



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013100155/07, 05.04.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.04.2011

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
10.06.2010 DE 102010023339.0

(43) Дата публикации заявки: 20.07.2014 Бюл. № 14

(45) Опубликовано: 20.11.2015 Бюл. № 32

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 3386883 A, 04.06.1968. DE 102009023305 A1, 02.12.2010. EP 0441261 A2, 14.08.1991. SU 1735909 A1, 23.05.1992.

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на национальной фазе: 10.01.2013

(86) Заявка РСТ:
EP 2011/055235 (05.04.2011)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2011/154172 (15.12.2011)

Адрес для переписки:

129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, строение 3,
ООО "Юридическая фирма Городисский и
Партнеры"

(72) Автор(ы):

ХАЙД Оливер (DE)

(73) Патентообладатель(и):

СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ (DE)

(54) УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ ДВУХ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ

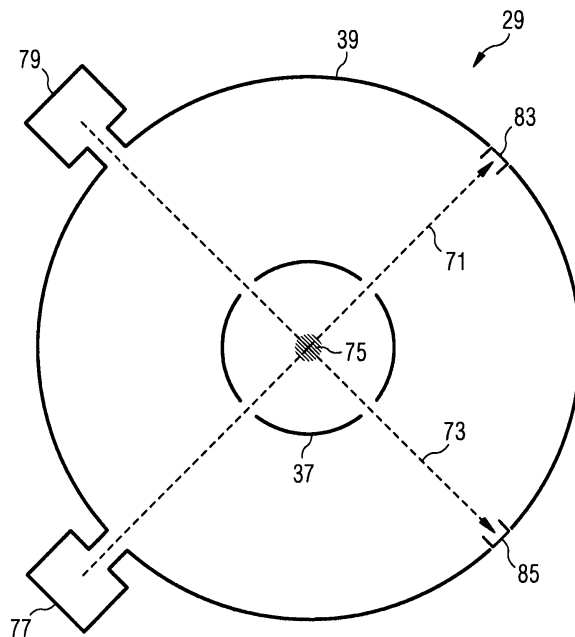
(57) Реферат:

Изобретение относится к ускорителю для ускорения и столкновения двух пучков заряженных частиц. Заявленное устройство содержит устройство формирования потенциального поля для формирования электростатического потенциального поля, которое создается таким образом, что посредством электростатического поля могут ускоряться или замедляться два пучка заряженных частиц, реакционную зону, в которой происходит столкновение обоих пучков заряженных частиц. При этом предусмотрено наличие первого участка ускорения для первого пучка в потенциальном поле, направленного на

реакционную зону, а также второго участка ускорения для второго пучка в потенциальном поле, при этом второй участок ускорения направлен на реакционную зону. Реакционная зона по отношению к потенциальному полю и к первому и второму участкам ускорения геометрически расположена таким образом, что частицы двух пучков могут ускоряться в направлении реакционной зоны вдоль первого участка ускорения и второго участка ускорения и после взаимодействия в реакционной зоне и прохождения через реакционную зону в потенциальном поле могут вновь замедляться. Техническим результатом является возможность

повышения энергетической эффективности ускорителя путем того, что энергия, затраченная устройством формирования потенциального поля

для ускорения обоих пучков к реакционной зоне, за счет замедления по меньшей мере частично может быть восстановлена. 7 з.п. ф-лы, 8 ил.



ФИГ.1

RU 2569324 C2

RU 2569324 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2013100155/07, 05.04.2011**

(24) Effective date for property rights:
05.04.2011

Priority:

(30) Convention priority:
10.06.2010 DE 102010023339.0

(43) Application published: **20.07.2014** Bull. № 14

(45) Date of publication: **20.11.2015** Bull. № 32

(85) Commencement of national phase: **10.01.2013**

(86) PCT application:
EP 2011/055235 (05.04.2011)

(87) PCT publication:
WO 2011/154172 (15.12.2011)

Mail address:

**129090, Moskva, ul. B. Spasskaja, 25, stroenie 3,
OOO "Juridicheskaja firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):
KhAJD Oliver (DE)

(73) Proprietor(s):
SIMENS AKTsiENGEZELL'ShAFT (DE)

(54) **ACCELERATOR FOR TWO PARTICLE BEAMS FOR PRODUCING COLLISION**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to an accelerator for acceleration and collision of two charged particle beams. The disclosed device comprises a potential field apparatus for generating an electrostatic potential field which is such that two beams of the charged particles are accelerated or decelerated by the electrostatic field, a reaction zone in which the collision of the two charged particle beams takes place, wherein the invention also provides a first acceleration region for the first beam in the potential field, which is directed towards the reaction zone, as well as second acceleration region for the second beam in the potential field, wherein the second acceleration region is directed towards the reaction zone. The reaction zone is arranged with respect to the potential field and to the first and second acceleration regions such that the particles of the two beams can be accelerated towards the reaction zone along the first acceleration region and the second acceleration region and, after interaction in the reaction

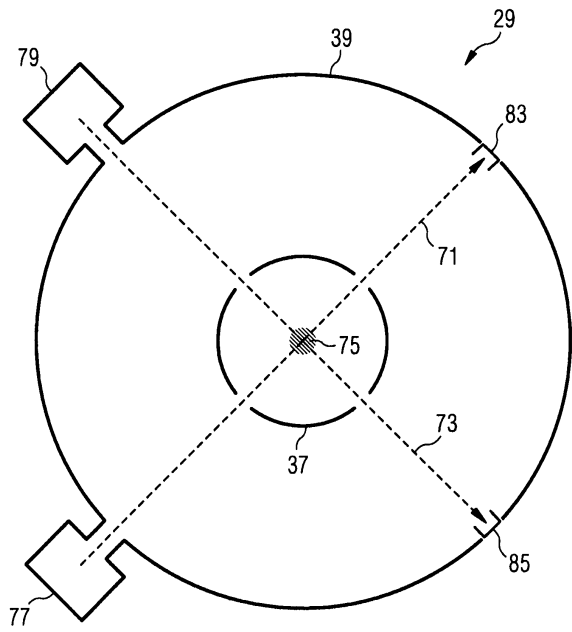
zone and passage through the reaction zone, are decelerated again in the potential field.

EFFECT: high energy-efficiency of the accelerator due to that the energy used by the potential field apparatus for accelerating the two beams towards the reaction zone can be recovered at least partially by the deceleration.

8 cl, 8 dwg

C 2
4
2
3
6
9
5
2
R U

R U
2
5
6
9
3
2
4
C 2



ФИГ.1

RU 2569324 C2

RU 2569324 C2

Имеются ядерные реакторы, в которых пучки ускоренных частиц направляются друг к другу, чтобы вызвать столкновение.

Так, например, известно, что компоненты, участвующие в термоядерной реакции с протонами ^{11}B , должны иметь кинетическую энергию свыше 600 кэВ относительно друг друга. В случае ядерного синтеза высвобождаются энергии 8,7 МэВ.

Задачей изобретения является создать ускоритель с энергетически эффективным устройством для запуска ядерных реакций.

Эта задача решается посредством признаков независимых пунктов формулы изобретения. Предпочтительные варианты осуществления характеризуются признаками зависимых пунктов формулы изобретения.

Соответствующий изобретению ускоритель для ускорения двух пучков заряженных частиц и для генерации столкновения между обоими пучками содержит:

- устройство формирования потенциального поля для формирования электростатического потенциального поля, которое создается таким образом, что посредством электростатического поля могут ускоряться или замедляться два пучка заряженных частиц,
- реакционную зону, в которой происходит столкновение обоих пучков заряженных частиц,
- первый участок ускорения для первого пучка в потенциальном поле, причем первый участок ускорения направлен на реакционную зону,
- второй участок ускорения для второго пучка в потенциальном поле, причем второй участок ускорения также направлен на реакционную зону.

Реакционная зона по отношению к потенциальному полю и к первому и второму участку ускорения геометрически расположена таким образом, что частицы двух пучков при работе ускорителя ускоряются в направлении реакционной зоны вдоль первого участка ускорения и второго участка ускорения. После взаимодействия в реакционной зоне и прохождения через реакционную зону в потенциальном поле частицы, которые не столкнулись друг с другом, вновь замедляются, так что энергия, затраченная устройством формирования потенциального поля для ускорения обоих пучков к реакционной зоне, за счет замедления по меньшей мере частично может быть восстановлена (регенерирована).

Предложенное устройство применяет, следовательно, электростатическое ускоряющее поле для ускорения по меньшей мере двух пучков ионов в качестве компонентов, участвующих в реакции. После ускорения и прохождения пучков-реактантов через зону взаимодействия заряженные частицы в электростатическом поле вновь тормозятся до незначительной скорости. Таким способом кинетическая энергия частиц, которые не прореагировали друг с другом, по существу и по большей части вновь восстанавливается.

Таким способом может также допускаться меньшее реакционное поперечное сечение. В частности, было установлено, что в устройствах, которые уничтожают пучок после прохождения через реакционную зону, например, так называемый сбор (дамп) пучка, может возникнуть большая потеря энергии. Например, при слишком малом реакционном поперечном сечении реактантов для термоядерной реакции, это может приводить к тому, что выход энергии в целом отрицателен, несмотря на высокий выход энергии при собственно реакции синтеза.

Этот отрицательный чистый выход энергии может получаться также при применении твердых мишеней, так как кинетическая энергия и в том случае не восстанавливается.

Предложенное устройство решает эти проблемы, так как большая часть примененной

для ускорения частиц энергии, за счет геометрической конфигурации электростатического потенциального поля, хода пучков и реакционной зоны по отношению друг к другу, вновь восстанавливается.

5 Так как часть частиц проходят через реакционную зону без существенного влияния, можно за счет геометрической конфигурации в потенциальном поле вновь восстановить 60%, в особенности 70% или максимум 80% или даже 90% энергии, примененной для ускорения пучков частиц.

10 Поэтому возможно при заданных затратах энергии применять мощные пучки частиц и тем самым достичь высокой скорости реакции. В отличие от плазменного реактора дополнительно минимизируется присутствие электронов в реакционной зоне, так что, например, минимизируются потери за счет излучения и передачи импульса.

15 Дополнительно ускоритель может иметь первый участок замедления для первого пучка в потенциальном поле, причем первый участок замедления направлен в сторону от реакционной зоны. Ускоритель может также иметь второй участок замедления для второго пучка в потенциальном поле, причем второй участок замедления направлен в сторону от реакционной зоны. Ускоритель должен, следовательно, не для каждого пучка иметь участок замедления. Например, для частичного восстановления энергии может быть уже достаточным замедлять один из обоих пучков после прохождения через реакционную зону.

20 Ускоритель может дополнительно включать в себя первый источник для предоставления заряженных частиц для первого пучка и для ввода его в первый участок ускорения. Ускоритель также может включать в себя второй источник для предоставления заряженных частиц для второго пучка и для ввода его во второй участок ускорения.

25 Ускоритель может дополнительно включать в себя первый уловитель для замедленных частиц первого пучка, который находится на конце первого участка пучка и, в частности, отрицательно заряжен. Ускоритель может также включать в себя второй уловитель для замедленных частиц второго пучка, который находится на конце второго участка пучка и, в частности, отрицательно заряжен. Электроды уловителя собирают 30 замедленные частицы. Потенциал, на котором находятся электроды уловителя, выбран таким образом, что электроды уловителя улавливают замедленные частицы. Потенциал электродов уловителя обычно согласован с местом в потенциальном поле, в котором размещены электроды уловителя.

35 Частицы первого пучка могут быть протонами. Частицы второго пучка могут быть ионами ^{11}B . Конфигурация потенциального поля может быть, в частности, выполнена таким образом, что за счет сформированного потенциального поля может достигаться энергия столкновения свыше 600 кэВ. Таким способом ускоритель может использоваться для реакции синтеза между протонами и ионами ^{11}B .

40 Устройство формирования потенциального поля может включать в себя набор конденсаторов из концентрично друг к другу расположенных электродов, с первым электродом, который может быть приведен на первый потенциал, и с вторым электродом, который расположен концентрично вокруг первого электрода и может быть приведен на второй потенциал, отличающийся от первого потенциала, так что 45 между первым электродом и вторым электродом формируется ускоряющий потенциал, причем реакционная зона находится внутри первого электрода. Первый электрод может, следовательно, быть отрицательно заряженным высоковольтным электродом.

Устройство формирования потенциального поля может содержать один или более промежуточных электродов, которые расположены концентрично между первым

электродом и вторым электродом. Может иметься переключающее устройство, с которым соединены электроды набора конденсаторов, и которое выполнено таким образом, что при работе переключающего устройства расположенные концентрично друг другу электроды набора конденсаторов приводятся на нарастающие ступени потенциала согласно последовательности их расположения. При этом высоковольтный электрод при концентричном расположении может быть наиболее удаленно внутри расположенным электродом, в то время как самый внешний электрод может быть, например, электродом массы.

Посредством переключающего устройства с электронными лампами электроды набора конденсаторов могут заряжаться с помощью переменного напряжения накачки. Амплитуда переменного напряжения накачки может быть сравнительно малой по отношению к достижимому высокому напряжению постоянного тока (DC). Эта структура устройства формирования потенциального поля позволяет обеспечить высокое ускорение при компактной конструкции.

Концентричное расположение обеспечивает возможность в целом компактной конструкции. Для благоприятного использования объема изоляции, следовательно, объема между внутренними и внешними электродами один или более концентричных промежуточных электродов приведены на соответствующие потенциалы. Ступени потенциала последовательно нарастают и могут выбираться таким образом, что внутри всего объема изоляции получается по существу равномерная напряженность поля.

В объеме изоляции может находиться высокий вакуум. Применение изолирующих материалов имеет недостаток, состоящий в том, что эти материалы при нагрузке электрическим постоянным полем имеют тенденцию к накоплению внутренних зарядов, которые, в частности, вызываются ионизированным излучением при работе ускорителя. Накопленные блуждающие заряды вызывают во всех физических изоляторах сильную неоднородную напряженность электрического поля, которая затем приводит к локальным превышениям границы пробоя и тем самым к формированию искровых каналов. Изоляция электродов набора электродов по отношению друг к другу посредством высокого вакуума позволяет избежать подобных недостатков. За счет этого можно увеличить напряженность электрического поля, используемую в стабильном режиме работы. Устройство, таким образом, по существу, за исключением немногих компонентов, как, например, подвески электродов, свободно от изоляционных материалов. Тем самым возможна эффективная, т.е. компактная и надежная изоляция высоковольтных электродов.

Введенные промежуточные электроды повышают к тому же границу пробивной напряженности поля, так что могут вырабатываться более высокие постоянные напряжения, чем без промежуточных электродов. Это основывается на том, что пробивная напряженность поля в вакууме примерно обратно пропорциональна квадратному корню из расстояния между электродами. Введенный(е) промежуточный(е) электрод(ы), с которым(и) электрическое поле внутри высоковольтного источника постоянного напряжения становится более равномерным, одновременно способствует(ют) предпочтительному повышению возможной достижимой напряженности поля.

Если подобный высоковольтный источник постоянного напряжения используется в качестве устройства формирования потенциального поля, при компактной конструкции может достигаться энергия частиц в диапазоне МВ.

В предпочтительной форме выполнения переключающее устройство содержит высоковольтный каскад, в особенности, каскад Грейнахера, или каскад Кокрофта-Уолтона. С подобным устройством с помощью сравнительно низкого переменного

напряжения первый электрод, второй электрод, а также промежуточные электроды могут заряжаться для генерации постоянного напряжения.

Эта форма выполнения основывается на идее генерации высокого напряжения, как она становится возможной, например, за счет выпрямительного каскада Грейнахера.

5 При использовании в ускорителе электрическая потенциальная энергия служит тому, чтобы кинетическую энергию частиц преобразовывать за счет того, что высокий потенциал приложен между источником частиц и концом участка ускорения.

10 В варианте выполнения набор конденсаторов посредством зазора, который проходит через электроды, делится на две отдельные друг от друга цепи конденсаторов. За счет разделения концентрических электродов набора конденсаторов на две отдельные друг от друга цепи конденсаторов, эти две цепи конденсаторов предпочтительным образом могут применяться для выполнения каскадного переключающего устройства, как каскад Грейнахера или каскад Кокрофта-Уолтона. Каждая цепь конденсаторов представляет собой компоновку со своей стороны расположенных концентрично друг

15 другу (частичных) электродов.

При выполнении набора электродов как набора сферических оболочек, разделение может осуществляться сечением вдоль экватора, что приводит тогда к двум наборам полусфер.

20 Отдельные конденсаторы цепей могут при таком включении заряжаться, соответственно, до напряжения от максимума к максимуму (размаха) первичного входного переменного напряжения, которое служит для заряда высоковольтного источника. Тем самым может достигаться простым способом вышеупомянутое выравнивание потенциала, равномерное распределение электрического поля и тем самым оптимальное использование изоляционного промежутка.

25 Предпочтительным образом переключающее устройство, которое включает в себя высоковольтный каскад, может соединять между собой две отдельные цепи конденсаторов и, в частности, размещаться в зазоре. Входное переменное напряжение для высоковольтного каскада может прикладываться между обоими самыми внешними электродами цепей конденсаторов, так как они, например, могут быть доступными

30 извне. Диодные цепочки выпрямительной схемы можно тогда разместить в экваториальном зазоре тем самым компактным способом.

35 Электроды набора конденсаторов могут быть сформированы таким образом, что они лежат на поверхности эллипсоида, в частности на сферической поверхности или на поверхности цилиндра. Эти формы являются физически благоприятными. Особенно благоприятным является выбор формы электродов, как в случае полой сферы или сферического конденсатора. Подобные формы, например цилиндра, также возможны, причем последний в общем случае обычно имеет сравнительно неоднородное распределение электрического поля.

40 Незначительная индуктивность чашеподобных потенциальных электродов позволяет применять более высокие рабочие частоты, так что падение напряжения при съеме тока, несмотря на относительно низкую емкость отдельных конденсаторов, остается ограниченным.

45 В одной форме выполнения переключающее устройство содержит диоды, которые, в частности, могут быть выполнены как электронные лампы. Это является предпочтительным по сравнению с полупроводниковыми диодами, так как при этом не существует физического соединения между наборами электродов, которое обуславливает опасность пробоя, и так как вакуумные диоды действуют, ограничивая ток, и являются надежными по отношению к перегрузке по току или перегрузке по

напряжению.

Диоды цепочки выпрямителей могут также быть выполнены как вакуумные электронные лампы без собственного вакуумного корпуса. В этом случае необходимый для работы электронных ламп вакуум обеспечивается посредством вакуумной изоляции.

5 Катоды могут быть выполнены как термические эмиттеры электронов, например, с нагревом пучка через экваториальный зазор, или как фотокатоды. Последние позволяют, посредством модуляции подсветки, например, посредством лазерного излучения, осуществлять управление током в каждой диоде и тем самым током заряда и, таким образом, косвенно, высоким напряжением.

10 Участок (участки) ускорения или участок (участки) замедления могут быть образованы посредством отверстий в электродах набора конденсаторов. Ускорение или замедление частиц осуществляется тогда через электроды.

В ускорителе применение вакуума имеет к тому же преимущество, состоящее в том, что не должна предусматриваться никакая собственная лучевая трубка, которая, в
15 свою очередь, имела бы по меньшей мере частично изоляционную поверхность. И здесь можно избежать возникновения критических проблем разряда на стенке вдоль изоляционных поверхностей, так как теперь не требуется, чтобы ускорительный канал имел изоляционные поверхности.

Примеры выполнения изобретения поясняются более подробно на основе следующих
20 чертежей, однако без ограничения ими; при этом на чертежах показано следующее:

фиг. 1 - схематичное представление конструкции ускорителя,

Фиг. 2 - схематичное представление схемы Грейнахера, известной из уровня техники,

фиг. 3 - схематичное представление сечения устройства формирования потенциального поля с реакционной зоной в центре,

25 Фиг. 4 - схематичное представление структуры электродов с набором электродов, расположенных в форме цилиндра,

фиг. 5 - схематичное представление сечения устройства формирования потенциального поля по фиг. 3 с уменьшающимся по направлению к центру расстоянием между
электродами,

30 фиг. 6 - представление диодов переключающего устройства, которые выполнены как электронные лампы без вакуумной колбы,

фиг. 7 - диаграмма, которая показывает процесс заряда в зависимости от циклов накачки, и

фиг. 8 - предпочтительная форма Кирхгофа концов электродов.

35 Одинаковые части снабжены на чертежах одинаковыми ссылочными позициями.

Фиг. 1 показывает схематичное представление соответствующего изобретению ускорителя 29 для ускорения двух пучков 71, 73 заряженных частиц и для создания столкновения между обоими пучками. На основе этого представления может быть пояснен принцип функционирования.

40 Ускоритель 29 содержит устройство, которое генерирует статическое потенциальное поле. В показанном здесь примере выполнения устройство содержит отрицательно заряженный первый, центральный электрод 37, который, например, может быть выполнен в цилиндрической или сферической форме. Центральный электрод 37 имеет отверстия, через которые ускоренные лучи 71, 73 частиц могут входить или вновь
45 выходить. Внешний электрод 37 может быть соединен с массой и имеет, как и центральный электрод 37, соответствующие отверстия.

Статическое потенциальное поле, которое применяется для ускорения или замедления пучков 71, 73 частиц, образуется между центральным электродом 37 и внешним

электродом 38.

Внутри центрального электрода 37 находится зона 75 взаимодействия, в которой взаимодействуют друг с другом оба пучка 71,73 частиц.

Первый источник 77 ионов находится вне внешнего электрода 39 и предоставляет
 5 первый тип ионов, например, протоны - H^+ - Второй источник 79 ионов находится также вне внешнего электрода 39 и предоставляет второй тип ионов, например, $^{11}B^{5+}$ -ионы.

Ионы формируются в первый пучок 71 частиц и, соответственно, второй пучок 73
 10 частиц и ускоряются посредством потенциального поля, которое формируется посредством этого устройства. После прохождения обоих пучков 71, 73 частиц через зону 75 взаимодействия, оба пучка 71, 73 частиц вновь замедляются, так что энергия, затраченная на ускорение, большей частью вновь восстанавливается. В конце участка ускорения находятся, соответственно, электроды 83, 85 улавливателя для сбора
 15 замедленных электронов. Электроды 83, 85 улавливателя находятся под низким отрицательным потенциалом, так что выполнение их функции гарантировано.

С помощью блок-схемы, показанной на фиг. 2, поясняется принцип работы высоковольтного каскада 9, который выполнен согласно схеме Грейнахера. По этому
 20 принципу можно реализовать структуру устройства формирования потенциального поля, которое является особенно предпочтительным и далее будет пояснено с помощью фиг. 3.

На входе 11 приложено переменное напряжение U . Первая полуволна заряжает через
 диод 13 конденсатор 15 до напряжения U . При следующей за этим полуволне переменного напряжения напряжение U конденсатора 13 суммируется с напряжением
 25 U на входе 11, так что конденсатор 17 через диод 19 заряжается теперь до напряжения $2U$. Этот процесс повторяется в последующих диодах и конденсаторах, так что в целом в показной на фиг. 1 схеме на выходе 21 создается напряжение $6U$. Фиг. 2 также явно показывает, как посредством представленной схемы образуется первый набор 23 конденсаторов первой цепи конденсаторов и второй набор 25 конденсаторов второй
 30 цепи конденсаторов.

Фиг. 3 показывает схематичное сечение высоковольтного источника 31 постоянного
 напряжения с центральным электродом 37, внешним электродом 39 и рядом промежуточных электродов 33, которые включены посредством высоковольтного
 каскада 35, принцип действия которого пояснялся со ссылкой на фиг.2, и могут
 35 заряжаться посредством этого высоковольтного каскада 35. Высоковольтный источник служит в качестве устройства для формирования потенциального поля. Источники и электроды улавливателя на фиг. 3 для наглядности чертежа не показаны, но находятся в аналогичном месте, как на фиг. 1.

Электроды 39, 37, 33 выполнены в полой сферической форме и размещены
 40 концентрично друг другу. Максимальная напряженность электрического поля, которая может быть приложена, пропорциональна кривизне электродов. Поэтому геометрия сферической оболочки особенно благоприятна.

В центре расположен высоковольтный электрод 37, а самый внешний электрод 39
 может быть электродом массы. Посредством экваториального сечения 47 электроды
 45 37, 39, 33 разделены на два разделенных зазором набора полусфер. Первый набор полусфер образует первую цепь 41 конденсаторов, второй набор полусфер образует вторую цепь 43 конденсаторов.

При этом к самым внешним электродам-полусферам 39', 39" приложено
 соответственно напряжение U источника 45 переменного напряжения. Диоды 49 для

формирования схемы размещены в области большого круга полых полусфер, то есть в экваториальном сечении 47 соответствующих полых сфер. Диоды 49 образуют шунтирующие соединения между обеими цепями 41, 43 конденсаторов, которые соответствуют обоим наборам 23, 25 конденсаторов по фиг. 2.

5 В представленном здесь высоковольтном источнике 31 посредством отверстий в электродных оболочках образуется первый участок 51 ускорения или замедления и второй участок 52 ускорения или замедления.

Для того чтобы изолировать высоковольтный электрод 37, вся электродная компоновка изолируется посредством вакуумной изоляции. За счет этого, в том числе,
10 могут генерироваться особенно высокие напряжения высоковольтного электрода 37, что имеет следствием особенно высокую энергию частиц. Однако также в принципе возможна изоляция высоковольтного электрода посредством твердой или жидкой изоляции.

Применение вакуума в качестве изолятора и применение расстояния между
15 промежуточными электродами величиной порядка 1 см позволяют достичь электрических напряженностей поля со значениями свыше 20 МВ/м. Кроме того, применение вакуума имеет преимущество, состоящее в том, что ускоритель в процессе работы не должен становиться недогруженным, так как возникающее при ускорении излучение может привести к проблемам в материале изолятора. Это позволяет
20 обеспечить создание машин с меньшими размерами и более компактных.

Одна форма выполнения высоковольтного источника предусматривает установку центрального электрода на потенциал -10 МВ.

Высоковольтный источник может иметь $N=50$ ступеней, то есть всего 100 диодов и конденсаторов. При внутреннем радиусе $r=0,05$ м и вакуумной изоляции с пробивной
25 напряженностью поля 20 МВ/м внешний радиус составляет 0,55 м. В каждой полусфере находятся 50 промежуточных полостей с расстоянием 1 см между смежными сферическими оболочками.

Меньшее число ступеней уменьшает число циклов заряда и эффективный внутренний импеданс источника, однако повышает требования к зарядному напряжению накачки.

30 Расположенные в экваториальном промежутке диоды, которые соединяют друг с другом оба набора полусфер, могут, например, располагаться согласно спиральному образцу. Полная емкость может составлять 74 пФ согласно уравнению (3.4), накопленная энергия равна 3,7 кДж. Зарядный ток 2 мА требует рабочей частоты примерно 100 кГц.

35 Фиг. 4 иллюстрирует форму электродов, при которой электроды 33, 37, 39, в форме полого цилиндра размещены концентрично друг другу. С помощью зазора набор электродов разделен на две отдельные друг от друга цепи конденсаторов, которые могут подключаться с помощью переключающего устройства, выполненного аналогично фиг. 2. Участки ускорения или замедления (здесь не показаны) образуются
40 с помощью отверстий в электродах набора конденсаторов.

Фиг. 5 показывает дальнейшее развитие 81 показанного на фиг. 2 высоковольтного источника, в котором расстояние между электродами 39, 37, 33 уменьшается по направлению к центру. Как поясняется ниже, за счет такого выполнения можно компенсировать уменьшение приложенного к самому внешнему электроду 39
45 переменного напряжения накачки по направлению к центру, так что между смежными парами электродов существует по существу одинаковая напряженность поля. Тем самым может достигаться по существу постоянная напряженность поля вдоль участков 51, 52 ускорения.

Фиг. 6 показывает форму выполнения диодов переключающего устройства. Концентрично расположенные электроды 39, 37, 33 в форме полусферических оболочек изображены для наглядности только обозначением.

Диоды показаны здесь как электронные лампы 63 с катодом 65 и противоположным анодом 67. Так как переключающее устройство размещено в вакуумной изоляции, то отсутствует вакуумный корпус электронных ламп, который в противном случае был бы необходим для работы электронов. Катоды могут выполняться как термические эмиттеры электронов, например, с нагревом излучением через экваториальный зазор, или как фотокатоды. Последние обеспечивают возможность, за счет модуляции подсветки, например, посредством лазерного излучения, управления током в каждом диоде. Ток заряда и, косвенным образом, высокое напряжение могут управляться таким образом.

Далее излагаются более подробные сведения относительно компонентов высоковольтного источника или ускорителя частиц.

15 СФЕРИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР

Компоновка соответствует принципу, представленному на фиг. 1, чтобы располагать высоковольтный электрод внутри ускорителя, а концентричный электрод массы - на внешней стороне ускорителя.

Сферический конденсатор с внутренним радиусом r и с внешним радиусом R имеет
20 емкость

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{rR}{R-r} \quad (3.1)$$

Напряженность поля при радиусе ρ тогда равна

$$25 \quad E = \frac{rR}{(R-r)\rho^2} U \quad (3.2)$$

Эта напряженность поля квадратично зависит от радиуса и поэтому сильно увеличивается по направлению к внутреннему электроду. Для внутренней площади
30 электрода $\rho=r$ достигается максимум

$$\dot{E} = \frac{R}{r(R-r)} U \quad (3.3)$$

С точки зрения пробивной прочности это является неблагоприятным.

35 Гипотетический сферический конденсатор с однородным электрическим полем имел бы емкость

$$\bar{C} = 4\pi\epsilon_0 \frac{R^2 + rR + r^2}{R-r} \quad (3.4)$$

40 За счет того что в каскадном ускорителе электроды конденсаторов каскада Грейнахера введены как промежуточные электроды на четко определенном потенциале, распределение напряженности поля по радиусу линейно выравнивается, так как для тонкостенных полых сфер электрическая напряженность поля примерно соответствует плоскому случаю

$$45 \quad E \rightarrow \frac{U}{(R-r)} \quad (3.5)$$

с минимальной максимальной напряженностью поля.

Емкость двух смежных промежуточных электродов равна

$$C_k = 4\pi\epsilon_0 \frac{r_k r_{k+1}}{r_{k+1} - r_k} \quad (3.6)$$

Электроды полусферической формы и одинаковое расстояние между электродами $d=(R-r)/N$ приводит к $r_k=r+kd$ и к емкостям электродов

$$C_{2k} = C_{2k+1} = 2\pi\epsilon_0 \frac{r^2 + rd + (2rd + d^2)k + d^2 k^2}{d} \quad (3.7)$$

ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Современные лавинные полупроводниковые диоды имеют очень незначительные паразитные емкости и демонстрируют короткие времена восстановления. Включение последовательно не требует никаких сопротивлений для выравнивания потенциала. Рабочая частота может выбираться сравнительно высокой, чтобы использовать относительно малые межэлектродные емкости обоих наборов конденсаторов Грейнахера.

Для напряжения накачки для заряда каскада Грейнахера может применяться напряжение $U_{in} \approx 100$ кВ, т.е. 70 кВ_{эфф}. Диоды должны выдерживать напряжения 200 кВ. Это может достигаться тем, что применяются цепочки диодов с малым допуском. Может применяться, например, десять диодов на 20 кВ. Диоды могут быть, например, диодами фирмы Филипс (Philips), обозначенными как BY724, диодами фирмы EDAL, обозначенными как BR757-200A, или диодами фирмы Фуджи (Fuji), обозначенными как ESJ5320A.

Быстрые времена восстановления для запираания (обратное время восстановления), например, $t_{rr} \approx 100$ нс для BY724, минимизируют потери. Размеры диода BY724, равные $2,5$ мм \times $12,5$ мм, позволяют разместить все 1000 диодов для переключающего устройства в единственной экваториальной плоскости для высоковольтного источника сферической формы.

Вместо твердотельных диодов могут также использоваться электронные лампы, в которых эмиссия электронов применяется для выпрямления. Цепочка диодов может быть образована множеством размещенных по отношению друг к другу в виде петли электродов электронных ламп, которые соединены с полусферическими оболочками. Каждый электрод действует, с одной стороны, как катод, а с другой стороны - как анод.

ДИСКРЕТНЫЙ НАБОР КОНДЕНСАТОРОВ

Центральная идея состоит в том, чтобы концентрично друг за другом расположенные электроды пересекать в экваториальной плоскости. Оба получаемые в результате набора электродов представляют собой каскадные конденсаторы. Необходимо только цепочки диодов подключить к противоположащим электродам через плоскость сечения. Следует заметить, что выпрямитель стабилизирует разность потенциалов расположенных друг за другом электродов автоматически примерно на $2U_{in}$, что предполагает постоянное расстояние между электродами. Приводное напряжение прикладывается между обеими внешними полусферами.

ИДЕАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ

Если схема содержит только емкости согласно фиг. 3, то стационарный режим работы рабочей частоты f выдает заряд

$$Q = \frac{I_{out}}{f} \quad (3.8)$$

на полную волну в нагрузку посредством конденсатора C_0 . Каждый из пары

конденсаторов C_{2k} и C_{2k+1} передает, таким образом, заряд $(k+1)Q$.

Накачка заряда представляет импеданс генератора-источника

$$R_G = \frac{1}{2f} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{2k^2 + 3k + 1}{C_{2k}} + \frac{2k^2 + 4k + 2}{C_{2k+1}} \right). \quad (3.9)$$

Тем самым ток нагрузки I_{out} сокращает выходное напряжение постоянного тока (DC) согласно

$$U_{out} = 2NU_{in} - R_G I_{out}. \quad (3.10)$$

Ток нагрузки обуславливает остаточные пульсации переменного тока (AC) в DC выходе со значением размаха амплитуд

$$\delta U = \frac{I_{out}}{f} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{k+1}{C_{2k}}. \quad (3.11)$$

Если все конденсаторы равны $C_k=C$, то эффективный импеданс источника

$$R_G = \frac{8N^3 + 9N^2 + N}{12fC} \quad (3.12)$$

и значение размаха амплитуд AC пульсаций становится равным

$$\delta U = \frac{I_{out}}{fC} \frac{N^2 + N}{2}. \quad (3.13)$$

Для данного накопителя полной энергии внутри выпрямителя, емкостная неуравновешенность сокращает в пользу низковольтной части значения R_G и R_R незначительно по сравнению с обычным выбором одинаковых конденсаторов.

Фиг. 7 показывает зарядку незаряженного каскада $N=50$ концентричных полусфер, нанесенную на график в зависимости от числа циклов накачки.

ЕМКОСТИ РАССЕЯНИЯ

Любой обмен зарядами между двумя колоннами сокращает эффективность схемы множителя (см. фиг. 1), например, ввиду емкостей рассеяния (паразитных емкостей) c_j и потерь заряда из-за задержки запираания (потерь заряда обратного восстановления) q_j через диоды D_j .

Основные уравнения для конденсаторных напряжений U_k^\pm на положительных и отрицательных экстремумах пикового приводного напряжения U , причем падением напряжения пробоя на диодах пренебрегают, имеют вид:

$$U_{2k}^+ = u_{2k+1} \quad (3.14)$$

$$U_{2k}^- = u_{2k} \quad (3.15)$$

$$U_{2k+1}^+ = u_{2k+1} \quad (3.16)$$

$$U_{2k+1}^- = u_{2k+2} \quad (3.17)$$

вплоть до индекса $2N-2$ и

$$U_{2N-1}^+ = u_{2N-1} - U \quad (3.18)$$

$$U_{2N-1}^- = U. \quad (3.19)$$

При этих условиях средняя амплитуда DC-выходного напряжения равна

$$U_{out} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{2N-1} u_k . \quad (3.20)$$

5 Значение размаха амплитуд пульсаций DC-напряжения равно

$$\delta U = \sum_{k=0}^{2N-1} (-1)^{k+1} u_k . \quad (3.21)$$

10 При емкостях рассеяния c_i , параллельных диодам D_i , основные уравнения для переменных $u_{-1}=0$, $U_{2N}=2U$, и трехдиагональная система уравнений имеет вид:

$$C_{k-1}u_{k-1} - (C_{k-1} + C_k)u_k + (C_k - c_k)u_{k+1} = \begin{cases} Q & \forall k \text{ четное} \\ 0 & \forall k \text{ нечетное} . \end{cases} \quad (3.22)$$

15 Заряды задержки запираания (заряды обратного восстановления)

Конечные времена задержки запираания t_{tr} ограниченных диодов обуславливают потерю заряда

$$q_D = \eta Q_D \quad (3.23)$$

20 где $\eta = f t_{tr}$ и Q_D для заряда на полную волну в прямом направлении. Уравнение (3.22) затем сводится к

$$C_{k-1}u_{k-1} - (C_{k-1} + (1 - \eta)C_k)u_k + ((1 - \eta)C_k - c_k)u_{k+1} = \begin{cases} Q & \forall k \text{ четное} \\ 0 & \forall k \text{ нечетное} . \end{cases} \quad (3.24)$$

25 НЕПРЕРЫВНЫЙ НАБОР КОНДЕНСАТОРОВ ЕМКОСТНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ

30 В каскадах Грейнахера выпрямительные диоды по существу воспринимают AC напряжение, преобразуют его в DC напряжение и аккумулируют его в высокое DC выходное напряжение. AC напряжение от обеих конденсаторных колонн направляется на высоковольтный электрод и за счет токов выпрямителя и емкостей рассеяния поглощается между обеими колоннами.

Для высокого числа N ступеней эта дискретная структура может аппроксимироваться непрерывной структурой линии передачи.

35 Для AC напряжения конденсаторная структура представляет продольный импеданс с удельным по длине импедансом Z . Емкости рассеяния между обеими колоннами вводят удельный по длине адмитанс (полную проводимость) Y шунта. Группирование напряжения выпрямительных диодов вызывает дополнительную удельную токовую нагрузку J , которая пропорциональна DC нагрузочному току I_{out} и плотности отводов

40 вдоль линии передачи.

Основные уравнения для AC напряжения $U(x)$ между колоннами и AC нагрузочным током $I(x)$ имеют вид:

$$I' = YU - J \quad (3.25)$$

$$45 U' = ZI . \quad (3.26)$$

Общее уравнение является расширенным телеграфным уравнением

$$U'' - \frac{3'}{3} U' - 3\eta U = 3\mathcal{J} . \quad (3.27)$$

В общем пульсации размаха амплитуды на DC выходе равны разности амплитуды
 5 АС напряжения на обоих концах линии передачи

$$\delta U = U(x_0) - U(x_1) . \quad (3.28)$$

10 Два крайевых условия требуются для однозначного решения этих дифференциальных уравнений.

Одним из крайевых условий может быть $U(x_0)=U_{in}$, задаваемое АС приводным напряжением между DC низковольтными концами обеих колонн. Другое естественное крайевое условие определяет АС ток на DC высоковольтном конце $x=x_1$. Краевое условие для концентричного концевого АС импеданса Z_1 между колоннами имеет вид:

$$15 \quad U'(x_1) = \frac{3(x_1)}{Z_1} U(x_1) . \quad (3.29)$$

В случае без нагрузки $Z_1=\infty$ крайевое условие $U'(x_1)=0$.

ПОСТОЯННОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ

20 Для постоянного расстояния t между электродами удельный ток нагрузки равен

$$\mathcal{J} = \frac{i\pi I_{out}}{t} . \quad (3.30)$$

так что распределение АС напряжения регулируется посредством

$$25 \quad U'' - \frac{3'}{3} U' - 3\eta U = 3\mathcal{J} . \quad (3.31)$$

Среднее DC выходное напряжение тогда равно

$$30 \quad U_{out} = \frac{2U_{in}}{t} \int_0^{Nt} U(x) dx \quad (3.32)$$

и DC пульсация размаха амплитуды DC напряжения равна

$$\delta U = U(Nt) - U(0) . \quad (3.33)$$

ОПТИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ

35 Оптимальное расстояние между электродами обеспечивает постоянную электрическую напряженность поля $2E$ постоянного тока при планируемом DC нагрузочном токе. Удельный АС нагрузочный ток вдоль линии передачи является зависимым от положения:

$$40 \quad \mathcal{J} = \frac{i\pi E I_{out}}{U} . \quad (3.34)$$

АС напряжение соответствует

$$45 \quad UU'' - \frac{3'}{3} UU' - 3\eta U^2 = 3i\pi E I_{out} . \quad (3.35)$$

Расстояния между электродами получаются из локальных АС амплитуд напряжения $t(x)=U(x)/E$.

DC выходное напряжение при планируемом DC нагрузочном токе равно $U_{out}=2Ed$.

Снижение нагрузки повышает непрерывно напряжения между электродами, поэтому режим работы с малой нагрузкой или без нагрузки может превысить допустимое E и максимальную нагрузочную способность выпрямительных колонн. Поэтому может рекомендоваться оптимизировать конструкцию для работы в ненагруженном режиме.

5 Для каждого заданного распределения электродов, которое отличается от распределения при проектировании в расчете на запланированный DC нагрузочный ток, AC напряжение вдоль линии передачи и тем самым DC выходное напряжение регулируется посредством уравнения (3.27).

ЛИНЕЙНЫЙ КАСКАД

10 Для линейного каскада с плоскими электродами ширины w , высоты h и расстояния s между колоннами импедансы линии передачи равны

$$\beta = \frac{2}{\epsilon_0 \omega w h}, \quad \eta = \frac{\epsilon_0 \omega w}{s}, \quad (3.36)$$

15 **ЛИНЕЙНЫЙ КАСКАД - ПОСТОЯННОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ**

Неоднородное телеграфное уравнение имеет вид:

$$U'' - \frac{2}{hs} U = \frac{I_{out}}{f \epsilon_0 w h t}, \quad (3.37)$$

20 В предположении линии, которая продолжается от $x=0$ до $x=d=Nt$ и которая управляется посредством $U_{in}=U(0)$, и при постоянной распространения $\gamma^2=2/(h*s)$, справедливо решение:

$$25 \quad U(x) = \frac{\cosh \gamma x}{\cosh \gamma d} U_{in} + \left(\frac{\cosh \gamma x}{\cosh \gamma d} - 1 \right) \frac{Ns}{2f \epsilon_0 d w} I_{out}. \quad (3.38)$$

Диоды отводят по существу AC напряжение, выпрямляют его и аккумулируют его вдоль линии передачи. Среднее DC выходное напряжение, таким образом, равно

$$30 \quad U_{out} = \frac{2}{t} \int_0^d U(x) dx, \quad (3.39)$$

или в явном виде:

$$35 \quad U_{out} = 2N \frac{\tanh \gamma d}{\gamma d} U_{in} + \left(\frac{\tanh \gamma d}{\gamma d} - 1 \right) \frac{N^2 s}{f \epsilon_0 d w} I_{out}. \quad (3.40)$$

Разложение в ряд до третьего порядка по γd дает:

$$40 \quad U_{out} \approx 2N U_{in} \left(1 - \frac{2d^2}{3hs} \right) - \frac{2N^2 d}{3f \epsilon_0 h w} I_{out} \quad (3.41)$$

И

$$\delta U \approx \frac{d^2}{hs} U_{in} + \frac{N}{f} \frac{d}{2 \epsilon_0 h w} I_{out}. \quad (3.42)$$

Эффекты, относящиеся к нагрузочному току, соответствуют уравнениям (3.12) и (3.13).

45 **ЛИНЕЙНЫЙ КАСКАД - ОПТИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ**

Основное уравнение здесь имеет вид:

$$UU'' - \frac{2}{hs} U'^2 = \frac{E I_{out}}{f \epsilon_0 \omega h} . \quad (3.43)$$

Представляется, что это дифференциальное уравнение не имеет замкнутого аналитического решения. Неявное решение, которое выполняет условие $U'(0)=0$, имеет вид:

$$x = \int_{U(0)}^{U(r)} \frac{du}{\sqrt{\frac{2}{hs} (u^2 - U^2(0)) + \frac{E I_{out}}{f \epsilon_0 \omega h} \log \frac{u}{U(0)}}} . \quad (3.44)$$

РАДИАЛЬНЫЙ КАСКАД

В предположении набора концентричных цилиндрических электродов с независимой от радиуса высотой h и осевым зазором s между колоннами, как показано на фиг. 4, удельные по радиусу импедансы равны:

$$Z = \frac{1}{\pi \epsilon_0 \omega r h} , \quad \mathfrak{I} = \frac{2\pi \epsilon_0 \omega r}{s} . \quad (3.45)$$

РАДИАЛЬНЫЙ КАСКАД - ПОСТОЯННОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ

При эквидистантном радиальном расстоянии между электродами $t=(R-r)/N$ основное уравнение

$$U'' + \frac{1}{\rho} U' = \frac{2}{hs} U = \frac{I_{out}}{\epsilon_0 \omega h t \rho} \quad (3.46)$$

имеет общее решение

$$U(\rho) = AK_0(\gamma\rho) + B I_0(\gamma\rho) + \frac{I_{out}}{4\gamma f \epsilon_0 h t} L_0(\gamma\rho) . \quad (3.47)$$

при $\gamma^2=2/(h*s)$. K_0 и I_0 являются модифицированными функциями Бесселя и L_0 является модифицированной функцией Струве L_0 нулевого порядка.

Краевые условия $U'(R)=0$ на внутреннем радиусе r и $U(R)=U_{in}$ на внешнем радиусе R определяют обе постоянные

$$A = \frac{U_{in} I_1(\gamma r) - \frac{I_{out}}{4\gamma f \epsilon_0 h t} [I_1(\gamma r) L_0(\gamma R) - I_0(\gamma R) (L_1(\gamma r) + \frac{2}{\pi})]}{I_0(\gamma R) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma R)} \quad (3.48)$$

$$B = \frac{U_{in} K_1(\gamma r) - \frac{I_{out}}{4\gamma f \epsilon_0 h t} [K_1(\gamma r) L_0(\gamma R) + K_0(\gamma R) (L_1(\gamma r) + \frac{2}{\pi})]}{I_0(\gamma R) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma R)} \quad (3.49)$$

так что

$$U(\rho) = U_{in} \frac{I_0(\gamma\rho) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma\rho)}{I_0(\gamma R) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma R)} + \frac{I_{out}}{4\gamma f \epsilon_0 h t} \left[L_0(\gamma\rho) - L_0(\gamma R) \frac{I_0(\gamma\rho) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma\rho)}{I_0(\gamma R) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma R)} - \left(L_1(\gamma r) + \frac{2}{\pi} \right) \frac{I_0(\gamma\rho) K_0(\gamma R) - I_0(\gamma R) K_0(\gamma\rho)}{I_0(\gamma R) K_1(\gamma r) + I_1(\gamma r) K_0(\gamma R)} \right] . \quad (3.50)$$

K_1 и I_1 являются модифицированными функциями Бесселя и L_1 является модифицированной функцией Струве $L_1=L'_0-2/\pi$, все первого порядка.

DC выходное напряжение равно

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{t} \int_r^R U(\rho) d\rho. \quad (3.51)$$

5 РАДИАЛЬНЫЙ КАСКАД - ОПТИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ

Оптимальное локальное расстояние между электродами равно $t(\rho)=U(\rho)/E$, и основное уравнение приводится к виду:

$$10 \quad UU'' + \frac{1}{\rho} UU' - \frac{2}{hs} U^2 = \frac{E I_{\text{out}}}{\epsilon_0 \omega h \rho} \quad (3.52)$$

Представляется, что это дифференциальное уравнение не имеет замкнутого аналитического решения, но оно может решаться численным способом.

ФОРМЫ ЭЛЕКТРОДОВ

15 ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Компактная машина требует максимизации электрической пробивной прочности. В общем случае, для конденсаторных электродов должны были бы выбираться гладкие поверхности с незначительной кривизной. Электрическая пробивная прочность E масштабируется в грубом приближении инверсным корнем квадратным из расстояния между электродами, так что большое число расположенных на малом расстоянии эквипотенциальных поверхностей с малыми различиями в напряжении были бы предпочтительны по сравнению с некоторыми немногими большими промежутками с большими различиями в напряжении.

ЭЛЕКТРОДНЫЕ КРОМКИ С МИНИМАЛЬНЫМ Е-ПОЛЕМ

25 Для существенно плоской структуры электродов с эквидистантным расстоянием и линейным распределением напряжения оптимальная форма кромок известна как форма Кирхгофа (см. ниже)

$$30 \quad x = \frac{A}{2\pi} \ln \frac{1 + \cos \vartheta}{1 - \cos \vartheta} = \frac{1 + A^2}{4\pi} \ln \frac{1 + 2A \cos \vartheta + A^2}{1 - 2A \cos \vartheta + A^2} \quad (3.53)$$

$$y = \frac{b}{2} + \frac{1 - A^2}{2\pi} \left(\arctan \frac{2A}{1 - A^2} - \arctan \frac{2A \sin \vartheta}{1 - A^2} \right). \quad (3.54)$$

35 в зависимости от параметра $\vartheta \in [0, \pi/2]$. Форма электродов показана на фиг. 8. Электроды имеют нормализованное унифицированное расстояние и асимптотическую толщину $1-A$ на удалении от кромки, которая на торцевой стороне сужается до вертикальной кромки с высотой

$$b = 1 - A - \frac{2 - 2A^2}{\pi} \arctan A. \quad (3.55)$$

40 Параметр $0 < A < 1$ представляет инверсное превышение E -поля ввиду наличия электродов. Толщина электродов может быть любой, не вводя заметных искажений E -поля.

Негативная кривизна, например, у горловин вдоль пути пучка, дополнительно уменьшает амплитуду E -поля.

45 Этот положительный результат объясняется тем, что электроды вызывают только локальную помеху для уже существующего E -поля.

Оптимальной формой для свободно стоящих высоковольтных электродов являются профили Роговского (Rogowski) и Борда (Borda) с пиковым значением в амплитуде E -

поля, равным двукратному от неискаженной напряженности поля.

ГЕНЕРАТОР ПРИВОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Генератор приводного напряжения должен предоставлять высокое переменное напряжение при высокой частоте. Обычным методом является усиливать среднее АС
5 напряжение посредством высокоизолированного выходного трансформатора.

Мешающие внутренние резонансы, которые обусловлены неизбежными емкостями обмоток и индуктивностями рассеяния, делают проблематичным проектирование конструкции для такого трансформатора.

Альтернативой может быть накачка заряда, то есть периодически управляемый
10 полупроводниковый генератор Маркса. Такая схема вырабатывает выходное напряжение с переходом от массы к высокому напряжению единственной полярности и эффективно заряжает первый конденсатор цепи конденсаторов.

ПРОБИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ В ВАКУУМЕ

ЗАКОН $D^{-0.5}$

15 Имеется множество ссылок, но отсутствует окончательное объяснение, что для расстояний между электродами выше $d \approx 10^{-3}$ м пробивное напряжение примерно пропорционально квадратному корню расстояния. Поэтому пробивное Е-поле масштабируется согласно:

$$20 \quad E_{\max} \approx \sigma d^{-0.5} \quad (\text{A.1})$$

при постоянном А в зависимости от материала электродов (см. ниже). Представляется, что для полей $E \approx 20$ МВ/м располагаемые в настоящее время материалы поверхностей электродов требуют расстояния между электродами $d \leq 10^{-2}$ м.

25 МАТЕРИАЛЫ ПОВЕРХНОСТИ

Пробой между электродами в вакууме сильно зависит от поверхности материала. Результаты исследования CLIC (A.Descoedres et al. "DC Breakdown experiments for CLIC", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p.577, 2008) демонстрируют коэффициенты пробоя:

30	Материал	σ в $\left[\frac{\text{МВ}}{\sqrt{\text{м}}} \right]$	
	Сталь	3.85	
	SS 316LN	3.79	3.16
	Ni	3.04	
	V		2.84
35	Ti		2.70
	Mo		1.92
	Monel	1.90	
	Ta		1.34
	Al	1.30	0.45
40	Cu	1.17	0.76

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ПЛОЩАДИ ЭЛЕКТРОДОВ

Имеются указания на то, что площадь электрода имеет существенное влияние на пробивную напряженность поля. Так справедливо:

$$45 \quad E_{\max} \approx 58 \cdot 10^6 \frac{V}{m} \left(\frac{A_{\text{эф}}}{1 \text{ cm}^2} \right)^{-0.25} \quad (\text{A.2})$$

для поверхностей медных электродов и расстояния между электродами $2 \cdot 10^{-2}$ мм.

Для плоских электродов из нержавеющей стали с расстоянием 10^{-3} м справедливо:

$$E_{\max} \approx 57.38 \cdot 10^6 \frac{V}{m} \left(\frac{A_{\text{от}}}{1 \text{ cm}^2} \right)^{-0.12} \quad (\text{A.3})$$

5 ФОРМА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

Является общеизвестным, что однородные E-поля допускают максимальные напряжения. Диэлектрический коэффициент использования η Швайгера (Schweiger) определен как величина, обратная локальному превышению E-поля на основе
10 неоднородностей поля, то есть отношение E-поля идеальной плоской электродной конфигурации и E-поля поверхностей с заострениями геометрии с учетом одинаковых опорных напряжений и расстояний.

Он представляет использование диэлектрика в отношении амплитуд E-поля. Для
15 малых расстояний $d < 6 \cdot 10^{-3}$ м неоднородные E-поля могут превышать пробивное напряжение.

КРИВИЗНА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ

Так как максимумы неоднородностей E-поля возникают на поверхностях электродов, релевантной мерой для формы электродов является средняя кривизна $H = (k_1 + k_2)/2$.

20 Имеются различные поверхности, которые выполняют идеальные условия различных локальных средних значений кривизны на большой поверхности. Например, такими являются катеноиды поверхностей вращения с $H = 0$.

Каждый чисто геометрический признак, такой как η или H может представлять только приближение к фактическому поведению пробоя. Локальные неоднородности
25 E-поля имеют нелокальное влияние на пробивной предел и могут даже улучшать общую полную напряженность поля.

ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ С ПОСТОЯННЫМ E-ПОЛЕМ

Фиг. 8 показывает кромки электрода Кирхгофа при $A = 0,6$ для вертикального E-поля. Повышение поля внутри набора электродов равно $1/A = 1,6$. Торцевые стороны являются
30 плоскими.

Поверхность электрода представляет эквипотенциальную линию электрического поля аналогично свободной поверхности текущей жидкости. Свободный от напряжения электрод следует линии поля потока. При комплексной пространственной координате $z = x + iy$ каждая аналитическая функция $w(z)$ выполняет уравнение Пуассона. Краевое
35 условие для свободной поверхности потока эквивалентно постоянной величине (сопряженной) производной v возможной функции w :

$$\bar{v} \equiv \frac{dw}{dz}. \quad (\text{A.4})$$

40 Каждая возможная функция $w = (i\bar{v})$ через скорость потока \bar{v} или плоскость годографа приводит к z-отображению плоскости:

$$z \equiv \int \frac{dw}{\bar{v}} = \int \frac{1}{\bar{v}} \frac{dw}{d\bar{v}} d\bar{v}. \quad (\text{A.5})$$

45 Без ограничения общности величина производной на плоскости электрода нормируется к единице, а высота DE может по сравнению с AF обозначаться как A (см. фиг. 6). В \bar{v} -плоскости кривая CD отображается тогда на $\arg i \rightarrow 1$ на единичном круге.

Точки на фиг. 8 A и F соответствуют $1/A$, B началу координат, C, D и E соответствуют 1. Полная картина потока отображается в первом квадранте единичного круга.

Источником линий потока является $1/A$, стоком которых является 1.

Два отображения на мнимой оси и единичном круге расширяют этот образец потока по всей комплексной \bar{v} -плоскости. Функция w потенциала определяется, таким образом, четырьмя источниками в \bar{v} -позициях $+A, -A, 1/A, -1/A$ и двумя стоками интенсивности 2 на ± 1 .

$$w = \log(\bar{v} - A) + \log(\bar{v} + A) + \log\left(\bar{v} - \frac{1}{A}\right) + \log\left(\bar{v} + \frac{1}{A}\right) - 2 \log(\bar{v} - 1) - 2 \log(\bar{v} + 1). \quad (\text{A.6})$$

Производная этого выражения равна:

$$\frac{dw}{d\bar{v}} = \frac{1}{\bar{v} - A} + \frac{1}{\bar{v} + A} + \frac{1}{\bar{v} - \frac{1}{A}} + \frac{1}{\bar{v} + \frac{1}{A}} - \frac{2}{\bar{v} - 1} - \frac{2}{\bar{v} + 1} \quad (\text{A.7})$$

и, таким образом:

$$z - z_0 = \int_{\bar{v}_0}^{\bar{v}} \left(\frac{1}{\bar{v} - A} + \frac{1}{\bar{v} + A} + \frac{1}{\bar{v} - \frac{1}{A}} + \frac{1}{\bar{v} + \frac{1}{A}} - \frac{2}{\bar{v} - 1} - \frac{2}{\bar{v} + 1} \right) d\bar{v} \quad (\text{A.8})$$

На свободной границе CD скорость потока $\bar{v} = e^{i\varphi}$, поэтому $d\bar{v} = i\bar{v} |d\varphi$ и

$$z - z_0 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1}{e^{i\varphi} - A} + \frac{1}{e^{i\varphi} + A} + \frac{1}{e^{i\varphi} - \frac{1}{A}} + \frac{1}{e^{i\varphi} + \frac{1}{A}} - \frac{2i}{e^{i\varphi} - 1} - \frac{2i}{e^{i\varphi} + 1} \right) d\varphi \quad (\text{A.9})$$

при $z_0 = i b$ точки C. Аналитическая интеграция дает уравнение (3.54).

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНЫХ ПОЗИЦИЙ

9 высоковольтный каскад

11 вход

13 диод

15 конденсатор

17 конденсатор

19 диод

21 выход

23 первый набор конденсаторов

25 второй набор конденсаторов

29 ускоритель

37 центральный электрод

39 внешний электрод

71 первый пучок частиц

73 второй пучок частиц

75 зона взаимодействия

77 первый источник

79 второй источник

83 первый электрод улавливателя

85 второй электрод улавливателя

31 высоковольтный источник

33 промежуточный электрод

35 высоковольтный каскад

39', 39" электродная полусфера

41 первая цепь конденсаторов

43 вторая цепь конденсаторов

45 источник переменного напряжения

47 экваториальное сечение

49 диод

51 первый ускорительный канал

5 52 второй ускорительный канал

63 электронные лампы

65 катод

67 анод

81 высоковольтный источник

10

Формула изобретения

1. Ускоритель (29) для ускорения двух пучков (71, 73) заряженных частиц и для генерации столкновения между обоими пучками (71, 73), содержащий:

15 - устройство (33, 35, 37, 39, 45) формирования потенциального поля для формирования электростатического потенциального поля, которое создается таким образом, что посредством электростатического поля могут ускоряться или соответственно замедляться два пучка (71, 73) заряженных частиц,

- реакционную зону (75), в которой происходит столкновение двух пучков (71, 73),

20 - первый участок (51) ускорения для первого пучка (71) в потенциальном поле, причем первый участок (51) ускорения направлен на реакционную зону (75),

- второй участок (52) ускорения для второго пучка (73) в потенциальном поле, причем второй участок (52) ускорения направлен на реакционную зону (75),

25 причем реакционная зона (75) по отношению к потенциальному полю и к первому и второму участку (51, 52) ускорения геометрически расположена таким образом, что частицы двух пучков (71, 73) могут ускоряться в направлении реакционной зоны (75) вдоль первого участка (51) ускорения и второго участка (52) ускорения и после взаимодействия в реакционной зоне (75) и прохождения через реакционную зону (75) в потенциальном поле могут вновь замедляться, так что энергия, затраченная устройством формирования потенциального поля для ускорения обоих пучков (71, 73) к реакционной зоне (75), за счет замедления по меньшей мере частично может быть восстановлена,

- первый уловитель (83) для замедленных частиц первого пучка (71), который находится на конце первого участка пучка и, в частности, отрицательно заряжен, и/или

35 - второй уловитель (85) для замедленных частиц второго пучка (73), который находится на конце второго участка пучка и, в частности, отрицательно заряжен.

2. Ускоритель (29) по п. 1, содержащий:

- первый участок замедления для первого пучка (71) в потенциальном поле, причем первый участок замедления направлен в сторону от реакционной зоны (75), и/или

40 - второй участок замедления для второго пучка (73) в потенциальном поле, причем второй участок замедления направлен в сторону от реакционной зоны (75).

3. Ускоритель (29) по п. 1 или 2, содержащий:

- первый источник (77) для предоставления заряженных частиц для первого пучка (71) и для ввода его в первый участок (51) ускорения и/или

45 - второй источник (79) для предоставления заряженных частиц для второго пучка (73) и для ввода его во второй участок (52) ускорения.

4. Ускоритель (29) по любому из пп. 1-2, в котором:

первыми частицами являются протоны, и/или вторыми частицами являются ионы бора, и потенциальное поле, в частности, выполнено таким образом, что может

достигаться энергия столкновения свыше 600 кэВ.

5. Ускоритель (29) по п. 3, в котором:

первыми частицами являются протоны, и/или вторыми частицами являются ионы бора, и потенциальное поле, в частности, выполнено таким образом, что может достигаться энергия столкновения свыше 600 кэВ.

6. Ускоритель (29) по любому из пп. 1-2, 5, причем устройство формирования потенциального поля содержит набор конденсаторов из концентрично друг к другу расположенных электродов,

- с первым электродом (37), который может быть приведен на первый потенциал,

10 и

- со вторым электродом (39), который расположен концентрично первому электроду (37) и может быть приведен на второй потенциал, отличающийся от первого потенциала, так что между первым электродом и вторым электродом формируется ускоряющий потенциал,

15 причем реакционная зона (75) находится внутри первого электрода (37).

7. Ускоритель (29) по п. 3, причем устройство формирования потенциального поля содержит набор конденсаторов из концентрично друг к другу расположенных электродов,

- с первым электродом (37), который может быть приведен на первый потенциал,

20 и

- со вторым электродом (39), который расположен концентрично первому электроду (37) и может быть приведен на второй потенциал, отличающийся от первого потенциала, так что между первым электродом и вторым электродом формируется ускоряющий потенциал,

25 - причем реакционная зона (75) находится внутри первого электрода (37).

8. Ускоритель (29) по п. 4, причем устройство формирования потенциального поля содержит набор конденсаторов из концентрично друг к другу расположенных электродов,

- с первым электродом (37), который может быть приведен на первый потенциал,

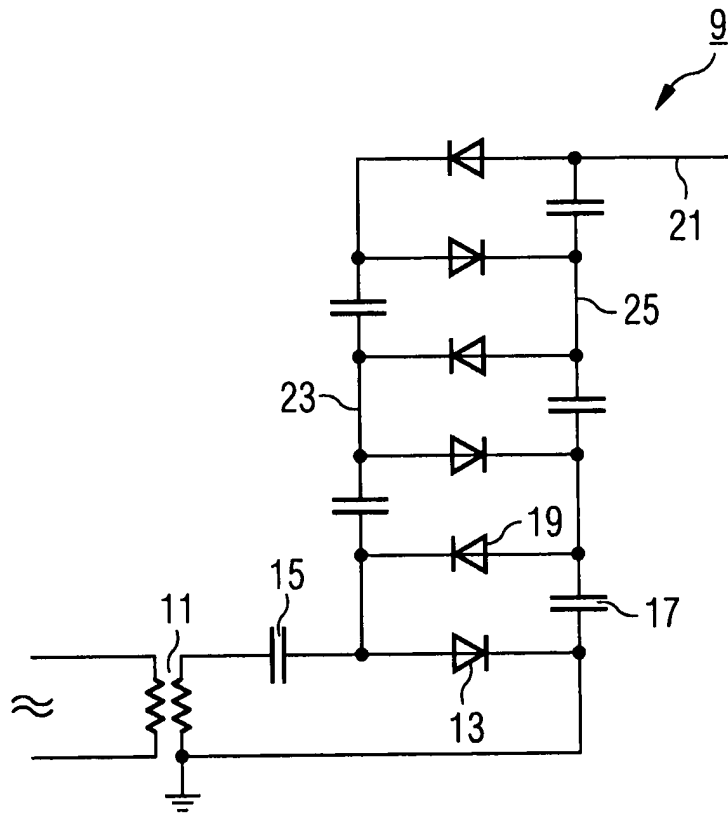
30 и

- с вторым электродом (39), который расположен концентрично первому электроду (37) и может быть приведен на второй потенциал, отличающийся от первого потенциала, так что между первым электродом и вторым электродом формируется ускоряющий потенциал,

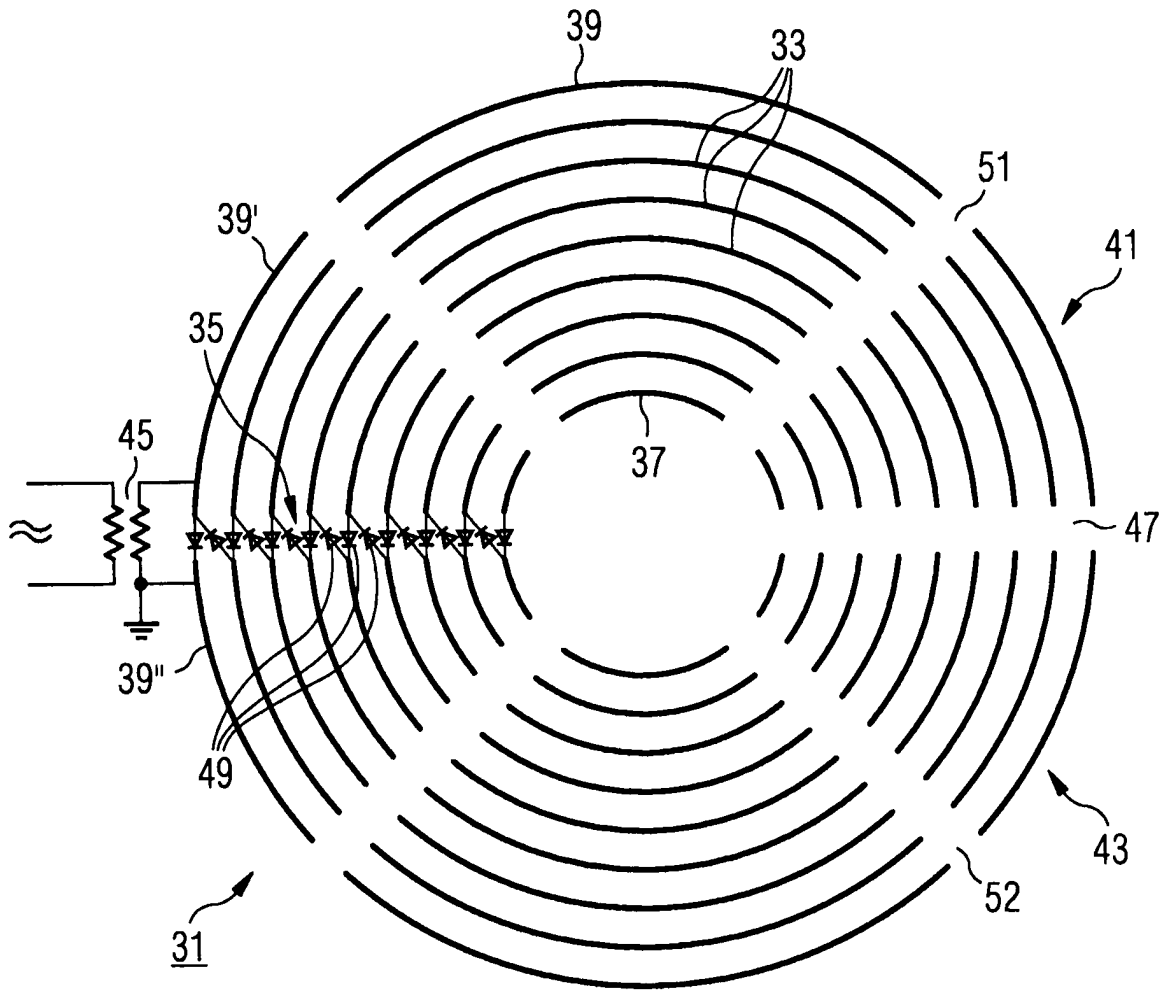
35 - причем реакционная зона (75) находится внутри первого электрода (37).

40

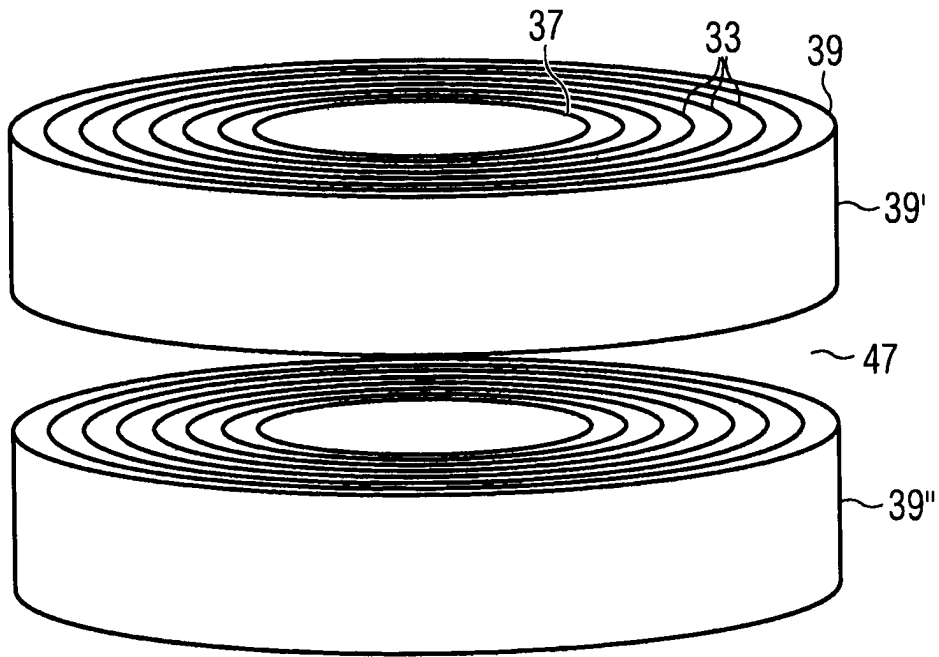
45



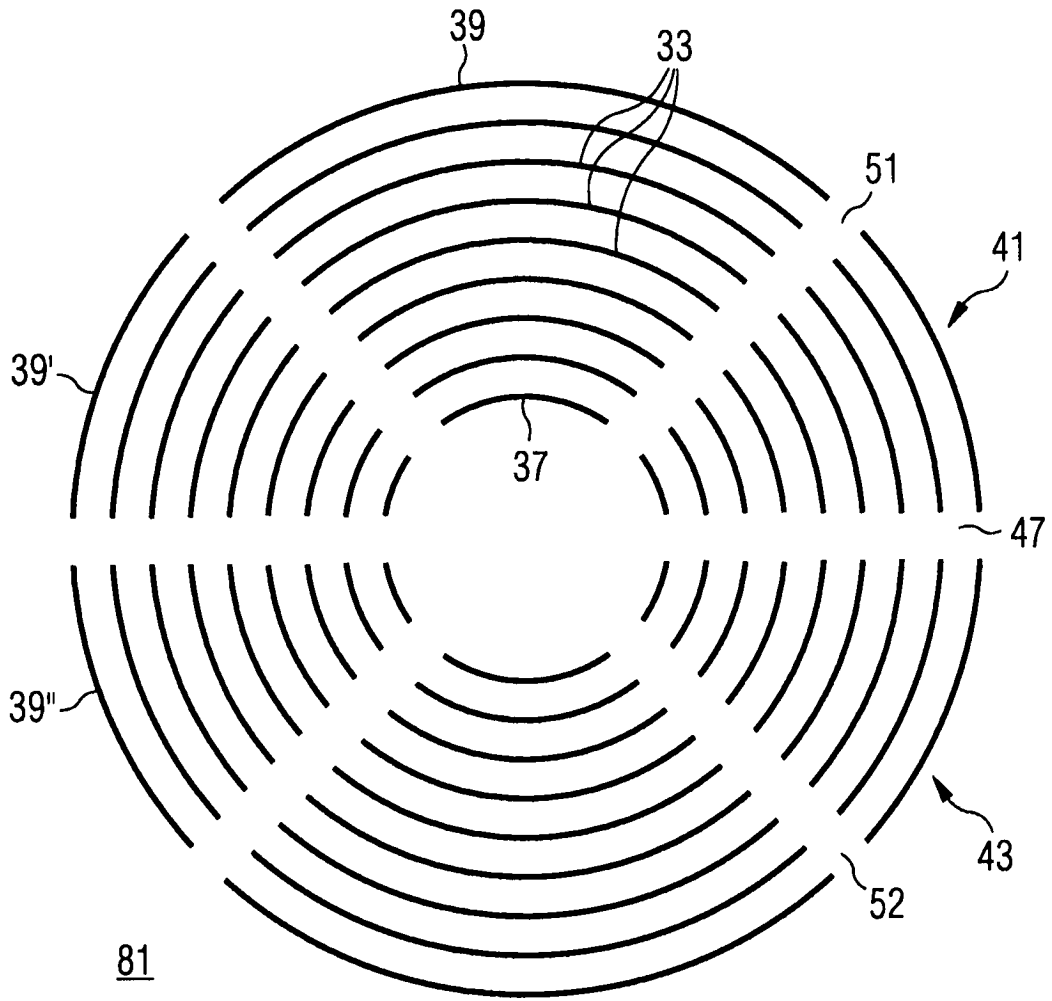
ФИГ.2



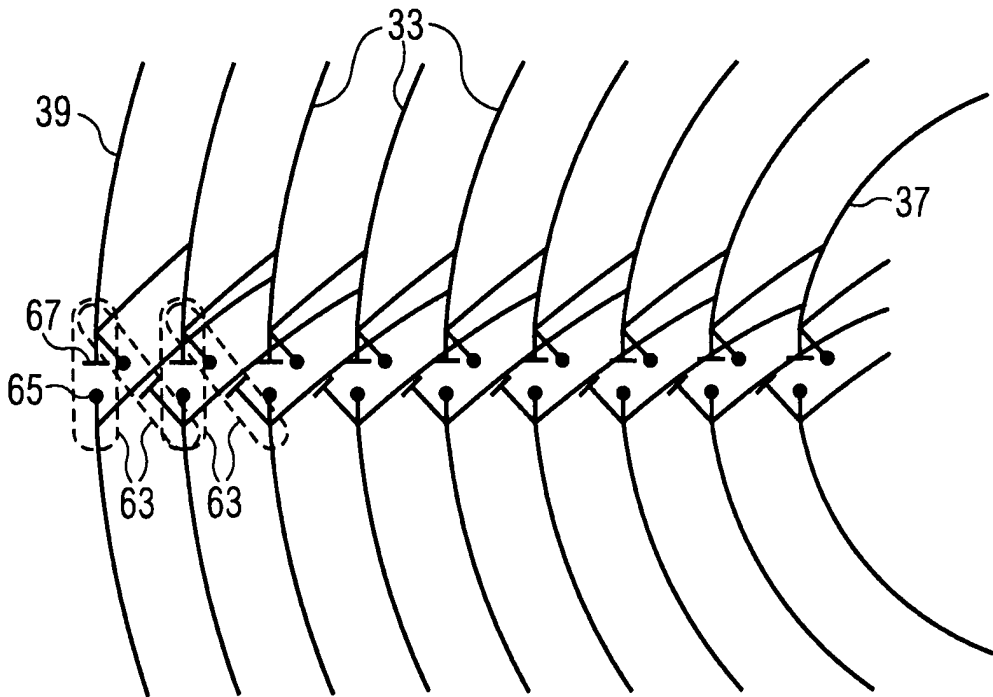
ФИГ.3



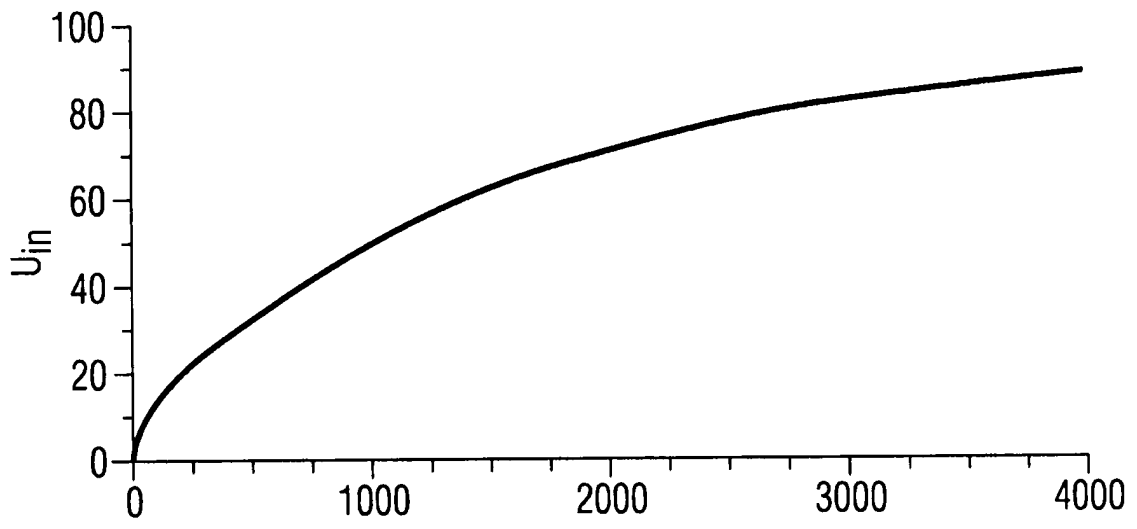
ФИГ.4



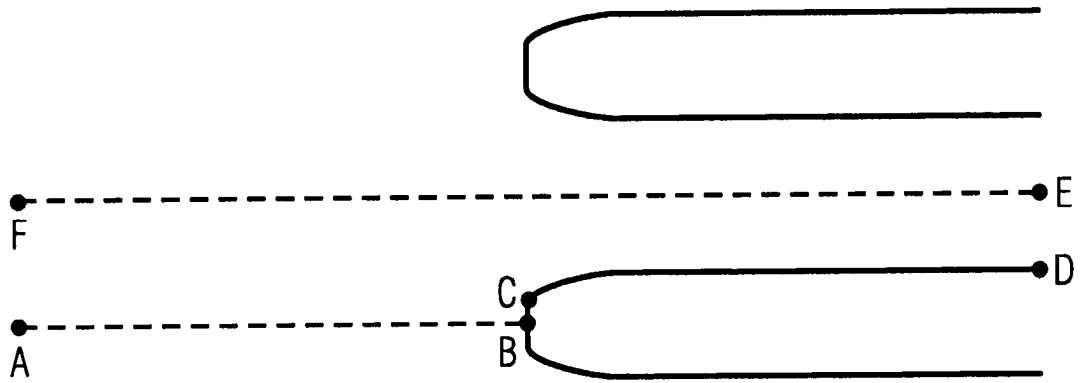
ФИГ.5



ФИГ.6



ФИГ.7



ФИГ.8