

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ФОКУСИРОВКИ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Б.В. Зайцев, С.С. Тишкин, Н.Г. Шулика

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

E-mail: tishkin@kipt.kharkov.ua

Рассмотрен ускоряюще-фокусирующий канал сильноточного линейного ускорителя тяжелых ионов с отношением массового числа к зарядовому $A/q \leq 20$. Канал рассчитан на формирование и ускорение пучка от энергии 100 кэВ/нукл. до 8,5 МэВ/нукл. Функционально в состав канала входят предобдирочная (энергия до 1 МэВ/нукл.) и основная секции (энергия до 8,5 МэВ/нукл.). Устойчивость движения ионов в предобдирочной и основной секциях обеспечивается комбинацией переменнo-фазовой и высокочастотной квадрупольной фокусировки. Предложена схема реализации данного типа фокусировки на базе ИН-структур. Проведено численное моделирование динамики пучка. Канал позволяет ускорять пучки ионов с током до 10 мА.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных линейных резонансных ускорителях ионов условно можно выделить следующие основные системы: инжектор (энергия до 120 кэВ), начальную часть ускорителя (НЧУ, энергия $\sim 2 \dots 7$ МэВ) и основную часть ускорителя (ОЧУ). В качестве НЧУ обычно применяется структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ или RFQ в английской транскрипции), предложенная В.А. Тепляковым и И.М. Капчинским [1]. В качестве ОЧУ используются структуры с трубками дрейфа и квадрупольными электромагнитными или твердотельными линзами, расположенными внутри трубок дрейфа или вне резонатора. Значительно упростить ускоряющие структуры ОЧУ можно, если для фокусировки частиц использовать самоускоряющее поле. Примером ускорителя, работающего без применения внешних фокусирующих устройств, является протонный инжектор на 30 МэВ «УРАЛ-30» [2]. Для фокусировки и ускорения пучка в основной части ускорителя в нем используется концепция «двойного зазора» [3].

Кроме этого, для обеспечения устойчивости движения частиц используются или предлагаются различные варианты переменнo-фазовой фокусировки (ПФФ). Однако в сильноточных вариантах ускорителей с ПФФ могут использоваться только такие режимы фокусировки, при которых очень медленно затухают продольные колебания частиц, что, в свою очередь, требует повышенной мощности ВЧ-питания. Изменить режимы ВЧ-фокусировки можно, если использовать комбинированную высокочастотную фокусировку (КВЧФ) [4].

В данной работе рассмотрены различные варианты комбинированной высокочастотной фокусировки для ускорителей тяжелых ионов, предложена схема их реализации на базе ИН-структур. Проведено численное моделирование динамики пучка в каналах с КВЧФ для частиц с отношением массового числа к зарядовому $A/q=20$ в диапазоне энергий 0,1...1 МэВ/нукл. и для частиц с отношением $A/q=5$ в диапазоне энергий 1...8,5 МэВ/нукл.

2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕГО КАНАЛА С КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

В общем случае задача построения ускоряюще-фокусирующего тракта линейного ускорителя является трехмерной и может включать все известные способы обеспечения радиально-фазовой устойчивости частиц. В настоящее время преимущественно используются два таких метода: ВЧ-квадрупольная [5] и переменнo-фазовая [6-8] фокусировки. Их совместное использование является физически непротиворечивым и позволяет строить ускоряюще-фокусирующие тракты линейных ускорителей для различных сортов частиц и диапазонов энергий.

Отметим отличие структур с КВЧФ от структур с «двойным зазором» (УРАЛ-30 и УРАЛ-30М). В последних для обеспечения радиально-фазовой устойчивости пучка в каждый ускоряющий зазор вводится дополнительный электрод, который разделяет зазор на две части: осесимметричную и квадрупольную. В первой части происходит ускорение и фазировка частиц, во второй – за счет введения дополнительных электродов («рогов») создается квадрупольная компонента поля. Периодическое изменение ориентации ВЧ-квадруполя в соседних ускоряющих периодах обеспечивает радиальную устойчивость движения частиц. При такой структуре ускоряющего периода значение синхронной фазы на осесимметричном участке должно быть отрицательным. Учитывая ограничения на длину периода, необходимые для поддержки синхронизма между движением частиц и ВЧ-полем, фаза частиц на квадрупольном участке периода жестко привязана к синхронной фазе в осесимметричном зазоре. В структурах с КВЧФ такого ограничения нет. Как и в каналах с ПФФ значение фазы синхронной частицы на ускоряющих периодах может быть как положительным, так и отрицательным. Это позволяет расширить возможности построения вариантов ускоряюще-фокусирующих периодов для различных

задач. В случае КВЧФ квадрупольный участок занимает не часть ускоряющего периода, а весь период, а следовательно, является более эффективным. Усилить фокусирующий эффект можно, используя сдвоенные участки (Рис.1). При этом возможно перейти к более высокой частоте, сохраняя приемлемую апертуру ускоряющего канала и увеличивая длину фокусирующего периода за счет осесимметричных ускоряющих зазоров. Это позволяет, с одной стороны, уменьшить геометрические размеры структуры, а с другой - повысить темп ускорения за счет дополнительных ускоряющих зазоров. Еще одним вариантом КВЧФ является сочетание переменнo-фазовой фокусировки и фокусировки высокочастотными триплетами (Рис.2) или использование концепции KONUS (Combined 0° Synchronous Particle Structure) [9] с заменой магнитных триплетов на высокочастотные. Конструктивной особенностью данного типа фокусировки является необходимость снижения разности потенциалов на квадрупольных участках относительно осесимметричных зазоров. Для ИИ-структуры осуществить такую регулировку можно азимутальным вращением штанги, на которой крепится центральная трубка дрейфа квадрупольного участка фокусировки. Для улучшения механической прочности можно использовать две симметричные штанги (см. Рис.1,2).

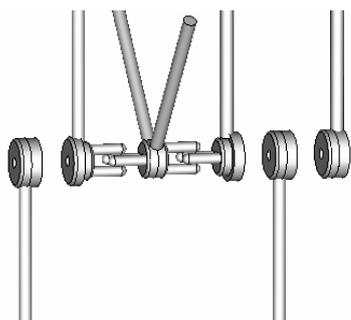


Рис.1. Участок ИИ-структуры, содержащий сдвоенный ВЧ-квадруполь

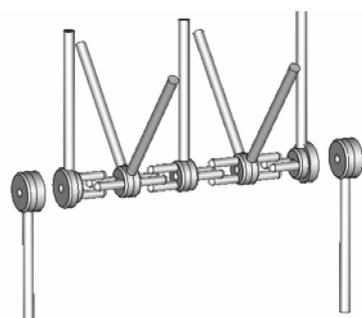


Рис.2. Участок ИИ-структуры, содержащий ВЧ-триплет

3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩИХ КАНАЛОВ С КВЧФ

Рассмотрим возможность применения КВЧФ в ускорителях тяжелых ионов на примере линейного ускорителя многозарядных ионов (ЛУМЗИ) ННЦ ХФТИ. Функционально в его состав входят инжектор (энергия 500 кэВ), предобдирочная секция

(1 МэВ/нукл., $A/q=14$) и основная секция (8,5 МэВ/нукл., $A/q=5$). С целью улучшения устойчивости работы инжекторной системы в настоящее время рассматривается возможность замены высоковольтного инжектора на низковольтный инжектор 120 кВ и начальную часть ускорителя на основе структуры RFQ. Преимущество КВЧФ перед фокусировкой магнитными линзами в том, что, в отличие от последней, фокусирующие силы при фокусировке ВЧ-квадрупольными не зависят от скорости частиц. Это позволяет сократить длину секции.

В Табл.1,2 представлены основные параметры ускоряюще-фокусирующего канала и характеристики пучка с КВЧФ ($A/q=20$) для двух вариантов фокусировки. Первый вариант – фокусировка сдвоенными ВЧ-дуплетами, второй – фокусировка ВЧ-триплетами. В первом варианте используется структура фокусирующего периода FOODDOOOOF, где F – ускоряющий период, содержащий квадрупольный участок, фокусирующий в одной из поперечных плоскостей; D – дефокусирующий период; O – осесимметричный ускоряющий период. Фаза синхронной частицы в осесимметричных зазорах (-23°). Во втором варианте число ускоряющих периодов различно для каждого фокусирующего периода и определяется в результате численного моделирования динамики частиц в ускоряющем канале. Общий принцип построения фокусирующего периода следующий: 2-3 группирующих периода с отрицательной синхронной фазой, участок с нулевой синхронной фазой и ВЧ-триплет.

Расчет параметров ускоряюще-фокусирующего тракта НЧУ и моделирование динамики частиц проводились в среде разработки APFRFQ [4]. Для учета сил объемного заряда использовался метод крупных частиц PP (частица–частица). Число частиц, используемых при численном моделировании, равно 7200. На Рис.3,4 представлены выходные параметры пучка для двух вариантов фокусирующих каналов. Отметим, что фокусировка сдвоенными ВЧ-дуплетами, несколько уступая по темпу ускорения, значительно превосходит вариант с фокусировкой ВЧ-триплетами по величине ускоряемых токов. На Рис.5 показана зависимость ускоренного тока от тока инжекции для варианта со сдвоенными ВЧ-дуплетами. Максимальный ток, ускоряемый со 100% трансмиссией пучка, составляет 20 мА. Для варианта с ВЧ-триплетами это значение равно 9 мА, при меньшем значении входного эмиттанта пучка, большей энергии инжекции (см. Табл.2) и значениях фокусирующих градиентов на квадрупольных участках в 2 раза выше, чем в первом варианте.

Использование КВЧФ позволяет предельно упростить и основную секцию ускорителя, в которой происходит ускорение частиц после обдирки. Диапазон энергий основной секции составляет 1...8,5 МэВ/нукл., $A/q=5$, рабочая частота 47,2 МГц. Фокусировка осуществляется 20 электромагнитными линзами. В структурах с КВЧФ не требуется применения внешних фокусирующих устройств. Кроме этого, переход на кратную частоту 94,4 МГц позволяет в 2 раза уменьшить поперечные размеры резонатора и увеличить максимальное ускоряющее поле в осесимметричном зазоре с 90 до 125 кВ/см.

Таблица 1

Основные параметры ускоряюще-фокусирующего канала предобдирочной секции с КВЧФ для 2-х вариантов фокусировки

Параметры	Варианты	
	1	2
Рабочая частота, МГц	47,2	47,2
Длина канала, см	792	600
Число ускоряющих зазоров	83	60
Апертура (радиус) канала, см	0,8...1,2	0,8...1,1
Длина фокусирующего периода, $\beta\lambda/2$	10	11, 13, 14, 12, 10
Распределение фаз синхронных частиц на фокусирующем периоде, град	0,3(-23),0 0,3(-23),0	3(-30),8(0); 2(-35),11(0); 3(-35),11(0); 2(-35),10(0); 2(-35),8(0)
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов в «рогатах» зазорах, кВ/см	176	195
Максимальная напряженность поля на оси осесимметричного зазора, кВ/см	90	90

Таблица 2

Расчетные параметры пучка

Параметры	Варианты	
	1	2
Отношение массового числа к зарядовому	20	20
Энергия инжекции, кэВ/нукл.	100	150
Выходная энергия, МэВ/нукл.	1	1
Ток инжекции, мА	10	10
Ускоренный ток, мА	10	9,5
Входные эмиттансы пучка		
ϵ_x (rms), мм·мрад	0,092	0,076
ϵ_y (rms), мм·мрад	0,090	0,076
ϵ_z (rms), град·кэВ/нукл.	13,46	7,85
ϵ_x (100%), мм·мрад	0,678	0,563
ϵ_y (100%), мм·мрад	0,694	0,563
ϵ_z (100%), град·кэВ/нукл.	102,67	50,75
Выходные эмиттансы пучка		
ϵ_x (rms), мм·мрад	0,110	0,140
ϵ_y (rms), мм·мрад	0,111	0,143
ϵ_z (rms), град·кэВ/ нукл.	14,76	16,85
ϵ_x (99%), мм·мрад	0,901	1,011
ϵ_y (99%), мм·мрад	0,974	1,024
ϵ_z (99%), град·кэВ/ нукл.	113,4	179,5
Темп ускорения, МэВ/м	2,27	2,83

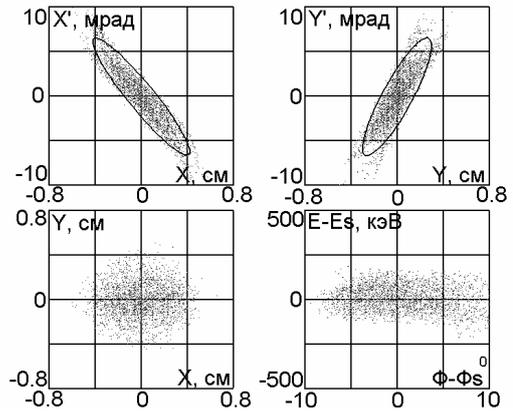


Рис.3. Выходные параметры пучка при фокусировке сдвоенными ВЧ-дуплетами

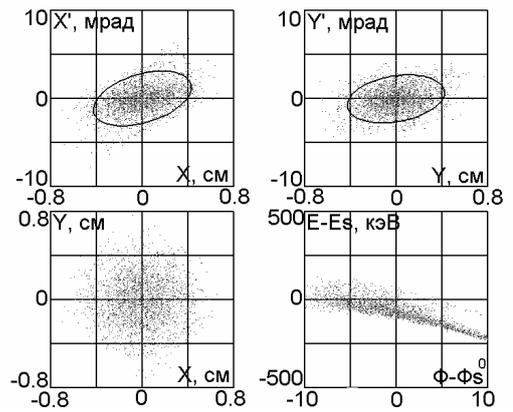


Рис.4. Выходные параметры пучка при фокусировке ВЧ-триплетами

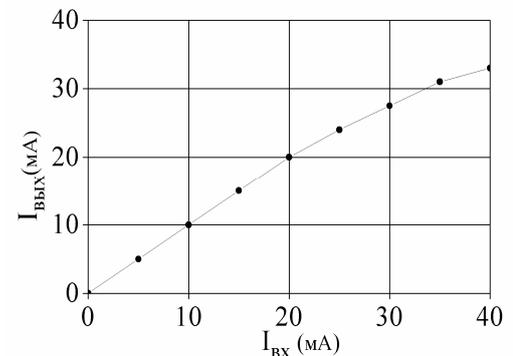


Рис.5. Зависимость ускоренного тока от тока инжекции при фокусировке сдвоенными ВЧ-дуплетами

В Табл.3 и на Рис.6 представлены выходные параметры пучка для четырех вариантов КВЧФ. Ток инжекции 5 мА ($A/q=5$), значения входных нормализованных эмиттансов: $\epsilon_{x,y}$ (rms) = 0,165 мм·мрад; $\epsilon_{x,y}$ (99%) = 1,02 мм·мрад; ϵ_z (rms) = 52,5 град·кэВ/нукл.; ϵ_z (99%) = 331,3 град·кэВ/нукл.

Использовались следующие варианты фокусирующих периодов:

1. Сдвоенные ВЧ-дуплеты, разделенные тремя осесимметричными зазорами (FOOODOOOOF). Распределение фаз синхронных частиц на фокусирующем периоде: 0°, 3 (-23°), 2(0°), 3 (-23°), 0°.

2. Сдвоенные ВЧ-дуплеты, разделенные пятью зазорами (FOOOODOOOOOOF). Фазы синхронных частиц: 0°, 4(-23°), 3(0°), 4(-23°), 2(0°).

Таблица 3

Основные расчетные параметры четырех вариантов КВЧФ основной секции ($A/q=5$)

Параметры	Варианты			
	1	2	3	4
Длина канала, см	1182	984	1025	858
Число зазоров	82	69	70	64
Апертура канала (радиус), см	0,8...1,2	0,8...1,2	0,8...1,1	0,8...1,1
Энергия инжекции, МэВ/нукл.	1	1	1	1
Выходная энергия, МэВ/нукл.	8,5	8,5	8,5	7,8
Ток инжекции, мА	5	5	5	5
Ускоренный ток, мА	5	5	5	4,9
Выходные эмиттансы пучка				
ϵ_x (rms), мм·мрад	0,174	0,231	0,177	0,215
ϵ_y (rms), мм·мрад	0,171	0,209	0,182	0,213
ϵ_z (rms), град·кэВ/нукл.	57,19	61,52	60,86	64,85
ϵ_x (99%), мм·мрад	1,182	2,191	1,218	1,928
ϵ_y (99%), мм·мрад	1,153	1,894	1,349	1,765
ϵ_z (99%), град·кэВ/нукл.	476,6	567,17	616,34	795,5
Темп ускорения, МэВ/м	3,2	3,8	3,65	3,96

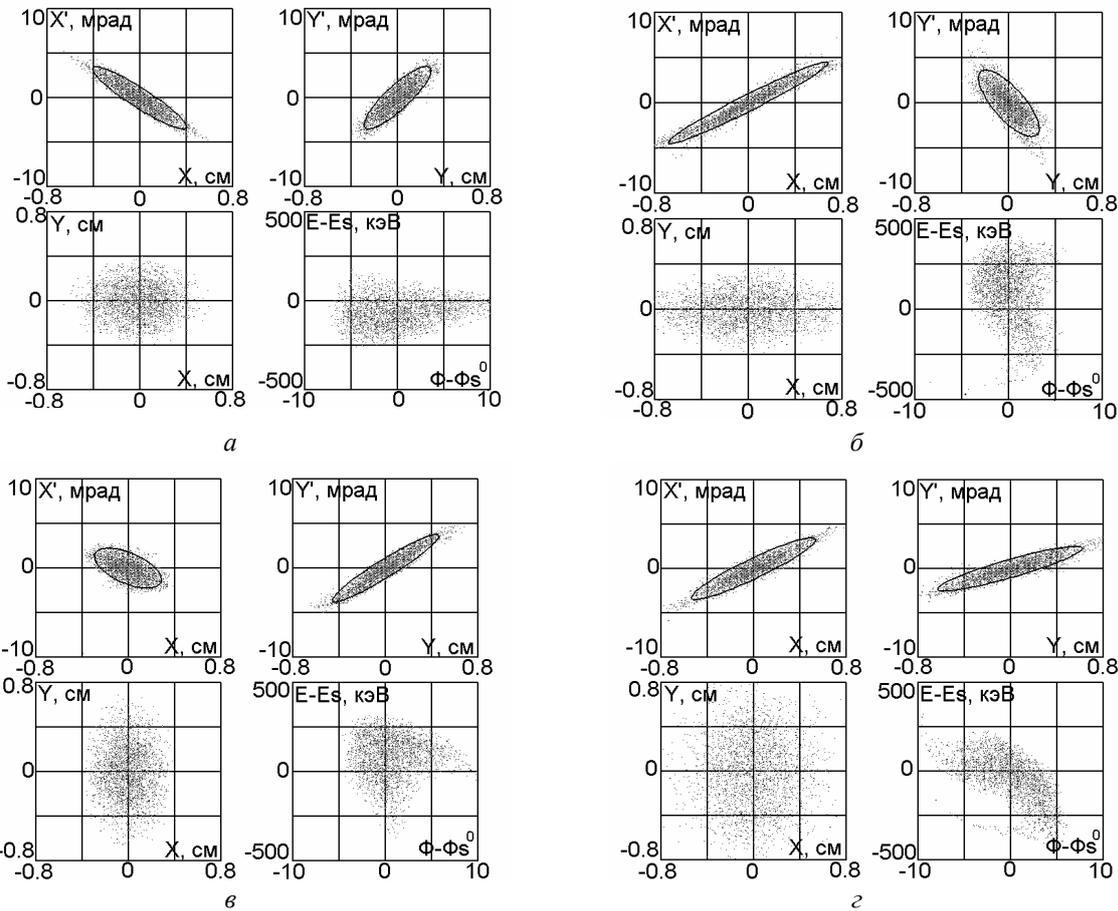


Рис. 6. Выходные параметры четырех вариантов КВЧФ основной секции ($A/q=5$):
 двоянный ВЧ-квадруполь, длина фокусирующего периода $5\lambda_L$ (а); двоянный ВЧ-квадруполь, длина фокусирующего периода $7\lambda_L$ (б); ВЧ-дуплет, длина фокусирующего периода $7/2\lambda_L$ (в); ВЧ-триплет (г)

3. Фокусировка одиночным ВЧ-дуплетом (FDOOOO). Фазы синхронных частиц: $4(0^\circ)$, $2(-30^\circ)$, -20° .

4. Фокусировка ВЧ-триплетами (7(O),FDDF); (9(O),DFFD); (10(O),FDDF); (8(O),DFFD); 10(O). Фазы синхронных частиц: $3(-30^\circ)$, $8(0^\circ)$; $2(-35^\circ)$, $11(0^\circ)$; $3(-35^\circ)$, $11(0^\circ)$; $2(-35^\circ)$, $10(0^\circ)$; $2(-35^\circ)$, $8(0^\circ)$.

Из рассмотренных типов фокусировок максимальным значением ускоренного тока при минимальном росте эмиттаса пучка обладает первый вариант. Предельный ток при 100% трансмиссии пучка составляет 10 мА. В остальных случаях темп ускорения выше, однако, предельный ток пучка меньше при более высоком росте эмиттаса пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования движения частиц в канале с комбинированной фокусировкой позволяют сделать вывод о перспективности этого метода для разработки высокоточных линейных ускорителей тяжелых ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой // *ПТЭ*. 1970, №2, с.19-22.
2. А.А. Егоров и др. Запуск линейного ускорителя протонов Урал-30 // *ЖТФ*. 1981, т.81, №8, с.1643-1647.
3. В.А. Тепляков. Фокусировка ускоряющим полем // *ПТЭ*. 1964, с.23-27.
4. С.С. Тишкин. Комбинированная фокусировка высокочастотным полем в линейных ускорителях ионов // *Вестник Харьковского национального университета. Серия физическая «Ядра, частицы, поля»*. 2008, №808, в.2(38), с.37-46.
5. В.В. Владимирский. Вариант жесткой фокусировки в линейном ускорителе // *ПТЭ*. 1956, №3, с.35-39.
6. M.L. Good. Phase-reversal focusing in Linear Accelerators // *Phys.Rev.* 1953, № 2, p.538-541.
7. Я.Б. Файнберг. Переменно-фазовая фокусировка в линейных ускорителях // *ЖТФ*. 1959, т.29, в.5, с.568-569.
8. В.Г. Папкович, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика. Переменно-фазовая фокусировка в линейном ускорителе // *ВАНТ. Серия «Техника физического эксперимента»*. 1978, в.2 (2), с.51-56.
9. U. Ratzinger, R. Tiede. Status of the HIF RF linac study based on H-mode cavities // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* 1998, A415, p.229-235.

Статья поступила в редакцию 27.11.2009 г.

THE PROSPECTS FOR COMBINED HIGH-FREQUENCY FOCUSING USAGE IN HIGH-CURRENT HEAVY ION LINACS

B.V. Zajtsev, S.S. Tishkin, M.G. Shulika

The study is made into a channel for acceleration and focusing of heavy ions with mass-charge ratio $A/q \leq 20$ in a high-current linear accelerator. The channel is designed to form and accelerate charged particle beams from 100 keV/u up to 8.5 MeV/u. Functionally the channel comprises a pre-stripping section and a main part. Ion stable motion in pre-stripping and main sections is provided by combination of phase-alternating focusing with quadrupole high-frequency one. A way of implementation of this focusing type based on the IH structures is suggested. Numerical simulation of the beam dynamics has been carried out. The channel makes acceleration of ion beams with current up to 10 mA possible.

ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОГО ВИСОКОЧАСТОТНОГО ФОКУСУВАННЯ В СИЛЬНОСТРУМОВИХ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ ВАЖКИХ ІОНІВ

Б.В. Зайцев, С.С. Тишкин, М.Г. Шулика

Розглянуто прискорюючо-фокусуєчий канал сильнострумового лінійного прискорювача важких іонів з відношенням масового числа до зарядового $A/q \leq 20$. Канал розраховано на формування та прискорення пучків від 100 кеВ/нукл. до 8,5 МеВ/нукл. Функціонально до складу каналу входять предобдиркова (до 1 МеВ/нукл.) та основна секції (до 8,5 МеВ/нукл.). Стійкість руху іонів у предобдирковій та основній секціях забезпечується за допомогою комбінації змінно-фазового та високочастотного квадрупольного фокусування. Запропоновано схему реалізації даного типу фокусування на базі ІН-структур. Проведено чисельне моделювання динаміки пучків. Канал дозволяє прискорювати пучки іонів зі струмом до 10 мА.