

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ (ПОКФ) ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

*В.А. Бомко, Б.В. Зайцев, Е.В. Ивахно, А.Ф. Кобец, К.В. Павлий,
З.Е. Птухина, С.С. Тишкин*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Обсуждаются результаты оптимизационных расчетов ускоряющей структуры, обеспечивающей формирование и ускорение пучков тяжелых ионов на участке предобдирочной секции линейного ускорителя многозарядных ионов (ЛУМЗИ). Секция с ПОКФ рассчитывается на ускорение пучков тяжелых ионов интенсивностью 10 мА, отношением массового числа к зарядовому $A/q \leq 20$, энергией от 6 до 150 кэВ/нукл. Рабочая частота, как и в основной секции ускорителя, составляет 47,2 МГц. В основу расчетов положен вариант формирования сгустков пучка, представляющий собой комбинацию участка с адиабатическим характером изменения параметров пучка и участка с высоким темпом ускорения. Оптимизирован процесс роста коэффициента модуляции электродов высокочастотных квадрупольей, создающих фокусирующее и ускоряющее поле, а также характер изменения величины синхронной фазы от -80 до -22° . Длина участка ускорения структуры с ПОКФ составляет 4,28 м, количество ячеек ускоряющей структуры 165, коэффициент захвата ионов в процесс ускорения составляет 75%.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой берет начало с 1970 года, когда И.М. Капчинский и В.А. Тепляков опубликовали статью «Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой» [1]. Последовавшие за этим новые публикации этих авторов [2,3,4] заложили физические и технические основы создания линейных ускорителей этого типа, обеспечивающих эффективное формирование пучков ионов на начальной стадии ускорения. Несколько позже, в Лос-Аламосе (США) этот тип ускоряющей структуры был всесторонне исследован, в результате чего к 1979 г. были созданы компьютерные программы по моделированию геометрических характеристик и динамики пучков в процессе ускорения, обеспечивающие радиальную и продольную устойчивость сгустков сильноточных пучков ускоряемых ионов [5,6]. С тех пор в зарубежной литературе этот тип ускоряющей структуры значится под названием «Radio frequency quadrupole» (RFQ). В дальнейшем ускоряющие структуры этого типа начали широко внедряться в лабораториях, где имелись в наличии или создавались новые линейные ускорители протонов и тяжелых ионов. Такой успех был вызван неординарными особенностями структуры ПОКФ, основные из которых заключались в следующем:

1. Радиальная устойчивость пучка в процессе ускорения осуществлялась высокочастотными полями, создающими пространственно-однородный фокусирующий квадрупольный эффект вдоль канала структуры. Поэтому фокусирующая сила не зависит от скорости ионов. Это дает возможность значительно снизить энергию инжекции и соответственно упростить высоковольтное оборудование инжектора.

2. Модуляция полюсов электродов, обращенных к оси, позволяет создать продольное электрическое поле, обеспечивающее ускорение и группировку пучка.

3. Глубина модуляции и закон изменения синхронной фазы вдоль ускоряющей структуры меняются таким образом, что обеспечивается ускорение квазистационарных сгустков. Это позволяет захватить в процесс ускорения сгустки с первоначальной фазовой протяженностью 360° при начальной синхронной фазе -90° .

4. Ограничения тока ускоряемых частиц, связанные с кулоновским расталкиванием, в квазистационарных сгустках практически отсутствуют. По мере ускорения сгустки сжимаются по фазе, сохраняя постоянные геометрические размеры. При этом сохраняется средний ток пучка. Пиковый ток сгустка при начальной энергии близок к среднему, так что максимальное значение среднего тока, несмотря на низкую энергию инжекции, оказывается высоким.

5. Применяемые модификации ускоряющих структур для ПОКФ позволяют значительно увеличить рабочую длину волны, что, в свою очередь, способствует увеличению предельного тока пучка, величина которого пропорциональна квадрату длины волны. Фактор увеличения рабочей длины волны особенно важен при создании линейных ускорителей тяжелых ионов, учитывая, что скорость ионов с большим отношением массового числа к зарядовому сравнительно невелика.

Ниже приведены результаты разработки ускоряющей структуры типа ПОКФ применительно к начальной части линейного ускорителя многозарядных ионов (ЛУМЗИ), рассчитываемой на значительное расширение диапазона масс и увеличение тока пучков ускоряемых ионов с учетом особенностей используемого оборудования.

2. ПРЕДОБДИРОЧНАЯ СЕКЦИЯ ЛУМЗИ

Линейный ускоритель многозарядных ионов позволяет ускорять ионы с начальным отношением массового числа к зарядовому $A/q \leq 15$, энергией

инжекции от 30 кэВ/нукл. до 8,5 МэВ/нукл. При этом инжектор представляет собой сложную систему высоковольтного оборудования, работающего под потенциалом до 500 кВ с длительностью импульса 300 мкс и частотой посылок 2...5 Гц. Ионы, получаемые из источника типа дуоплазмотрон с током около 10 мА, формируются в пучки с требуемыми радиальными характеристиками и подаются на вход в предобдирочную секцию ЛУМЗИ, рассчитанную на ускорение от 30 до 975 кэВ/нукл. Эта предобдирочная секция (ПОС-15), как и основная секция ЛУМЗИ, сооружена на базе встречноштыревой ускоряющей структуры, позволяющей применить высокочастотное питание с рабочей длиной волны 6,36 м и отличается высокими электродинамическими характеристиками. Однако, в отличие от основной секции, где фокусировка пучка осуществляется магнитными квадрупольями с импульсной системой питания, ПОС-15 была сооружена на базе сеточной фокусировки, которой, наряду с наиболее высоким темпом ускорения, свойственны потери пучка за счет малого угла захвата и за счет рассеяния на сетках. Практически ток пучка, например, ионов N^+ , на выходе ПОС-15 составляет 140 мкА в импульсе, поэтому на выходе основной секции ток ионов N^{5+} составляет 30 мкА, или 10^{10} частиц за импульс.

В настоящее время осуществляется разработка новой предобдирочной секции с увеличенным отношением $A/q = 20$, что позволит ускорять ионы Ar^{2+} , Fe^{3+} , Kr^{4+} и других элементов, отношение массового числа к зарядовому которых находится в указанных пределах. В основу начальной части ПОС-20 предполагается положить структуру ПОКФ (RFQ), которой свойственны указанные выше преимущества.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАСЧЕТА СТРУКТУРЫ ПОКФ

Процесс адиабатического сжатия сгустков в ускоряющей структуре с ПОКФ выполняется при условии, что соблюдается оптимальная процедура изменения глубины модуляции электродов (m), а также величины синхронной фазы сгустков (φ_s) и апертурного канала (a). Эффективность ускорения T (фактор времени пролета) и фокусировки (χ), определяются из равенств:

$$T = \frac{(\pi/4)(m^2 - 1)}{[m^2 I_0(ka) + I_0(mka)]}, \quad (1)$$

$$\chi = \frac{[I_0(ka) + I_0(mka)]}{[m^2 I_0(ka) + I_0(mka)]},$$

где $k = 2\pi/\beta\lambda$; $\beta = v/c$ – относительная скорость ионов; λ – рабочая длина волны. При этом:

$$\chi = 1 - 4TI_0(ka)/\pi. \quad (2)$$

Геометрическая длина сепаратрисы составляет:

$$Z_c = v_s / \omega \cdot \Phi(\varphi_s), \quad (3)$$

где v_s – скорость синхронной частицы; ω – частота ВЧ-колебаний; $\Phi(\varphi_s)$ – фазовая протяженность сепаратрисы. Отсюда следует, что, если уменьшать синхронную фазу вдоль оси так, чтобы сохранялась

величина $\Phi(\varphi_s)v_s = const$, то геометрическая длина сепаратрисы будет постоянной. С другой стороны, условие $T \sin(\varphi_s)/v_s^2 = const$ обеспечивает сохранность всех фазовых траекторий. Таким образом, в области адиабатического процесса группировки при заданных величинах начальной и конечной синхронных фаз (φ_0 и φ_k) эффективность ускорения (T_0 и T_k) и энергия (W_0 и W_k) связаны соотношениями:

$$T_0 = T_k(W_0 \sin \varphi_k / W_k \sin \varphi_0), \quad (4)$$

$$\Phi(\varphi_0) = \Phi(\varphi_k) \sqrt{W_k / W_0},$$

при этом

$$tg(\varphi_s) = -(\Phi_c - \sin \Phi_c) / (1 - \cos \Phi_c). \quad (5)$$

4. ВЫБОР ВАРИАНТОВ ПОКФ

Основываясь на приведенных соотношениях, нами была составлена программа расчета параметров ускоряющей структуры на участке адиабатической группировки. В процессе расчетов определялось увеличение энергии частиц W , ускоряемых вдоль канала, эффективность ускорения T , текущая апертура a (расстояние электродов до оси в поперечных сечениях, где электроды равноудалены от оси), глубина модуляции электродов m , синхронная фаза φ_s , а также продольные размеры ячеек вдоль оси, $L = \beta\lambda/2$, и рост длины ускоряющей структуры z .

В качестве исходных значений параметров были определены величины: начальная энергия ионов $W_0 = 6$ кэВ/нукл. = 120 кэВ, $A/q = 20$, рабочая длина волны $\lambda = 6,36$ м, максимальная глубина модуляции $m = 2$, минимальный радиус апертуры $a = 0,5$ см, средний радиус апертуры $R_0 = a(m+1)/2 = 0,75$ см.

Первоочередной задачей было определение оптимальных значений следующих параметров группирующего участка структуры с квазистационарными параметрами пучка: конечная энергия частиц, W_k , величина синхронной фазы на входе, φ_0 , фазовая длина входной сепаратрисы, Φ_0 , величина синхронной фазы на выходе из участка, φ_k , жесткость фокусировки, B , обеспечивающей устойчивую радиальную динамику в зависимости от фактора дефокусировки, Δ , согласно диаграмме устойчивости Смитта-Глюкстерна [7]. Величины B и Δ определяются из равенств:

$$B = \frac{eqV\chi\lambda^2}{20mc^2a^2}, \quad \Delta = \frac{eqTV\pi \sin \varphi_s}{10\beta^2 m_0 c^2}. \quad (6)$$

В результате оптимизационных расчетов, в которых указанные параметры варьировались в допустимых пределах, было установлено, что для таких больших значений $A/q=20$ группирующий участок структуры, обеспечивающий получение оптимальных параметров, становится очень длинным. Поэтому потребовался поиск других подходов к параметрам ускоряющей структуры.

В настоящее время в мировой практике создания ускоряющих структур ПОКФ, пригодных для уско-

рения пучков тяжелых ионов с малой интенсивностью порядка 100 мкА, используется методика, предложенная Yamada [8]. В этом случае структура ПОКФ подразделяется на 6 участков:

1. Радиальное согласование (radial matching structure).
2. Продольное формирование сепаратрисы (shaper).
3. Предварительная группировка пучка (prebuncher).
4. Группирователь (buncher).
5. Бустер (buster).
6. Участок ускорения (accelerating section).

Отличие варианта Yamada заключается в том, что на новом участке группировки (prebuncher) имеет место компрессия сгустков за счет быстрого изменения синхронной фазы (к примеру, от -90 до -75°). Это не сказывается особенно на других параметрах сгустка, так как в случае слаботочных пучков частицы получают предварительную группировку на участке shaper, сосредоточившись в середине сгустка. В дальнейшем участок с квазистационарным процессом группировки (gentle buncher) образуется по обычному закону.

В нашем варианте осуществление методики Yamada наталкивается на ряд трудностей. Во-первых, наша структура рассчитывается на входной ток пучка около 10 мА, а, во-вторых, использование участка shaper невозможно при слабой технологической базе, так как в этом случае требуется выполнение коэффициента модуляции $m=0,01$ на довольно большом количестве ячеек. При указанных выше параметрах ускоряющего канала, порядка 10 мм, такая величина коэффициента модуляции определяет размер около 100 мкм.

Мы пошли по другому пути. Упрощение процесса формирования пучка осуществляется за счет увеличения синхронной фазы на входе в секцию ПОКФ от -90 до -80° . При этом, как следует из равенства (5), длина входной сепаратрисы уменьшится от 360 до 270° , следовательно, в процесс ускорения будет захвачено 75% частиц. Такой подход исключает необходимость группировки частиц, находящихся на отдаленных расстояниях от синхронной фазы, которая протекает на значительной длине ускоряющей структуры и большом количестве ячеек малых размеров. Кроме того, как видно из соотношений (6), фактор дефокусировки пропорционален $\sin\phi_s$ и обратно пропорционален β^2 . Следовательно, увеличение $(-\phi_s)$ и более быстрое изменение β снижает фактор дефокусировки, компенсируя при этом более быстрое увеличение фактора времени пролета, T , увеличивающее темп ускорения. В этом случае компоновка ускоряющей структуры упрощается и состоит из участков радиального формирования (RMS), участка адиабатической группировки (gentle buncher), бустера и участка ускорения (acceleration section).

5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ПОКФ ДЛЯ ПОС-20

В результате оптимизационных исследований выполнен расчет ускоряющей структуры при условии, что входная синхронная фаза составляет -80° . Полученные величины параметров структуры ПОКФ приведены в таблице. Как видно, на участке адиабатики длиной 153 см ионы ускоряются от 6 до 36 кэВ/нукл. При этом синхронная фаза увеличивается от -80 до -36° .

Параметры участка ПОКФ секции ПОС-20

Наименование параметра	RMS	Адиабатика	Бустер	Ускорение
Энергия на входе, кэВ/нукл.	6	6	36	100
Энергия на выходе, кэВ/нукл.	6	36	100	150
Рабочая частота, МГц	47,2	47,2	47,2	47,2
Разность потенциалов, В	10^5	10^5	10^5	10^5
Длина участка, см	13,63	153,12	128,87	125,20
Количество ячеек	12	95	34	24
Средн. радиус апертуры, см	–	0,75	0,75	0,75
Радиус апертуры, см	1,2...0,75	0,70...0,50	0,50	0,50
Фактор фокусировки, В	–	3,33...4,68	3,54	3,55
Фактор дефокусировки, Δ	–	0,018...0,11	–0,034	–0,018

На входе в структуру ПОКФ располагается секция радиального формирования пучка. Она предназначена для согласования независимого от времени радиального эмиттанса инжектируемого пучка со структурой, фокусирующий канал которой зависит от времени. Этот участок представляет собой квадрупольные электроды гладкого профиля с апертурой сходящегося радиуса, который меняется вдоль оси согласно соотношению [9]:

$$(a/r_0)^2 = 8/(\sin kz + \sin 3kz). \quad (7)$$

Процесс изменения основных параметров на участках ПОКФ предобдирочной секции ПОС-20 изображен на Рис. 1.

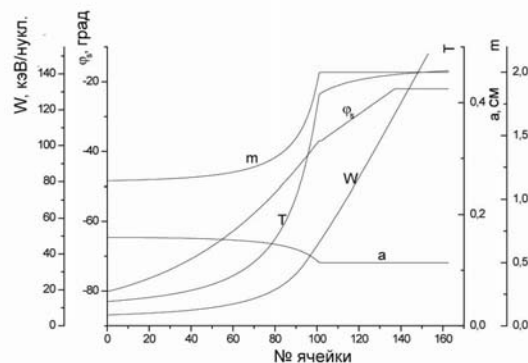


Рис. 1. Параметры электродов вдоль канала структуры ПОКФ: W – энергия синхронной частицы; a – радиус апертуры; m – коэффициент модуляции; ϕ_s – синхронная фаза

Видно, что все параметры медленно меняются в начале адиабатического участка структуры, достигая к концу участка требуемых величин, которые обеспечивают квазистационарную группировку частиц в сгустки. Эффективность ускорения в конце этого участка достигает $T=0,415$, при этом эффективность фокусировки удерживается на уровне $V=3,33\dots 4,68$ при величине дефокусирующего параметра, находящегося в пределах $\Delta = -(0,018\dots 0,108)$, что достаточно для удержания радиальных характеристик пучка в зоне устойчивости диаграммы Смита-Глюкстерна [7].

За участком адиабатики следует бустерный участок длиной 128,8 см с постоянными величинами $m=2$ и $a=0,5$ см, где имеет место более высокий темп ускорения и величина синхронной фазы увеличивается от -36 до -22° , а энергия растет до 100 кэВ/нукл. Последний участок, где постоянны величины m , T , a , φ_s , обеспечивает ускорение ионов до 150 кэВ/нукл., на длине 120 см. Таким образом, суммарная длина структуры ПOKФ составляет 428 см при общем количестве ячеек 165.

6. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Описанная выше ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой базируется на встречно-штыревом варианте, в котором резонатор возбуждается на волне H_{110} (H-RFQ). Разработка этой структуры и ее внедрение в действующие ускорительные установки осуществлена в ХФТИ [11,12] и в дальнейшем широко используется в лабораториях, где сооружаются линейные ускорители тяжелых ионов [13]. ПOKФ в начальном варианте в ИТЭФ и других лабораториях базировалась на структуре четырехкамерного резонатора, возбуждаемого на волне H_{210} . Наш выбор основан на следующих предпосылках:

1. Внутренний диаметр резонатора почти в 2,5 раза меньше, чем в четырехкамерном резонаторе, возбуждаемом на той же частоте. Эта особенность имеет

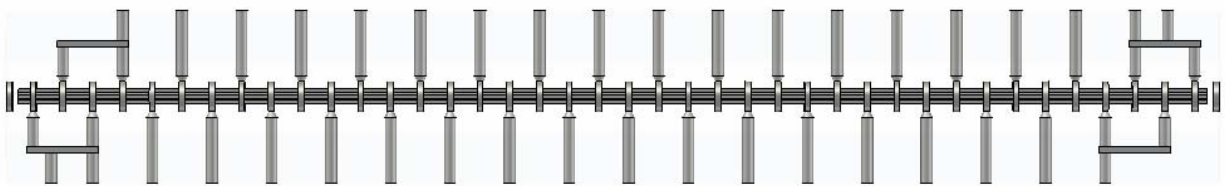


Рис.3. Общий вид структуры ПOKФ для ПОС-20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приводятся результаты исследований по разработке ускоряющей структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПOKФ), предназначенной для начального участка новой предобдирочной части ЛУМЗИ. Особенностью выбранного варианта структуры является большое отношение массового числа ускоряемых ионов к зарядовому, $A/q \leq 20$, что при достаточно высоком токе ускоряемого пучка (до 10 мА) потребовало бы большой длины участка адиабатической группировки сгустков и большо-

большое значение для ускорителей тяжелых ионов, где требуется как можно большая рабочая длина волны.

2. В четырехкамерном резонаторе диапазон частот рабочей волны перекрывается спектром частот дипольных мод, которые сильно затрудняют возбуждение ВЧ-мощностью. Отстройка их на допустимое расстояние требует специальных мер, усложняющих конструкцию.

3. Особенностью H_{110} -волны является сильная ВЧ-связь вдоль резонатора продольным магнитным полем, что позволяет строить длинные ускоряющие структуры со стабильным распределением напряжений вдоль оси резонатора.

Схематический вид конструкции ускоряющей структуры с ПOKФ представлен на Рис.2, где приведен небольшой ее участок.

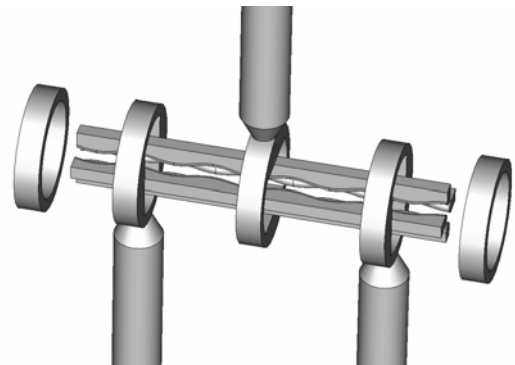


Рис.2. Схематический вид участка структуры ПOKФ для ПОС-20

На Рис.3 приведена общая схема структуры для ПОС-20, основанная на встречно-штыревом варианте. Внутренний диаметр резонатора при резонансной частоте 147,2 МГц составляет 57,5 см. На входном и выходном концах структуры вмонтированы концевые резонансные элементы настройки, с помощью которых формируется равномерное распределение напряжения на электродах вдоль всего канала ускорения.

го количества ячеек модуляции электродов, образующих ВЧ-квадруполь. Оптимизационные расчеты привели к заключению, что приемлемым является вариант с увеличенной синхронной фазой до (-80°) . В основу участка ПOKФ предобдирочной секции ЛУМЗИ положена встречно-штыревая ускоряющая структура, конструкция которой является более простой по сравнению с общепринятым вариантом четырехкамерного резонатора. Разработана методика формирования равномерного распределения напряжения между электродами вдоль канала большой длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *ПТЭ*. 1970, № 2, с.19.
2. И.М. Капчинский, А.В. Тепляков // *ПТЭ*. 1970, № 4, с.17.
3. И.М. Капчинский // *ПТЭ*. 1977, № 4, с.23.
4. И.М. Капчинский. *Теория линейных резонансных ускорителей*. М.: «Энергоиздат», 1982.
5. R.H. Stokes, et al. RF Quadrupole beam dynamics // *IEEE Trans.* 1979, v.NS-26, p.3469.
6. K.R.Crandell, et al. Quadrupole beam dynamics study // *Proc of LINAC, Montauch.* 1979, p.2005.
7. И.М. Капчинский. *Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях*. М.: «Атомиздат», 1966.
8. S. Yamada. Buncher section optimization of heavy ion RFQ linac // *Proc. 1989 Linear Conf.* Santa Fe, LA, 9234-C.
9. N. Metrotra, et al. Beam dynamics of the heavy ion RFQ with prebuncher // *PAC2006*. №297, p.264.
10. V. Tokuda and S. Yamada. New formulation the RFQ Radial matching section // *Proc. 1981 LINAC Conf.* Santa Fe, LA, p.313.
11. В.А. Бомко, Е.И. Ревуцкий // *ЖТФ*. 1964, т.34, в.7, с.1259.
12. V.A. Bomko, et al. // *Review of Sc. Instr.* 1998, v.69, № 10, p.3537.
13. U. Ratzinger, et al. The RFQ section of the new UNILAC prestripper accelerator at GSI // *EPAC*. 1996, p.304.

Статья поступила в редакцию 06.10.2009 г.

ACCELERATING STRUCTURE WITH RADIO-FREQUENCY QUADRUPOLE, RFQ, FOR THE HEAVY IONS ACCELERATING

V.A. Bomko, B.V. Zaitsev, E.V. Ivachno, A.F. Kobets, K.V. Pavlii, Z.E. Ptukhina, S.S. Tishkin

Results of the optimization calculations RFQ accelerating structure, provided forming and acceleration heavy ion beams on the beginning part of the Multi-charged Linear Accelerator (MILAC) are discussion. Structure RFQ designed on the heavy ion beams current 10 mA with $A/q \leq 20$. Ion energy change from 6 to 150 keV/u. Design frequency put together 47.2 MHz, that is equal frequency of the mine MILAC section. Version of the beam bunches forming which have been putting in calculation, is combination of the structure with adiabatic character beam parameter and of the structure with high duty factor acceleration. Process RFQ electrode modulation coefficient increasing and character changing of the synchronous phase from -80 to -22° have been optimized. Length RFQ-structure is 4.28 m and cells number is 165. Capture coefficient of the ions in accelerating process is 75%.

ПРИСКОРЮВАЛЬНА СТРУКТУРА ІЗ ПРОСТОРОВО-ОДНОРІДНИМ КВАДРУПОЛЬНИМ ФОКУСУВАННЯМ (ПОКФ) ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ ПУЧКІВ ВАЖКИХ ІОНІВ

В.А. Бомко, Б.В. Зайцев, Є.В. Івахно, А.П. Кобець, К.В. Павлій, З.Є. Птухіна, С.С. Тишкін

Обговорюються результати оптимізованих розрахунків прискорювальної структури, що забезпечує формування й прискорення пучків важких іонів на ділянці предобдиркової секції лінійного прискорювача багатозарядних іонів. Секція з ПОКФ розраховується на прискорення пучків важких іонів інтенсивністю 10 мА, відношенням масового числа до зарядового $A/q \leq 20$, енергії від 6 до 150 кеВ/нукл. Робоча частота, як і в основній секції прискорювача, становить 47,2 МГц. В основу розрахунків покладено варіант формування згустків пучка, що представляє собою комбінацію ділянки з адиабатичним характером зміни параметрів пучка й ділянки з високим темпом прискорення. Оптимізовано процес росту коефіцієнта модуляції електродів височастотних квадруполів, що створюють фокусуюче й прискорювальне поле, а також характер зміни величини синхронної фази від -80 до -22° . Довжина ділянки прискорення структури з ПОКФ становить 4,28 м, кількість комірок прискорювальної структури 165, коефіцієнт захоплення іонів у процес прискорення становить 75%.