

Динамика частиц в линейном ускорителе ионов на базе переменнo-фазовой фокусировки с плывущим центром сгустка

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

Введение

Вариант переменнo-фазовой фокусировки с плывущим центром сгустка (ПФФ с ПЦС) уже дискутировался ранее на предыдущем XV Сессии по ускорителям заряженных частиц [1] и на XV Международном семинаре по линейным ускорителям заряженных частиц [2].

Основной особенностью рассматриваемого метода ПФФ является несовпадение как по энергии, так и по фазе центра сгустка ускоряемых частиц с энергией и фазой синхронной частицы, на которую рассчитывается структура участков ускорителя. В процессе ускорения такой центр сгустка плывет относительно синхронной фазы. Во всех предыдущих вариантах ПФФ так же, как и в ускоряющих структурах с жестко-фокусирующим каналом и ПОКФ, центр сгустка всегда совпадал с синхронной фазой и приращение энергии вдоль ускоряющей структуры оценивалось по энергии синхронной частицы. В рассматриваемом варианте понятие «синхронной частицы» не имеет физического смысла так как в момент прохождения центра зазора весь сгусток находится по энергии выше условной «синхронной частицы», и фаза центра сгустка сдвинута относительно синхронной фазы.

Идея несовпадения синхронной фазы с центром сгустка рассматривалась ранее при разработке постускорителя в Мюнхенском технологическом университете [3]. Однако вследствие того, что в качестве синхронной выбиралась нулевая фаза ($\phi_s=0$), захват в процесс ускорения как по продольному, так и по радиальному движению был мал, поэтому радиальная устойчивость обеспечивалась в основном за счет квадрупольных магнитных триплетов, чередующихся с участками ускоряющей структуры, а фазовый захват не превышал 30° .

Принцип рассматриваемого варианта 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 $\Delta W, \phi$, 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 перемещение частиц относительно центра сгустка, сопровождающиеся 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.

В результате исследования радиально-фазовой устойчивости, основанной на принципе ПФФ с ПЦС, апробированной ранее в расчете динамики пучка в линейном ускорителе тяжелых ионов с большим отношением массового числа ионов к зарядовому и протонного варианта ускорителя на базе ускоряющей структуры встречно-штыревого типа была достигнута значительная величина угла захвата (выше 100°) при достаточном радиально-фокусирующем эффекте (нормализованный аксептанс $0,6 - 1,78$) и высоком темпе ускорения ($2,5 - 3$ МэВ/м).

Исследование динамики пучка в линейном ускорителе ПФФ с ПЦС

Дальнейшее совершенствование методики ПФФ с ПЦС проводилось в процессе расчета линейного ускорителя тяжелых ионов с большим отношением массового числа к зарядовому $A/q = 32$. Такой ускоритель прорабатывается нами уже на протяжении последних трех лет. Его назначение – новая предобдирочная секция ЛУМЗИ (ПОС-32), которая должна заменить существующую секцию, рассчитанную на $A/q = 15$. Это позволит значительно расширить диапазон масс ускоряемых ионов.

Оптимизация характеристик ПОС-32 направлена на разработку ускорителя конструктивно простого, дешевого, эффективного по потреблению электроэнергии и с лучшими параметрами пучка. Предыдущие разработки показали, что этих целей можно достичь, используя встречно-штыревую ускоряющую структуру [5] на базе ПФФ с ПЦС.

Начальное ускорение с группирующим действием в ПОС-32 осуществляется при достаточно большой по абсолютной величине синхронной фазе (-70°). На последующих группирующих участках абсолютная величина синхронной фазы по мере уменьшения протяженности сгустка уменьшается последовательно до -60° , а затем до -50° .

Переброс сгустка из участка с отрицательной синхронной фазой в участок с положительной синхронной фазой осуществляется за счет соответствующего удлинения переходной трубки дрейфа. Обратный переброс в нашем варианте укладывается в размеры укороченной переходной трубки дрейфа, без присущего, например, варианту МПФФ [4] использования вставки длиной $\beta\lambda$, которое, кроме соответствующей потери темпа ускорения, приводит в процессе дрейфа к дополнительной расфокусировке и удлинению сгустка по фазам.

Все частицы из непрерывного пучка, инжектируемого в линейный ускоритель, находящиеся в пределах разброса по энергии $\Delta W/W = \pm 5\%$ и фазовой протяженностью 100° , захватываются в процесс устойчивого радиально-фазового движения до расчетной энергии. Полученный угол захвата несколько выше, чем в случае жестко-фокусирующего канала.

Рис.1 представляет фазовый портрет сгустка на выходе из первого группирующего участка с $\phi_s = -70^\circ$, состоящего из 2 ячеек, а рис.2 – на выходе из первого фокусирующего участка, в котором 3 ячейки с $\phi_s = +45^\circ$ и сдвиг по энергии центра сгустка относительно синхронной составляет на входе $+20\%$. На рис.3 приведены совмещенные в одном масштабе портреты сгустков в центре последнего из зазоров на участках группирующего и фокусирующего действия. Как видно, произошел отсев частиц, находящихся вне пределов сепаратрисы. Фазовые портреты сгустков условно укладываются в эллипсы, расположенные перпендикулярно друг другу.

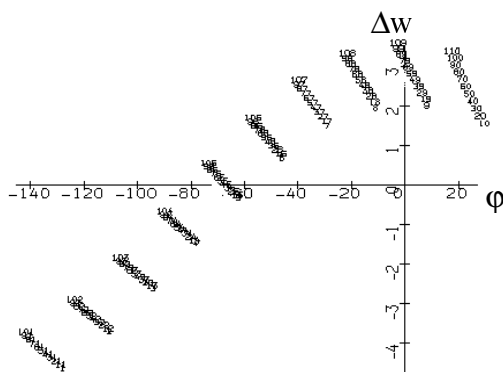


Рис. 1: Фазовый портрет сгустка на выходе первого группирующего участка.

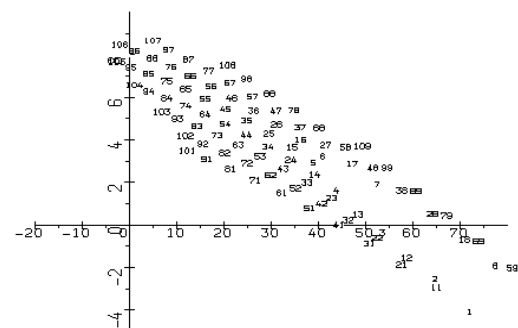


Рис.2: Фазовый портрет сгустка на выходе первого фокусирующего участка.

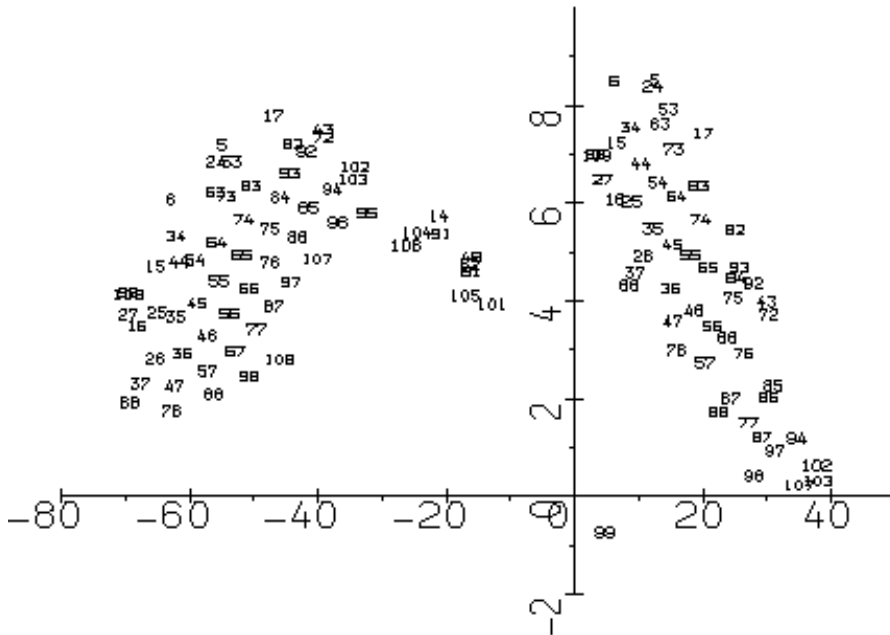


Рис.3: Фазовый портрет на выходе 7- и 8-го участков.

Расчет ускоряющей структуры и динамики частиц в процессе ускорения оптимизировался по фазовому и радиальному движениям и проводился в одночастичном приближении. Неучет расталкивающего действия заряда сгустка позволил детально исследовать динамику частиц, процесс формирования сгустков, а также определить оптимальные условия достижения наибольшей величины продольного и радиального аксептансов. В качестве регулирующих факторов использовался перебор таких величин как количество ячеек на участке, величина переброса по фазе от участка к участку, степень превышения по энергии центра сгустка относительно энергии «синхронной частицы». В процессе оптимизации динамики частиц по радиальному движению рассматривались опорные траектории условных частиц, которые на входе в ускоритель находились на радиусах 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 мм и с угловыми характеристиками $-6, -3, 0, +3, +6$ мрад. Расчет оптимизировался по траекториям радиального движения и размерам, ориентацией и положением эллипсов фазового портрета.

Выполнен расчет радиального аксептанса условной частицы, находящейся в центре исходной сепаратрисы. На рис.4 представлен радиальный аксептанс фокусирующего канала. Видно, что его геометрическая величина составляет $350 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, а нормализованный аксептанс $-1,2 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Эти величины находятся на уровне радиальных аксептансов ПОКФ и жестко-фокусирующих каналов.

В таблице приведены характеристики ускоряющей структуры ПОС -32, в основе которой лежит встречно-штыревая ускоряющая структура с фокусирующим каналом типа ПФФ с ПЦС.

$R_0, \text{мм}$ мрад	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
39	0	0	0												
36	0	0	0												
33	0	0	0	0											
30	0	0	0	0	0										
27	0	0	0	0	0	0									
24	0	0	0	0	0	0	0								
21	0	0	0	0	0	0	0	0							
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис.4: Радиальный аксептанс линейного ускорителя ПОС-32 .

Характеристики ускорителя ПОС -32.

Энергия ионов на входе, кэВ/н	14
Энергия ионов на выходе, кэВ/н	655
Отношение массового числа ионов к зарядовому A/q	32
Рабочая частота, МГц	23,7
Градиент электрического поля в зазорах, МВ/м	95
Длина ускоряющей структуры, м	6
Количество трубок дрейфа	48
Апертура трубок дрейфа, мм	16-24
Синхронная фаза группирующего участка, град	70-45
Синхронная фаза фокусирующего участка, град	45-20
Количество группирующих участков	7
Количество фокусирующих участков	7
Темп ускорения, МэВ/м	3,2
Продольный захват, град	100
Продольный аксептанс, кэВ мрад	180
Радиальный аксептанс, мм · мрад	495
Нормализованный рад. акс., π мм · мрад	0,87

Список литературы

1. В.А.Бомко, Ю.П.Мазалов, Ю.В.Мелешкова. Вариант переменного-фазовой фокусировки с плавущим центром сгустка. 15-е Совещание по уск. зар. частиц, Протвино, 1996, т.2, с.50-53.
2. В.А.Бомко, Ю.П.Мазалов, З.Е.Птухина. Линейный ускоритель протонов с переменной фазовой фокусировкой с плавущим центром сгустка. 15-й Междунар. Семинар по линейным ускорителям заряженных частиц. - Алушта, 1997. Аннотации докладов.
3. U.Ratsinger, E.Nolte, R.Geier et al. Nucl. Instr. and Meth., A 263 (1988), 261.
4. В.Г.Папкович, Н.А.Хижняк, Н.Г.Шулика. ВАНТ, сер.Техника физ.эксп, вып. 2(2), Харьков, 1978, 51.