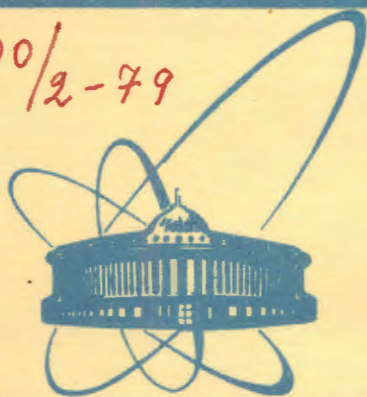


5500/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

М-30

29/12-79
P9 - 12621

Б.Н.Марченко, Т.Н.Томилина, В.А.Яковлев

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАСТЯЖКИ ПРОТОННОГО ПУЧКА
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ
ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ
И МАНИПУЛЯЦИИ ВЧ ГЕНЕРАТОРА С-ЭЛЕКТРОДА

1979

Р9 - 12621

Б.Н.Марченко, Т.Н.Томилина, В.А.Яковлев

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАСТЯЖКИ ПРОТОННОГО ПУЧКА
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МэВ
ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ
И МАНИПУЛЯЦИИ ВЧ ГЕНЕРАТОРА С-ЭЛЕКТРОДА

Областной научно-исследовательский
центр ядерной физики
БИБЛИОТЕКА

Марченко Б.Н., Томила Т.Н., Яковлев В.А. P9 - 12621

Повышение стабильности и эффективности растяжки протонного пучка синхроциклотрона на 680 МэВ при помощи фазовой синхронизации и манипуляции в.ч. генератора С-электрода

Рассматриваются способы амплитудной манипуляции и синхронизации частоты генератора С-электрода с частотой в.ч. генератора, питающего дуант, благодаря которым повышается стабильность и эффективность растяжки. Интенсивность растянутого пучка увеличивается в полтора раза и приближается к 60% интенсивности нерастянутого протонного пучка синхроциклотрона на 680 МэВ ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Marchenko B.N., Tomilina T.N., Yakovlev V.A. P9 - 12621

Increasing of Stability and Efficiency of a 680 MeV Synchrocyclotron Proton Beam Stretching by means of Phase Synchronization and C-Electrode r.f. Generator Manipulation

Some ways of amplitude manipulation and synchronization of C-electrode r.f. generator, which increase the stability and efficiency of stretching are considered. The intensity of stretched beam increases 1.5 times and is near to 60 percent intensity of nonstretched 680 MeV proton beam of the JINR 680 MeV synchrocyclotron.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Как известно¹⁻⁴ в системе растяжки протонного пучка синхроциклотрона на 680 МэВ при помощи С-электрода для его питания используется генератор с независимым возбуждением, частота которого не синхронизована по фазе с частотой генератора, питающего дуант.

Генератор С-электрода работает по следующей программе: рабочий ход, в течение которого частота изменяется от 14,4 МГц до 14,1 МГц за интервал времени, равный $0,95 T_{\text{мод}}$, и обратный ход, где интервал времени, равный $0,05 T_{\text{мод}}$, происходит нарастание частоты от 14,1 МГц до 14,4 МГц.

Отсутствие фазовой синхронизации и наличие на С-электроде в.ч. напряжения с нарастающим законом изменения частоты приводит к ухудшению стабильности, понижению эффективности растяжки и уменьшению средней интенсивности растянутого пучка протонов.

Для устранения этих недостатков целесообразно ввести в систему управления генератором С-электрода дополнительные устройства, позволяющие осуществить:

а/ фазировку генератора С-электрода в.ч. сигналом с дуанта;

б/ плавную /а не ступенчатую, как в настоящее время/ регулировку закона изменения частоты на С-электроде;

в/ запираание генератора С-электрода на интервал времени с нарастающим законом изменения частоты /в конце каждого цикла растяжки пучка/;

г/ отключение в.ч. генератора дуанта и включение схемы управления С-электродом в.ч. сигналом с дуанта на частоте вывода.

Реализации этих задач посвящена данная работа:

а/ для фазировки генератора С-электрода используется в.ч. сигнал с дуанта, который через регулирующую линию задержки подается на вход генератора С-электрода. Величина задержки подбирается по максимальной величине интенсивности растянутого пучка;

б/ для осуществления плавного закона изменения частоты на С-электроде нелинейное пилообразное напряжение получается как сумма линейно изменяющегося напряжения и нелинейной добавки, создаваемой интегрированием ступенчатого изменяющегося напряжения. Форма нелинейной добавки подбирается по максимальной интенсивности, стабильности и оптимальной форме растянутого пучка;

в/ для запираания генератора С-электрода используется манипулятор, который не пропускает в.ч. сигнала задающего генератора на вход усилителя мощности во время обратного хода и фазировки. Длительность манипулирующего импульса регулируется;

г/ для отключения в.ч. генератора дуанта и включения схемы управления С-электродом формируется отключающий импульс на частоте 14,4 МГц из в.ч. сигнала с дуанта.

В работе описана блок-схема системы управления С-электродом, позволяющая осуществить синхронизацию в.ч. генератора С-электрода по фазе, плавную регулировку частоты и манипуляцию. Авторы стремились к максимальному использованию блоков наносекундной электроники ^{/5/}.

Специально разработанные блоки описаны в §§ 3-5. В § 6 приводятся результаты экспериментального опробования всего устройства на синхроциклотроне.

§ 1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И БЛОК-СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОЦИКЛОТРОНОМ В РЕЖИМЕ РАСТЯЖКИ ПУЧКА ПРИ ПОМОЩИ С-ЭЛЕКТРОДА

Функциональная схема системы, осуществляющая повышение стабильности и улучшение формы растянутого протонного пучка, изображена на рис. 1.

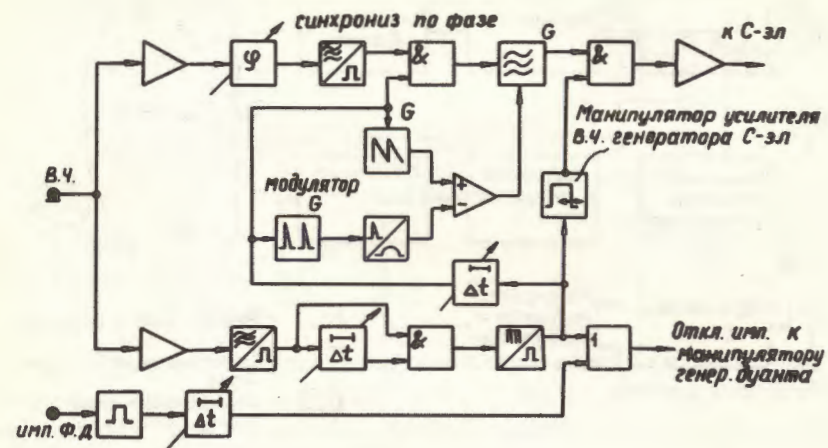


Рис. 1. Функциональная схема системы растяжки пучка, позволяющая повысить стабильность, улучшить форму и увеличить интенсивность растянутого пучка.

Функциональная схема, работающая в настоящее время, показана на рис. 2.

На рис. 3 сплошной линией изображена блок-схема действующих в настоящее время устройств управления синхроциклотроном, пунктирной линией показаны изменения и дополнения, позволяющие улучшить стабильность, интенсивность и форму растянутого протонного пучка.

В отличие от существующей схемы, где для запуска и отключения всех систем используется импульс фотодатчика, в рассматриваемой в данной работе схеме отключение в.ч. генератора дуанта, запуск модулятора С-электрода и блоков стандартной

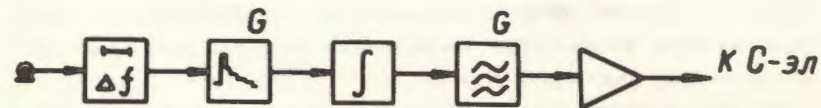


Рис. 2. Функциональная схема, постоянно действующая в настоящее время, при работе ускорителя в режиме растяжки протонного пучка.

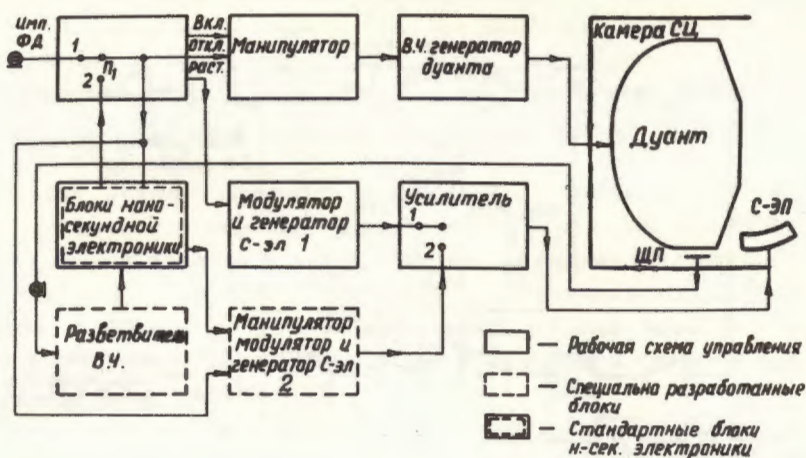


Рис.3. Блок-схема системы растяжки пучка при помощи С-электрода.

электроники производится импульсом, сформированным из в.ч. сигнала с дуанта, на частоте, близкой к частоте вывода частиц $f = 14,4 \text{ МГц}$. Схема формирования частотного импульса дает разброс не более $\pm 0,05 \text{ нс}$ и необходима для устранения нестабильности нижней границы частотного диапазона основной программы. Нестабильность в обычной схеме существует как из-за неточности изготовления лопаток ротора, так и вследствие недостаточной стабилизации оборотов ротора вариантов.

§ 2. СИНХРОНИЗАЦИЯ В.Ч. ГЕНЕРАТОРА С-ЭЛЕКТРОДА ПО ФАЗЕ

Как уже говорилось выше, в настоящее время дуант и С-электрод питаются от двух независимых в.ч. генераторов.

Для синхронной работы генератора С-электрода с генератором дуанта необходимо фазировать генератор С-электрода в.ч. сигналом, снятым с дуанта.

На рис. 4 представлена блок-схема синхронизации генератора С-электрода с в.ч. генератором дуанта. Практически синхронизация полностью осуществляется при помощи блоков наносекундной электроники.

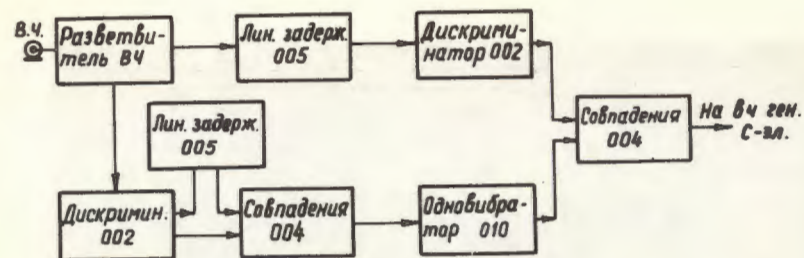


Рис.4. Блок-схема синхронизации генератора С-электрода с в.ч. генератором дуанта.

Для выделения из частотно-модулированного сигнала с диапазоном изменения частот $25,85 \div 13,95 \text{ МГц}$ гребенки импульсов на частоте $14,38 \pm 0,05 \text{ МГц}$ использовались блоки стандартной наносекундной электроники^{5/} 004-совпадения и 010-одновибратор. В качестве временной задержки для регулировки фазы в.ч. генератора С-электрода использовалась стандартная линия задержки 005.

§ 3. МОДУЛЯТОР ДЛЯ ПЛАВНОГО ПОДБОРА ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЗАДАЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА С-ЭЛЕКТРОДА

Для того, чтобы свести к минимуму потери пучка при перехвате С-электродом протонов, ускоряемых при помощи в.ч. напряжения на дуанте, необходимо, чтобы нижняя частота в.ч. диапазона в момент отключения дуанта совпадала с верхней частотой в.ч. диапазона в момент включения С-электрода. Необходимо также создать такой закон изменения частоты $f_c(t)$, чтобы на самой верхней частоте диапазона величина производной $\dot{f}_c(t)$ возможно меньше отличалась от $\dot{f}_d(t)$ производной на нижней частоте дуанта, и далее позволяла осуществить плавное изменение частоты вплоть до нижних частот диапазона С-электрода^{6/}/рис. 5/.

Таким образом, в результате разработки модулятора в.ч. генератора С-электрода необходимо было иметь устройство, позволяющее в нужном диапазоне частот плавно изменять

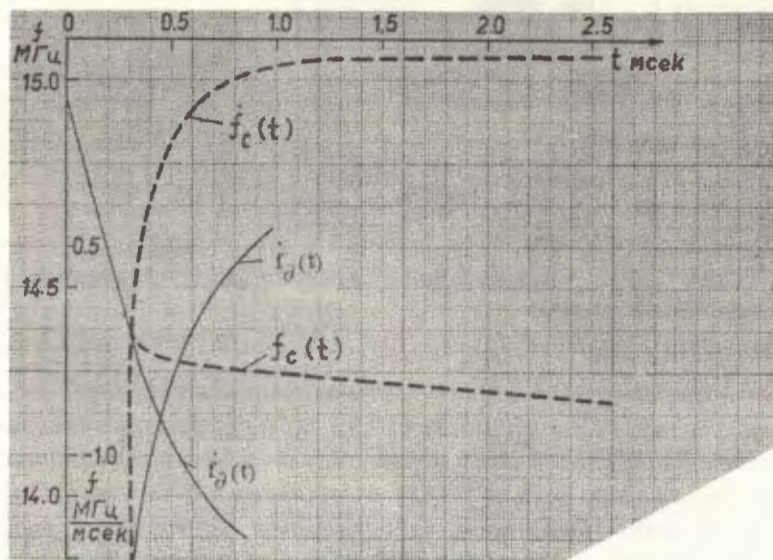


Рис.5. Изменение частоты $f_{\partial}(t)$ и производной $\dot{f}_{\partial}(t)$ на дуанте и расчетный закон $f_c(t)$ и $\dot{f}_c(t)$ на С-электроде для получения оптимального растянутого пучка.

зависимость $f_c(t)$ и производную $\dot{f}_c(t)$, а также смещать всю кривую $f_c(t)$, понижая или повышая одновременно верхнюю и нижнюю границы диапазона частот.

В нашей разработке эта задача была решена следующим образом: в независимых каналах формировались линейная пила и нелинейная добавка, которая в сумматоре вычиталась из линейной пилы. Амплитуда линейной пилы может меняться от 0 до 10 В. Амплитуда и форма нелинейной добавки также регулируются.

На рис. 6 приведены временные диаграммы напряжения линейной пилы, нелинейной добавки и разностного напряжения после сумматора, уровень постоянной составляющей которого может регулироваться от 0 до 10 В.

Принципиальная схема сумматора изображена на рис. 7.

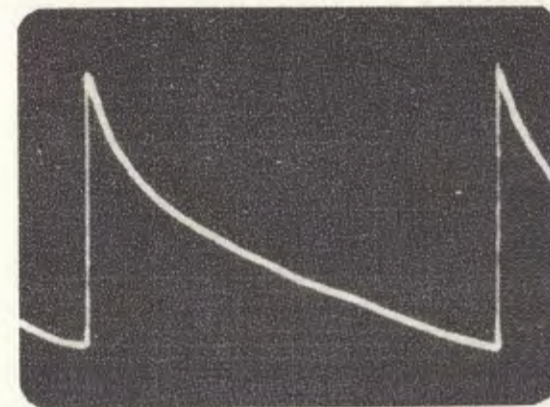
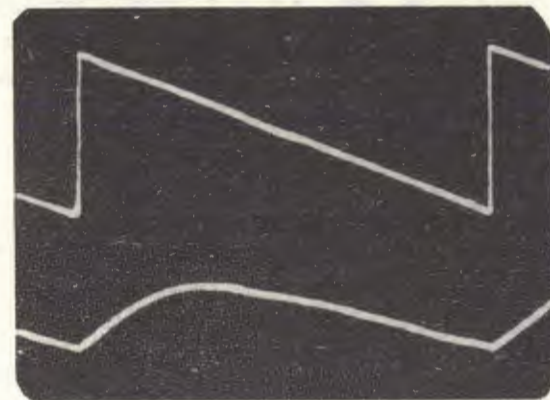


Рис.6. Временные диаграммы напряжений модулятора. 1 - линейная пила, 2 - нелинейная добавка, 3 - напряжение после сумматора.

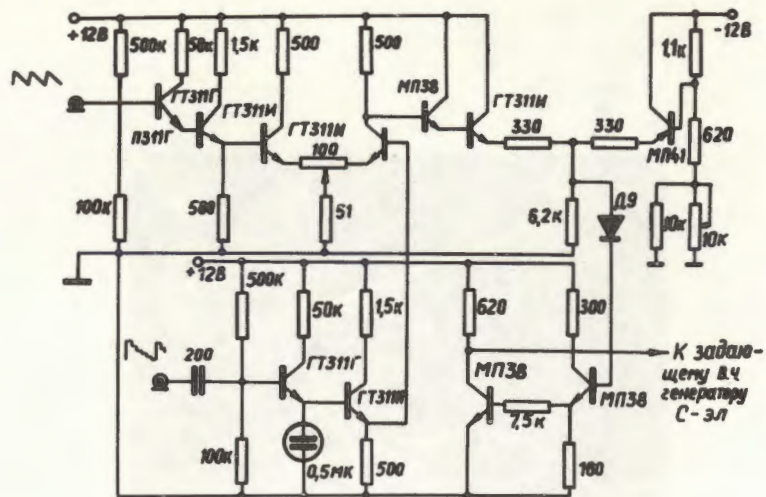
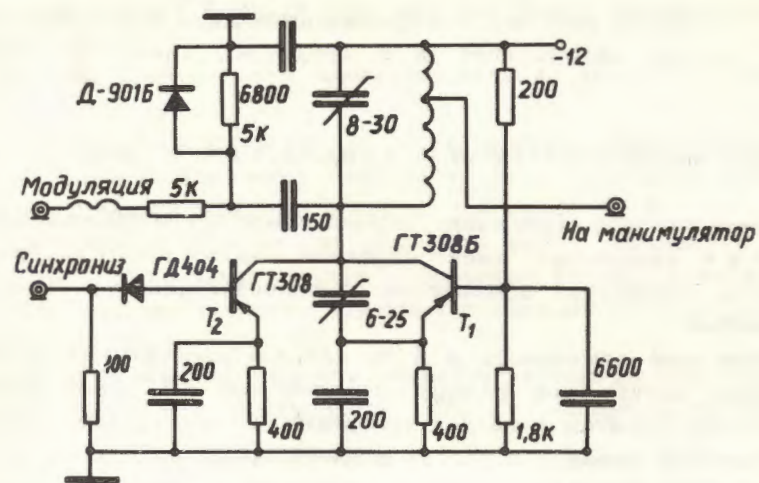


Рис.7. Принципиальная схема сумматора модулятора в.ч. генератора С-электрода.

§ 4. ЗАДАЮЩИЙ В.Ч. ГЕНЕРАТОР С - ЭЛЕКТРОДА

После того как были рассмотрены устройства, позволяющие фазировать задающий генератор и формировать закон изменения его частоты, рассмотрим схему самого генератора, управляемого этими устройствами.

Схема генератора С-электрода изображена на рис. 8. Он собран по схеме с общей базой на транзисторе T_1 /ГТ-308В/, изменение частоты осуществляется при помощи варикапа, на который подается сигнал с модулятора. Для подачи на генератор фазировочной пачки в.ч. импульсов используется транзистор T_2 /ГТ-308В/, включенный параллельно транзистору T_1 и работающий в режиме ключа. Ключевой режим T_2 позволяет производить фазировку генератора с помощью наносекундных сигналов, получаемых от стандартных блоков наносекундной логики. Ширина полосы захватывания на верхней частоте генератора С-электрода равна $+20 \text{ кГц} - 2 \text{ кГц}$ /рис. 9/.



Задающий генератор С-эл

Рис.8. Принципиальная схема задающего генератора С-электрода.

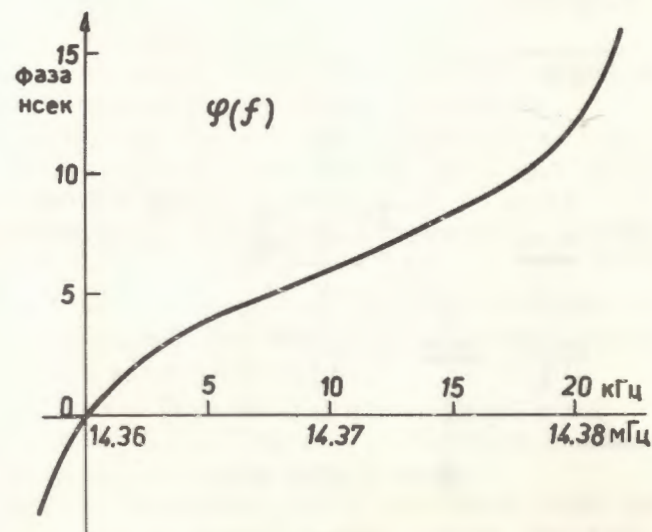


Рис.9. Фазо-частотная характеристика в области фазирования.

Генератор работает в непрерывном режиме, а манипуляция в.ч. сигнала осуществляется в предварительном усилителе.

§ 5. МАНИПУЛЯТОР В.Ч. ГЕНЕРАТОРА С-ЭЛЕКТРОДА

Пилообразное напряжение, используемое для модуляции частоты в.ч. генератора, имеет обратный ход, во время которого частота генератора изменяется от низкой границы диапазона к высокой.

Как уже отмечалось в § 3, для доускорения частиц без фазовых потерь при помощи С-электрода на стыке конца ускорения дуантом и начала ускорения С-электродом должно выполняться равенство частот и производных, поэтому наличие в диапазоне в.ч. генератора С-электрода участка с обратным законом изменения частоты и положительной производной $\dot{f}_c(t)$ приводит к частичной потере пучка и ухудшению его стабильности. Для устранения нерабочих частот из диапазона в.ч. генератора была использована схема, изображенная на рис. 10.

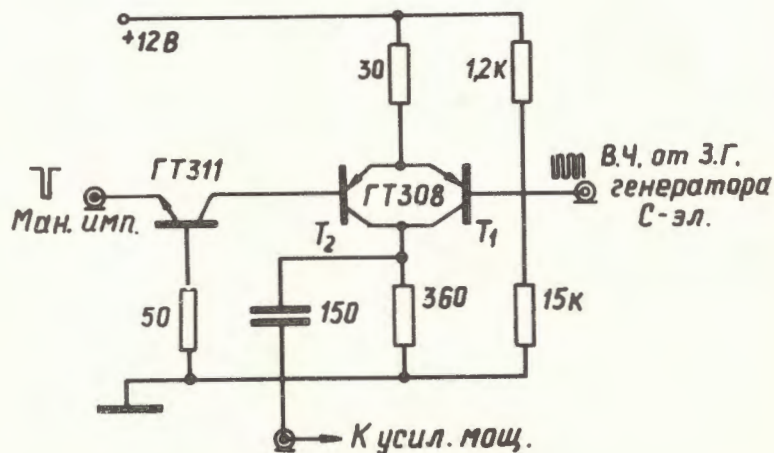


Рис.10. Принципиальная схема манипулирующего устройства.

Формирование манипулирующего импульса из в.ч. сигнала с дуанта осуществляется при помощи блока наносекундной логики 010.

На вход транзистора T_1 поступает сигнал с задающего генератора С-электрода.

Работа схемы основана на шунтировании транзистора T_1 транзистором T_2 в момент прихода на вход T_2 отрицательного манипулирующего импульса с амплитудой около 0,5 В.

Манипулятор вырезает из диапазона частот задающего генератора С-электрода участок с обратным законом изменения частоты, наличие которого ухудшает стабильность растянутого пучка.

Минимальная длительность манипулирующего импульса равна 200 мкс, что составляет $\approx 3\%$ от периода модуляции.

§ 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная проверка схемы и эффективности ее воздействия на параметры растянутого протонного пучка была проведена по контрольным приборам на пульте управления синхроциклотроном и по мониторам, используемым в эксперименте по измерению поляризации протонов, испущенных назад на углеводе /Р.Я.Зулькарнеев/.

1. Перед началом эксперимента ускоритель был настроен в типовом протонном режиме без растяжки пучка:

магнитное поле $H = 1,665 \text{ Тл}$ / $I_{\text{осн}} = 4250 \text{ А}$; $I_{\text{под}} = 290 \text{ А}$;
режим генератора дуанта $E = 6,5 \text{ кВ}$; $I_k = 8,7 \text{ А}$; $I_c = 2,0 \text{ А}$;
фокусирующее напряжение $U_{\text{ф}} = 4,0 \text{ кВ}$.

В этом режиме интенсивность ускоренных протонов была $\alpha_{\text{п}} = 0,560 \pm 0,010$.

2. Затем была включена система растяжки пучка с обычной схемой управления на микромодулях и получен растянутый протонный пучок с интенсивностью $\alpha_{\text{прас}} = 0,210 \pm 0,010$.

В этом режиме была снята зависимость частоты на С-электроде от времени $f_{1c}(t) / 1$ на рис. 11/. Осциллограмма растянутого пучка изображена на рис. 12.

После этих предварительных измерений была включена рассматриваемая в данной работе схема растяжки пучка.

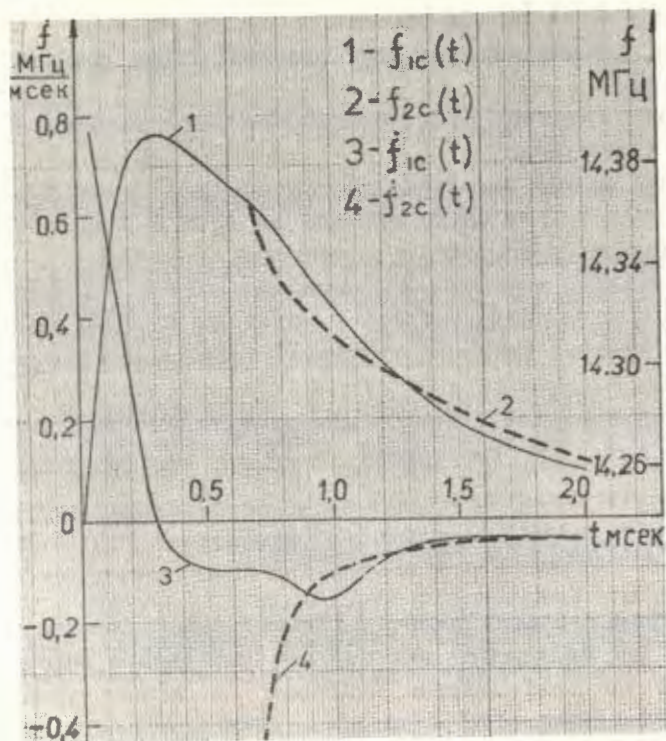


Рис.11. Зависимости частоты $f_c(t)$ и производной $f'_c(t)$ от времени для старой /кривые 1, 3/ и новой /кривые 2, 4/ схем в.ч. генератора С-электрода.

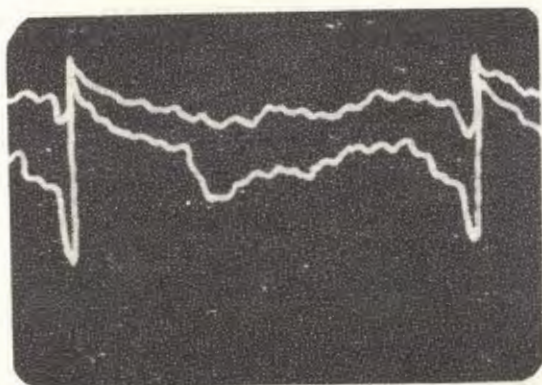


Рис.12. Осциллограмма растянутого пучка $a_{\text{прас}} = 0,210 \pm 0,0010$.

Режимы генераторов дуанта и С-электрода при этом не изменились.

3. Зависимость частоты на С-электроде от времени при работе системы растяжки от новой схемы приведена на рис. 11 /2/. Эта зависимость подбиралась экспериментально, основным критерием при подборе была равномерность растянутого пучка. Максимальная интенсивность получилась равной $a_{\text{прас}} = 0,320 \pm \pm 0,002$. Осциллограмма растянутого пучка для этого случая представлена на рис. 13. Зависимость производных $f'_{1c}(t)$ и $f'_{2c}(t)$ для старой и новой схем приведена на рис. 11 /3 и 4/.

Также экспериментально подбиралась форма огибающей амплитуды ускоряющего напряжения на С-электроде. На рис. 15 представлена осциллограмма огибающей, при которой получилась оптимальная форма растянутого пучка /рис. 14/.

4. Далее была снята зависимость интенсивности растянутого пучка от фазы в.ч. напряжения на С-электроде, которая регистрировалась по времени задержки в.ч. сигнала, поступающего на С-электрод. Эта зависимость представлена на рис. 16. Заштрихованной полосой для сравнения показана интенсивность растянутого пучка в обычном режиме без синхронизации по фазе, манипуляции и без использования импульсов, сформированных из в.ч. сигнала с дуанта для отключения генератора, питающего дуант, и включения генератора, питающего С-электрод.

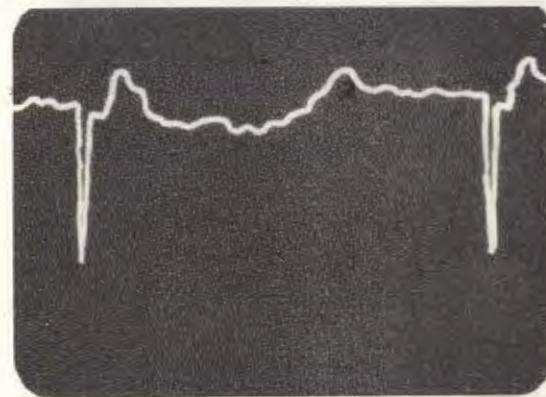


Рис.13. Осциллограмма растянутого пучка $a_{\text{прас}} = 0,320 \pm 0,002$.

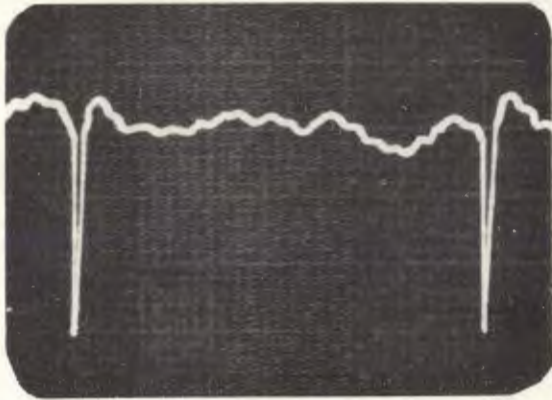


Рис.14. Оптимальная форма растянутого пучка $\alpha_{н} = 0,320 \pm 0,002$.

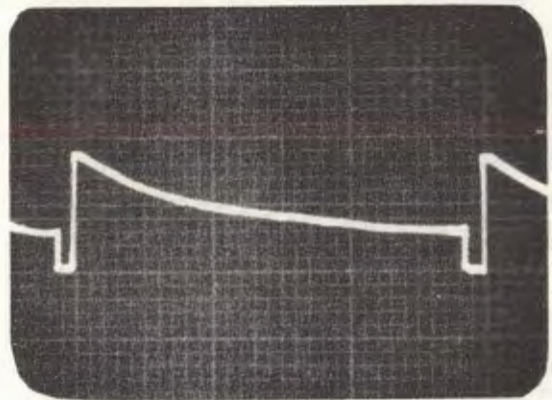


Рис.15. Огибающая ускоряющего напряжения на С-электроде.

Из рис. 16 видно, что изменение фазы в пределах периода высокой частоты $f = 70$ нс/ меняет интенсивность более чем в 2,5 раза от 55% до 145% средней интенсивности растянутого пучка при работе по схеме без фазировки. Длительность растянутого пучка составляет $\approx 97\%$ периода модуляции.

5. Отключение манипуляции в.ч. напряжения $f_c(t)$ С-электрода после предварительной настройки схемы на максимальную интенсивность растянутого пучка $\alpha_{н\text{рас}} = 0,32$ привело к уменьше-

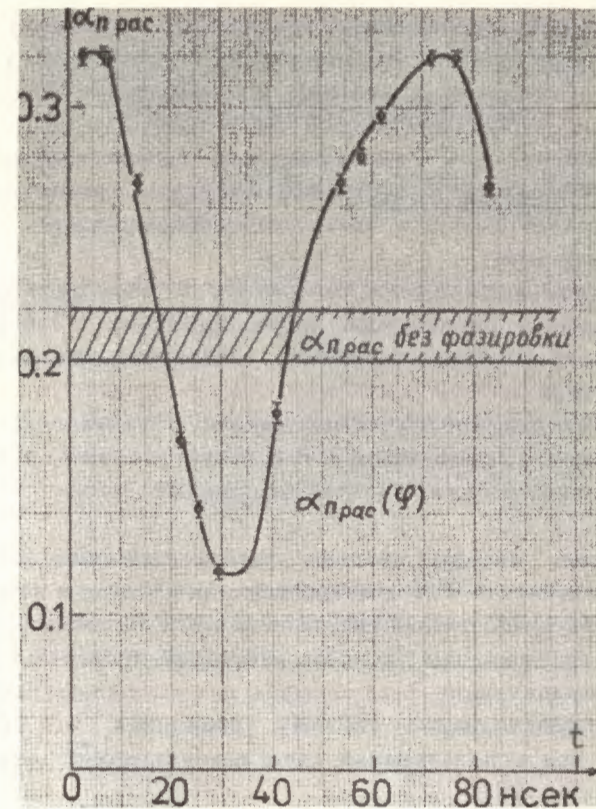


Рис.16. Зависимость интенсивности растянутого пучка от фазы /нс/. Заштрихованный участок - интенсивность без фазировки.

нию интенсивности на 25% $\alpha_{н\text{рас}} = 0,24$, при этом фон увеличился с 0,007 до 0,012.

ВЫВОДЫ

На основании результатов экспериментальной проверки разработанной схемы управления растяжкой пучка при помощи С-электрода видно, что:

1/ регулируемый закон частоты $f_c(t)$ в.ч. генератора С-электрода позволяет создать равномерно растянутый по всему периоду пучок протонов.

При подобранном оптимальном законе $f_c(t)$ наилучшая форма амплитуды ускоряющего напряжения на С-электроде имеет максимум на высоких частотах диапазона С-электрода /14,36 МГц/;

2/ использование для отключения в.ч. генератора дуанта и включения генератора С-электрода импульса, сформированного из в.ч. сигнала с дуанта, повышает стабильность растянутого пучка в пять раз;

3/ подбор оптимальной фазы генератора С-электрода повышает интенсивность растянутого пучка примерно в 1,5 раза;

4/ при работе растяжки от новой схемы фон снижается более, чем в 1,5 раза.

Был осуществлен прогон новой схемы в течение 12 ч во время эксперимента, проводимого Р.Я.Зулькарнеевым, и получена положительная оценка качества растянутого пучка.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Р.Я.Зулькарнееву за участие в измерениях и контроле качества растянутого пучка и за предоставление удобного времени для экспериментальной проверки новой схемы; П.Т.Шишлянникову - за помощь при включении данного устройства в действующую систему управления; В.Г.Зинову за содействие при использовании схем наносекундной электроники.

Авторы признательны А.Н.Сафонову за расчет некоторых параметров синхроциклотрона по полученным предварительным экспериментальным результатам; А.М.Фокиной за тщательное выполнение иллюстраций, Л.И.Тарасовой, взявшей на себя труд перепечатать данную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, Б1-9-7609, Дубна, 1973.
2. Глазов А.А. и др. Труды 4-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т. 1, с. 242-245.
3. Енчевич И.Б. и др. ОИЯИ, 9-6632, Дубна, 1972.
4. Глазов А.А., Онищенко Л.М. ОИЯИ, Б1-9-7286, Дубна, 1973.

5. Борейко В.Ф. и др. ОИЯИ, 13-6396, Дубна, 1972.

6. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. Расчет оптимальных режимов временной растяжки при помощи С-электрода. ОИЯИ, Р9-12577, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 июля 1979 года.