

5873

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 5873



В.Н.Аносов, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков,
Л.М.Онищенко

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗЫ
УСКОРЕННОГО ПУЧКА
В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

1971

Р9 - 5873

В.Н.Аносов, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков,
Л.М.Онищенко

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗЫ
УСКОРЕННОГО ПУЧКА
В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

Введение

Отсутствие в изохронном циклотроне фазовой устойчивости приводит к жестким допускам на отклонение ΔB - среднего магнитного поля от требуемого. Отличие периода обращения частицы на величину ΔT от периода высокочастотного ускоряющего напряжения T_0 приводит к появлению фазового сдвига за один оборот

$$\frac{d\phi}{d\nu} = 2\pi \frac{\Delta T}{T_0}. \quad (1)$$

Знак в (1) выбран так, что положительный фазовый сдвиг, который получается, если период обращения частицы больше периода ускоряющего напряжения, означает отставание фазы. Период обращения ускоряемой частицы T в магнитном поле B можно представить уравнением

$$T = \frac{2\pi r}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{E_0}{eBcr}\right)^2}, \quad (2)$$

где e и E_0 - заряд и энергия покоя электрона, c - скорость света, B - индукция магнитного поля и r - радиус. Если магнитное поле B на радиусе r отличается от изохронного на ΔB , то из (2) следует

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{\gamma^3} \frac{\Delta B}{B_0}. \quad (3)$$

Здесь $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, B_0 - индукция магнитного поля в центре ускорителя.

Подставляя (3) в (1), а также учитывая связь между приращением энергии и радиуса, которая для изохронного циклотрона имеет вид:

$$\frac{dr}{dv} = \frac{r e V_0 \cos \phi}{E_0 \gamma^3 (r/r_\infty)^2}, \quad (4)$$

где $r_\infty = \frac{c}{\omega_0}$, ω_0 и V_0 - частота и амплитуда ускоряющего напряжения, получим

$$\left(\frac{d\phi}{dr}\right)_B = -2\pi \frac{E_0}{eV_0 \cos \phi} \frac{\Delta B(r)}{B_0} \frac{r}{r_\infty^2} \quad (5)$$

или

$$\left(\frac{d\phi}{dr}\right)_B = -2\pi \Delta B(r) \omega_0 \frac{r}{V_0 \cos \phi}. \quad (6)$$

Если отличие магнитного поля ΔB не зависит от радиуса, (5) может быть проинтегрировано

$$\sin(\phi - 45^\circ) - \sin(\phi - 45^\circ) = -2\pi \frac{E_0}{\sqrt{2} eV_0} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma_n^2} - \frac{1}{\gamma_k^2}\right) \cdot \frac{\Delta B}{B_0}. \quad (7)$$

Следует отметить, что дуант электронной модели имеет азимутальную протяженность 90° .

Аналогичным образом определим фазовый сдвиг, возникающий из-за отличия частоты ускоряющего напряжения от ω_0 . Эта зависимость имеет следующий вид:

$$\left(\frac{d\phi}{dr}\right)_\omega = 2\pi \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{E_0}{eV_0 \cos \phi} \frac{r}{r_\infty^2 [1 - (r/r_\infty)^2]^{3/2}} \quad (8)$$

или

$$\left(\frac{d\phi}{dr}\right)_\omega = 2\pi \frac{E_0}{eV_0 \cos \phi} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{r}{r_\infty^2} \gamma^3 = 2\pi \Delta\omega B_0 \frac{r}{V_0 \cos \phi} \gamma^3. \quad (9)$$

Так как $\Delta\omega$ не зависит от радиуса, уравнение (9) может быть проинтегрировано

$$\sin(\phi - 45^\circ) - \sin(\phi_0 - 45^\circ) = 2\pi \frac{E_0}{\sqrt{2} e V_0} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} (\gamma_K - \gamma_H). \quad (10)$$

Соотношения (7) и (10) позволяют определить допуск на отличие магнитного поля от изохронного, который для электронной модели ($eV_0 = 1$ кэВ, $\phi_0 = 45^\circ$, допустимый сдвиг $\Delta\phi = \pm 30^\circ$) оказывается равным $\frac{\Delta B}{B} = \pm 6 \cdot 10^{-4}$ и допуск на отличие частоты от ω_0 , который при тех же условиях не должен быть больше $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \approx \pm 2,25 \cdot 10^{-4}$.

Так как реальное магнитное поле отличается от изохронного, то представляет несомненный интерес экспериментально определить зависимость фазового положения ускоренного пучка от радиуса, чтобы составить более ясное представление о динамике пучка в ускорителе и иметь возможность при соответствующей корректировке магнитного поля уменьшить фазовый дрейф пучка. Задача изучения поведения фазы пучка /1,2/ в изохронном циклотроне и ее корректировки /3/ привлекает все большее внимание, а в дальнейшем, при сооружении моноэнергетических циклотронов /4/, ее решение станет решающим фактором для получения требуемой моноэнергетичности пучков.

Аппаратура

Для измерений фазы пучка в экспериментах использовалась специальная экранированная мишень (рис. 1), установленная на подвижный пробник, что позволяло наблюдать за поведением фазы пучка с любым заданным интервалом по радиусу. Блок-схема измерений приведена на рис. 2. При последовательном подключении мишени можно одновременно следить за средним током пучка, знать абсолютное значение фазы и наблюдать за формой импульса ускоренного пучка на стробоскопическом осциллографе. Согласованным кабелем сигнал от мишени с частотой $\approx 39,5$ Мгц подается на вход резонансного усилителя, настроенного на вторую гармонику этой частоты. Принципиальная схема усилителя показана на рис. 3а. Усиление по второй гармонике составляет 30 дБ, а ослабление по первой гармонике - 20 дБ. Сигнал с выхода усилителя второй гармоники поступает на вход

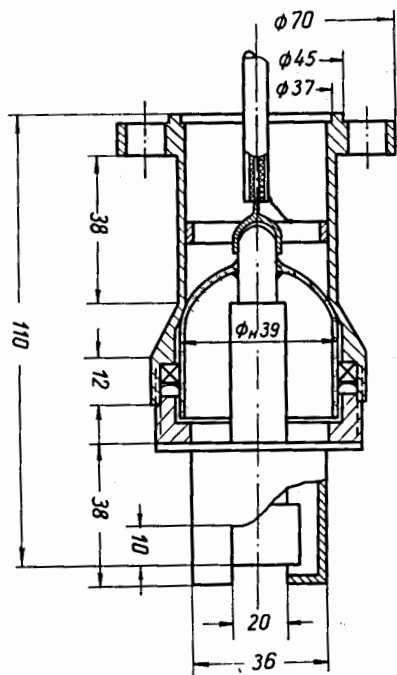


Рис. 1. Конструкция экранированной фазовой мишени.

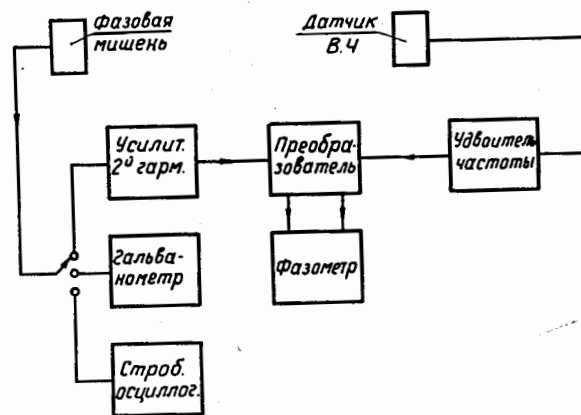


Рис. 2. Блок-схема фазовых измерений.

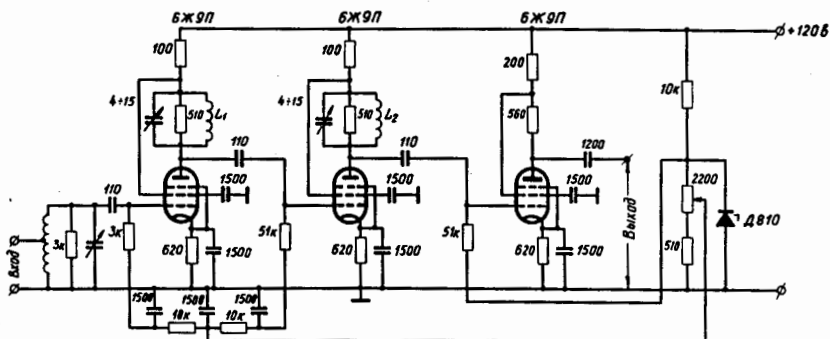


Рис. 3а. Принципиальная схема усилителя второй гармоники.

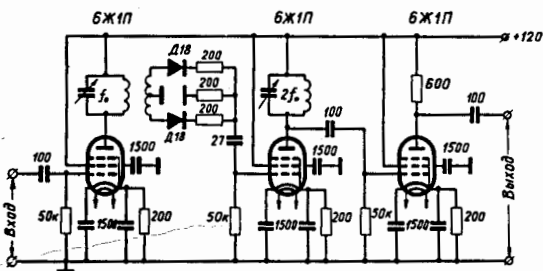


Рис. 3б. Принципиальная схема удвоителя частоты.

"1" фазометра. Для создания опорного сигнала используется напряжение с датчика, имеющего емкостную связь с дуантом. Частота опорного сигнала удваивается резонансным удвоителем частоты, принципиальная схема которого приведена на рис. 3б.

Фазометр состоит из двух самостоятельных блоков собственно фазометра и преобразователя частоты. Преобразователь частоты, принципиальная схема которого показана на рис.4, включает в себя гетеродин и два идентичных канала, каждый из которых состоит из смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ), настроенного на частоту ≈ 80 кГц. Важное значение имеет фазовая характеристика УПЧ, т.е. зависимость фазы сигнала на выходе УПЧ от его частоты. Промежуточная частота (при отсутствии схемы автоподстройки частоты гетеродина) зависит от стабильности частоты ВЧ-генератора и гетеродина и при существующей стабильности этих генераторов $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ может изменяться примерно на ± 2 кГц. Для улучшения этой характеристики фильтры в УПЧ выполнены в виде системы связанных контуров и настроены так, что максимальное изменение фазы в тракте УПЧ при изменении частоты в указанных пределах не превышает 2° .

Собственно фазометр выполнен по схеме /5/, показанной на рис. 5. Каждый канал состоит из трех усилителей-формирователей, в которых синусоидальный сигнал преобразуется в прямоугольную волну, дифференцирующей цепи, общего для обоих каналов коммутатора сигналов и триггера. Импульс на выходе одного триггера имеет длительность, пропорциональную $T - \tau$, а на выходе второго $T + \tau$, где T - период, а τ - временной сдвиг между исследуемыми сигналами. Между анодами триггеров включен микроамперметр, ток которого пропорционален измеряемому сдвигу. Фазометр имеет шкалы: ± 180 , ± 100 , ± 50 , и $\pm 25^\circ$, чувствительность фазометра на шкале $\pm 25^\circ$ составляет $1,25^\circ$.

Калибровка

Описанная аппаратура позволяет проследить за изменением фазы пучка в процессе его ускорения с точностью не хуже 2° . Однако важно знать не только относительный сдвиг фазы от радиуса к радиусу, но

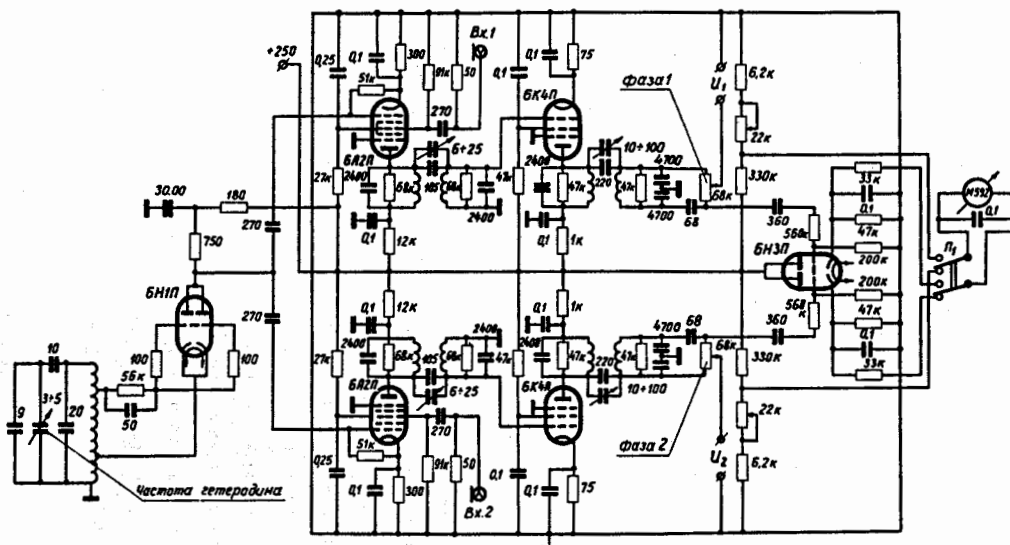


Рис. 4. Принципиальная схема преобразователя частоты.

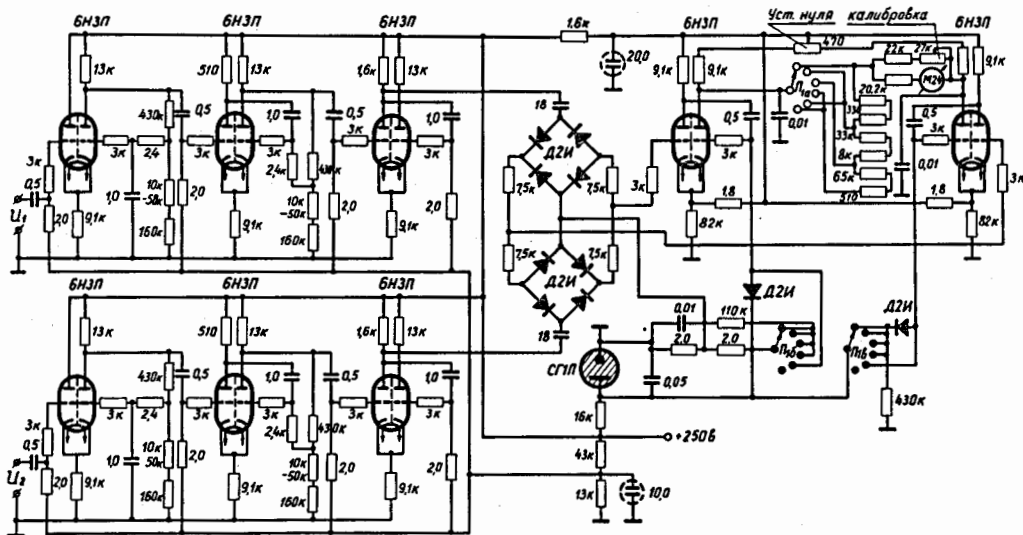


Рис. 5. Принципиальная схема фазометра.

и абсолютное положение центра сгустка относительно волны ускоряющего напряжения. Для этого необходимо произвести привязку к абсолютной фазе хотя бы в одной точке (на одном из фиксируемых радиусов). Для калибровки абсолютной фазы широко используется метод, предложенный в работе /1/, но этот метод имеет ряд существенных недостатков. В проведенных исследованиях для калибровки (привязки) фазы было использовано то обстоятельство, что в электронной модели пучок на начальный радиус инжектируется в виде сформированных сгустков /6/, фазовое положение которых относительно волны ускоряющего напряжения может регулироваться в широких пределах. Фазовая мишень, размещенная на азимуте 240° (пробник №3) относительно азимута инжекции (рис. 6), устанавливалась по радиусу в районе первого оборота, где имеется разделение смежных орбит. Затем для нескольких значений радиуса, отличающихся на 2 мм, снимались зависимости тока пучка от начальной фазы. Полученные кривые приведены на рис. 7а, по оси абсцисс отложен фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем. В зависимости от начальной фазы ϕ и угловой протяженности дуанта θ частицы будут получать различный прирост энергии и, соответственно, радиуса. Если дуант имеет две ускоряющие кромки, то приращение радиуса на первой кромке равно $\Delta R \cos \phi$, а на второй $\Delta R \cos(\phi + \theta)$, где ΔR — максимальное приращение на одной кромке. На азимуте размещения мишени ϵ , который отсчитывается от второй (по ходу пучка) ускоряющей кромки, приращение радиуса с точностью до членов второго порядка по $\frac{\Delta r}{R_n}$, R_n — радиус инжекции, равно

$$\frac{\Delta r}{\Delta R} = (1 - \cos \theta + \sin \epsilon \sin \theta) \cos \phi + \sin \theta (1 - \cos \epsilon) \sin \phi. \quad (11)$$

Это выражение имеет максимум при

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\sin \theta (1 - \cos \epsilon)}{1 - \cos \theta + \sin \epsilon \sin \theta}. \quad (12)$$

Для электронной модели $\theta = 90^\circ$, а $\epsilon = 15^\circ$, при этом выражение (11) достигает максимума при $\phi = 1,5^\circ$, поэтому можно считать, что максимальный заброс пучка на азимуте фазовой мишени будет иметь место, когда частицы проходят первую ускоряющую щель дуанта при максимальном напряжении.

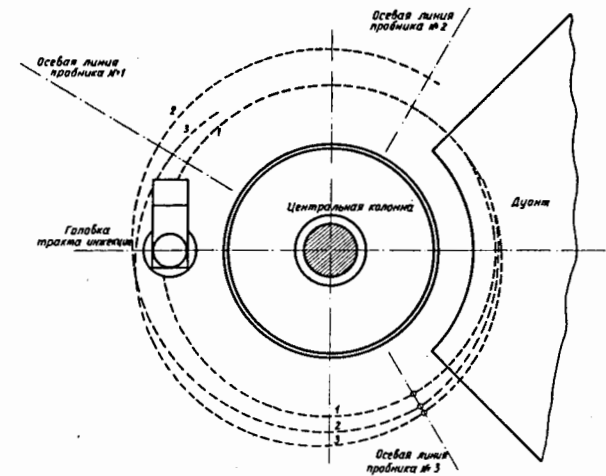


Рис. 6. План расположения головки инжектора, дуанта и измерительных пробников.

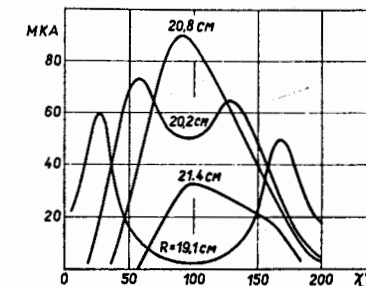


Рис. 7а. Зависимость тока пучка на фиксированном радиусе от начального сдвига фазы χ_0 .

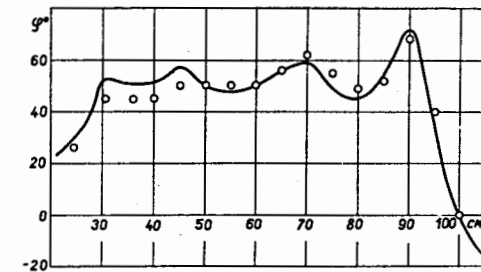


Рис. 7б. Зависимость фазы пучка от радиуса.

Меньшие значения радиуса достигаются, как видно из (11), при двух значениях ϕ , что экспериментально подтверждается кривыми рис. 7а. Таким образом, определяя максимальный радиус первого оборота в зависимости от сдвига, вносимого фазовращателем и измеряя при этом разность фаз между сигналом с мишени и датчика ускоряющего напряжения, осуществили привязку абсолютного значения фазы. Оценки показывают, что точность абсолютной привязки фазы описанным способом не хуже $\pm 4^{\circ}$.

Эксперимент

Поведение фазы пучка при его ускорении от радиуса инжекции до конечного для одного из вариантов магнитного поля электронной модели приведено на рис. 7б. Как видно из рис. 7б, фазовый дрейф в процессе ускорения до $r = 90$ см находится в допустимых пределах, что не должно приводить к потерям частиц, связанным с фазовым движением. Это находится в соответствии с токовыми характеристиками по радиусу. В дальнейшем фазовая характеристика (рис. 7б) принималась за исходную при исправлении фазового дрейфа в зоне радиусов 90–100 см обмотками тонкой коррекции.

Для большей достоверности полученных результатов фазовая характеристика измерялась стробоскопическим осциллографом *OSA-601*, эквивалентная полоса которого составляет 1 Гц при чувствительности тракта вертикального отклонения 50 мВ/см на входном сопротивлении 50 ом. Отсюда следует, что для корректных измерений амплитуда импульса тока должна быть не менее 1 ма. Поскольку в проведенных исследованиях амплитуда импульса тока изменялась от 2 до 6 ма, это позволило провести измерения с хорошей точностью.

На рис. 8 показаны осциллограммы импульса тока, сфотографированные с экрана осциллографа *OSA-601*. Длительность развертки на приведенных осциллограммах составляет 1 нсек/см. Изменение фазы по радиусу определялось по смещению импульса тока (определенной ее части) на экране осциллографа относительно реперной точки. Обработанные результаты измерений нанесены точками на фазовую характеристику, изме-

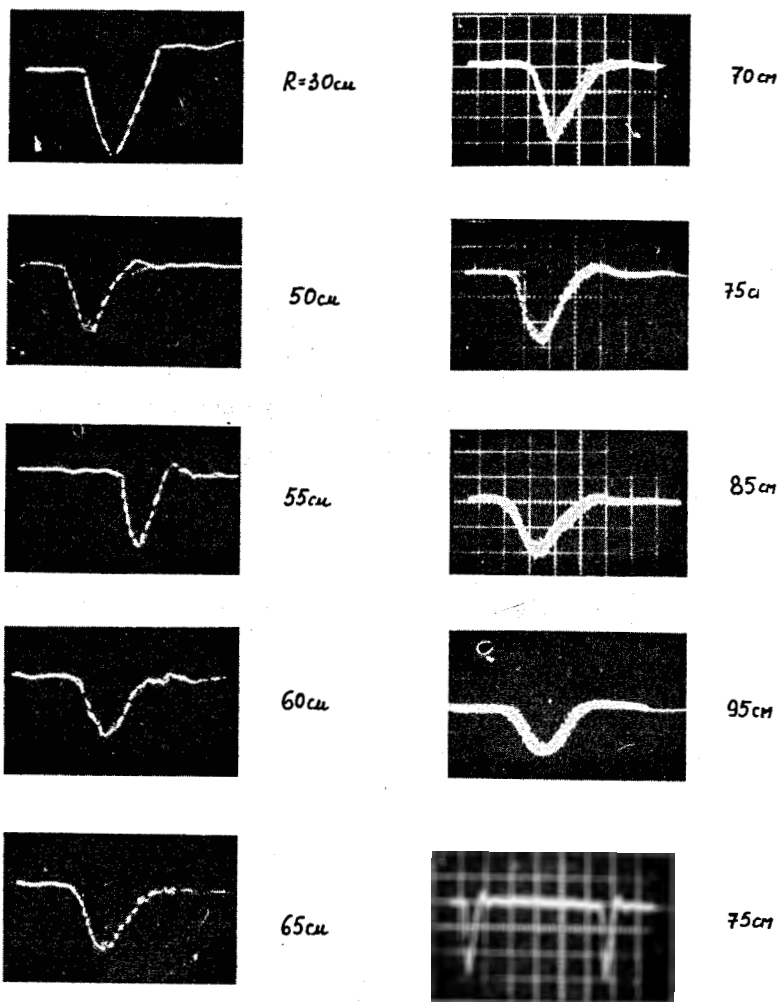


Рис. 8. Осциллограммы импульса тока. Развертка 1 нсек/см, чувствительность 1 ма/см.

ренную фазометром (рис. 7б). Как видно из рисунка, имеется хорошее совпадение результатов, полученных независимыми способами измерений. Осциллографические измерения имеют меньшую точность, что определяется некоторым изменением формы импульса с радиусом, нелинейностью развертки, а также неустойчивой синхронизацией.

Как было показано выше (7), допуск на отклонение магнитного поля от изохронного не должен быть больше $6 \cdot 10^{-4}$, при этом допускается смещение фазы в пределах $\pm 30^\circ$. Действительно, такой дрейф фазы не будет катастрофическим, т.к. при использовании 90° дуанта пучок будет ускоряться, если фаза лежит в пределах $-45^\circ + 135^\circ$. Представляло определенный интерес провести экспериментальную проверку смещение фазы пучка при расстройке магнитного поля. С этой целью среднее магнитное поле ускорителя изменялось при помощи сильноточной концентрической обмотки, расположенной в зоне конечных радиусов. Изменение магнитного поля по радиусу в зависимости от тока в этой обмотке известно экспериментально с хорошей точностью. Изменение фазы пучка по радиусу от величины расстройки магнитного поля показано на рис. 9а. На рис. 9б приведены зависимости фазы и тока пучка на радиусах 45, 75 и 100 см от вносимой расстройки в изохронное магнитное поле. Из графиков рис. 9 следует, что максимально допустимый фазовый дрейф к $r = 100$ см не должен превышать 45° . Теоретическая оценка фазового дрейфа по формуле (7) дает значение $42^\circ 30'$, что всего на $2^\circ 30'$ отличается от экспериментального результата.

Следует обратить внимание на то, что фазовый дрейф при одной и той же расстройке магнитного поля будет существенно зависеть от начальной фазы ϕ_0 . С этой точки зрения оптимальной фазой является фаза 45° , обеспечивающая минимальный дрейф при существующих ошибках в магнитном поле.

Такой же интерес представляет изучение поведения фазы при вносимой расстройке в частоту ускоряющего напряжения. На рис. 10а показаны зависимости фазы по радиусу при внесенной расстройке в частоту ускоряющего напряжения, а на рис. 10б - зависимость фазы и тока на $r = 75$ см от частоты ускоряющего напряжения. Результаты этого эксперимента находятся в хорошем согласии с оценкой, даваемой формулой (10).

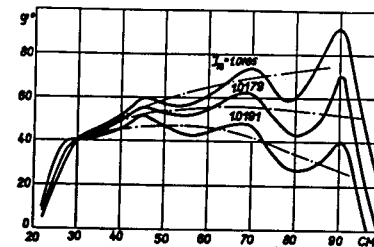


Рис. 9а. Зависимость фазы пучка от радиуса при расстройке изохронного магнитного поля.

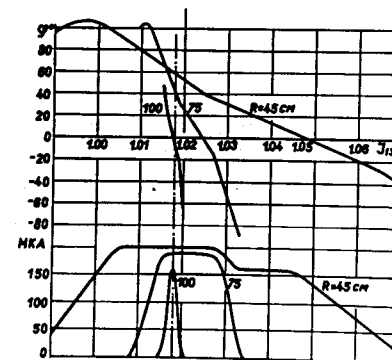


Рис. 9б. Зависимость тока пучка и его фазы от расстройки магнитного поля на радиусах $r = 45, 75, 100$ см.

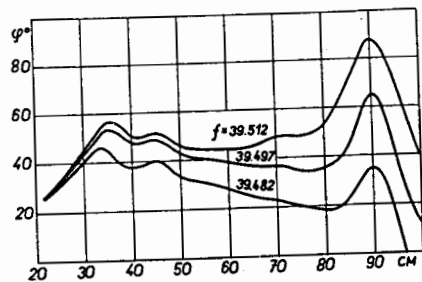


Рис. 10а. Зависимость фазы пучка от радиуса при расстройке частоты ускоряющего напряжения.

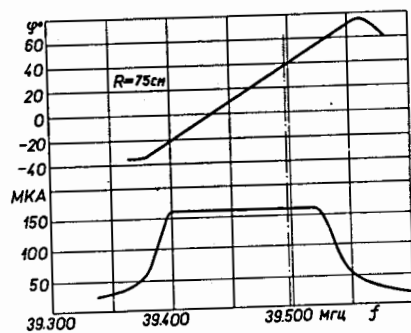


Рис. 10б. Зависимость тока пучка и его фазы от частоты ускоряющего напряжения на радиусе $r = 75$ см.

Важной характеристикой пучка является протяженность ускоряемого сгустка частиц по азимуту или фазовая протяженность пучка $\Delta\phi$. Простейший способ измерения этого параметра заключается в исследовании формы сигнала, создаваемого падающим на мишень пучком, при помощи стробосциллографа. Впервые зависимости фазовой протяженности пучка от радиуса $\Delta\phi = f(r)$ для электронной модели были приведены в работе /7/. В зависимости от режима ускорения длительность импульса на полувисоте составляет $1,5 + 2,0$ нсек и остается практически постоянной в процессе ускорения с точностью $\pm 0,25$ нсек, что соответствует азимутальной протяженности сгустка частиц $(20 + 30^\circ) \pm 3,6^\circ$.

Как было отмечено выше, фазовая характеристика (рис. 76) принималась за исходную при корректировке магнитного поля ускорителя элементами тонкой коррекции. Корректирующие токи в обмотках тонкой коррекции рассчитывались на ЭВМ методом наименьших квадратов (МНК) по специальной программе. После проведенной серии экспериментов фазовая кривая (рис. 76) была приведена к кривой, показанной на рис. 11. Из рис. 11 видно, что полный фазовый дрейф пучка от радиуса 35 см до радиуса 105 см не превышает 12° , в то время как из экспериментов следует, что дрейф фазы, который не приводит к потерям интенсивности, составляет 45° . Увеличивая число элементов коррекции, по-видимому, можно свести полный фазовый дрейф в электронной модели к 5° .

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В.П. Дмитриевскому, А.А. Глазову и В.В. Кольге за полезные обсуждения результатов работы, А.П. Агудину, В.А. Аккуратову и А.Г. Комиссарову за помощь в проведении эксперимента.

Л и т е р а т у р а

1. А.А. Garren, L. Smith. CERN 63-19, p.18, 1963.
2. Н.Р. Sküssi et al., Nucl.Instr., 89, 87, 1970.
3. А.М. Гришин. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, стр. 32, ВИНТИ, Москва, 1970 г.
4. А.А. Глазов и др. ОИЯИ Р9-3932, Дубна, 1968.
5. И.М. Вишенчук. Вопросы электронной измерительной техники. №2, стр. 5, Львов, 1961.

6. А.А. Глазов и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц т. 1, стр. 433, ВИНТИ, Москва, 1970 г.

7. А.А. Глазов и др. ОИЯИ 9-5206, Дубна, 1970 г.

Рукопись поступила в издательский отдел

17 июня 1971 года.

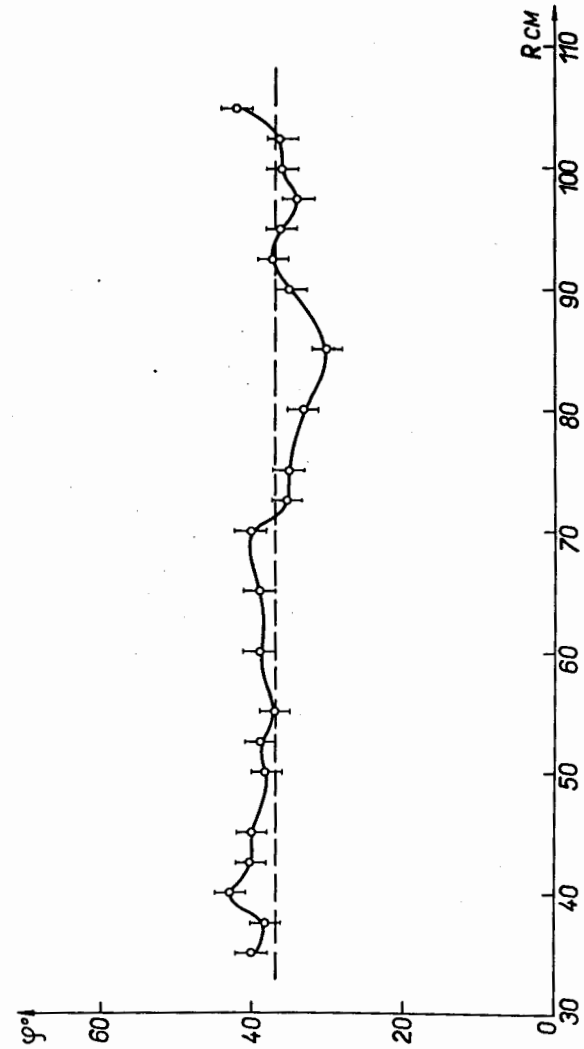


Рис. 11. Зависимость фазы пучка от радиуса.