

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЧАСТИЦ

И. Я. БАРИТ, Г. А. ВАСИЛЬЕВ, В. Н. КАНУННИКОВ, Л. Н. КАЦАУРОВ,
А. А. КОЛОМЕНСКИЙ, Е. М. МОРОЗ, Л. П. НЕЧАЕВА, А. П. ФАТЕЕВ

Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Ю. Г. БАСАРГИН, О. А. ГУСЕВ, Р. Н. ЛИТУНОВСКИЙ,
И. Ф. МАЛЫШЕВ, О. А. МИНЯЕВ, М. П. СВИНИН

*Научно-исследовательский институт электрофизической
аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Ленинград*

Докладчик: В. Н. Канунников

В настоящее время становится реальной задача сооружения спектрометрического (моноэнергетического) циклотрона с регулируемой энергией, обладающего энергетическим разбросом выводимого пучка 10^{-4} , максимальной энергией протонов $\sim 50-100$ Мэв и средней интенсивностью пучка ~ 100 мка [1, 2]. Успешное решение этой задачи предполагает выполнение следующих требований:

1. Обеспечение отчетливого разделения орбит в области выводного устройства циклотрона, что позволит значительно снизить энергетический разброс в выводимом пучке ионов. Можно будет перейти от величин порядка сотен кэв, обусловленных тем, что из-за бетатронных колебаний вывод ионов происходит с нескольких орбит, к величинам порядка десятков кэв, обусловленным разбросом в отдельном сгустке ускоренных ионов.

2. Введение дополнительной гармоники ускоряющего напряжения, которая позволит устранить основную причину возникновения энергетического разброса в сгустке—зависимость приобретаемой ионом энергии от фазы ускоряющего напряжения. Вторая и третья гармоники обеспечивают плоскую вершину кривой зависимости ускоряющего напряжения от времени. Выбирая, например, третью гармонику и поддерживая ее амплитуду на уровне $0,126 \pm 0,0002$ от прироста энергии иона, можно добиться того, чтобы в достаточно широком интервале фаз $-6^\circ \leq \varphi \leq 6^\circ$ изменение ускоряющего напряжения не превышало 10^{-5} , что обеспечи-

вает энергетический разброс $\Delta E = 10^{-5} \times 100$ Мэв = 1 кэв. При этом неточность в фазировании основного и дополнительного ускоряющих напряжений должны быть меньше $\pm 0,1^\circ$.

3. Удержание ускоряемых ионов в пределах фазовой области с «плоской» формой ускоряющего напряжения. Это может быть достигнуто за счет инжекции достаточно коротких сгустков длительностью 2—3 нсек и последующей автоматической коррекции положения фазы сгустка в процессе ускорения.

4. Обеспечение высокой стабильности амплитуды основного ускоряющего напряжения (требуемая стабильность 3×10^{-5}). При этом нестабильности с периодом, превышающим время ускорения ионов, не приводят к энергетическому разбросу ионов в пучке, а вызывают лишь медленные изменения энергии всего пучка, которые могут быть, в принципе, скомпенсированы на выводном тракте дополнительным устройством.

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР совместно с НИИ Электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова разрабатывается проект спектрометрического циклотрона на 80 Мэв (по прототипам). В этом проекте принята предложенная в [3] магнитная система, состоящая из отдельных секторов, разделенных свободными промежутками. Первый циклотрон такого типа был сооружен в ФИАНе [4]. Секторная магнитная система была предусмотрена также в проекте мезонной фабрики в Ок-Ридже [5]. В секторной системе удобным образом решается вопрос об инжекции ионов из внешнего источника. Внешняя инжекция должна обеспечить высокую точность параметров пучка ионов в начале ускорения, а также позволит использовать в дальнейшем источники поляризованных ионов. Кроме того, секторная система обеспечивает более сильную вертикальную фокусировку ионов, что важно с точки зрения повышения предельного пространственного заряда.

Число секторов в проектируемом циклотроне выбрано равны 4. В этом случае два промежутка между блоками можно использовать для размещения основных ускоряющих элементов ВЧ-системы, а остальные — для дополнительных дуантов с третьей гармоникой, а также для вывода пучка. Выбор радиуса и напряженности поля циклотрона должен быть согласован с амплитудой ускоряющего напряжения и необходимым разделением орбит. При выбранных в рассматриваемом варианте параметрах $R_k = 2,6$ м, $\Delta E_{ob} = 350$ кэв/об) расстояние между последними орбитами ~ 5 мм.

Конфигурация магнитного поля циклотрона должна обеспечивать выполнение условий изохронизма, разделения орбит и устойчивости движения ускоряемых частиц. В частности, допуск на отклонение магнитного поля от изохронного составляет 10^{-4} . Для создания поля с такой точностью будут использованы полюсные наконечники и корректирующие обмотки.

В качестве одного из возможных вариантов основной ускоряющей системы можно использовать два вертикальных полуволновых коаксиальных резонатора переменного сечения, подобных описанным в [5]. С учетом мощности пучка и потерь в ВЧ-тракте требуемая мощность генератора должна составлять 150 квт.

Инжекция частиц в циклотрон может быть осуществлена, например, в медианной плоскости, как это было сделано на циклотроне ФИАН [6]. Другой способ инжекции состоит в том, что пучок ионов впускается в камеру под небольшим углом к оси циклотрона (аксиальная инжекция). В качестве источника ускоряющего напряжения инжектора предполагается применить разрабатываемый в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова малогабаритный каскадный генератор на 1 Мв, который должен обеспечивать средний ток нагрузки 2—3 ма и стабильность напряжения 10^{-3} .

Отклонение и выпуск пучка наиболее просто достигаются применением электростатического дефлектора в комбинации с выводным магнитом. Энергия выпущенного пучка будет изменяться ступенями с шагом, равным приросту энергии за оборот. Плавное регулирование энергии в пределах этой величины может быть осуществлено изменением амплитуды ускоряющего напряжения, либо путем пропускания выведенного пучка через резонатор.

Для работы рассматриваемого ускорителя особенно важно хорошее разделение орбит и фазовая устойчивость. В связи с этим следует упомянуть о некоторых результатах, полученных при изучении динамики частиц в процессе ускорения.

1. Показано, что для заданной энергии инжекции и заданного прироста энергии за оборот среди возможных разворачивающихся траекторий существует одна траектория, называемая обычно равновесной орбитой, для которой прецессия, вызванная действием ускоряющих щелей, компенсируется бетатронными колебаниями. Прецессией траекторий можно управлять, что особенно важно в районе вывода пучка; в частности, прецессия может быть сведена к минимуму, обусловленному конечными размерами сгустка.

2. При движении частиц в циклотроне могут возникнуть биения амплитуды бетатронных колебаний за счет их параметрического возбуждения. Этот вопрос тесно связан с выбором числа ускоряющих резонаторов (дуантов) и их азимутальными размерами.

3. Составляющая электростатических сил пространственного заряда, действующая вдоль оси сгустка, вносит дополнительный энергетический разброс частиц. Основной эффект при этом дает не поле самого сгустка, а поле соседних сгустков. При некоторых условиях указанный разброс может оказаться сравнимым с заданным, что приведет к ограничению полезной длины сгустка.

Представление о параметрах разрабатываемого циклотрона дает

таблица 1. Подробное обоснование выбора параметров циклотрона, а также изложение программы физических исследований на нем дано в работе [1].

Таблица 1
Некоторые параметры спектрометрического циклотрона

Диапазон изменения энергии (для протонов)	10—80 Мэв
Конечный радиус	263 см
Максимальная напряженность поля	10000 э
Средняя напряженность поля	5000 э
Общий вес электромагнита	600 т
Потребляемая э/м мощность	450 квт
Диапазон частот в.ч. генератора	10—15 Мгц
Амплитуда ускоряющего напряжения	125 кв
Энергия инжекции	1 Мэв
Число магнитных секторов	4
Допустимая величина 1-ой гармоники азимутальной асимметрии поля	~2 э
Стабильность уровня магнитного поля	5×10^{-6}

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Барит и др. Препринт ФИАН, № 15, 1969.
2. А. А. Глазов и др. Препринт ОИЯИ, Р9—3932, 1968.
3. Е. М. Могоз, М. С. Рабинович, Sympostum CERN, 1, 547, 1956
4. В. А. Гладышев и др. Ат. энергия, 18, 213, 1965.
5. R. S. Livingston, Nucl. Instr. and Meth., 18-19, 438, 1962
6. В. А. Гладышев, и др. Труды Международной конференции по ускорителям, Атомиздат, М., 1964, стр. 658—661.

ДИСКУССИЯ

Замолодчиков: Каким методом Вы собираетесь обеспечить стабильность уровня магнитного поля 5×10^{-5} ?

Канунников: Известно, что с помощью ядерного резонанса можно добиться стабилизации в несколько единиц на 10^{-7} в однородном поле. Стабилизировать неоднородное поле изохронного циклотрона труднее, но, по-видимому, это разрешимая задача, если использовать систему автокоррекции по пучку.

Livingston: The majority of the papers were concerned with obtaining the beam with improved parameters. I would like to ask what are the reasons for coming to lower magnetic fields as it was for instance in paper presented by Kannunikov. In what degree is it justified?

Канунников: 10 кэрст не так уж мало, так как прирост энергии составляет 350 кэв на оборот. Необходимо разделить орбиты перед выводом, а для этого требуются меньшие поля.

Замолодчиков: Надо принять во внимание большой планируемый ток упомянутых ускорителей и соответствующие этому току размеры сгустка, а для этого нужно уменьшить магнитное поле.

Комар: При переходе к более низким полям вес и стоимость магнита возрастают не очень сильно.

Канунников: Еще одним доводом в пользу меньших магнитных полей является требование не слишком малого радиуса инжекции.

Martin: Before departure from the Conference Dr. Blosser has told me that the Michigan University Cyclotron MSU had the energy resolution $3 \cdot 10^{-4}$ with the intensity 15 mka. The width of the bunch is $1,7^\circ$ at the energy 34 MeV. The amplitude of the radiofrequency voltage is stabilized up to 0,02%.

Kim: Did anybody compare the cost of the monoenergy cyclotron and of usual cyclotron but with the external analysing system? Which is the most useful to built?

Басаргин: При сравнении следует исходить из какой-то фиксированной характеристики. Если за основу взять возможность получения 100 мка, то вопрос о стоимости, по-видимому, теряет смысл.

Kim: And what experiments require just these intensities at $\frac{\Delta E}{E} = 10^{-4}$?

Канунников: Программа экспериментов, в частности, требующих больших токов, намечена в упомянутом докладе преприята ФИАН и НИИЭФА.

Livingston: In the past when higher quality or intensity became available, physicists were quite successful in finding good experiments to use them; therefore if we have got machines with current 100 mka and $\frac{\Delta E}{E} = 10^{-4}$, then the physicists will be able to apply them.