутки между 2—3-м и 7—8-м резонаторами. Линзы с аксиально-симметричным постоянным магнитным полем из самарий-кобальтовых магнитов.

В ускоряющую структуру инжектируются сгустки с фазовой протяженностью около 40° . Собственно инжектор расположен под углом 30° к оси структуры. Поворот осуществляется магнитом (рис. 9). В первых резонаторах производится дополнительная

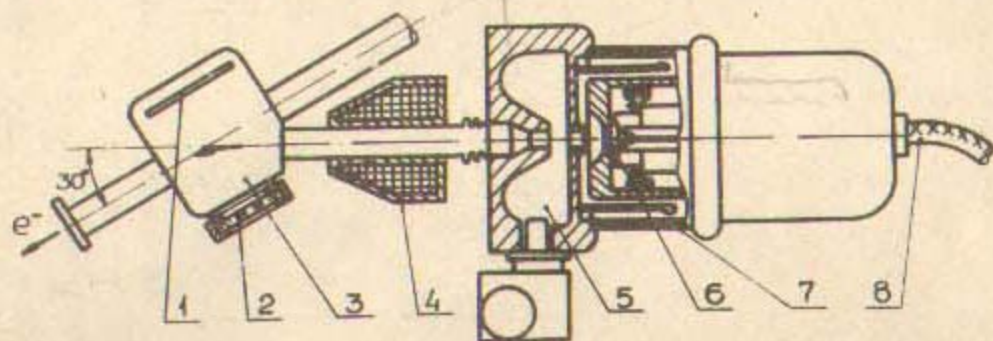


Рис. 9. Инжектор:

1—люмин фор; 2—окно; 3—камера поворотного магнита; 4—линза инжектора; 5—резонатор («пассивный»); 6—КСУ; 7—изолятор; 8—ввод питания КСУ.

группировка пучка, обеспечивающая фазовую протяженность сгустков $\sim 5^\circ$ на выходе из ускоряющей структуры. Для компенсации дефокусирующего воздействия первого ускоряющего зазора перед ним устанавливается фокусирующая линза (рис. 3).

Расчеты были проведены для 10 оборотов пучка в микротроне для тока 10 и 100 мА при инжекции непосредственно в структуру. Исходные значения параметров пучка были предварительно получены при расчетах инжектора-группирователя, показанного на рис. 9. Варианты расчета сведены в табл. 1. Расчеты показывают, что пучок после прохода ускоряющей структуры при токе 50 мА будет иметь энергетический разброс менее 3% и поперечный эмиттанс ~ 1.5 мрад·см. Первый резонатор структуры, как показывают расчеты, на динамику пучка второго и последующих оборотов

Таблица 1

Нач. параметры							Параметры ускоренного пучка						
I_0 , мА	E_0 , кэВ	r_0 , см	α_0 , мрад	U_1 , кВ	U_2 , в		$E_{\text{пол.}}$, МэВ	$\Delta E/E$, %	ϵ мрад·см	α , мрад	$\Delta\varphi$, град	$r_{\text{пл.}}$, см	ΔR , мм
10	40	0,5	-15	300	466		30	2	0,5	3	2	0,5	0
100	40	0,5	-25	360	466		30	2	0,3	4	3	0,7	0
100	40	0,5	-15	240	466		30	2	0,3	4,7	3	0,75	1
100	40	0,5	-15	300	466		30	2	0,9	5	3	0,6	-3
100	40	0,5	-15	300	466		30	2	0,6	2,5	3	0,6	0
100	40	0,5	-15	300	466		30	2	1,4	7	3	0,9	0

влияет незначительно, так как сгустки проходят его при фазе ускоряющего поля близкой к нулю.

На динамику пучка существенное влияние может оказывать возбуждение пучком высших типов колебаний, которое как известно приводит к неустойчивости пучка в микротроне. Для подавления этих колебаний в каждый ускоряющий резонатор введено устройство, шунтирующее высшие частоты и являющееся запрещенным для основной частоты. Устройство шунтирования состоит из петли, которая погружается в полость резонатора, и резонансной дроссельной развязки, через которую к устройству подключается коаксиальная нагрузка.

Конструктивно структура составлена из блоков двух типов: медных, в которых выполнены пролетные трубки, и дюралюминиевых, в которых выполнены отверстия связи, элементы подстройки частоты и измерительные петли. Медь обеспечивает большую электрическую прочность, дюралюминий позволяет удешевить и облегчить конструкцию. Для обеспечения контактов между блоками и вакуумной плотности используются индиевые уплотнения. Форма ускоряющего резонатора и частично коаксиал показаны на рис. 10.

3. В инжекторе (рис. 9) в качестве источника электронов используется катодно-сеточный узел (КСУ) от металлокерамического тетрода. Рабочая поверхность импрегнированного катода 0.9 см^2 . Выбор КСУ на основе тетрода обусловлен желанием иметь на его выходе короткие импульсы тока близкие к прямоугольным при минимальном темновом токе меньше 1.5 мкА . Режим работы КСУ регулируется изменением запирающего смещения и напряжения экранной сетки. На участок сетка—катод для формирования сгустков электронов через высоковольтный разделитель подается ВЧ-импульс, сфазированный с основным источником мощности. В КСУ предусмотрена возможность дополнительной модуляции тока инжектора по второй (экранной) сетке на частоте 50.83 МГц для увеличения пикового значения тока в сгустках в три-пять раз (так называемый режим работы с прореживанием тока). Этот режим работы позволяет увеличить число ускоренных частиц в сгустке без повышения мощности генератора. На выходе КСУ ускоренные до 40 кэВ сгустки электронов имеют фазовую длину $\sim 120^\circ$, что позволяет для модуляции их по энергии и последующей группировки использовать «пассивный» резонатор. Участок группировки включает в себя этот резонатор, фокусирующую

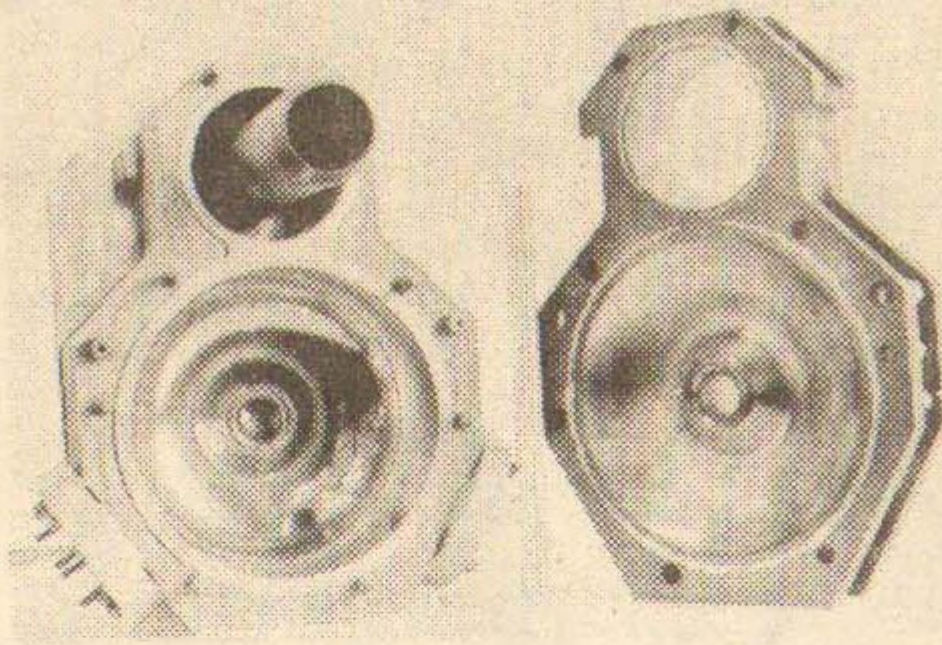


Рис. 10. Внутренний вид ускоряющего резонатора (и частично коаксиального).

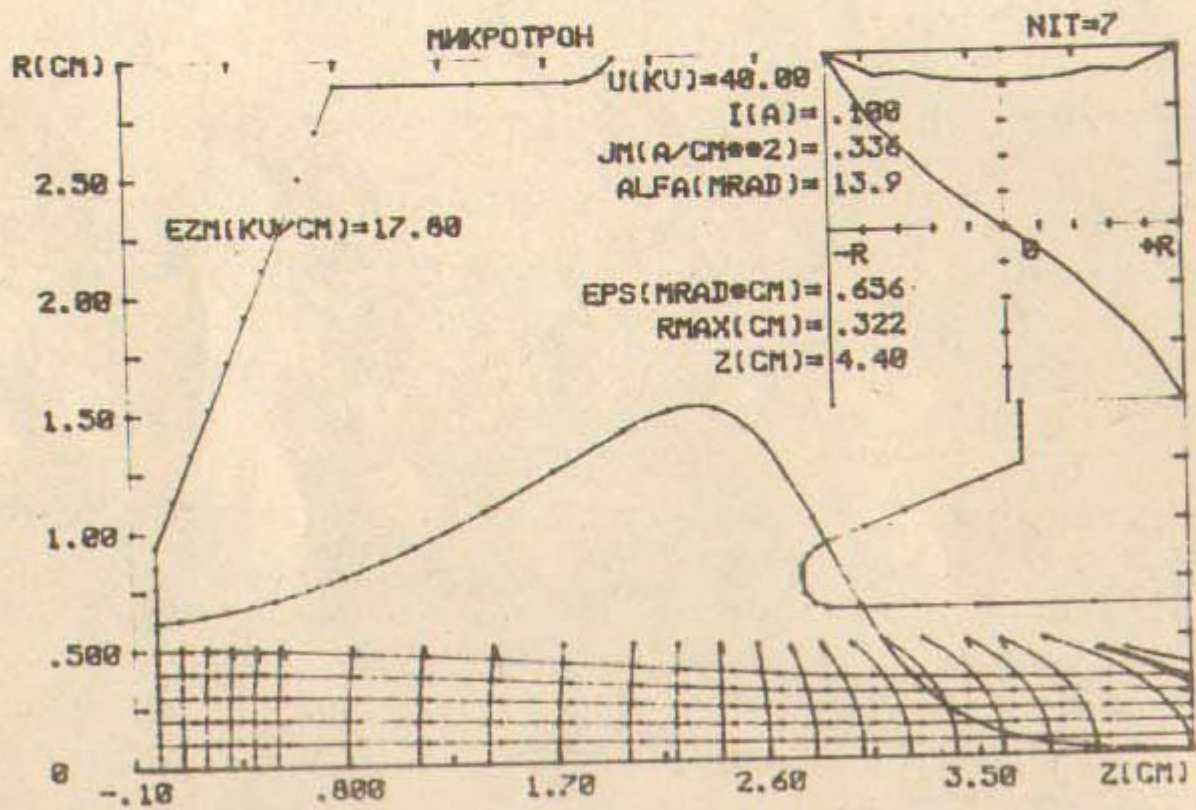


Рис. 11. Пушка инжектора (результаты расчета).

линзу и поворотный магнит. На этом участке при средних токах инжектора от 15 до 150 мА возможно получение коротких сгустков до 40° . Приведенные параметры инжектора были рассчитаны и проверены на испытательном стенде инжектора. В расчетах рассматривался процесс формирования плотности и фазовой длины сгустка при учете сил объемного заряда его радиальной и продольной компоненты. На входе в «пассивный» резонатор сгустки имеют распределение плотности, близкое к трапеции с крутым передним фронтом. Оптика катодного узла рассчитана таким образом, чтобы пучок входил в резонатор сходящимся ($15-25$ мрад) и был равноплотным по радиусу (рис. 11). «Пассивный» резонатор должен быть высокодобротным, его шунтовое сопротивление при работе с током в микротроне $5-10$ мА должно быть более 1 МОм. При токах инжекции в микротрон более 100 мА резонатор может быть шунтирован. Пучок, проходя резонатор, возбуждает его и теряет часть своей мощности. При токе пучка 100 мА мощность составляет ~ 500 Вт. Для модуляции сгустков по энергии резонатор должен быть расстроен таким образом, чтобы фаза наведенного поля в резонаторе была тормозящей для начала сгустка, а амплитуда составляла $10-13\%$ от энергии (40 кэВ) центральной частицы. В этом случае процесс формирования плотности и фазовой длины сгустков на участке дрейфа происходит достаточно линейно для токов от 15 до 100 мА. При испытании инжектора на стенде была установлена зависимость диаметра пучка от ускоряющего напряжения и тока, в фокусирующей линзе. Размеры пучка наблюдались на люминофоре, установленном в поворотной камере (рис. 9), и измерялись в коллекторе, состоящем из диафрагмы $\varnothing 10$ мм и диска $\varnothing 40$ мм. Коллектор был установлен на расстоянии 50 см за предполагаемым местом входа в первый резонатор структуры. Для измерения фазовой протяженности сгустков и формы тока, коллектор был заменен на согласованный широкополосный цилиндр Фарадея (полоса 7 ГГц, КСВН 1.3). Измерения проводились быстрым осциллографом (полоса 6 ГГц) при развертке 100 пс и круговой развертке с частотой следования сгустков (915 МГц). Некоторые результаты измерений показаны на рис. 12, 13, а вариант расчета динамики сгустков приведен в табл. 2.

Проведенные измерения показали удовлетворительное соответствие с расчетными значениями. Следует отметить тот факт, что несмотря на то, что частицы сгустка (начало и конец) приобретают значительный энергетический разброс около 13% в «пассивном» резонаторе, в процессе дрейфа и группировки для частиц

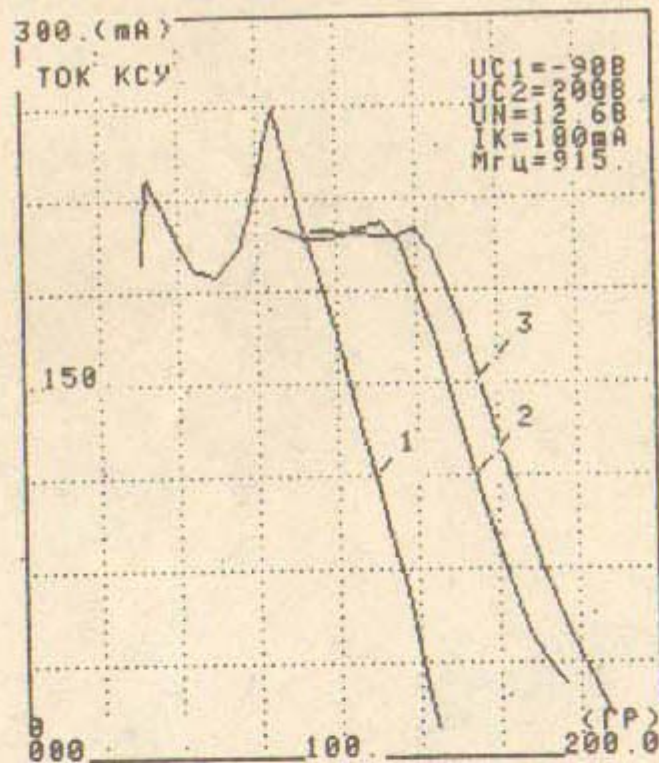


Рис. 12. Ток катодно-сеточного узла (КСУ):
 1—форма тока катода; 2—ток на выходе первой управляющей сетки, 3—ток на выходе второй управляющей сетки (экранной).

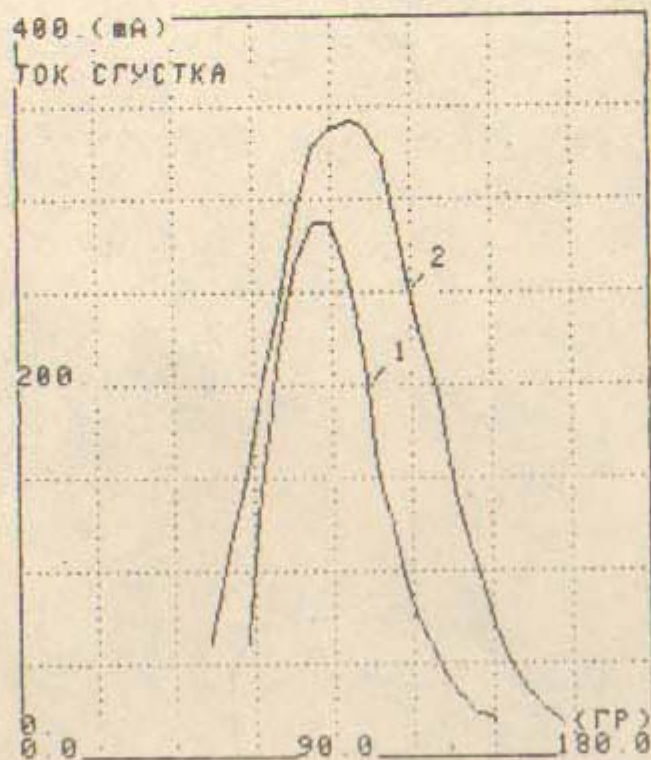


Рис. 13. Фазовая протяженность и форма тока сгустков на выходе инжектора после группировки. Ток в импульсе 30 мкс: 1) — 40 мА, 2) — 100 мА.

приосевой области этот разброс нейтрализуется кулоновскими силами заряда до значений менее 1.5%. Для периферийных по радиусу частиц энергетический разброс не нейтрализуется и происходит перегруппировка. Большой процент модуляции приводит к перераспределению плотности сгустка, и на входе в структуру он имеет форму гантели.

Таблица 2

Результаты расчета группировки сгустка в инжекторе без магнитной линзы
 $E=40$ КэВ, $\Delta E/E=13.5\%$, $I_0=50$ мА $R_0=0.5$ см, $2\phi_0=120^\circ$, $\Delta R/\Delta Z=-10$ мрад.

Z, см	ϕ , град.	R_{\max} , см	$\Delta R/\Delta Z$, мрад	ΔE , кэВ
0	50.84	0.489	5.56	5.43
3	45.47	0.511	9.31	5.08
9	36.1	0.585	14.4	4.11
15	28.73	0.695	22.2	3.08
21	23.51	0.851	29.6	2.04
27	20.28	1.047	35.4	1.12
33	18.77	1.274	39.9	0.38

4. Источником ВЧ-мощности для питания ускоряющей структуры микротрона служит новый СВЧ-прибор магникон [4, 5], который в процессе подготовки к экспериментам был выведен на рабочий режим с уровнем мощности 2.5 МВт в импульсе 30 мкс. Магникон работал на эквивалент нагрузки. Его мощность была измерена калориметрированием, а направленные ответвители, которые используются в ВЧ-тракте структуры, откалиброваны. Коэффициент усиления прибора составил 31 дБ. Электронный КПД 85%. Эксплуатационные характеристики магникона, такие как регулировочная, нагрузочная, фазовая стабильность и другие, подробно исследованы и приведены в работе [5].

Магникон имеет два вывода энергии со сдвигом фаз колебаний в них 90° . Для работы на ускоряющую структуру микротрона, имеющую один вход, необходимо устройство сложения мощностей. Положительное свойство магникона, заключающееся в том, что даже при больших рассогласованиях с нагрузкой работа генератора не нарушается [5], позволяет использовать устройство сложения мощности без балластной нагрузки. Таким устройством сложения мощности может быть тройник. В рассматриваемой ВЧ-системе передача мощности осуществляется по коаксиальным кабелям

(РК-50-44) и ее сложение производится посредством волноводно-коаксиального тройника (ВКТ).

Собственно устройство сложения мощности (ВКТ), волновод 220×104 мм и коаксиальный переход с волноводным шлейфом составляют единую конструкцию с ускоряющей структурой. Мощность в коаксиальный резонатор вводится через согласующий низкоомный четвертьволновый трансформатор.

К особенностям волноводно-коаксиального тройника можно отнести то, что кабель РК-50-44 проходит сквозь волновод в широкой стенке без нарушения центральной жилы с ее изоляцией. Внешняя оплетка кабеля закрепляется на стенках волновода, а изоляция центральной жилы кабеля используется для уплотнения под давлением азота 2-3 атм. Такая конструкция сумматора позволяет исключить дополнительные ВЧ-разъемы и иметь их только на выходах магнкона. Транспортировка энергии по кабелям обеспечивает достаточную конструктивную гибкость системы. Общая длина кабеля РК-50-44 около 8 м, и на рабочей частоте (915 МГц) затухание в нем невелико ($\sim 5\%$).

5. До начала испытаний ВЧ-системы на большом уровне мощности были произведены измерения и настройка ускоряющей структуры, волноводного тракта, ВКТ и инжектора на отдельном испытательном стенде. (Некоторые результаты испытаний инжектора были приведены в разделе 3.) Были измерены коэффициент связи в структуре ($k=0.84\%$), параметры резонаторов структуры (табл. 3). Определены диапазоны регулировок по частоте и условия согласования с источником ВЧ-мощности — магнконом.

Структура была настроена для работы на нижней частоте, а устройства ВКТ, волноводно-коаксиальный переход и волноводный шлейф выставлены в положение, обеспечивающее согласование с генератором при работе микротрона с током от 15 до 100 мА. Падающая и отраженная мощность измеряется направленными ответвителями на входе структуры и на выходе магнкона.

Таблица 3

Q_v	Q_s	ρ_v (Ом)	ρ_s (Ом)	Z (МОм/м)
18000	5000	213	20	30

Резонаторы структуры не имеют устройств для подавления

мультипактора, поэтому потребовалась предварительная тренировка ВЧ-полем (несколько рабочих смен) для выхода ускоряющей структуры в номинальный режим. Тренировка структуры проводилась при частоте повторения 2 Гц. Тренировка и испытание ускоряющей структуры показали, что каких-либо проблем при работе магнотрона на несогласованную или резонансную нагрузку не возникает.

Испытания ВЧ-системы микротрона показали надежность ВЧ-тракта на уровне мощности 2 МВт при работе на резонансную высокочастотную нагрузку. При ускорении пучка с током 50 мА наблюдалась «подсадка» напряжения падающей волны генератора. После согласования генератора с нагруженной пучком структурой, при подсадке напряжения в ускоряющих резонаторах 13%, изменение мощности на входе структуры составило 3% по отношению к мощности без пучка в структуре. При этом были получены значения КСВН на входе структуры, близкие к расчетным, показанным на графике рис. 7.

Для проводки пучка потребовалась коррекция его траектории нацеливающими катушками с магнитным полем, наложенным на всю длину структуры. Был проведен и ускорен пучок с током 50 мА в центр коллектора диаметром 10 мм, расположенного в 90 см от выхода из структуры. При этом регистрировался ток, его положение и радиальные размеры пучка по отпечатку на радиационно-чувствительной пленке (рис. 14).

Энергия ускоренного пучка измерялась косвенно по напряжению в ускоряющих резонаторах и непосредственно на выходе структуры по поглощению в металле. На выходе структуры был установлен пакет из алюминиевых пластин разной толщины с прокладками между ними (30 мкм) из радиационно-чувствительной пленки и на него был направлен пучок, выпущенный в атмосферу через титановую фольгу 50 мкм. Измеренная энергия пучка составляет 6 МэВ. Импульсная мощность в пучке 300 кВт.

Использованная в ускоряющих резонаторах мощность с учетом мощности в пучке составляет 85% от поступающей. Мощность потребляемая от магнотрона, 1.7 МВт.

Поперечный эмиттанс пучка оценивался при измерении размеров пучка по отпечаткам, полученным непосредственно на выходе структуры и в плоскости коллектора. Измеренное значение поперечного эмиттанса пучка соответствует 0.8 мрад·с. Токпрохождение ускоренного пучка в зависимости от фазы инжектора показано на рис. 15.

Графики, характеризующие режим ВЧ-тренировки структуры, показаны на рис. 16. На рис. 17—20 представлены результаты эксперимента при ускорении пучка в структуре

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акимов В.Е. и др.* Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987, т. II, с.113.
2. *Sundelin R.M. et al.* JEEE Trans. on Nucl. Sci, 1977, v.NS-24, N.3, p.1686.
3. *Sundelin R.M. et al.* JEEE Trans. on Nucl. Sci, 1981, v.NS-28, N.3, p.2844.
4. *Карлинер М.М. и др.* Магнотрон. — В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1988, с.141, вып.5.
5. *Karliner M.M. et al.* Nuclear Instr. and Methods in Physics Research, 1988, v.A269 N4, p.459.

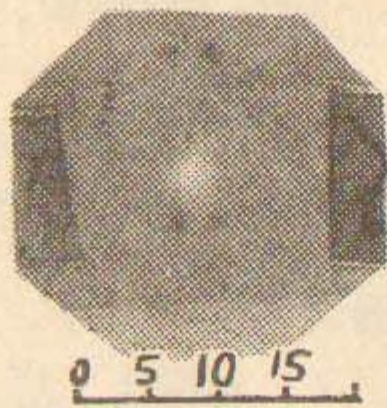


Рис. 14. След пучка на выходе из структуры.

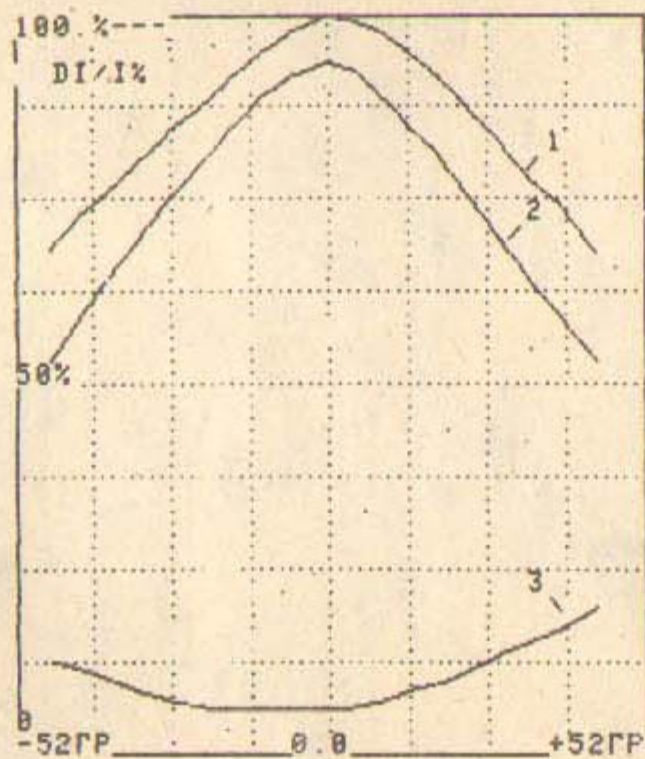
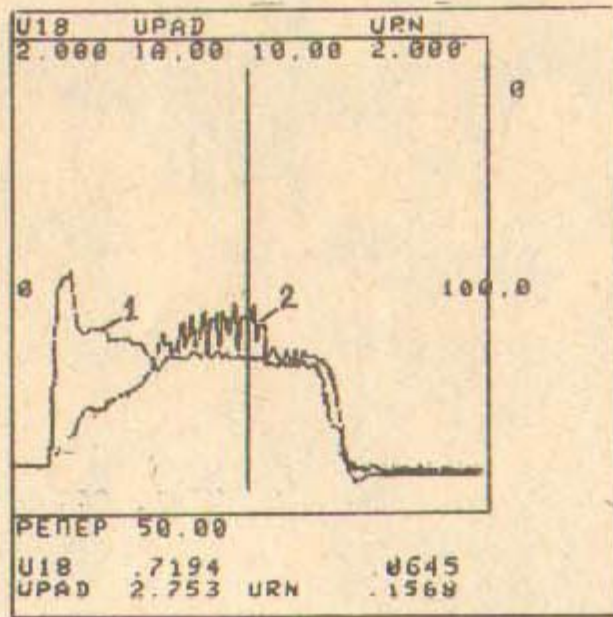
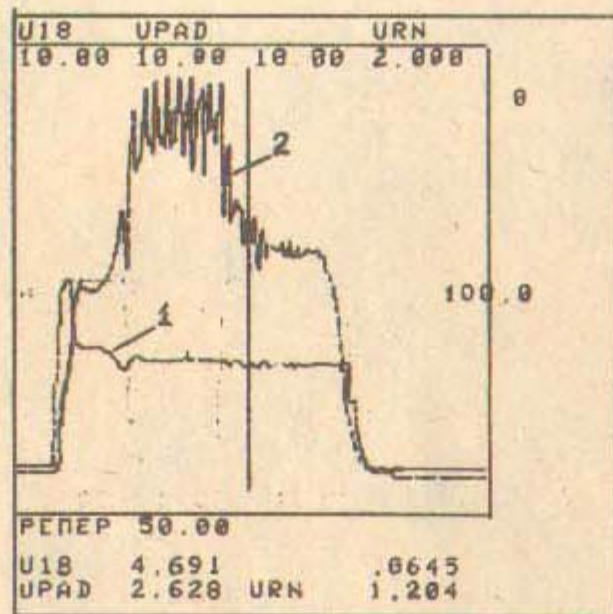


Рис. 15. Токопрохождение в зависимости от фазы инжекции, $I=60$ мА:
 1— суммарный ток коллектора, 2— ток в центре, 3— ток в диафрагме.



a



b

Рис. 16. Резонансный ВЧ-разряд в ускоряющих резонаторах при тренировке структуры:

a—начало работы, *b*—после 1.5 часа тренировки; 1—форма падающей волны, 2—ВЧ-разряд в ускоряющем резонаторе.

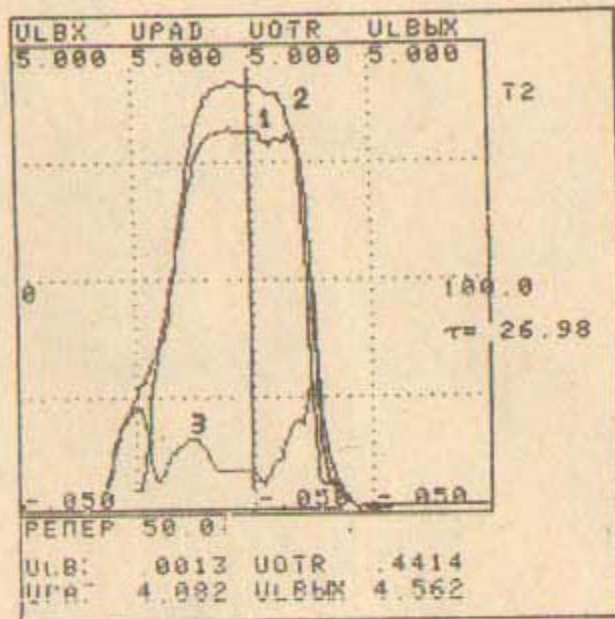


Рис. 17. Осциллограммы напряжений:
1 — падающей волны в волноводе (1); 2 — в ускоряющем резонаторе (ULBbX); 3 — отра-
женной волны (UOTR).

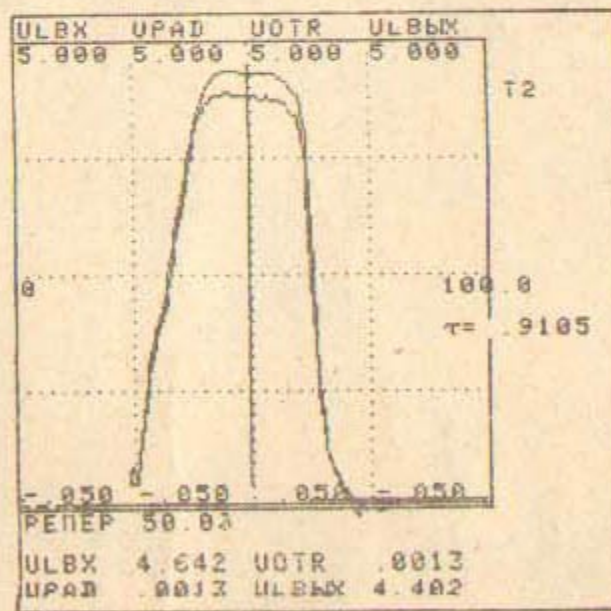


Рис. 18. Соотношение амплитуд поля в первом и выходном ускоряющих резонаторах.

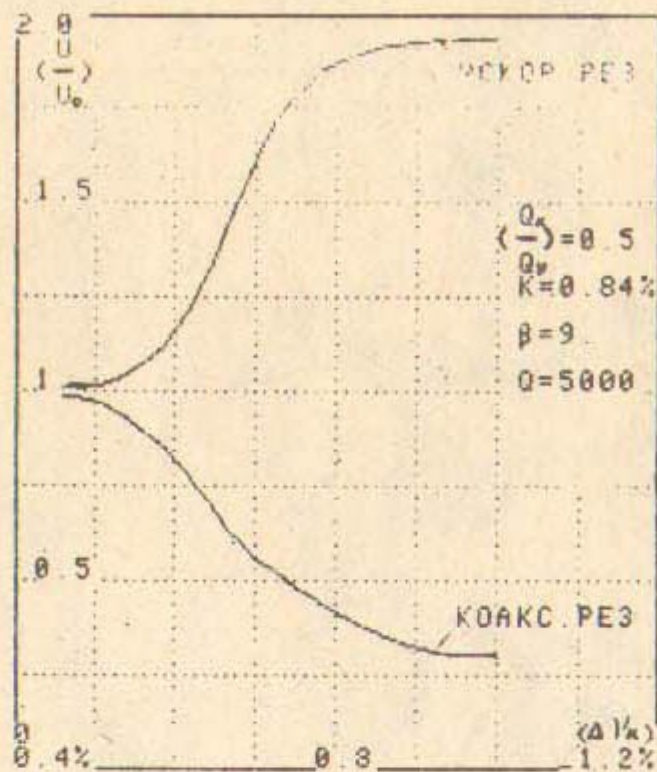


Рис. 19. Относительное изменение напряженности полей в коаксиальном и ускоряющих резонаторах при настройке структуры на рабочую частоту ($\nu_k = 1\%$).

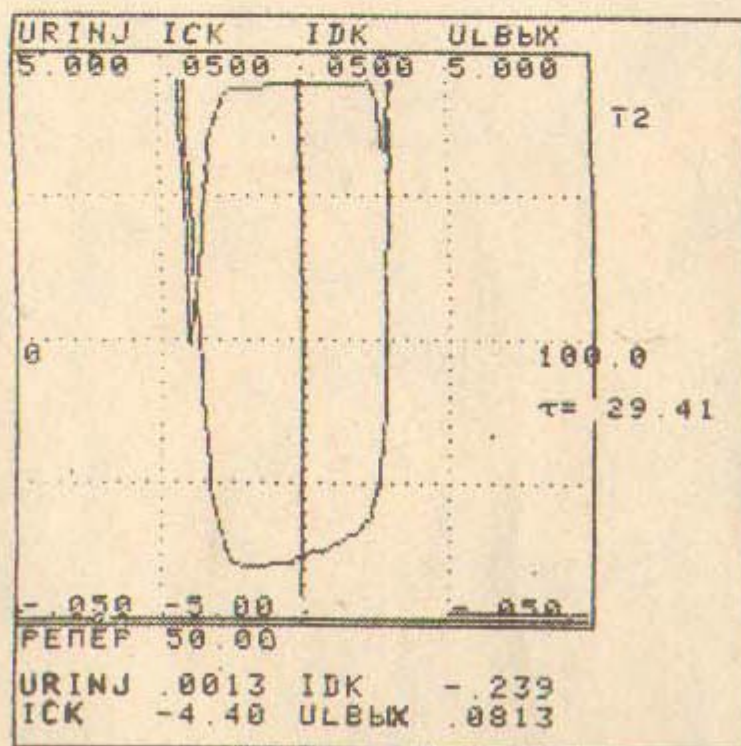


Рис. 20. Осциллограмма формы тока ускоренного пучка на выходе из структуры: ICK — ток в центре коллектора, IDK — ток в диафрагме коллектора.

В.Е. Акимов, П.Д. Воблый, М.М. Карлинер,
Е.В. Козырев, И.Г. Макаров, Н.В. Матяш,
О.А. Нежевенко, А.А. Никифоров, Г.Н. Острейко,
Б.З. Персов, С.И. Рувинский, Г.В. Сердобинцев,
В.П. Яковлев

Ускоряющая система разрезного микротрона

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 20 ноября 1989 г.
Подписано в печать 28.XI. 1989 г. МН 12235
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,9 печ.л., 1,6 уч.-изд.л.
Тираж 170 экз. Бесплатно. Заказ № 162

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*

{ Ш. 663 83 год. Бидко, Сергей
{ инженер 25 кв. по { Остришко - Яков
{ { Суродкин
ул. Католик? Ш. 663.04.

Новый император "Сурокон"