



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: **2005121525/06, 13.06.2003**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**13.06.2003**

(30) Конвенционный приоритет:  
**09.12.2002 (пп.1-12) IT MI2002A002608**

(43) Дата публикации заявки: **20.01.2006**

(45) Опубликовано: **27.01.2008 Бюл. № 3**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 780822 A1, 07.09.1981. SU 890957 A1, 15.08.1985. US 5113141 A, 12.05.1992. GB 1311616 A, 28.03.1973.**

(85) Дата перевода заявки РСТ на национальную фазу:  
**11.07.2005**

(86) Заявка РСТ:  
**EP 03/06254 (13.06.2003)**

(87) Публикация РСТ:  
**WO 2004/054331 (24.06.2004)**

Адрес для переписки:  
**103735, Москва, ул. Ильинка, 5/2, ООО  
"Союзпатент", пат.пов. С.Б.Фелицыной, рег. №  
303**

(72) Автор(ы):

**АМАЛЬДИ Уго (СН),  
КРЕШЕНТИ Массимо (СН),  
ЦЕННАРО Риккардо (СН)**

(73) Патентообладатель(и):

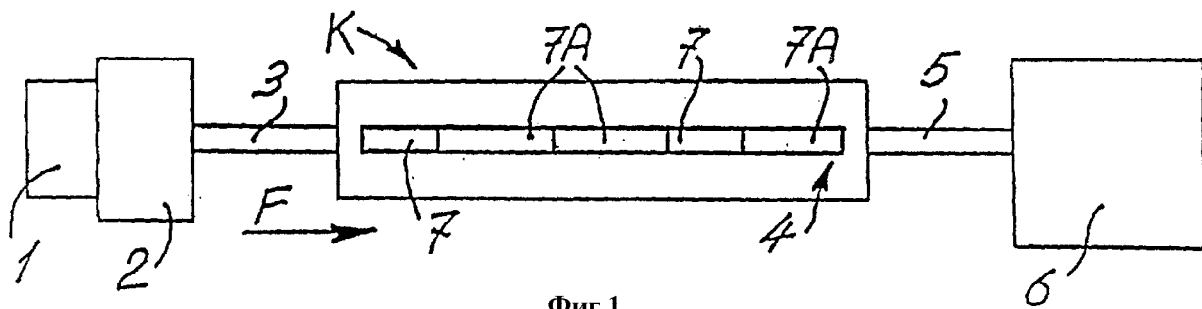
**ФОНДАЦИОНЕ ПЕР АДРОТЕРАПИЯ  
ОНКОЛОДЖИКА-ТЭРА (ИТ)**

### (54) ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к линейным ускорителям с дрейфовыми трубами и может быть использовано для ускорения пучков ионов низкой энергии. Технический результат заключается в снижении себестоимости и эксплуатационных расходов, уменьшении размеров ускорителя и в обеспечении стабильности ускоряющего поля. Согласно изобретению частицы входят в линейный ускоритель с низкой энергией, ускоряются и фокусируются вдоль прямой линии в нескольких резонансных ускоряющих структурах с расположенными между ними структурами связи до желаемой энергии, например, для терапевтических целей. В ускоряющих структурах, возбуждаемых резонансным электромагнитным полем Н-типа, размещено несколько коаксиальных дрейфовых труб, между которыми предусмотрено множество

ускоряющих зазоров. При этом указанные дрейфовые трубы поддерживаются, например, с помощью чередующихся горизонтальных и вертикальных ножек. Базовый модуль состоит из двух ускоряющих структур и расположенной между ними структуры связи или при необходимости модифицированной структуры связи, соединенной с генератором радиочастотной мощности. При этом структура связи при необходимости может быть соединена с вакуумной системой, а также может быть снабжена квадрупольными линзами. Указанный базовый модуль можно удлинять с получением модулей, которые имеют нечетное число  $n$  структур связи и четное число  $N=n+1$  ускоряющих структур. Линейный ускоритель содержит один или несколько модулей и обеспечивает получение большого градиента ускорения и очень компактную структуру. 3 н. и 9



Фиг.1

RU 2316157 C2

RU 2316157 C2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.

*H05H 9/04* (2006.01)*H05H 7/22* (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21), (22) Application: **2005121525/06, 13.06.2003**(24) Effective date for property rights: **13.06.2003**(30) Priority:  
**09.12.2002 (cl.1-12) IT MI2002A002608**(43) Application published: **20.01.2006**(45) Date of publication: **27.01.2008 Bull. 3**(85) Commencement of national phase: **11.07.2005**(86) PCT application:  
**EP 03/06254 (13.06.2003)**(87) PCT publication:  
**WO 2004/054331 (24.06.2004)**Mail address:  
**103735, Moskva, ul. Il'inka, 5/2, OOO  
"Sojuzpatent", pat.pov. S.B.Felitsynoj, reg. № 303**(72) Inventor(s):  
**AMAL'DI Ugo (CH),  
KREShENTI Massimo (CH),  
TsENNARO Rikkardo (CH)**(73) Proprietor(s):  
**FONDATsIONE PER ADROTERAPIJa  
ONKOLODZHKA-TEhRA (IT)**(54) **LINEAR ACCELERATOR FOR ACCELERATING AN ION BEAM**

(57) Abstract:

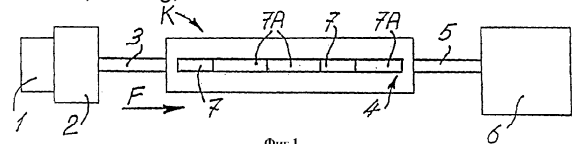
FIELD: linear accelerators with drift tubes, possible use for accelerating low energy ion beams.

SUBSTANCE: in accordance to the invention the particles enter the accelerator at low energy, get accelerated and focused along a straight line in several resonance accelerating structures with connection structures positioned between them up to desired energy, for example, for therapeutic purposes. In accelerating structures, excited with resonance electromagnetic field of H-type, several coaxial drift tubes are positioned, between which a set of accelerating gaps is provided. Aforementioned drift tubes are supported by means of, for example, alternating horizontal and vertical legs. Base module consists of two accelerating structures and connection structures positioned between them or when necessary a modified connection structure,

connected to radio frequency power generator. Connection structure when necessary may be connected to vacuum system, and also may be fitted with quadripole lenses. Aforementioned base module may be extended with production of modules, which have odd number  $n$  of connection structures and even number  $N=n+1$  of accelerating structures. Linear accelerator contains one or more modules and ensures production of high acceleration gradient and very compact structure.

EFFECT: reduced manufacturing costs and operational costs, decreased dimensions of accelerator unit, ensured stability of accelerating field.

3 cl, 11 dwg, 1 tbl



Область техники, к которой относится изобретение

Данное изобретение относится к линейному ускорителю с дрейфовыми трубами для ускорения ионов в виде пучка, к системе, содержащей такой линейный ускоритель, и к способу ускорения ионного пучка, согласно вводной части пунктов 1, 8 и 11 формулы

5 изобретения, соответственно. Изобретение также относится к областям применения раскрытого линейного ускорителя, системы и способа.

Уровень техники

Хорошо известно использование ускорителей частиц для ускорения ионов (протонов и тяжелых ионов) до очень высоких скоростей. При высоких скоростях большое количество

10 таких частиц образуют так называемый "пучок", и этот пучок можно использовать для различных целей, например для исследований, медицинского или промышленного применения. Препятствием и размеры ускорителей практически ограничивали их применение в исследовательских лабораториях. Даже в настоящее время существующие ускорители являются непрактичными для многих применений с использованием ионов.

15 Существующие ускорители бывают трех типов: циклотронные, линейные и синхротронные.

Если требуются ионные пучки с большим отношением массы к заряду и/или в диапазоне скоростей до около 0,6 скорости света, то обычные циклотроны мало подходят для этого. Компактность, модульность, меньшая сложность и в результате меньшая стоимость

20 являются преимуществами линейных ускорителей по сравнению с синхротронами.

В настоящее время используют технику радиочастотных линейных ускорителей для ускорения заряженных частиц из "источника ионов" до желаемой энергии. Для ионов (протонов и тяжелых ионов) диапазон энергии, обеспечиваемый линейными ускорителями составляет от нескольких десятков килоэлектронвольт на нуклон (кэВ/ну) до сотен

25 мегаэлектронвольт на нуклон (МэВ/ну), т.е. диапазон скоростей от около 0,05 до около 0,8 скорости света.

Все линейные ускорители состоят из вакуумированных цилиндрических металлических полостей или линий передачи. Эти структуры заполняются электромагнитной энергией с помощью генераторов радиочастотной энергии. Пучок проходит по продольной оси

30 линейного ускорителя и встречает сильные радиочастотные электрические поля, которые могут ускорять заряженные частицы, если фаза радиочастотной волны соответственно синхронизована с прибытием сгруппированного пучка.

До настоящего времени использовались два вида структур: структуры бегущей волны и структуры стоячей волны. В структурах бегущей волны ускоритель является линией

35 передачи и ведет себя как волновод, в котором проходят электромагнитные волны вдоль всей длины структуры. Некоторое количество мощности получает пучок, некоторое количество мощности теряется вследствие омических потерь, а остаток поглощается в согласованной нагрузке. В структурах стоячей волны ускоритель является резонансным объемным резонатором, внутри которого введенные электромагнитные волны создают

40 зависящую от времени структуру стоячих волн, периодическую на резонансной частоте.

Хорошо известно, что в этой области обычно используется параметр  $\beta = v/c$ , где  $v$  является скоростью частиц, а  $c$  обозначает скорость света. Линейные ускорители стоячей волны используются в основном для скоростей частиц менее половины скорости света (линейные ускорители с малым  $\beta$ ). Линейные ускорители как стоячей волны, так и

45 бегущей волны используются для более высоких скоростей (линейные ускорители со средним  $\beta$ ), причем в настоящее время предпочтительным является первое решение. При скорости частиц, примерно равной скорости света, доминирующее значение имеют линейные ускорители бегущей волны (линейные ускорители с высоким  $\beta$ ). Известно также, что глубокая терапия рака с помощью ионных пучков требует  $\beta \leq 0,6$ , что является

50 диапазоном линейных ускорителей стоячей волны.

Кроме того, известно, что:

- в диапазоне низких скоростей ( $0,01 \leq \beta < 0,1$ ) наиболее часто используемой структурой линейного ускорителя является радиочастотная квадрупольная линза (RFQ);

- в диапазоне средних скоростей ( $0,1 \leq \beta \leq 0,4$ ) наиболее часто используемой является структура линейного ускорителя с дрейфовыми трубами (DTL),

- структура линейного ускорителя со связанными объемными резонаторами (CCL) является структурой стоячей волны, наиболее часто используемая в диапазоне высоких скоростей ( $0,4 \leq \beta < 0,1$ ).

В линейных ускорителях стоячей волны радиочастотные электрические поля прикладываются внутри вакуумированных объемных резонаторов к линейной матрице электродов. Расстояние между электродами выбирается так, что поле в подходящей фазе относительно прибывающего пучка передает частицам "полезную" мощность. Остальное время поле экранировано и не воздействует на сгруппированный пучок. Расстояние между последовательными электродами учитывает также увеличение скорости частиц, что обуславливает более длинные структуры для пучков с большей скоростью.

Радиочастотные электрические поля в этих полостях являются результатом возбуждения в объемных резонаторах резонансных электромагнитных волн. Обычно структура поля содержится в цилиндрическом объеме. В таком объеме могут существовать два семейства волн:

- поперечные магнитные волны (TM), называемые также E-волнами, где существует сильная составляющая электрического поля в направлении пучка (или, другими словами, магнитное поле является поперечным относительно направления пучка),

- поперечные электрические волны (TE), называемые также H-волнами, где существует сильная составляющая магнитного поля в направлении пучка (или, другими словами, электрическое поле является поперечным относительно направления пучка). В этом последнем семействе введение электродов модифицирует структуру поля из открытой конфигурации так, что сильная составляющая электрического поля всегда направлена в направлении пучка, которое является полезным направлением.

Опыт разработки объемных резонаторов с обоими типами структуры стоячих волн привел к пониманию различного поведения объемных резонаторов при использовании E-волн или H-волн.

В семействах E-волн введение электродов не влияет очень сильно на направление ускоряющего поля, которое всегда направлено вдоль пучка.

В противоположность этому в семействе H-волн введение электродов сильно изменяет направление поля вдоль оси пучка. В результате, в объемных резонаторах с H-волнами электрическое поле лучше сконцентрировано вблизи оси пучка, где оно эффективно требуется. Поэтому структуры H-волн являются более эффективными.

Параметром, обычно используемым для измерения эффективности объемного резонатора относительно потребляемой мощности, является "шунтирующее полное сопротивление на единицу длины". Этот параметр имеет размерность сопротивления на единицу длины и не зависит от уровня поля и скорости частиц.

Вообще говоря, объемные резонаторы H-волн имеют довольно большое шунтирующее полное сопротивление на единицу длины, которое уменьшается при увеличении скорости частиц, в то время как объемные резонаторы E-волн имеют противоположное поведение. Поэтому объемные резонаторы H-волн являются более эффективными при низкой скорости, в то время как объемные резонаторы E-волн лучше подходят для более высокой скорости, при этом среднее значение обычно лежит около  $\beta \approx 0,4$ .

Продольные размеры ускоряющей структуры связаны с длиной, проходимой частицами за радиочастотный период, называемой также "длиной волны частиц" или  $\beta\lambda$ , где  $\lambda$  является длиной радиочастотной волны. Эффективное ускорение происходит, когда частицы прибывают в каждый зазор ускорения с подходящей радиочастотной фазой. В радиочастотном линейном ускорителе возможны два режима: 0-режим и  $\pi$ -режим.

Относительно радиочастотного поля в заданный момент времени, в 0-режиме осевое ускоряющее поле имеет одинаковый модуль и знак в каждом зазоре ускорения, в то время как в  $\pi$ -режиме электрическое поле изменяет знак от одного зазора к следующему зазору. В настоящее время предпочтение отдается  $\pi$ -режиму, поскольку для одной и той же длины

волны частиц  $\beta$  эффективный средний градиент поля является более высоким.

Более подробное описание ускорителей частиц, используемых до настоящего времени, можно найти в ссылках в конце данного описания, приведенных в порядке публикации.

5 Наконец, следует указать на то, что область применения имеет главное значение при выборе существующих типов ускорителей протонов и ионов с различными структурными характеристиками и функциями:

- в лучевой терапии требуются чрезвычайно точные, имеющие очень низкую интенсивность узкие пучки с ограниченной энергией и малым рассеиванием энергии. Их следует обеспечивать с помощью достаточно небольших и компактных конструкций, подлежащих установке в ограниченном объеме, доступном в больничных условиях, в то время как для исследований часто требуются пучки высокой интенсивности и высокой энергии для экспериментов, например, в физике высоких энергий или в областях, связанных с расщеплением, синтезом ядер, и во многих других применениях.

10 В US-A 5382914 раскрыт линейный ускоритель для протонной терапии, структура которого является достаточно обычной, а линейный ускоритель представляет практически хорошо известную структуру Алвареза. Для ускорения в линейном ускорителе используется 0-режим и поэтому он является довольно длинным.

US-A-5523659 относится к линейному ускорителю с радиочастотной фокусировкой, имеющему известную структуру Алвареза с модификациями, включая радиочастотные фокусирующие секции типа RFQ (радиочастотная квадрупольная линза). Механическая конструкция, включающая электрическую фокусировку, является сложной. Результирующее шунтирующее полное сопротивление является низким, а получаемая связь между продольной и поперечной плоскостями усложняет транспортировку пучка.

20 В US-A-5113141 раскрыта структура четырехвыводного линейного ускорителя с радиочастотными квадрупольными линзами, которая является структурой объемного резонатора Н-волны, где предпринимается попытка одновременной фокусировки и ускорения пучков небольшой энергии. Эффективность такого вида фокусировки быстро уменьшается при возрастании  $\beta$ . Результирующее шунтирующее полное сопротивление является низким, а полученная связь между продольной и поперечной плоскостями усложняет транспортировку пучка.

25 В US-A-4906896 относится к структуре линейного ускорителя с диском и шайбами, в котором используются Е-волны. При низком  $\beta$  шунтирующее полное сопротивление является низким. Механическая конструкция является сложной. Стабильность поля является скорее низкой, поскольку она нарушается радиочастотными резонансами вблизи рабочего режима.

#### Раскрытие изобретения

30 Главной целью данного изобретения является создание нового ускорителя ионного пучка, системы, содержащей такой ускоритель, а также способа ускорения ионных пучков, отвечающих указанным выше требованиям. Другой целью данного изобретения является использование некоторых новых, а также существующих компонентов, но с использованием новых отдельных или комбинированных функций с целью получения в совокупности неожиданных и удивительно хороших результатов, обеспечивающих, среди прочих преимуществ, эффективное уменьшение общих размеров ускорителя, который можно просто устанавливать в клинике или больнице.

40 Еще одной целью данного изобретения является осуществление модульности, которая позволяет, с одной стороны, создавать ионный пучок требуемой энергии, а с другой стороны, уменьшать количество компонентов, необходимых в обычных линейных ускорителях, что обеспечивает снижение стоимости конструкции и эксплуатации.

Дополнительной целью является обеспечение высокой стабильности ускоряющего поля независимо от частоты и длины резонансной структуры.

50 Другой целью данного изобретения является увеличение градиента ускорения, а, следовательно, значительное уменьшение длины ускорителя.

Еще одной целью данного изобретения является существенное уменьшение

потребляемой электрической энергии, что обеспечивает снижение стоимости эксплуатации ускорителя или структуры или всей системы, согласно данному изобретению.

Еще одной целью данного изобретения является увеличение диапазона скоростей по меньшей мере до  $\beta \approx 0,6$  внутри небольших размеров, что обеспечивает в случае

5 применения в медицине терапию глубоких злокачественных опухолей.

Другой целью данного изобретения является возможность работы предлагаемого линейного ускорителя также на низких частотах, например в диапазоне от около 100 МГц до около 0,8 ГГц, с целью получения высоких токов для исследований или других

10 Эти и другие цели и преимущества достигаются с помощью линейного ускорителя, системы, содержащей такой линейный ускоритель, и способа ускорения пучка ионов, имеющих характеристики, раскрытые в п.п.1, 8 и 11 формулы изобретения соответственно.

Краткое описание чертежей

15 Другие характеристики, преимущества и подробности линейного ускорителя, согласно данному изобретению, системы, содержащей такой линейный ускоритель, а также способа ускорения ионного пучка, согласно данному изобретению, следуют из приведенного ниже подробного описания со ссылками на прилагаемые чертежи, показывающие лишь в качестве примера предпочтительные варианты выполнения изобретения.

На чертежах изображено:

20 фиг.1 - блок-схема полной системы, содержащей линейный ускоритель, согласно данному изобретению;

фиг.2 - блок-схема, соответственно, базового модуля CLUSTER (расшифровка приводится ниже в подробном описании предпочтительных вариантов выполнения), согласно изобретению, для  $n=1$  и двух увеличенных модулей с  $n=3$  и  $n=5$  соответственно,

25 где  $n$  обозначает нечетное число структур связи в модуле;

фиг.3 - продольный разрез четверти базовой структуры, показывающий внутреннюю часть двух ускоряющих боковых структур, их внутренние нагрузки и среднюю структуру связи, в изометрической проекции;

30 фиг.4 - частичный горизонтальный продольный разрез модуля, показывающий среднюю структуру связи и часть двух ускоряющих боковых структур;

фиг.5 - частичный вертикальный продольный разрез модуля, показывающий среднюю структуру связи и часть двух ускоряющих боковых структур;

фиг.6 - продольный разрез под углом  $45^\circ$  модуля, показывающий среднюю структуру связи и часть двух ускоряющих боковых структур;

35 фиг.7 и 8 - разрез по линии VII-VII, соответственно, линии VIII-VIII на фиг.4, при этом указанные разрезы выполнены по центру ножек и показывают направление и ориентацию Н-поля;

фиг.9 и 10 - разрез по линии IX-IX, соответственно, линии X-X на фиг.4;

40 фиг.11 - частичный продольный разрез под углом  $45^\circ$  модуля, показывающий среднюю связную структуру, модифицированную для связи с фидером радиочастотной энергии, и часть двух ускоряющих боковых структур.

Осуществление изобретения

На разных фигурах одинаковыми позициями обозначены одинаковые элементы.

45 Показаны лишь части, необходимые для понимания изобретения. В последующем описании структуры, функций и способа ссылки делаются сначала на фиг.1, на которой показана блок-схема системы или полного комплекса К, содержащего линейный ускоритель, разработанный в соответствии с изобретением и обозначенный в целом позицией 4.

50 Обычный ионный источник 1 инжектирует коллимированный ионный пучок в обычный инжектор 2, например, электростатический ускоритель или небольшой циклотрон или радиочастотную квадрупольную линзу. Стрелка F обозначает направление пучка. Предварительно ускоренный пучок затем инжектируется в обычную секцию 3 транспортировки луча малой энергии (LEBT), которая фокусирует и направляет пучок до

входа в ускоритель или линейный ускоритель 4, согласно изобретению. Указанный линейный ускоритель 4 является линейным ускорителем с дрейфовыми трубами, работающим на высокой частоте, например, для применения в терапии рака. Указанный линейный ускоритель состоит из одного или нескольких базовых модулей 7 и/или одного  
5 или нескольких увеличенных модулей 7А, подробное описание которых приведено ниже, и называется CLUSTER. Как будет показано и описано более подробно ниже, несколько резонансных структур 8 находятся на одной линии и связаны друг с другом на модульной основе с целью получения необходимой выходной энергии пучка для CLUSTER 4,  
10 предусмотренного для применения пучка. Указанную выходную энергию пучка можно модулировать посредством изменения входящей радиочастотной мощности, в то время как выходную интенсивность пучка можно модулировать посредством регулирования параметров и динамики инъекции.

Следует отметить, что обычные объемные резонаторы Н-типа используются в настоящее время для ускорения ионных пучков малой скорости, высокой интенсивности и с  
15 высоким отношением массы к заряду. В таких применениях поперечные размеры пучка является довольно большими (несколько десятков мм), и поэтому отверстие для пучка должно быть также соответственно большим, по меньшей мере несколько десятков мм, при этом обычно допускается коэффициент  $2/3$  между диаметром пучка и диаметром отверстия. В результате, объемные резонаторы, выполненные и работающие в  
20 соответствии с известными концепциями, должны работать в диапазоне низких частот, т.е. от около нескольких МГц (объемные резонаторы с диаметром около 1 м) до нескольких сотен МГц (объемные резонаторы с диаметром порядка около 0,3 м). В противоположность этому, для применений в медицине достаточно отверстия для луча порядка нескольких мм, поскольку требуются пучки низкой интенсивности.

Для упрощения установки в больницах длина таких структур должна быть по  
возможности более короткой. Вместо использования средних или низких рабочих частот, что имеет место в обычных линейных ускорителях, в CLUSTER 4, согласно данному изобретению, предлагается использовать высокие рабочие частоты от около 0,5 ГГц до  
нескольких ГГц, например 6-7 ГГц. В настоящее время прогресс в области механических  
30 технологий позволяет изготавливать такие небольшие структуры с требуемой точностью.

Следует также отметить, что стабильность поля уменьшается с увеличением частоты и длины. Это сильно ограничивает разработку длинных обычных ускоряющих структур. Данное изобретение решает проблему посредством создания последовательности  
ускоряющих объемных резонаторов умеренной длины, связанных друг с другом с помощью  
35 нового способа соединения, как будет показано и пояснено ниже. С помощью этого нового способа не только поддерживается стабильность, но также усиливается связь.

Системы связанных объемных резонаторов предлагались или конструировались, но ни в одной из них не использовались ускоряющие структуры Н-типа. В обычной технологии  
структуры Н-типа обычно использовались при низкой скорости и низкой частоте. Как  
40 указывалось выше, в соответствии с изобретением предлагается в противоположность этому использовать такие структуры Н-типа при намного более высоких частотах. Действительно, хорошо известно, что чем выше частоты, тем больше допустимое поле, что приводит к увеличению коэффициента усиления мощности на метр и к уменьшению общей длины ускорителя. Этот параметр является ключевым, например, для применений в  
45 медицине, где поиск возможности уменьшения общей длины ускорителя связан с уменьшением стоимости ускорителя и пространства для его установки.

Однако радиочастотное ускоряющее поле вызывает эффект радиальной расфокусировки, особенно важный при низкой энергии, который ограничивает максимально допустимое поле. Поэтому необходимо добавлять определенное число элементов  
50 радиального фокусирования, что дополнительно увеличивает полную длину ускорителя. Согласно изобретению, поперечную фокусировку получают с помощью хорошо известной технологии, основанной на использовании магнитных квадрупольных линз в качестве фокусирующих элементов. Размеры указанных квадрупольных линз не изменяются



прямопропорционально частоте. При низкой частоте обычно выбирают, там где это возможно, установку квадрупольных линз внутри ускоряющих объемных резонаторов, или же, где это невозможно, создание отдельных объемных резонаторов, чередующихся с фокусирующими элементами.

5 На высокой частоте нет пространства для введения квадрупольных линз в ускоряющие объемные резонаторы, а решение с чередующимися ускоряющими структурами и фокусирующими элементами приводит к длинным и не применимым на практике структурам.

В противоположность этому, как предлагается данным изобретением и как показано на 10 фигурах, относящихся к предпочтительному варианту выполнения, фокусирующие квадрупольные линзы 18 можно располагать непосредственно внутри структур 9 связи. Таким образом, связные структуры 9 имеют одновременно две функции: связи между двумя ускоряющими структурами 8 и размещения магнитных квадрупольных линз 18 для поперечной фокусировки пучка.

15 Согласно данному изобретению, предлагается новая концепция связной структуры 9 между ускоряющими структурами 8. Такие связные структуры 9, имеющие диаметр, примерно в два раза больший диаметра ускоряющих структур 8, выполняют функцию моста для потока мощности между структурами или ускоряющими структурами 8, и 20 одновременно, при необходимости, функцию размещения квадрупольных линз 18, как указывалось выше, и, при необходимости, обеспечивают соединение с вакуумной системой 13. Такое соединение может быть создано в любом месте в модуле 7.

Таким образом, согласно изобретению, базовый модуль состоит из средней связной структуры 9 и двух ускоряющих боковых структур 8, при этом указанные три структуры соединены друг с другом.

25 Согласно изобретению, в показанном примере выполнения связь с радиочастотным мощным генератором выполняется, когда необходимо (например, в единственном базовом модуле), как показано на фиг.2, через модифицированную связную структуру 9А. Указанная связная структура 9А аналогична указанной связной структуре 9, когда 30 структура 9 разделена на две части, называемые разделенными связными ячейками 21, и добавлена третья, коаксиальная ячейка 22, называемая питающей ячейкой. Возможная, но не исключительная конфигурация показана на фиг.11, где показан продольный разрез под углом 45°, содержащий в центре модифицированную связную структуру 9А и часть двух ускоряющих структур 8. Таким образом, сохраняется радиочастотная конфигурация 35 типа  $\pi/2$ . В этом случае две разделенные связные ячейки 21 остаются невозбужденными полем, в то время как питающая ячейка 22 возбуждается. Поэтому мощность эффективно инжектируется через волновод или кабель в питающую ячейку 22 и проходит через две разделенные связные ячейки 21 через две или более щелей. Длина модифицированной структуры связи обеспечивает сохранение синхронизации с ускорением пучка.

40 Таким образом, связь с генератором радиочастотной мощности, согласно изобретению, осуществляется простым механическим способом, что исключает любое искажение поля в ускоряющих структурах 8.

Согласно изобретению, с помощью предложенной системы связи обеспечивается достаточное пространство в центральной части связной структуры 9, 9А для размещения 45 одной или нескольких квадрупольных линз 18 для поперечной фокусировки. При этом пространство, необходимое для связной структуры, предпочтительно используется также для поперечной фокусировки пучка, что обеспечивает максимальную компактность всего CLUSTER 4.

50 Следует отметить, что квадрупольные линзы 18 можно заменять другими функционально эквивалентными компонентами, в случае их размещения вне связных структур 9, 9А, а также в частных вариантах выполнения можно отказаться от указанных квадрупольных линз 18.

За счет идеи данного изобретения использовать высокие частоты, можно достичь также уменьшения потребляемой мощности. Действительно, общим правилом является то, что

если геометрические размеры изменяются пропорционально частоте, то эффективное шунтирующее полное сопротивление на единицу длины увеличивается пропорционально квадратному корню частоты.

Другая идея данного изобретения состоит в комбинировании предыдущей идеи и использования Н-волн, принципиально более эффективных.

Кроме того, согласно изобретению, для создания ионного пучка с требуемой энергией для предусмотренного применения, наряду с базовыми модулями 7 предусматриваются также увеличенные модули 7А, состоящие из базового модуля 7, к которому добавлены несколько связанных структур 9, 9А и несколько ускоряющих структур 8, как показано, например, на фиг.2, где число  $n$  связанных структур всегда является нечетным числом, а число ускоряющих структур  $N=n+1$ .

Поэтому, согласно данному изобретению, в простом варианте выполнения единственный радиочастотный мощный генератор 11 может питать модуль 7 или 7А линейного ускорителя 4, в то время как при наличии нескольких связанных модулей 7 и/или 7А могут быть предусмотрены несколько единичных мощных генераторов 11 с единственным радиочастотным выходом 12 или с множественным, разветвленным выходом 12, где позицией 12 обозначаются также радиочастотные входы в модифицированные связанные структуры 9А модулей 7, 7А. Согласно изобретению, каждый модуль имеет единственный радиочастотный вход 11 в единичной модифицированной связанной структуре 9А.

Как показано на фигурах, в предлагаемом линейном ускорителе 4, согласно изобретению, ионный пучок ускоряется и фокусируется в продольном направлении одновременно с помощью радиочастотных электрических полей в ускоряющих зазорах 20 до расчетной энергии для предусмотренного применения, например для терапии рака. Поперечная фокусировка обеспечивается с помощью магнитных полей. Выходной пучок линейного ускорителя затем инжектируется в линию 5 транспортировки пучка высокой энергии, которая фокусирует и направляет указанный пучок в зону 6 использования, где он используется, например, в медицинских целях.

Для применений в медицине можно ускорять пучок ионов до энергии около 4000 МэВ (330 МэВ/ну), которая в настоящее время представляет оптимальную максимальную энергию пучка для терапии глубоких злокачественных опухолей.

В целом число необходимых базовых модулей 7 и состав удлиненных модулей 7А зависит также от рабочей частоты, от максимальной мощности, поставляемой радиочастотными генераторами, от требуемого уровня поля, а также от энергии инъекции предварительно ускоренного пучка. Согласно данному изобретению, предпочтительный модульный вариант выполнения позволяет в любом случае минимизировать число радиочастотных мощных генераторов в линейном ускорителе CLUSTER 4 для уменьшения по возможности стоимости линейного ускорителя 4 и, следовательно, всей системы К, включающей линейный ускоритель 4.

Следует отметить, что объемные резонаторы в модулях, например, последовательности из трех объемных резонаторов 8-9, 9А-8 или другие последовательности, настроенные на одинаковую рабочую частоту, связаны друг с другом для резонанса в режиме  $\pi/2$ , при этом связанной объемный резонатор/объемные резонаторы 9А номинально не возбуждаются, или же в случае связанного объемного резонатора/объемных резонаторов 9А возбуждаются лишь частично, так что такая конфигурация сильно способствует стабильности системы.

Частичный разрез в изометрической проекции предпочтительного варианта выполнения показан на фиг.3. На фигуре можно видеть часть двух ускоряющих структур 8 и структуру 9 связи.

На изометрической проекции на фиг.3 обозначены также три различных продольных разреза, а именно горизонтальный разрез (фиг.4), вертикальный разрез (фиг.5) и разрез под углом  $45^\circ$  (фиг.6).

Как показано на фигурах, последовательность дрейфовых труб 15, распределенная по

продольной оси линейного ускорителя 4, расположена в ускоряющих структурах 8. Тонкие радиальные ножки 16, 17 в количестве  $m$ , при  $m \geq 1$ , поддерживают, исходя из внутренней поверхности стенки корпуса ускоряющей структуры 8, каждую указанную дрейфовую трубу 15. Резонансную рабочую волну ускоряющих объемных резонаторов можно

5 классифицировать как волну  $H_{m10}$ . В показанном предпочтительном варианте выполнения  $m=2$  и ножки 16, 17 являются чередующимися горизонтальными ножками 16 и вертикальными ножками 17.

В других конфигурациях с  $m > 2$  соседние ножки 16, 17 повернуты относительно друг друга на  $\pi/m$ .

10 Н-волны имеют магнитное поле, расположенное продольно в объемном резонаторе, в то время как электрическое поле является радиальным, за исключением оси, где дрейфовые трубы 15 приносят искажение электрического поля вдоль направления  $F$  пучка.

Поэтому были добавлены, согласно изобретению, некоторые механические и конструктивные модификации у выводов ускоряющих структур 8, а также у выводов 10

15 связи между ускоряющими структурами 8 и расположенными между ними связными структурами 9, 9А для продления подходящим образом линий магнитного поля с целью поддержания приблизительно постоянной величины электрического поля в ускоряющем зазоре 20. Указанные выводы 10 имеют дополнительную задачу регулирования связи между ускоряющими структурами 8 и расположенными между ними связными структурами

20 9, 9а. Для этой цели длина и диаметр указанных выводов 10 ускоряющих структур 8 регулируют так, чтобы удлинить продольные линии магнитного поля вблизи концевых крышек указанной ускоряющей структуры 8. Диаметр связных структур 9, 9А примерно в два раза больше диаметра ускоряющей структуры 8, поэтому цилиндрические выводы 10 имеют форму кольцевой камеры промежуточного диаметра. Для второй цели регулируют

25 толщину указанных выводов 10, толщину между связной структурой 9, 9А и выводами 10, а также число, форму и размеры щелей связи 14, как показано на фиг.3,4, 5, 6 и 11.

Указанные выводы 10, имеющие форму кольцевых камер, открыты на окружности, соответствующей их внутреннему диаметру, в то время как на их наружной поверхности имеются отверстия 14 связи, как показано на фиг.6, 9 и 11.

30 Что касается ускоряющих структур 8, то указанные структуры могут быть описаны как колебательный контур, который может быть представлен для простоты емкостной частью, сконцентрированной в ускоряющем зазоре 20, образованном между смежными дрейфовыми трубами 15, и индуктивной частью, распределенной в остающемся объеме между ножками 16, 17 и внутренней стенкой объемного резонатора, как показано на фиг.7

35 и 8. В течение радиочастотного периода путь радиочастотного тока от одной дрейфовой трубы 15 к другой дрейфовой трубе проходит туда и обратно через горизонтальные ножки 16 и вертикальные ножки 17.

Рабочий режим ускоряющей структуры 8 является  $\pi$ -режимом, что означает, что в заданный момент времени радиочастотного цикла направление осевого электрического

40 поля обращается при переходе от одного ускоряющего зазора 20 к следующему зазору. Эффективное ускорение возможно в каждом ускоряющем зазоре 20, поскольку расстояние между указанными ускоряющими зазорами 20 составляет  $\beta\lambda/2$ . Стабильность поля связана с величиной интервала между частотой ( $\omega_0$  рабочей волны и частотой наиболее

45 близкой (на стороне более высоких частот) зависящей от продольного направления волны  $\omega_1$ . Зависимость  $\omega_1$  от числа ускоряющих зазоров "ngap" в ускоряющей структуре описывается формулой:

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \sqrt{1 + \frac{1}{(ngap)^2}}$$

50 Поскольку отношение  $\omega_1/\omega_0$  должно быть не меньше нескольких промилле, то в ускоряющей структуре 8 допустимо максимально около 20 ускоряющих зазоров.

Как указывалось выше, фундаментальная идея данного изобретения состоит в использовании обычной структуры Н-типа (т.е. структуры, работающей обычно на частоте

в несколько сотен МГц при обычной конструкции), которая выполнена с возможностью работы на высокой частоте, например, как указывалось выше, для терапии глубоких злокачественных опухолей.

5 Обычные объемные резонаторы с Н-волной имеют диаметр, приблизительно, между 0,3 и 1 м, а длина может достигать нескольких метров. Число ускоряющих зазоров между последовательными магнитными линзами также составляет около 20.

В противоположность этому, согласно данному изобретению и как отражено в приведенной ниже таблице 1, длина ускоряющих структур 8 не превышает, приблизительно, 350 мм, и достигаемая, примерно, при  $\beta=0,6$ , а диаметр не превышает 100 мм. Поскольку длина ускоряющего зазора 20 линейно уменьшается в зависимости от частоты, в то время как максимальное поле, которое можно прилагать, увеличивается (согласно критерию, экспериментально установленному Килпатриком в 1953) лишь пропорционально корню квадратному частоты, то длина структуры для одного и того же коэффициента усиления мощности уменьшается примерно пропорционально корню квадратному частоты, следовательно, требуется больше ускоряющих зазоров 20.

Поскольку максимальное число ускоряющих зазоров 20 в одной ускоряющей структуре 8 составляет около 20, то число ускоряющих структур 8, которые требуется снабжать энергией, больше, чем в обычном ускорителе.

20 Кроме того, прямое соединение линии питания со структурой такого небольшого диаметра было бы очень трудно сконструировать, поскольку было бы невозможно исключить сильные искажения ускоряющего поля. Небольшие поперечные размеры исключают также возможность установки магнитных квадрупольных линз в качестве фокусирующих линз внутри структуры, как часто делается в обычных объемных резонаторах, работающих на низкой частоте.

25 Как указывалось выше, эти проблемы эффективно решаются с помощью новой технической и структурной конструкции линейного ускорителя CLUSTER 4, содержащей базовые модули 7 и удлиненные модули 7А. Базовая структура, как показано, например, на фиг.2, содержит две ускоряющие структуры и одну структуру связи.

На фиг.9 показан поперечный разрез структуры 9 связи на уровне указанных щелей 14 связи, в то время как на фиг.10 показан поперечный разрез структуры 9 связи на уровне магнитной квадрупольной линзы 18. Как указывалось выше, связанная структура 9, 9А, согласно изобретению, в предпочтительном варианте выполнения обеспечивает размещение небольшой квадрупольной линзы 18 и одновременно обеспечивает радиочастотную связь между всеми ускоряющими структурами одного модуля 7.

35 В показанном варианте выполнения изобретения квадрупольные линзы 18, расположенные внутри каждой связанной структуры 9, 9А, обеспечивают поперечную фокусировку пучка в конфигурации решетки FODO. На практике можно использовать коммерчески доступные постоянные квадрупольные магниты 18 с продольной длиной 30 мм и с радиусом отверстия в несколько мм. С их помощью можно достигать магнитных градиентов  $dB/dx \approx 500$  Т/м.

В качестве альтернативного решения можно также применять не постоянные квадрупольные линзы 18 при применении линейного ускорителя CLUSTER 4, для целей, отличных от терапии глубоких злокачественных опухолей, где можно использовать более низкую частоту, например порядка 0,6 ГГц.

45 Структура 9, 9А связи, согласно изобретению, не ускоряет пучок и является в основном коаксиальным резонатором, колеблющимся в режиме стоячих ТЕМ-волн. Ее длина такова, чтобы сохранять синхронизацию с ускорением пучка. Связь с ускоряющими структурами 8 осуществляется через две или более щелей 14 связи, например четыре, как показано на фиг.9.

50 В таблице 1 сведены три примера выполнения возможных модулей линейного ускорителя CLUSTER 4, работающих на различных частотах: 1,5; 3,0 и 6,0 ГГц. В этих примерах ускоряемой частицей является  $^{12}\text{C}^{6+}$  ( $Q=6$ ,  $A=12$ ).

Таблица 1			
Примеры выполнения возможных модулей CLUSTER для ускорения частиц $^{12}\text{C}^{6+}$ ( $Q=6, A=12$ )			
Примеры возможных модулей CLUSTER	1	2	3
Частота (в МГц)	1500	3000	6000
Q (заряд ионов)	6	6	6
A (масса ионов)	12	12	12
Входная энергия (в МэВ) ( $\beta_{\text{input}}=v/c=0,25$ )	360	360	360
Выходная энергия (в МэВ) ( $0,27 \leq \beta_{\text{output}}=v/c, 28$ )	472	442	418
Число ускоряющих структур в одном модуле N	4	4	4
Длина (средняя) ускоряющей структуры (в мм)	370	180	90
Диаметр ускоряющей структуры (в мм)	90	42	21
Длина структуры связи (в мм)*	~35	~35	~35
Диаметр структуры связи (в мм)	180	80	50
Диаметр отверстия для пучка (в мм)	10,0	5,0	2,5
Полная длина (модуль с 4 ускоряющими структурами) (в мм)	1585	825	465
Шунтирующее полное сопротивление Z (в Ом/м)	~100	~140	~200
Среднее осевое поле $E_0$ (в МВ/м)	16,1	23,9	34,5
Максимальное поле поверхности $E_{\text{max}}$ ( $\approx 2,5 \times E_{\text{Kilpatrick}}$ ) (в МВ/м)	87,5	117,5	162,5
Пиковая мощность (модуль из 4 ускоряющих структур) (в МВт)	5,5	3,43	2,5
Длина магнитной квадрупольной линзы (в мм)	30	30	30
Магнитный квадрупольный градиент $B'$ (в Т/м) (решетка FODO)	210	355	475
Опережение фазы за период $\sigma$ (в град.)	80	74	50
Минимальная огибающая пучка $\beta_{\text{min}}$ (в мм/мрад)	0,3	0,2	0,2
Максимальная огибающая пучка $\beta_{\text{max}}$ (в мм/мрад)	1,6	0,9	0,6
* Настроенной для согласования с длиной квадрупольной линзы			

Из приведенного выше описания структур и функций следует, что линейные ускорители согласно изобретению эффективно обеспечивают указанные объем и преимущества и могут предпочтительно использоваться в различных областях: от области медицины, на которой основаны раскрытые примеры, до области исследований или во множестве других применений, например, для получения больших потоков для расщепления и синтеза ядер, а также в тех случаях, где предусмотрено использование сверхпроводящих ускорителей, и т.д.

Важный аспект данного изобретения состоит в том, что такой линейный ускоритель или CLUSTER может также эффективно работать на более низких частотах, чем были указаны выше. Действительно, за счет уменьшения рабочей частоты, например при работе на частоте порядка от 100 МГц до 0,5 ГГц, можно получать большие токи, которые требуются в некоторых областях исследований. Поэтому объем данного изобретения включает все структуры CLUSTER независимо от числа предусмотренных базовых и/или удлиненных модулей, при этом предлагаемый CLUSTER может работать как на высоких, так и на низких частотах, как указывалось выше.

Специалисты в данной области техники могут вводить технические и функциональные модификации в конструкцию линейных ускорителей и CLUSTER, согласно изобретению, для различных применений без отхода от объема и идеи данного изобретения, заданных в прилагаемой формуле изобретения.

Источники информации

P.M.Lapostolle, "Introduction a la Theorie des Accelerateurs Lineaires" (Введение в теорию линейных ускорителей), CERN 87-09 Division du Synchrotron a Protons, Juillet 1987.

T.P.Wangler, "Introduction to Linear Accelerators" (Введение в линейные ускорители), Los Alamos National Laboratories Report LA-UR-805, April 1993.

U.Ratzinger, "Effiziente Hochfrequenz-Linearbeschleuniger fuer leichte und schwere Ionen (Эффективные высокочастотные линейные ускорители для легких и тяжелых ионов), Habilitationsschrift, Fachbereich Physik der Johann Wolfgang Goethe Universitaet, Frankfurt am Main, Juli 1998.

Труды изобретателей в данной области приведены ниже в порядке дат публикации.

U.Amaldi, A Possible Scheme to Obtain e-e- and e+e- Collisions at Energies of GeV

(Возможная схема для получения столкновений e-e- и e+e- при энергиях в сотни ГэВ), Phys. Lett. Vol.61B, Nr.3, pp.313-315, March 1976.

U.Amaldi, M.Grandolfo and L.Picardi editors, "The RITA Network and the Design of Compact Proton Accelerators" (Сеть RITA и конструирование компактных ускорителей протонов), INFN-LNF Frascati, Italy, August 1996 (ISBN 88-86409-08-7).

M.Crescenti и 2 соавтора, "Commissioning and Experience in Stripping, Filtering and Measuring the 4.2 MeV/u Lead Beam at CERN Linac3", (Выполнение и опыт очистки, фильтрации и измерения свинцового пучка с энергией 4,2 МэВ/ну на линейном ускорителе 3), Linac96, Geneva, Switzerland, August 1996.

R.Zennaro и 2 соавтора, "Equivalent Lumped Circuit Study for the Field Stabilisation of a Long 4-Vane RFQ", (Исследование эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами для стабилизации поля длинной радиочастотной квадрупольной линзы с 4 лопастями), Linac98, Chicago, August 1998.

M.Crescenti и 8 соавторов, "Proton-Ion Medical Machine Study (PIMMS) PART I", (Исследование протонно-ионного медицинского устройства, часть 1), CERN/PS 99-010 (DI), Geneva, Switzerland, March 1999.

U.Amaldi, R.Zennaro и 14 соавторов, "Study, Construction and Test of a 3 GHz Proton Linac Booster (LIBO) for Cancer Therapy", (Исследование, конструирование и испытание усилителя для линейного ускорителя протонов с частотой 3 ГГц для терапии рака), EPAC2000, Vienna, Austria, June 2000.

U.Amaldi, R.Zennaro и 13 соавторов, "Successful High Power Test of a Proton Linac Booster (LIBO) Prototype for Hadrontherapy", (Успешное испытание с высокой мощностью прототипа усилителя для линейного ускорителя протонов для хандроно-терапии), PAC2000, Chicago, August 2000.

M.Crescenti и 13 соавторов, "Proton-Ion Medical Machine Study (PIMMS) PART II", (Исследование протонно-ионного медицинского устройства, часть 2), CERN/PS 2000-007 (DR), Geneva, Switzerland, July 2000. В частности, глава II-7 Инжекция.

#### Формула изобретения

1. Линейный ускоритель для ускорения пучка ионов, характеризующийся тем, что он содержит

(i) по меньшей мере, одну пару из первой и второй ускоряющих структур (8), выравненных по одной оси, резонирующих в электромагнитном поле стоячих волн Н-типа, в каждой из которых размещено несколько коаксиальных дрейфовых труб (15), поддерживаемых ножками и отделенных друг от друга с образованием соответствующего зазора (20), ускоряющего пучок ионов, при этом наружное окончание (8А) указанной первой ускоряющей структуры является входом для предварительно ускоренного, коллимированного и сфокусированного пучка ионов, а наружное окончание (8 В) является выходом для пучка ионов высокой энергии,

(ii) расположенную между ними структуру (9) связи или при необходимости модифицированную структуру (9А) связи для соединения с генератором (11) радиочастотной мощности, действующую в качестве моста для потока радиочастотной мощности между смежными ускоряющими структурами (8), коаксиальную, резонирующую в режиме объемного резонатора стоячих Т-волн, состоящую из двух коаксиальных цилиндров, при необходимости соединенную с вакуумной системой (13) и включающую при необходимости одну или несколько квадрупольных линз (18), длина которых является подходящей для поддержания синхронизации ускорения, соединенную с указанными первой и второй ускоряющими структурами (8) своим соответствующим внутренним окончанием (8С) через кольцевые выводы (10), присутствующие на обоих окончаниях указанных ускоряющих структур (8), и обеспечивающую регулирование электромагнитного поля на оси каждого указанного ускоряющего зазора (20),

(iii) при этом рабочая частота превышает 100 МГц.

2. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что внутри указанных

ускоряющих структур (8) указанные дрейфовые трубы (15) поддерживаются с помощью  $m \geq 1$  тонких радиальных ножек (16, 17), взаимно повернутых по окружности на  $\pi/m$ .

3. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что кольцевые выводы (10) выполнены в форме кольцевой камеры, имеющей внутренний диаметр, соответствующий наружному диаметру указанных ускоряющих структур (8), и наружный диаметр, примерно в два раза превышающий внутренний диаметр, при этом указанные выводы (10) открыты по окружности, соответствующей их внутреннему диаметру в то время, как на своей наружной поверхности они имеют отверстия связи (14) в определенных положениях.

4. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что базовый модуль (7), состоящий из указанных первой и второй ускоряющих структур (8) и расположенной между ними структуры (9А) связи, соединенной с генератором (11) радиочастотной мощности и при необходимости снабженной одной или несколькими квадрупольными линзами (18), предусмотрен для модульного удлинения с образованием удлиненных модулей (7А), всегда содержащих нечетное число  $n$  структур (9А) связи, при необходимости снабженных одной или несколькими квадрупольными линзами (18), и ускоряющими структурами (8) в количестве  $N=n+1$ .

5. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что длина указанных дрейфовых труб (15) и указанных ускоряющих зазоров (20) увеличена так, что расстояние между центрами смежных ускоряющих зазоров (20) составляет примерно целое число половин длины волны частиц ( $\beta\lambda/2$ ).

6. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что указанное множество дрейфовых труб (15), размещенных внутри указанных ускоряющих структур (8), расположено так, чтобы создать резонансный  $\pi$ -режим.

7. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что каждый базовый модуль (7) или каждый указанный удлиненный модуль (7А) образует последовательность связанных резонаторов, колеблющихся в  $\pi$ -режиме.

8. Система ускорения пучка ионов, отличающаяся тем, что она содержит последовательно установленные источник (1) ионов, при необходимости, инжектор (2) предварительного ускорения, при необходимости, линию (3) транспортировки луча низкой энергии, линейный ускоритель (4) для ускорения пучка ионов до энергии, требуемой для конкретного применения, по любому из пп.1-7, и дополнительно к этому при необходимости, линию (5) транспортировки пучка ионов высокой энергии, а также зону или устройство (6), где используется ускоренный пучок.

9. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что рабочая частота находится в диапазоне 100 МГц-0,8 ГГц.

10. Линейный ускоритель по п.1, характеризующийся тем, что рабочая частота превышает 0,8 ГГц.

11. Способ ускорения пучка ионов в линейном ускорителе, в котором пучок ионов, предварительно коллимированный, ускоренный, сфокусированный и при необходимости направленный в линию (3) транспортировки луча низкой энергии, инжектируют в линейный ускоритель (4) по любому из пп.1-10, в котором

ускорение луча получают с помощью радиочастотных электрических полей, уровень которых по существу является постоянным во всех указанных ускоряющих зазорах (20), принадлежащих одному и тому же модулю (7, 7А), предусмотренному в линейном ускорителе (4), при этом указанный модуль или модули (7, 7А) имеют единственный вход (12) для радиочастотной мощности для каждого предусмотренного модуля (7, 7А), при этом указанный единственный вход (12) для радиочастотной мощности соединен с единственной модифицированной структурой (9А) связи,

кроме того, на выходе линейного ускорителя (4) ускоренный пучок ионов при необходимости направляют в линию (5) транспортировки пучка высокой энергии и в зону или устройство (6), где он подлежит использованию.

12. Способ по п.11, характеризующийся тем, что энергию выходного пучка модулируют

посредством изменения входной радиочастотной мощности, а интенсивность выходного пучка линейного ускорителя модулируют с помощью параметров пучка ионов на входе линейного ускорителя и с помощью динамики пучка.

5

10

15

20

25

30

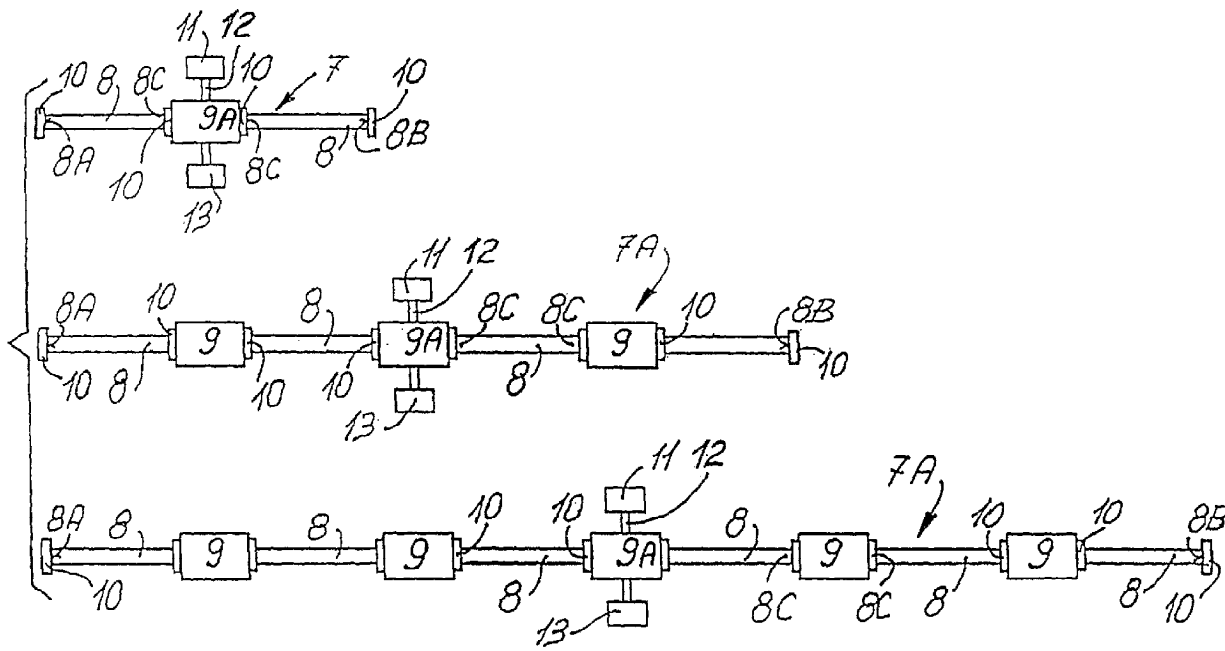
35

40

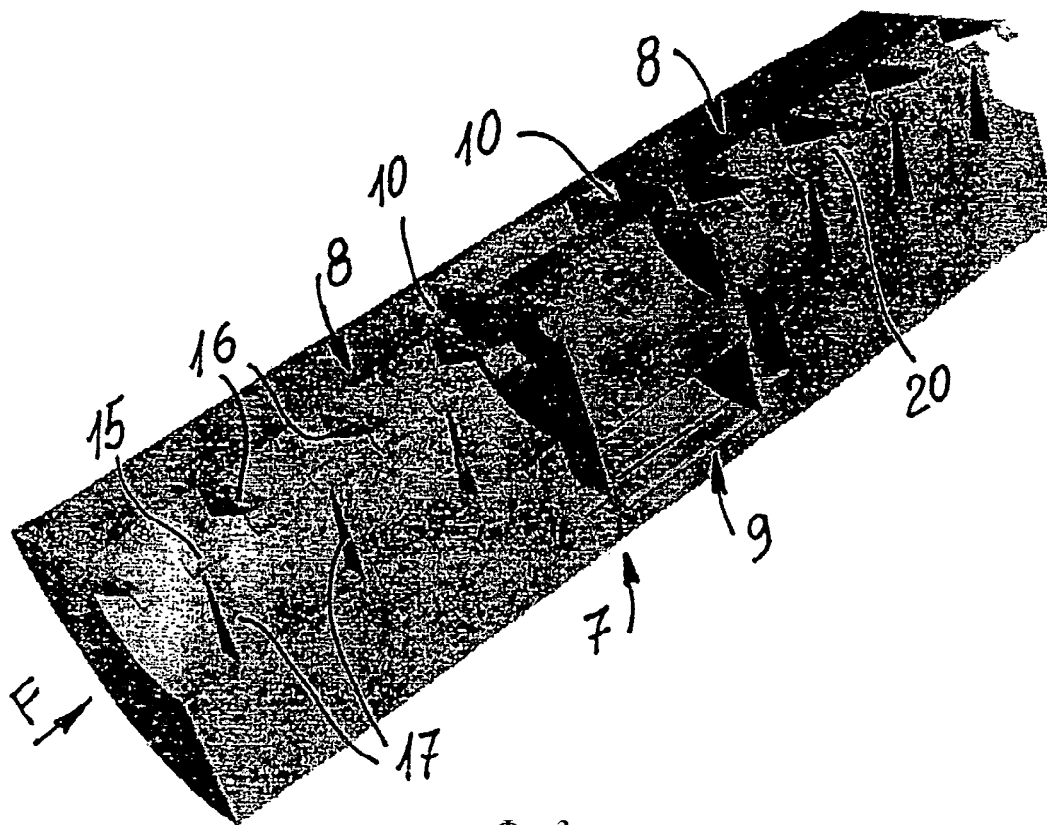
45

50

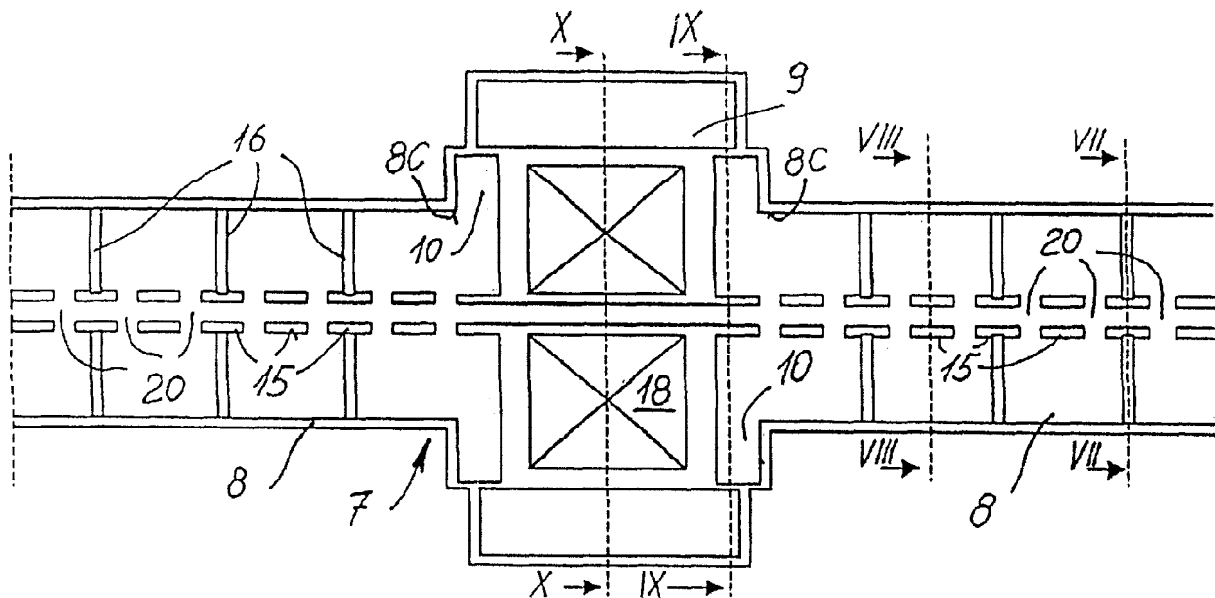




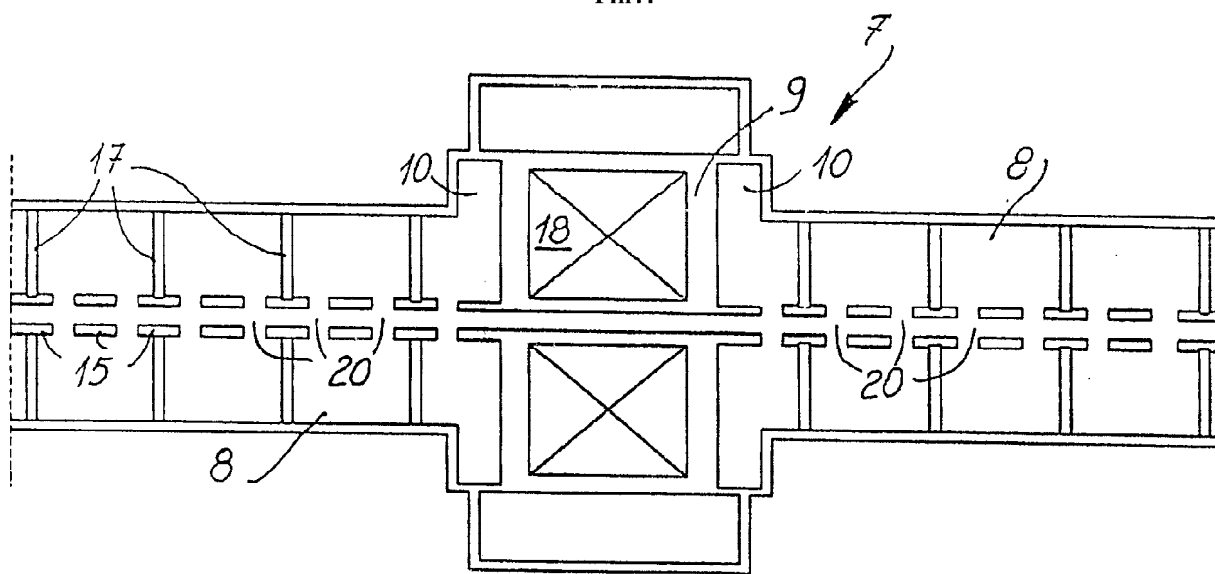
Фиг.2



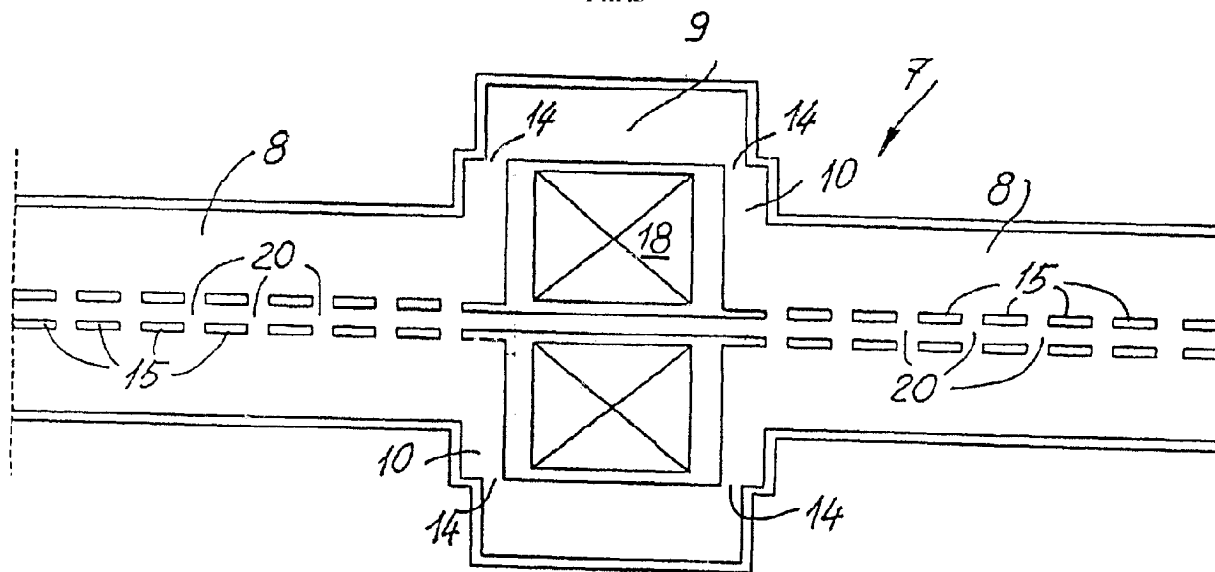
Фиг.3



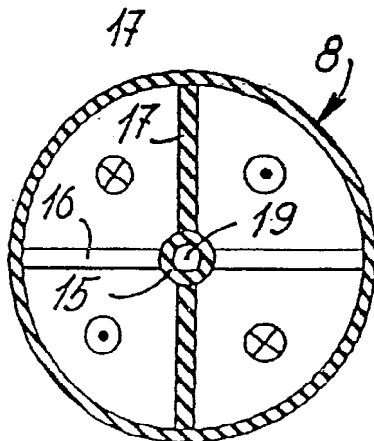
Фиг.4



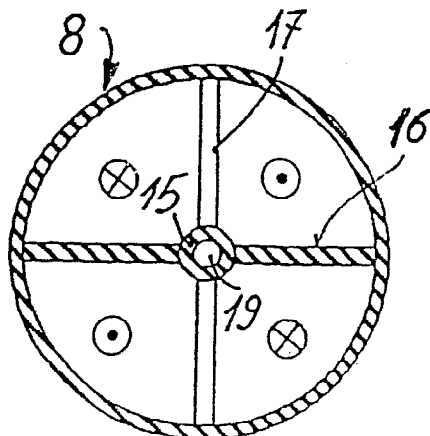
Фиг.5



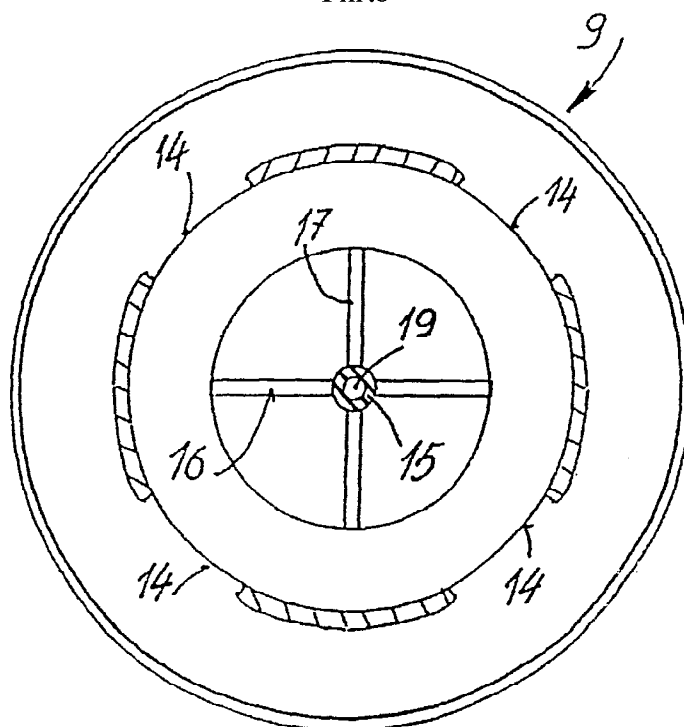
Фиг.6



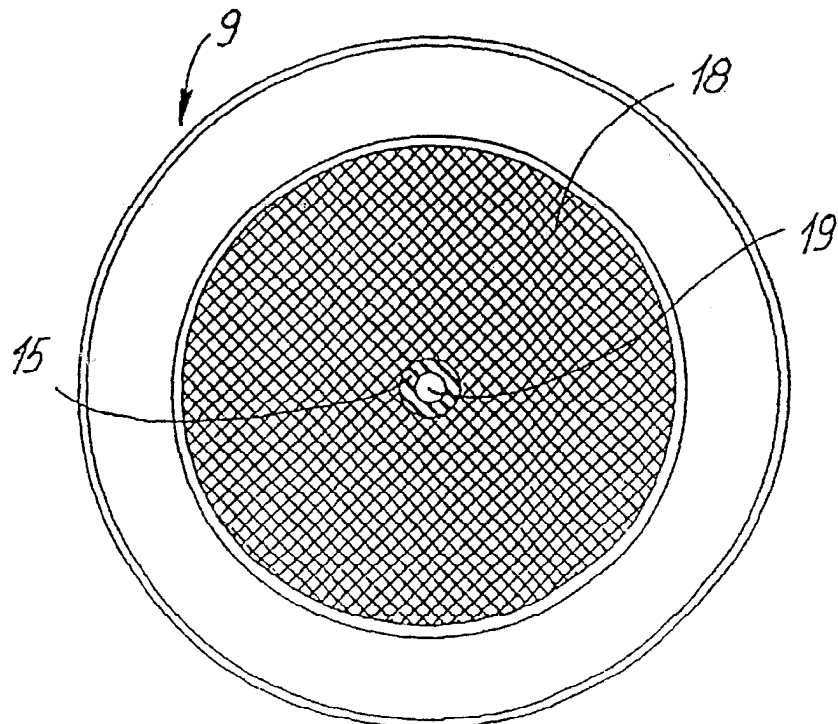
Фиг.7



Фиг.8

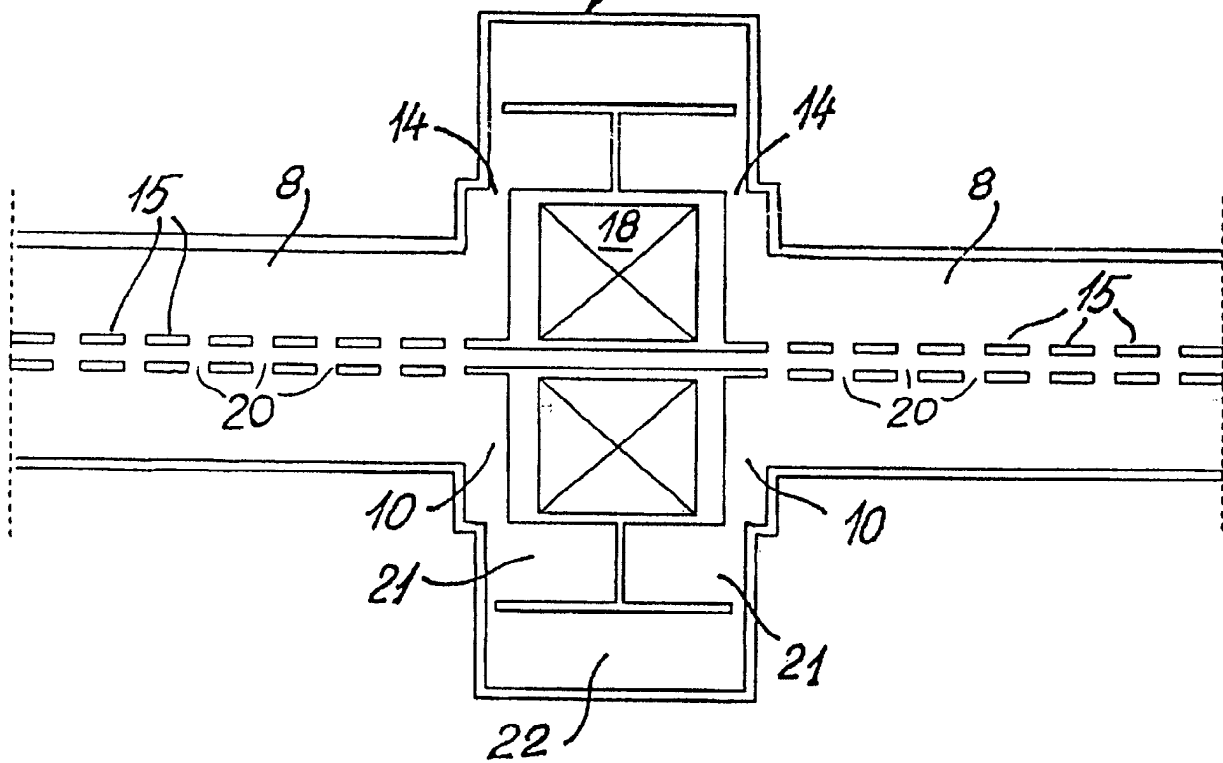


Фиг.9



Фиг.10

9A



Фиг.11