

# Линейный ускоритель протонов с регулируемой энергией ускоренных частиц

В. А. БОМКО, А. П. КЛЮЧАРЕВ, Б. И. РУДЯК

УДК 621.384.643

Крупнейший недостаток линейных ускорителей ионов, ограничивающий их применение в науке и технике, — невозможность регулирования энергии ускоренных частиц. Ускоряющая структура типа Альвареца [1] в виде резонатора, нагруженного трубками дрейфа и возбуждаемого на волне типа  $E_{010}$ , в принципе не позволяет изменять энергию пучка. Получить частицы с промежуточными энергиями можно только делением ускорителя на секции. Такой способ влечет за собой некоторые трудности и не обеспечивает плавного регулирования энергии.

Попытки получения промежуточных энергий ионов на линейных ускорителях предпринимались давно. На ускорителе тяжелых ионов в Берлине [2] использовали тот факт, что в некоторых линейных ускорителях при недостаточной хорошей настройке систем в ускоренном пучке кроме ионов с максимальной энергией присутствует спектр частиц с промежуточными энергиями. Таким образом, искусственно отклоняя режим работы ускорителя от нормального, например изменяя распределение напряженности ускоряющего поля и перестраивая другие системы ускорителя, удается выделить некоторые компоненты спектра промежуточных энергий. Этот режим нестабилен, а интенсивность значительно ниже интенсивности пучка с полной энергией. Различные гипотезы, объясняющие этот эффект, вытекают из особенностей данного ускорителя — больших диаметров трубок дрейфа и сеточной фокусировки в предобдирочной секции.

В Харьковском физико-техническом институте предложен и разработан новый способ ускорения ионов в линейных ускорителях, позволяющий плавно изменять энергию частиц в пределах до любого значения ниже расчетной максимальной без уменьшения интенсивности и ухудшения монохроматичности пучка.

## Принцип плавного регулирования энергии ускоренных частиц

Сущность принципа регулирования энергии ускоренных частиц заключается в формировании вдоль оси ускорителя участков равно-

мерного распределения ускоряющего поля меняющейся протяженности. Это ведет к отказу от возбуждения резонатора на волне типа  $E_{010}$ .

При возбуждении резонатора на такой волне невозможно получить участки с равномерным распределением ускоряющего поля меняющейся протяженности. Возмущающими настроечными устройствами, обычно используемыми для получения допустимой равномерности полей, можно только наклонять или хаотично искажать распределение полей.

Изучение изменения распределения высокочастотных полей в резонаторе, возбужденном на волне  $E_{011}$  (и более высоких волнах типа  $E_{01l}$ ) при возмущении частот элементарных отсеков резонатора настроечными устройствами, привело авторов настоящей работы к заключению, что использование этого по существу «паразитного» типа волны может решить проблему регулирования энергии ионов, ускоренных на линейных ускорителях.

Обычно при возбуждении волны  $E_{011}$  в резонаторе линейного ускорителя с трубками дрейфа, все ячейки которого настроены на одну резонансную частоту, устанавливается косинусоидальное распределение электрического высокочастотного поля вдоль оси (рис. 1, кривая 1). При помощи возмущений, вносимых у одного из концов резонатора, нетрудно сдвигать вдоль его оси узел распределения элект-

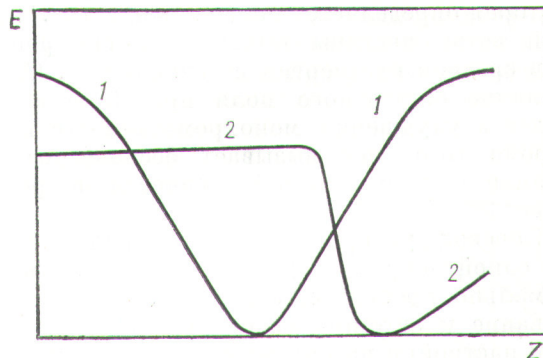


Рис. 1. Распределение полей вдоль ускорителя, соответствующее возбуждению в резонаторе волны типа  $E_{011}$ : 1 — все ячейки резонатора настроены на одну частоту; 2 — частоты ячеек возмущены с целью получения равномерного участка ускоряющего поля. ■

трического поля, а настраивая соответствующим образом ячейки резонатора, можно формировать участки равномерного поля с крутым спадом (рис. 1, кривая 2).

При изменении протяженности равномерного участка с идеально крутым спадом обеспечивается ступенчатое регулирование энергии ускоренных частиц с шагом, равным приросту энергии на одном периоде ускоряющей структуры. Практически спад имеет некоторый наклон, и, меняя его крутизну, возможно плавно регулировать энергию.

На участке ускоряющей структуры, где отсутствует ускорение, нужно провести пучок без потерь, для чего необходимо по заранее отработанной программе установить магнитные поля в фокусирующих квадрупольях, расположенных в трубках дрейфа.

### Устройства для формирования полей

Для обеспечения монохроматичности пучка при ускорении до промежуточных энергий участки равномерного распределения ускоряющего поля меняющейся протяженности должны иметь достаточно крутой спад.

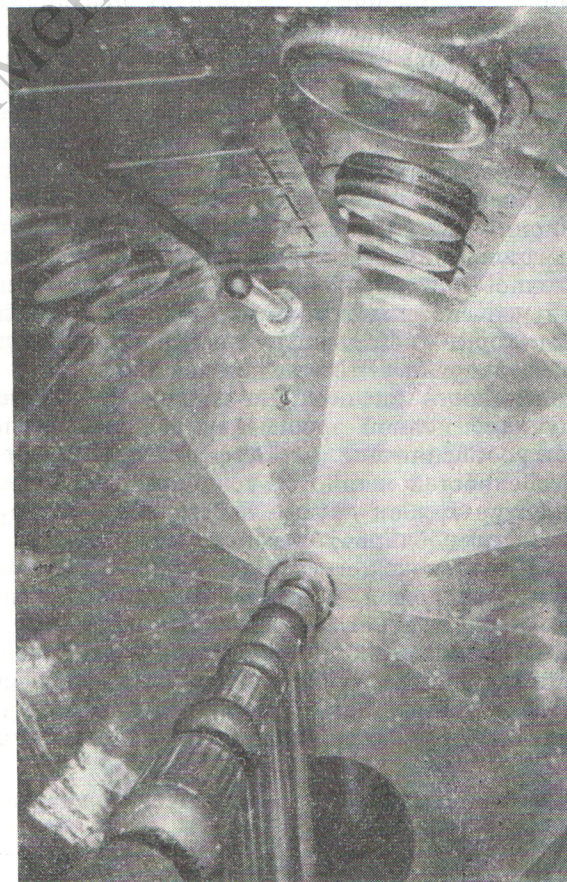
Монохроматичность пучка ухудшается и по другой причине. При формировании равномерного распределения ускоряющего поля деформацией левой ветви волны  $E_{011}$  (см. рис. 1) остается некоторое распределение электрического поля правой ветви. Особенно значительна напряженность этого поля при формировании коротких участков равномерного поля для ускорения частиц до энергий, меньших половины максимальной. Эти поля существенно не влияют на абсолютную величину энергии, которая определяется полем левой ветви. В правой ветви частицы выходят из синхронизма и в среднем их энергия не изменяется. Однако наличие остаточного поля правой ветви  $E_{011}$  ведет к ухудшению монохроматичности пучка. Кроме того, оно вызывает бесполезное рассеяние высокочастотной мощности в резонаторе.

Перевод ускорителя на ускорение частиц от одной энергии к другой должен быть максимально простым и обеспечивать программирование и автоматическое управление процессом настройки на оптимальные параметры пучка при любой промежуточной энергии ускоренных частиц.

Указанные задачи определяют очень высокие требования к настроечным устройствам.

Известные настроечники, применяемые в настоящее время (цилиндры, шары, пластины и т. п.) и устанавливаемые на боковой стенке резонатора, малоэффективны, когда в качестве рабочей используется волна типа  $E_{011}$ . В этом случае значительно повышается стабильность полей, вследствие чего снижается их чувствительность к вносимым в резонатор возмущениям. Кроме того, эти устройства не позволяют устранять полностью поля правой ветви волны  $E_{011}$ .

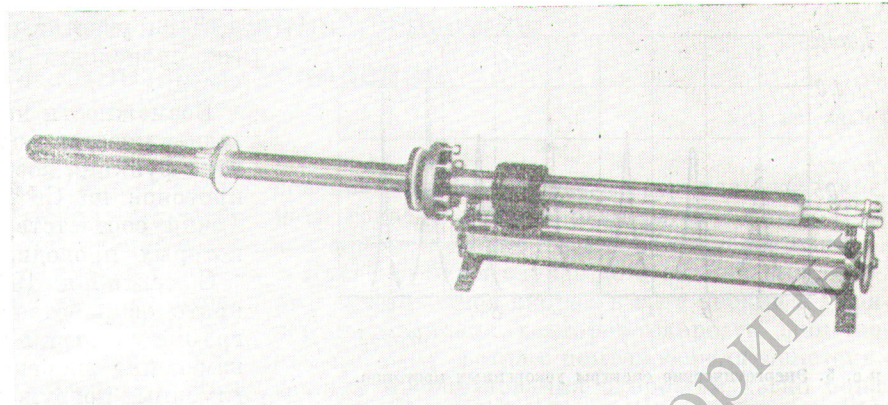
Настроечным устройством, удовлетворяющим всем указанным требованиям и в то же время простым и удобным в эксплуатации, можно считать штырь переменной длины, расположенный на торцевой стенке резонатора. Изучение свойств такой новой резонансной системы, вносимой в резонатор, показало, что ее действие в некоторой степени аналогично действию полутрубки дрейфа, устанавливаемой обычно на



Р и с. 2. Расположение настроечного штыря резонаторе.

торцевой стенке резонатора, при изменении ее длины.

В результате экспериментального исследования установлено, что действие резонансного штыря наиболее эффективно, если он выводится вблизи боковой стенки резонатора (рис. 2). При погружении штыря в резонатор узел электрического поля волны  $E_{011}$  сдвигается вдоль резонатора и в конечном счете полностью устраняет правую ветвь поля. Это устройство отличается эффективностью и конструктивной простотой (рис. 3); оно удобно в эксплуатации и позволяет автоматизировать процесс плавного регулирования энергии ускоренных частиц.



Р и с. 3. Настраечное устройство.

### Экспериментальные результаты

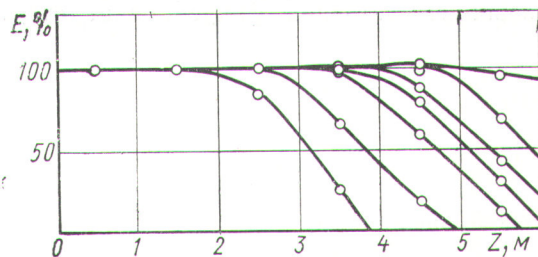
Принцип регулирования энергии ускоренных частиц экспериментально исследовался на линейном ускорителе протонов с максимальной энергией 9 Мэв при энергетическом разбросе 30 кэв [3]. Основные его характеристики: рабочая длина волны  $\lambda_0 = 2,1$  м, средняя напряженность электрического поля вдоль оси 18,4 кэв/см, длина резонатора 6 м, энергия ионизации 500 кэв, 34 трубки дрейфа, фокусировка сеточная. Этот ускоритель с момента его запуска в 1966 г. работал на волне  $E_{010}$  при коэффициенте заполнения 0,4% с интенсивностью 0,2 мка.

С начала 1969 г. ускоритель переводился в режим ускорения с плавной регулировкой энергии ускоренных частиц. Вначале экспериментально отработывались методы формирования участков равномерного распределения ускоренных полей меняющейся протяженности на волне  $E_{011}$ . Были исследованы распределение энергии в высокочастотной энергии при описанном способе формирования поля, соотношение длинностей резонатора при различных способах формирования поля, стабильность ускоренного поля и его чувствительность к возмущениям. Кроме того, изучались эксплуатационные характеристики ускорителя при плавном регулировании энергии ускоренных частиц.

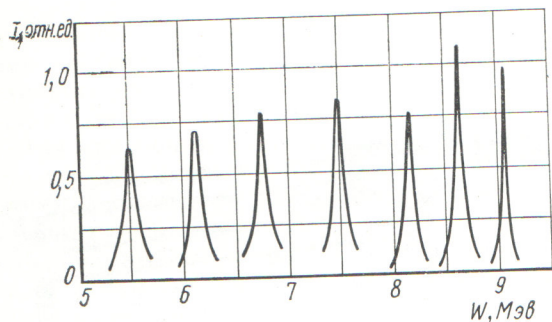
Резонансный штырь устанавливался на выходной торцевой стенке резонатора на расстоянии 10 см от боковой стенки. Это расстояние, обеспечивая достаточную эффективность действия штыря, устраняло пробой на стенке резонатора.

Формирование полей, способствующее плавному регулированию энергии ускоренных частиц, проводилось путем использования резонансного штыря и настроечных устройств обычного типа. При помощи штыря узел поля волны  $E_{011}$  сдвигался на нужное расстояние, а равномерность поля и крутизна спада обеспечивались боковыми настроечниками. На рис. 4 приведено семь распределений напряженности ускоряющего поля вдоль оси ускорителя, сформированных таким способом.

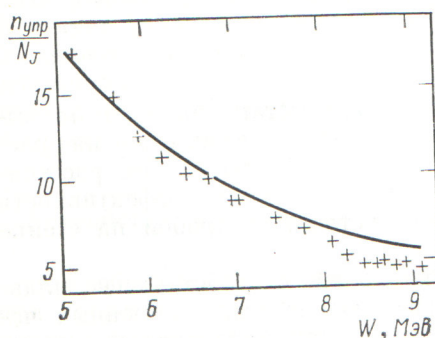
Интересно отметить, что при соответствующей перестройке удалось получить равномерное распределение поля левой ветви волны  $E_{011}$  по всей длине ускорителя. Не зная всей «предыстории» формирования этого распределения, невозможно отличить его от обычно получаемого равномерного распределения поля на волне  $E_{010}$ . В обоих случаях при равномерном рас-



Р и с. 4. Распределения полей, сформированные вдоль резонатора, возбуждаемого на волне  $E_{011}$ .



Р и с. 5. Энергетические спектры ускоренных протонов.



Р и с. 6. Функция возбуждения упругого рассеяния протонов, полученная при плавном регулировании энергии ускоряемых протонов.

пределении поля вдоль всего резонатора, потери высокочастотной мощности одинаковы.

На рис. 5 приведены примеры энергетических спектров протонов, ускоренных до различных энергий, которые соответствуют распределениям полей, изображенным на рис. 4. Как видно из рис. 5, разброс протонов по энергии при ускорении до максимальной энергии равномерным по всей длине ускорителя полем волны  $E_{011}$  составляет 50 кэВ, что существенно лучше, чем в случае ускорения в обычном режиме на волне  $E_{010}$ . Уменьшение интенсивности при уменьшении энергии ускоренных частиц, наблюдаемое на рис. 5, объясняется использованием сеточной фокусировки, отсутствующей

щей на участке, где нет ускоряющего поля и где происходят некоторые потери ускоренных частиц.

Возможности нового режима работы ускорителя иллюстрируются рис. 6, на котором показана функция возбуждения упругого рассеяния протонов на  $\text{Cr}^{53}$ , измеренная под углом  $60^\circ$ . Точки соответствуют значениям энергий, при которых проводился эксперимент.

С сентября 1969 г. линейный ускоритель протонов работает по экспериментальной программе в режиме, обеспечивающем плавное изменение энергии от 3 до 9 МэВ. Изменение глубины погружения настроечных устройств осуществляется по заранее разработанной программе, без нарушения вакуума и при включенном высокочастотном питании. Для получения требуемого уровня участков полей с равномерным распределением малой протяженности генераторы размещены так, чтобы высокочастотная мощность подавалась вблизи входного конца ускорителя.

Как показала длительная эксплуатация ускорителя на волне  $E_{011}$ , этот режим кроме возможности плавно изменять энергию обеспечивает большую стабильность характеристик ускоренного пучка. Даже при работе на максимальной энергии режим ускорения на волне  $E_{011}$  более предпочтителен, чем обычно используемый режим ускорения на волне  $E_{010}$ .

Достоинство описанного способа ускорения — возможность его реализации на существующих линейных ускорителях без значительных конструктивных изменений и, следовательно, без дополнительных затрат.

Поступила в Редакцию 8/VI 1970 г.  
В окончательной редакции 4/I 1971 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. Alvarez et al. Rev. Scient. Instrum., 26, 111 (1955).
2. A. Ghiorso et al. Proc. Linear Acceler. Conf. (Los-Alamos, 1966).
3. Б. И. Рудяк и др. В сб. «Ядерная физика». Харьков, Изд. ФТИ АН УССР, 1967, стр. 25.