

Переменно-фазовая фокусировка с плывущим центром сгустка

В.А. Бомко, Ю.П. Мазалов, Ю.В. Мелешкова
ИНЦ Харьковский физико-технический институт, Украина

Проблема радиальной и фазовой устойчивости пучков в ускоряюще-фокусирующем канале линейного ускорителя протонов и тяжелых ионов продолжает быть актуальной, несмотря на более чем 50-летнюю историю развития этой области ускорительной техники. Способ создания одновременной радиальной и фазовой устойчивости определяет параметры ускоряющего канала в целом (угол захвата, жесткость фокусирующей системы, пропускную способность, темп ускорения, ток ускоренного пучка, потребляемую ВЧ-мощность, конструкцию ускоряющей структуры и т.д.).

Идея переменно-фазовой фокусировки (ПФФ), выдвинутая еще в 50-х годах независимо М.Гудом [1] и Я.Б.Файнбергом [2], содержала в себе потенциальную возможность нового подхода к обеспечению радиально-фазовой устойчивости с помощью фокусировки самим ВЧ-полем. В дальнейшем метод переменно-фазовой фокусировки прошел длинный путь совершенствования [3,4], в результате чего было установлено, что приемлемая радиально-фазовая устойчивость может быть достигнута в случае асимметричного переброса синхронной фазы, совмещенной с центром сгустка из области отрицательных фаз (группирующих сгусток) в область положительных фаз (радиально-фокусирующих сил).

Существенным шагом вперед явилось предложение использовать фокусирующий период, состоящий из нескольких ускоряющих периодов [5]. Тем не менее проблема темпа ускорения и потерь ВЧ-мощности осталась ввиду того, что для обеспечения одновременной радиальной и фазовой устойчивости и в этом варианте синхронную частицу необходимо перебрасывать в фазы -70° и в $+47^\circ$.

Известна также идея достижения определенной радиально-фазовой устойчивости путем использования структуры с нулевой синхронной фазой [6]. При условии, что энергия частиц в сгустке превышает энергию синхронной частицы в синхронной фазе, происходит перемещение частиц из области положительных фаз в отрицательные. Однако в этом варианте в положительных фазах пребывает незначительная часть сгустка и только непродолжительное время, поэтому неизменным условием являлось использование квадрупольных триплетов, которые и обеспечивали радиальную фокусировку. Использование $\varphi_s = 0$ давало очень небольшой угол захвата по фазам, не превышающий 30° .

Принцип рассматриваемого варианта переменно-фазовой фокусировки с плывущим центром сгустка (ПФФ с ПЦС) заключается в комбинации периодического переброса центра сгустка из области отрицательных фаз в положительные и наоборот, с постоянным превышением энергии центра сгустка над энергией синхронной частицы, как с положительными, так и с отрицательными фазами. В результате, на каждом участке все частицы сгустка перемещаются в процессе ускорения в направлении меньших фаз на плоскости $\Delta W, \varphi$, где ΔW — отклонение по энергии частиц в сгустке относительно энергии синхронной частицы; φ — фаза частиц в сгустке. При этом происходят непрерывная деформация формы фазового портрета сгустка и пере-

мещение частиц относительно центра сгустка, сопровождающееся затуханием фазовых колебаний частиц. Баланс между противоречивыми требованиями радиальной и фазовой устойчивостей достигается подбором диапазона переброса фаз, количеством ускоряющих периодов на длине фокусирующего и группирующего участков, а также степенью превышения энергии центра сгустка относительно энергии синхронной частицы.

Значительное расширение угла захвата (до 120°) в рассматриваемом варианте при достаточном радиально-фокусирующем эффекте и достаточно высоком темпе ускорения достигается за счет комплекса факторов, главные из которых следующие:

1. Синхронная фаза как в области положительных, так и отрицательных фаз значительно отличается от нуля.

2. Первые три ускоряющих периода являются группирующими поэтому синхронная фаза структуры выбирается большой по абсолютной величине -70° .

3. Сгруппированный сгусток с помощью соответствующего увеличения длины трубки дрейфа перебрасывается в область положительных фаз, где ускоряющая структура рассчитана на меньшую энергию (около 5%), чем энергия центра сгустка. Оптимальной величиной фазы, в которую перебрасывается центр сгустка является $+45^\circ$. Протяженность участка ускорения в положительных фазах составляет 3..4 ускоряющих периода. Участок заканчивается, когда большая ось эллипса портрета сгустка на плоскости ΔW , ϕ в результате превышения энергии, переориентируется на 90° по отношению к положению его оси на выходе из группирующего участка.

4. Сфокусированный сгусток перебрасывается в область отрицательных фаз, при этом частица, находящаяся в правом эксцентриситете эллипса портрета сгустка (опорная частица), помещается в фазу, равную -30° . Энергия синхронной частицы участка с отрицательными фазами также уменьшена по отношению к энергии опорной частицы на ту же величину (около 5%). Количество ускоряющих периодов на этом участке выбирается таким, чтобы большая ось эллипса сгустка в центре последнего зазора на участке структуры заняла положение под углом 90° по отношению к ее ориентации на выходе из фокусирующего участка (практически это достигается на протяжении 3–4 ускоряющих периодов).

5. На последующих участках ускоряющей структуры с периодическим чередованием положительных и отрицательных фаз повторяются описанные в пунктах 3 и 4 действия с некоторой коррекцией количества ускоряющих периодов, сдвига по фазе и степени превышения энергии центра сгустка по отношению к синхронной фазе. С ростом энергии частиц в сгустке размах переброса фаз может уменьшаться. Это позволяет постепенно повышать темп ускорения.

6. Превышение энергии центра сгустка над энергией синхронной частицы на участках ускорения как в области положительных, так и отрицательных фаз, приводит к деформации эллипса, уплыванию всего сгустка и перемешиванию частиц по отношению к центру сгустка.

7. Оптимальные условия радиальной и фазовой устойчивостей требуют при переходе на некоторые участки с отрицательной синхронной фазой использовать кратный дрейф, обычно это выражается в удлинении трубки дрейфа на величину, равную $\beta\lambda$. Это способствует более эффективному группирующему действию при сохранении радиальной сходимости пучка после участка с положительной синхронной фазой, но

ведет к потере темпа ускорения. Обычно такой метод применяется на начальном этапе ускорения. После того как сгусток сформирован и диапазон переброса по фазам уменьшается, необходимость в кратном дрейфе отпадает.

В качестве иллюстрации ниже приведены данные по расчету динамики частиц в канале переменного-фазовой фокусировки с плывущим центром сгустка для ускоряющей структуры тяжелых ионов встречно-штыревого типа со знакопеременным законом распределения поля в зазорах между трубками дрейфа (π -волна). Структура рассчитана на 3-кратное увеличение скорости тяжелых ионов с большим отношением массового числа к зарядовому ($A/q=32$). Общее число ускоряющих периодов 38.

На рис.1 и 2 приведены два типичных фазовых портрета сгустка ускоряемых ионов. Первый из них представляет сгусток на выходе из участка ускоряющей структуры с положительной синхронной фазой, второй — портрет сгустка на выходе из участка с отрицательной фазой.

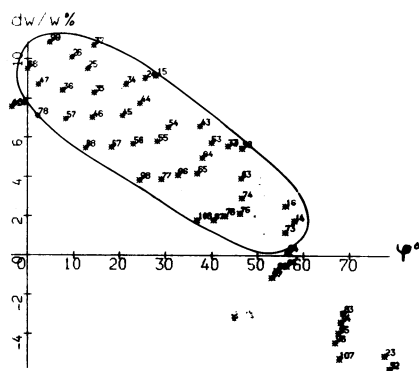


Рис. 1:

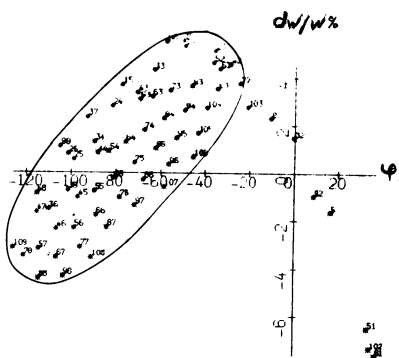


Рис. 2:

На рис.3 приведена сепаратриса, определяющая захват ионов по фазе и энергии в процесс ускорения на входе в ускоряюще-фокусирующий канал. Как видно, размеры сепаратрисы как по фазе, так и по энергетическому захвату превышают соответствующие параметры жестко-фокусирующего канала.

На рис.4 приведен радиальный аксептанс на плоскости r, r' , из которого видно, что геометрический аксептанс составляет 250 мм-мрад, что также находится на уровне динамики в жестко-фокусирующем канале.

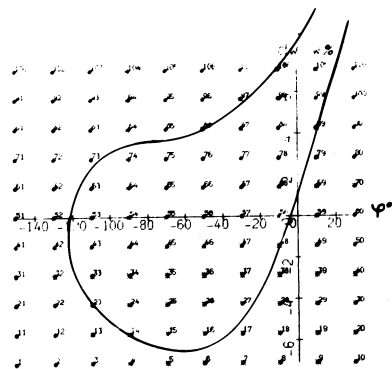


Рис. 3:

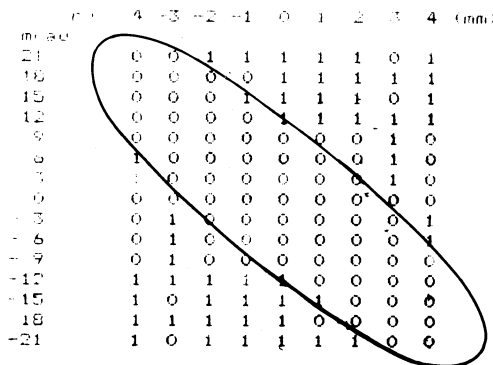


Рис. 4:

Список литературы

- [1] M.L.Good. Phys.Rev., 92 (1953), 538.
- [2] Ja.B.Fainberg. Proc. Symp. on High Energy Acceler. and Pion Phys., v.1, Geneva CERN, 1956, p.91.
- [3] В.В.Кушин. Атомная энергия, т.29, в.2, 1970, с.123.
- [4] В.В.Кушин, В.М.Мохов. Атомная энергия, т.35, в.2, 1973, с.192.
- [5] В.Г.Папкович, Н.А.Хижняк, Н.Г.Шулика. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, в.2(2), Харьков, 1978, с.51.
- [6] U.Ratzinger, E.Nolte, R.Geier and H.Morinaga. Nucl. Instr. and Meth., A 263 (1988), 261.