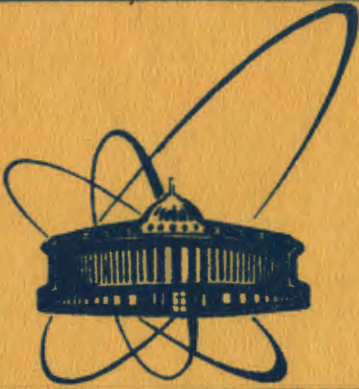


2804/84



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P9-84-169 e+

В.А.Аккуратов, А.А.Глазов, Е.Н.Заплатин,
В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков

РЕЖИМ FLAT-TOP -УСКОРЕНИЯ
НА ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

1984

Экспериментальные исследования эффекта расширения замкнутых орбит /1/ на электронной модели кольцевого циклотрона /2/ со всей очевидностью подтвердили существование указанного эффекта /3/, однако уменьшение доли частиц, "размазанных" между последней обычной и отщепленной орбитами, требует улучшения качества уско-ряемого пучка /4/. Использование оригинального высокочастотного инжектора совместно с диафрагмами, установленными на радиусе первого оборота, позволило уменьшить угловую /фазовую/ протяжен-ность ускоряемого пучка до $\sim 5^\circ$, что обеспечивает допустимый энер-гетический разброс при ускорении в максимуме набора энергии. Однако наличие фазового дрейфа в процессе ускорения, который не может быть устранен имеющимся набором корректирующих катушек, по-прежнему приводило к недопустимому энергетическому разбро-су /5/.

В сложившейся ситуации единственной реальной возможностью получения ускоренного пучка с допустимым энергетическим разбросом $\sim 10^{-3}$ / является осуществление на электронной модели режима flat-top-ускорения /6/. В связи с наличием запаса мощности у ос-новного ускоряющего ВЧ генератора было решено использовать на-бор из первой и второй гармоник ускоряющего напряжения, обеспе-чивающий максимальную угловую протяженность зоны "постоянного" набора энергии. Подобный выбор диктуется соображениями ра-диотехники, так как ввиду конструктивных особенностей модели ускорение в ней может осуществляться только с помощью дуантов, протяженность которых даже для первой гармоники соизмерима с ра-бочей длиной волны ускоряющего напряжения, что приводит к замет-ному радиальному распределению напряжения.

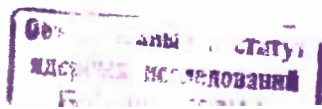
В случае использования первой и второй гармоник ускоряющего напряжения при оптимальных фазовых соотношениях набор энергии за оборот равняется

$$\Delta W / \Delta W_{01} = \cos\phi - \frac{1}{a} \cos 2\phi, \quad /1/$$

где ΔW_0 определяется амплитудой ускоряющего напряжения U_0 и фа-зовой протяженностью дуанта θ :

$$\Delta W_{0i} = 2U_{0i} \sin\theta_i / 2, \quad /2/$$

a - отношение наборов: $a = \Delta W_{01} / \Delta W_{02}$. Выражение /1/ имеет экстремумы при $\phi_1 = 0$ и $\phi_2 = \pm a/4$ /последние только при $a < 4$ /.



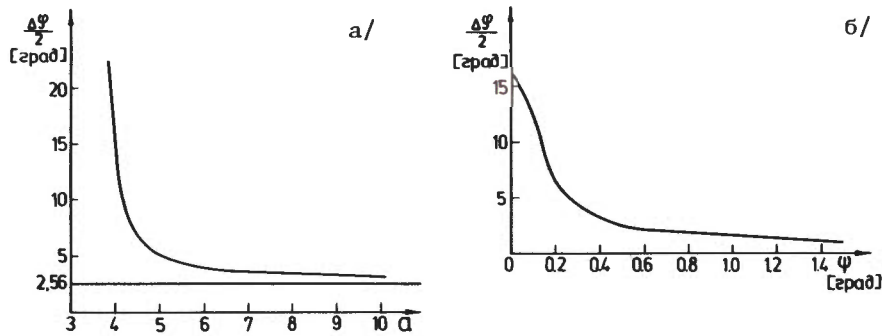


Рис.1. Зависимости допустимого рабочего фазового диапазона напряжения дуанта 2-й гармоники от отношения наборов энергий /а/ и фазового сдвига относительно основного ускоряющего напряжения /б/.

Относительный энергетический разброс между максимумом и минимумом двугорбой кривой

$$\delta = 2 \left[\left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right) \phi_2 - \left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right) \phi_1 \right] / \left[\left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right) \phi_2 + \left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right) \phi_1 \right] \quad /3/$$

или, при подставлении значений ΔW и ΔW_{01} ,

$$\delta = 2 \left(\frac{a}{8} + \frac{2}{a} - 1 \right) / \left(\frac{a}{8} + 1 \right). \quad /4/$$

Максимальное рабочее значение фаз равно ϕ_m , ($U(\phi_m) = U(\phi_1)$). Подставляя ΔW , ΔW_{01} и ϕ в /1/, найдем

$$\cos \phi_m = a/2 - 1, \quad /5/$$

а из /4/

$$a = \frac{4}{2 - \delta} (2 + \delta - \sqrt{6\delta + \delta^2}). \quad /6/$$

Для одnogорбой кривой

$$\cos \phi_m = \frac{a}{4} - \sqrt{\left(\frac{a}{4} \right)^2 - \frac{\frac{a}{2}(2 - \delta) - 2}{2 - \delta}} \approx (1 + \Delta) - \sqrt{\Delta^2 + (1,5 + 2\Delta)\delta}, \quad /7/$$

где $\Delta = (a/4) - 1 \ll 1$.

Зависимость $\phi_m = \phi_m(a)$ представлена на рис.1а.

Наличие малого паразитного фазового сдвига трансформирует /1/ в

$$\Delta W / \Delta W_{01} = \cos \phi - \frac{1}{a} \cos(2\phi + 2\psi) \approx \cos \phi - \frac{1}{2} \cos 2\phi + \frac{2\psi}{a} \sin 2\phi, \quad /8/$$

то есть имеется симметричная часть и асимметричная, приводящая к перекосу плато, и тогда

$$\delta = [\Delta W_{\text{прав.}}(\phi > 0) - \Delta W_{\text{лев.}}(\phi < 0)] / 0,75. \quad /9/$$

Зависимость $\phi = \phi(\psi)$ при $a = 4$ представлена на рис.1б. Видно, что допуск на фазовый сдвиг весьма жесткий, $\approx 0,1^\circ$.

Как уже отмечалось, благодаря высокой рабочей частоте $f_{\text{обр.}} = f_1 = 39,6$ МГц, вдоль радиуса имеется заметное падение ускоряющего напряжения, причем на второй гармонике оно должно быть значительно большим, чем на первой. В этом случае путем варьирования угловой протяженности дуанта второй гармоники можно поддерживать оптимальные значения наборов энергии на дуантах первой и второй гармоник: $a \approx 4$.

Выбор профиля дуанта осуществляется следующим образом. Основной дуант имеет угловую протяженность 45° ; предположим, что дуант второй гармоники на максимальном радиусе $r_{\text{max}} = 105$ см имеет такую же угловую протяженность.

В этом случае

$$\Delta W_1(r) = 2U_1(r) \sin(45^\circ/2), \quad \Delta W_1(105) = 2U_1(105) \sin(45^\circ/2), \quad /10/$$

$$\Delta W_2(r) = 2U_2(r) \sin \theta, \quad \Delta W_2(105) = 2U_2(105) \sin(45^\circ/2),$$

где

$$U_1 = (U_1 / U_{01}) U_{01} = K_1 U_{01}, \quad U_2 = (U_2 / U_{02}) U_{02} = K_2 U_{02}, \quad /11/$$

U_{01} и U_{02} - напряжение первой и второй гармоник в центре при r_{min} .

Из /10/ при $a = 4$ следует

$$\frac{U_{01}}{U_{02}} = 4 \frac{\sin 45^\circ K_2(105)}{\sin 22,5^\circ K_1(105)}, \quad /12/$$

$$\sin \theta = \frac{U_{01}}{U_{02}} \frac{\sin 22,5^\circ K_1(r)}{4 K_2(r)}. \quad /13/$$

Распределение напряжения $K_1(r)$ для первой гармоники может быть определено экспериментально, а исходное для $K_2(r)$ - расчетным или экспериментальным путем на частоте второй гармоники для дуанта с угловым размером 45° .

Полученный профиль может быть использован затем для расчета нового распределения напряжения путем аппроксимации линии сложной формы набором однородных участков, которое, в свою очередь, может быть использовано для расчета профиля во втором приближении и т.д. Можно вырезать профиль дуанта по первому приближению, а для второго использовать экспериментально измеренное распределение напряжения.

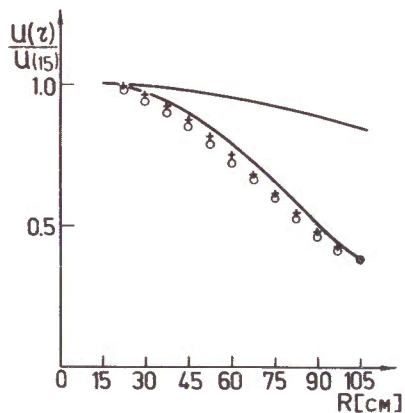
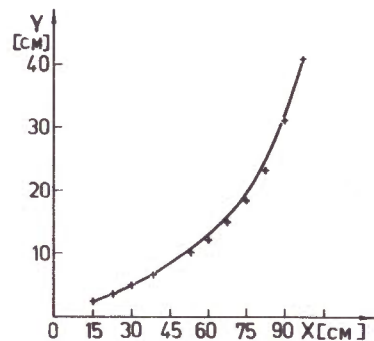


Рис.3. Форма рабочего дуанта второй гармоники /x - размер по оси дуанта/.

Рис.2. Экспериментально измеренные распределения напряжений на дуанте 1-й и 2-й гармоник.



Вертикальные размеры ускорительной камеры позволяют разместить в ней дуант второй гармоники с расстоянием до плакировки $h = 23$ мм. Увеличение этого размера целесообразно с точки зрения уменьшения мощности потерь и, следовательно, мощности генератора второй гармоники, однако серьезным препятствием для получения необходимого напряжения может стать резонансный высокочастотный разряд, условия для возникновения которого перестают удовлетворять только при $h \leq 10$ мм. Специально проведенный эксперимент на макете дуанта подтвердил справедливость таких опасений, поэтому в качестве рабочего варианта был принят дуант с зазором до плакировки, равным 8 мм.

Экспериментально измеренные распределения напряжения на дуанте 1-й гармоники и 45-градусном дуанте второй гармоники показаны на рис.2 /сплошные линии/. Распределения использованы для расчета формы дуанта в первом приближении /рис.3, крестики/ с помощью выражений /12/, /13/. Изготовлен дуант рассчитанного профиля с припуском ≈ 30 мм на каждую сторону. Результаты измерения распределения напряжения вдоль ускоряющей кромки дуанта представлены на рис.2/крестики/. Они использовались для расчета нового профиля /рис.3, сплошная линия/. Окончательное распределение напряжения представлено на рис.2/кружки/. Получившееся отношение $\Delta W_1/\Delta W_2$ для $U_{01}/U_{02} \approx 3,2$ лежит в пределах $3,850 \leq (\Delta W_1/\Delta W_2) \leq 4,018$, что соответствует $44,8 \geq \Delta\phi^\circ (a) \geq 30,3$.

Мощность потерь в дуанте и входное сопротивление со стороны резонансной линии рассчитывались путем разбиения дуанта на короткие отрезки, волновые сопротивления которых считались постоянными, и путем сшивания решений на границе. Рассчитанная подобным образом мощность потерь, без учета поперечных швов и по-

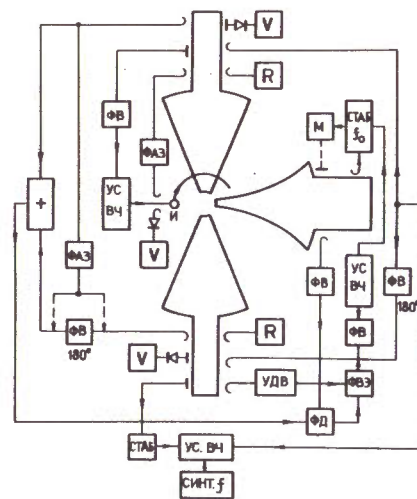
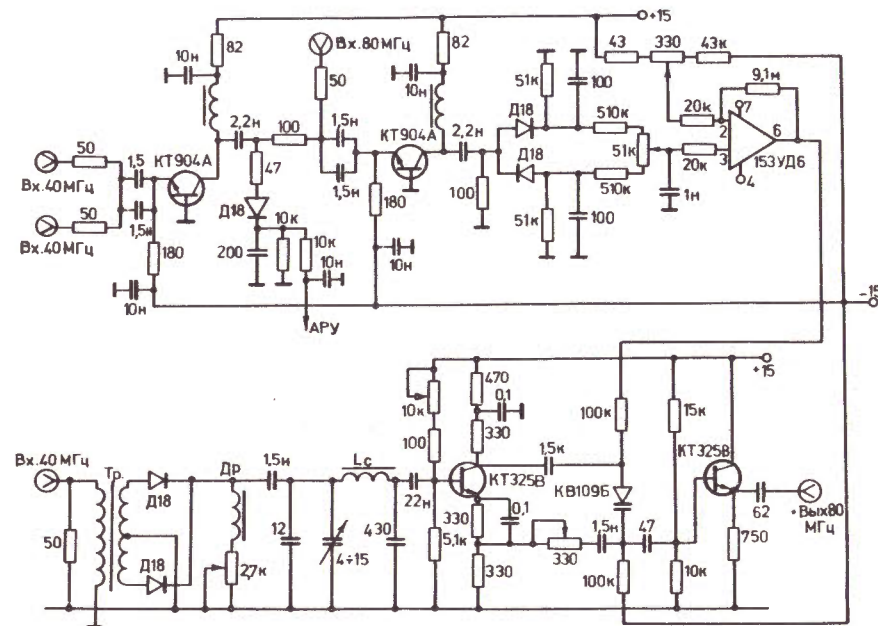


Рис.4. Блок-схема ВЧ питания электронной модели кольцевого циклотрона.

Рис.5. Схема задающего ВЧ генератора второй гармоники и система стабилизации фазы.



терь в закорачивающем устройстве, составила ≈ 80 Вт при амплитуде в центре, равной 1 кВ.

Для реализации режима ускорения flat-top разработан и изготовлен сложный комплекс аппаратуры в дополнение к существующему на электронной модели. Полная блок-схема высокочастотного питания электронной модели представлена на рис.4.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

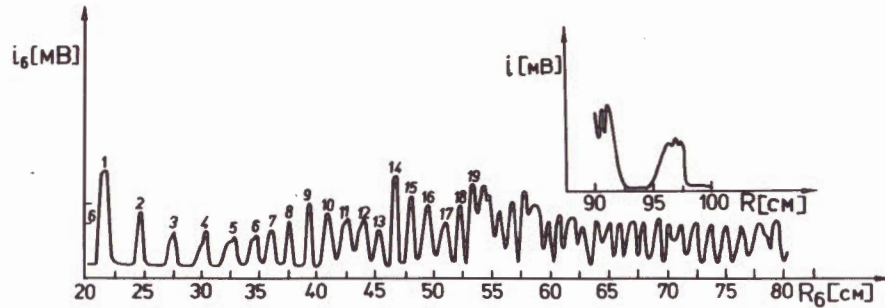


Рис.6. Зависимость тока ускоряемого пучка от радиуса ускорителя.

На рис.5 приведена схема задающего ВЧ генератора второй гармоники и системы стабилизации фазы. В качестве удвоителя частоты используется двухтактный выпрямитель, работающий на резонансный контур второй гармоники. В цепи возбуждения генератора установлен электронный фазовращатель, напряжение на который подается с фазового частотного детектора ^{17/}. Диапазон захвата стабилизатора фазы - $\pm 15^\circ$, коэффициент стабилизации ~ 10 .

Предварительные эксперименты, проведенные на электронной модели, показали, что разработанный комплекс flat-top-ускорения обеспечивает заметно лучший режим токопрохождения с разделением орбит практически до конечного радиуса и эффективное разделение их на радиусе вывода /рис.6/.

В дальнейшем для расширения возможностей системы при проведении экспериментальных исследований и повышения стабильности работы предполагается увеличить мощность ВЧ генератора второй гармоники и ввести дополнительные независимые системы контроля фазовых соотношений между напряжением 1-й и 2-й гармоник ускоряющего напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Р9-6733, Дубна, 1972.
2. Аносов В.Н. и др. АЭ, 1968, вып.6, с.539.
3. Василенко А.Т. и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, с.205.
4. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Д9-81-290, Дубна, 1981.
5. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, 9-82-188, Дубна, 1982.
6. Glazov A.A. et al. Fifth Int.Cycl.Conf., 1969, p.410.
7. Pedersen B.O. IRE Trans.on Instr., 1960, vol.1-9, No.3, p.349.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 марта 1984 года

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д2,4-83-179	Труды XU Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Лаборатория физики элементарных частиц
Института ядерных исследований
Москва, ул. Профсоюзная, д. 25
Тел. 302-3484