

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

P9-84-631

**Г.В.Долбилов, Н.И.Лебедев, В.А.Петров,
А.А.Фатеев, Б.Г.Шинов**

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЧКА
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ
СИЛУНД-20**

1984

Линейный индукционный ускоритель электронов СИЛУНД-20^{/1/} разработан, изготовлен и запущен в Объединенном институте ядерных исследований. Ускоритель состоит из плазменного источника электронов^{/2/}, пяти ускоряющих секций индукционного типа, питаемых модуляторами со схемами усиления мощности на нелинейных элементах, и ускорительного тракта с соленоидальным импульсным магнитным полем^{/3/}. В источнике электронов для формирования пучка используется разряд в газе между игольчатым катодом и цилиндрическим анодом, расположенными в первой секции индукторов. Разряд зажигается предимпульсом напряжения модулятора. Образование плазменных электродов инициируется в анодной области магнитным полем. При включении первой ускоряющей секции формируется пучок электронов.

Ток пучка на выходе ускорителя достигает 1 кА, энергия - 2 МэВ, частота повторения импульсов - 50 Гц.

При использовании ускорителя СИЛУНД-20 в качестве инжектора коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20^{/3,4/} предъявляются жесткие требования к пучку. Эмиттанс пучка с током ~500 А не должен превосходить 25 π мрад·см. Пучок не должен иметь углового отклонения при выходе из фокусирующего поля ускорителя. Требуется высокая стабильность параметров пучка. Отсюда становится ясной необходимость тщательного исследования характеристик ускорителя, параметров пучка и их стабильности.

Для исследования использовалась интерактивная автоматизированная система. Она позволяет измерять временные и амплитудные характеристики импульсов основных систем ускорителя и сигналов, поступающих с диагностической аппаратуры. Общее число каналов регистрирующей аппаратуры - 28. Сбор, обработка и представление информации осуществляются двухмашинным комплексом на базе микро-ЭВМ МERA-60-10 и мини-ЭВМ СМ-4. Программируемый со стороны микро-ЭВМ протокол обмена данными и применение на СМ-4 пакета программ СМ ГРАФОР дают новые возможности для нахождения связей различных параметров и закономерностей формирования пучка. Экспериментальные результаты отображаются графически на цветном мониторе, плоттере и графическом терминале.

Размеры, положение центра тяжести и эмиттанс пучка определялись с помощью многоканального датчика коллекторного типа. На рис. 1 изображена типичная картина профиля пучка, снятая и обработанная с помощью измерительного комплекса. В измерении эмиттанса использовался метод диафрагмирования^{/5/}. Замагниченность плазменного катода источников электронов оценивалась по траектории движения центра тяжести пучка в магнитном поле и по повороту



Рис. 1

характеристики являются неизменными. Измерение параметров проводилось именно для этой части пучка. На выходе источника электронов при оптимальном фокусирующем поле $B=0,1$ Т, токе ~ 1 кА и энергии ~ 400 кэВ пучок имеет диаметр $d \approx 8$ мм. Столь малый диаметр пучка объясняется тем, что источник электронов работает в режиме нейтрализации пространственного заряда. В процессе ускорения величина тока практически не меняется, энергия достигает 2 МэВ, а диаметр пучка возрастает до ~ 20 мм. За первой секцией на расстоянии ~ 400 мм от анода источника электронов и в конце ускорителя наблюдается смещение центра тяжести пучка от оси, максимальная величина которого $\Delta R \approx 5$ мм. Наличие смещения может быть связано с неидеальной точностью изготовления и установки фокусирующих катушек /смещение осей достигает $\pm 0,5$ мм, угловое отклонение $\sim \pm 0,007$ рад/ и с развитием поперечной неустойчивости за счет взаимодействия пучка с элементами ускорительного тракта ^{16/}. Установить место появления смещения пока не удалось, так как приближение датчика положения к аноду приводит к нарушению режима работы источника электронов. Можно предположить, что некоторое смещение существует при вводе пучка в фокусирующее магнитное поле ускорителя. Такое предположение позволяет сделать простейшие оценки. Наличие начального смещения пучка от оси приводит в азимутально-симметричном магнитном поле к движению по спирали. Спираль может или касаться оси в случае, если катод источника немагнитен, или приближаться к оси на расстояние, определяющееся степенью замагниченности. Период такого движения $T = 2\pi m_0 / eB$. Наличие смещения приводит при выходе из фокусирующего поля ускорителя к прямолинейному движению под углом к оси. Измерение и численные оценки дают для максимального смещения ~ 5 мм приблизительно одинаковое значение углового отклонения пучка при выходе из поля, равное 0,04 рад. Для дальнейшей проводки пучка необходима корректировка углового отклонения с помощью, например, поперечного магнитного поля.

На рис.2 представлена зависимость величины эмиттанса электронного пучка ускорителя от отношения рассматриваемой части тока к полному току пучка. Фазовые портреты пучка имеют форму эллипсов. При обработке результатов измерения учитывалось, что распределение плотности пучка по сечению близко к распределению

в азимутальном направлении проколлимированного щелью пучка, вышедшего из фокусирующего поля ускорителя.

Исследования временной структуры пучка с помощью строба длительностью 10 нс показали, что для части пучка, соответствующей вершине импульса ускоряющего напряжения длительностью ~ 20 нс, дифференциальные ха-

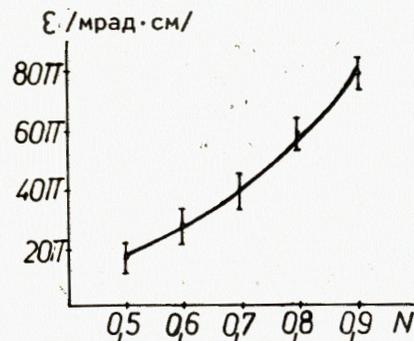


Рис. 2

Гаусса. Измерение величины эмиттанса пучка непосредственно за источником показало, что эмиттанс $\epsilon \approx 100\pi$ мрад·см для 60% тока пучка.

Установлено, что центр тяжести пучка описывает в магнитном поле на плоскости, перпендикулярной оси, при изменении поля по величине окружность, проходящую через ось. Поворот в азимутальном направлении проколлимированного щелью при выходе из магнитного поля ускорителя пучка не превышает 2° на расстоя-

нии 200 мм от щели. При включении на этом участке фокусирующего поля амплитудой 0,1 Т наблюдается поворот $\sim 45^\circ$. Следовательно, величина магнитного поля на плазменном катоде не превышает 4% от амплитуды фокусирующего поля ускорителя.

Эти экспериментальные факты свидетельствуют о незначительной замагниченности плазменного катода источника.

Угол, на который повернется вошедший в фокусирующее поле смещенным пучок при прохождении через ускоритель,

$$\phi = \int_0^L \frac{eB}{\beta m_0 c} \frac{dz}{\gamma(z)} = \frac{eB W_0}{\beta m_0 c E} \ln\left(1 + \frac{EL}{W_0}\right), \quad /1/$$

где W_0 - энергия покоя электрона, E - набор энергии на единице длины, L - длина ускорителя, B - магнитная индукция.

Пучок выходит из источника электронов с энергией $\sim 0,4$ МэВ. Поэтому с достаточной для оценки точностью можно считать $\beta = \text{Const}$ в процессе ускорения. Из /1/ видно, что нестабильность магнитного поля и ускоряющего напряжения приводит к нестабильности фазы колебаний и, следовательно, углового отклонения пучка при выходе из фокусирующего поля ускорителя. Так как в индукционном ускорителе величина ускоряющего напряжения зависит от ускоряемого тока, то нестабильность тока пучка по амплитуде приводит к аналогичному эффекту. В этом случае корректировка углового отклонения является неэффективной. Подстановка численных данных в /1/ дает для поля $B = 0,1$ Т, $\Delta B/B \approx 1\%$ или $\Delta E/E \approx 1\%$ нестабильность фазы $\Delta\phi \approx 36^\circ$. Оценки показывают, что допустимый разброс значений углового отклонения на выходе пучка из ускорителя составляет величину $\approx 0,003$ рад. Это соответствует нестабильности фазы $\Delta\phi \approx 3^\circ$. Следовательно, величина нестабильности магнитного поля и энергии не должна превышать $\pm 0,05\%$.

Как показали измерения, амплитудная нестабильность зарядного напряжения модуляторов на выходе системы стабилизации не превы-

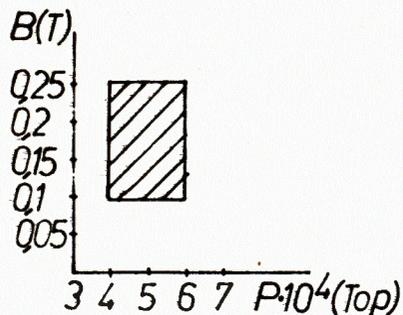


Рис. 3

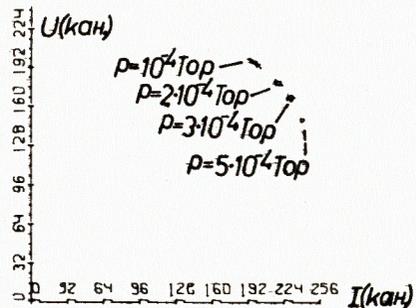


Рис. 4

шает $\pm 0,03\%$. Система стабилизации напряжения модуляторов снижает разброс значений углового отклонения пучка от оси с $0,04$ рад до $0,02$ рад. Нестабильность фокусирующего поля по величине достигает $\pm 0,5\%$. Необходима дополнительная стабилизация магнитного поля.

На рис.3 изображена область значений магнитного поля и вакуума в источнике электронов, в которой амплитудная нестабильность тока пучка не превышает 1% , что соответствует нестабильности импульса напряжения модулятора. Сложность задачи разделения нестабильности напряжения модулятора и тока пучка обусловлена тем, что послеимпульсы, даже незначительной амплитуды, могут оказывать действие на начальное состояние нелинейных элементов модулятора, определяющее стабильность импульса. На рис.4 показана типичная картина, полученная путем одновременного измерения амплитуды импульсов напряжения модулятора и тока пучка, позволяющая определить величину нестабильности отдельных параметров.

После ~ 1500 ч работы ускорителя с частотой до 50 Гц изменений характеристик не наблюдалось, нестабильность тока источника по амплитуде осталась прежней /меньше 1% /. В процессе ускорения амплитудная нестабильность тока пучка несколько возрастает. На рис.5 изображена гистограмма, характеризующая стабильность

тока пучка от импульса к импульсу. Достигнутый в настоящее время уровень нестабильности тока / $\sim 5\%$ / на выходе из ускорителя, не может быть снижен без стабилизации всех систем.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Э.А.Перельштейну за помощь и полезные дискуссии, а также В.Н.Шалыпину за помощь при измерении замагниченности плазменного катода.

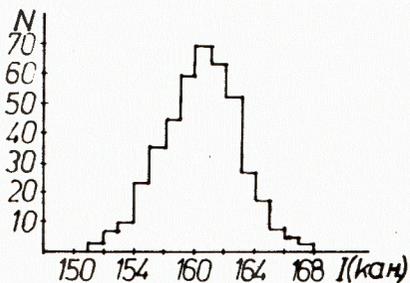


Рис. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В. и др. В кн.: Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с. 101.
2. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-82-70, Дубна, 1982.
3. Александров В.С. и др. В кн.: Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983, с. 54.
4. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-83-307, Дубна, 1983.
5. Москалев В.А. и др. Измерение параметров пучков заряженных частиц. Атомиздат, М., 1980.
6. Алексахин Ю.И., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, Р9-82-640, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 сентября 1984 года.

Долбилов Г.В. и др.

P9-84-631

Исследования пучка линейного индукционного ускорителя электронов СИЛУНД-20

Приведены результаты работ по исследованиям пучка линейного индукционного ускорителя электронов СИЛУНД-20. Для исследований использовалась интерактивная автоматизированная система, позволяющая измерять временные и амплитудные характеристики импульсов. Определены эмиттанс, положение центра тяжести, размеры пучка и замагниченность плазменного катода источника электронов. Измерена стабильность характеристик ускорителя и параметров пучка. Найдена область наибольшей стабильности. Указаны причины возникновения неустойчивости параметров и пути ее устранения.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградской

Dolbilov G.V.

P9-84-631

Investigation of SILUND-20 Electron Linear Induction Accelerator Beam

The results of investigation of the beam of SILUND-20 electron linear induction accelerator are presented. The interactive automated system was used for these investigations, which permits to measure pulse time responses and amplitude characteristics. The beam emittance, the centre of gravity position, beam dimensions and magnetization of plasma cathode of the electron source have been defined. The stability of accelerator characteristics and of beam parameters have been measured. The causes of parameter instability and the ways of their elimination are pointed out. The region of maximum stability has been determined.

The investigation has been performed at the Department of New Methods and Acceleration, JINR.
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984