

Изобретение относится к ускорительной технике и может быть использовано при разработке бетатронов, синхротронов, адгезаторов для формирования интенсивных ускоренных пучков с прецизионными параметрами для физических экспериментов.

Наиболее близким к заявляемому решению по назначению, технической сущности и достигаемому результату при использовании является способ получения электронно-ионных колец, включающий возбуждение магнитного поля с вертикальной и горизонтальной устойчивостью движения частиц (см. Е.Г. Комар, Основы ускорительной техники. - М.: Атомиздат, 1975 г. стр. 114-126), при котором устойчивость движения частиц обеспечивают заданием уменьшения напряженности магнитного поля по радиусу, а следовательно и силы Лоренца, меньшим, чем центробежная сила, а показатель спада магнитного поля выбирают из соотношения  $0 < n < 1$ .

Описанный выше способ реализует условия, при которых функции  $P_H=f(r)$  и  $P_C=f(r)$  пересекаются в точке  $r=r_0$ , соответствующей равновесной орбите. Всякое отклонение от равновесной орбиты в сторону увеличения радиуса приводит к появлению центростремительной ( $P_H$  - силы Лоренца), а в сторону

уменьшения  $P_C$  - центробежной силы. Движение оказывается в радиальном направлении устойчивым. Достаточная кривизна силовых линий обеспечивает и вертикальную фокусировку. Отклонение частицы от средней плоскости приводит к появлению вертикальной фокусирующей силы  $P_f$ . Таким образом, чтобы обеспечить устойчивое движение частиц в радиальном и вертикальном направлениях, необходимо соблюдать условия  $0 < n < 1$ . Это условие называют условием устойчивого движения частиц при мягкой фокусировке.

Однако предлагаемый способ оказывается очень чувствительным к выбору величины показателя спада магнитного поля, что ограничивает использование способа в реальных устройствах. Реально вертикальная фокусировка оказывается слабой, а ее усиление приводит к ослаблению радиальной фокусировки, что исключает использование этого способа для осевого ускорения частиц.

Поэтому целью предлагаемого технического решения является обеспечение устойчивости циклического движения частиц.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствования способа формирования электронно-ионных колец, включающего возбуждение магнитного поля, при котором, вследствие возбуждения магнитного поля в короткозамкнутых сверхпроводниковых витках с направлением магнитных силовых линий, совпадающим с направлением магнитных силовых линий магнитного поля электронно-ионного кольца, при этом переход в сверхпроводящее состояние осуществляют в момент достижения величины магнитного потока необходимой для удержания и стабилизации электронного кольца, обеспечивается такое изменение

магнитного потока в зависимости от радиуса, при котором график изменения силы Лоренца  $P_H=f(r)$  имеет знаковое изменение магнитного потока в зависимости от радиуса, при котором график изменения силы

Лоренца  $P_L=f(r)$  имеет значение  $P_H=0$ . При этом возникает, так называемый эффект "магнитной потенциальной ямы", стабилизирующий пучок не только в радиальном, но и в вертикальном направлении, и за счет этого создающий условия для устойчивого существования замкнутых кольцевых конфигураций зарядов при существенно меньших габаритах и весе устройств, реализующих описываемый способ.

Поставленная задача решается тем, что в известном способе формирования электронно-ионных колец, включающем формирование электронно-ионного кольца в магнитном поле с вертикальной и радиальной устойчивостью частиц кольца, а также периодическое изменение сил электрического поля с частотой равной частоте вращения частиц, в котором согласно изобретению, магнитное поле формируют с помощью сверхпроводников второго рода, переход в сверхпроводящее состояние в витках сверхпроводников второго рода осуществляют в момент достижения магнитного поля такой величины, которая необходима для удержания электронно-ионного кольца из расчетной траектории, причем магнитное поле в витках сверхпроводников второго рода возбуждают так, что силовые линии магнитного поля сверхпроводника и силовые линии магнитного поля электронно-ионного кольца направлены в одну сторону, при этом магнитный поток электронно-ионного кольца через площадь, ограниченную сверхпроводящим контуром, составляет 0,1...0,5 величины магнитного потока, создаваемого в витках сверхпроводников второго рода.

Предлагаемый способ обеспечивает устойчивость круговых электронно-ионных конфигураций за счет целенаправленного воздействия собственного магнитного поля кольца на внешнее формирующее магнитное поле сверхпроводящих короткозамкнутых витков.

Использование жестких сверхпроводящих проводников 2-го рода для возбуждения магнитного поля позволяет создать условие, при котором на радиусе "r" круговой траектории сила Лоренца меняет свой знак и переходит из магнитоотталкивающей в магнитопритягивающую. Любое смещение электронно-ионного кольца или частиц электронно-ионного кольца вызывает силы, которые возвращают их в исходное положение.

Использование жестких сверхпроводников 2-го рода на основе ниобий-олова, ниобий-алюминия) позволяет создать компактную магнитную систему на поля  $H=100-200$  к Эрстед.

В предлагаемом способе обеспечивается устойчивость и стабилизация частиц в пучке целенаправленным воздействием собственного магнитного поля пучка на внешнее формирующее магнитное поле сверхпроводящих короткозамкнутых витков таким образом, что суммарный магнитный поток, пронизывающий поверхности ограниченные сверхпроводящими витками, может быть задан и остается постоянным в силу выполнения закона сохранения магнитного потока. При этом механизм взаимодействия

между отдельным зарядом и сверхпроводящими витками таков, что сила Лоренца  $\vec{P}$ , пропорциональная магнитной индукции  $\vec{B}$ , может либо увеличиваться, либо уменьшаться в зависимости от того, какой из двух

мотивов окажется преобладающим - уменьшение тока  $I$ , возбуждающего поле и уменьшающего  $\vec{P}$  при сближении заряда с витками, и непосредственное увеличение магнитной индукции  $\vec{B}$  в результате сближения

заряда с витками  $\vec{B}$   $I$  если бы ток в витках оставался постоянным. Расчеты показывают, что уменьшение силы  $\vec{P}$  при уменьшении  $r_0$  будет происходить в том случае, когда отношение магнитного потока от заряда через

поверхность витков составляет не менее десятой доли полного магнитного потока (магнитного

потокосцепления) витка. На фиг. 2 показан характер изменения силы Лоренца  $\vec{P}$  в зависимости от радиуса для некоторых характерных систем. Кривая 1 характерна для теплых витков, кривая 2 - для сверхпроводящих

систем. Закон уменьшения  $\vec{P}$  при уменьшении  $r$  (кривая 3 на фиг. 2) аналогичен закону обычной механической растянутой пружины, которая, как показывает опыт, может удерживать в устойчивом орбитальном движении точечную массу. Это свидетельствует об устойчивости траектории частицы. Если бы не проявлялся описываемый эффект (например, если бы виток не обладал идеальной электрической проводимостью, а запитывался постоянным током от стороннего источника), график зависимости силы Лоренца от радиуса имел бы вид кривой 4 на фиг. 2, который говорит о возможности реализации устойчивого орбитального движения заряда. Реализация условий предлагаемого способа позволяет достичь стабилизации не только по радиусу и аппликату, но и по фазе.

На фиг. 1 показана схема взаимодействия магнитных полей.

На фиг. 2 показаны графики изменения силы Лоренца.

На фиг. 3 показана принципиальная схема бетатрона, использующего предлагаемый способ.

Реализация способа формирования электронно-ионных колец рассмотрена на примере работы бетатрона для ускорения протонов до энергий  $W \approx 10$  ГэВ, схема которого, включающая элементы, осуществляющие стабилизацию, приведена на фиг. 3.

Принципиальная схема включает четыре или более сверхпроводящих витка 1, 2, 3, 4. "теплый" токовый виток 5, имитирующий магнитное поле кольцевого протонного пучка и его геометрические параметры, основной сверхпроводящий магнит 6, создающий в зоне ускорения магнитную индукцию  $B = 0 \dots 40$  тл, кольцевую вакуумную камеру 7 и систему криогенного обеспечения 8.

С помощью токового витка 5, расположенного в зоне устойчивости и ускорения протонного пучка, создают магнитное поле, имитирующее магнитное поле протонного кольцевого пучка таким образом и в таком направлении, чтобы величины токов и магнитных потоков в остальных сверхпроводниковых витках при переводе их в сверхпроводящее состояние соответствовали бы условию постоянства "замороженного" магнитного потока, определяемого соотношением:

$$\psi_1 - \psi_p = \sum_{i=1}^n L_{ij} I_j = \text{const}, \quad j=1, n, \quad (1)$$

что соответствует условию проявления эффекта магнитной потенциальной ямы (МПЯ).

где

$n$  - число короткозамкнутых сверхпроводящих витков (в рассматриваемом случае  $n=4$ );

$I$  - ток в сверхпроводящем витке;

$L$  - собственные и взаимные индуктивности витков;

$\psi_p$  - магнитный поток от кругового протонного пучка, пронизывающий поверхность, ограниченную каждым контуром с индексом  $j$ .

$\psi_i$  - "замороженный" поток в  $i$ -том идеальном кольце.

Пусть, например, протонный кольцевой пучок с поперечным сечением  $S_p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  движется на среднем радиусе  $r_p = 0,25$  м со скоростью  $V_0 = 10$  м/сек. Такой пучок может быть создан ионным источником с потенциалом на ускоряющей ионно-оптической системе  $\psi = 500$  В. Для удержания протонного пучка с такой скоростью на орбите  $r_p = 0,25$  м необходимо минимальное магнитное поле с индукцией  $B_{\text{min}} = m \cdot v_0 / q \cdot r_p = 1 \cdot 10^{-3}$  тл.

Такую суммарную индукцию должны создать четыре сверхпроводящих кольца в зоне ускорения пучка. Для создания оптимальных условий для обеспечения устойчивого движения пучка на заданном радиусе сам кольцевой пучок должен создавать соизмеримое магнитное поле (или не менее 0,1 от его значения), что соответствует протеканию тока в пучке

$$I = 0,2 \mu r \cdot B_{\text{min}} \approx 120 \text{ а},$$

(где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость) с концентрацией протонов порядка  $n_p = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . При выполнении условия (1) и при обеспечении в витках условий идеальной проводимости (сверхпроводимости), выполняется условие МПЯ и условия обеспечения устойчивости протонного пучка на заданной траектории, физический механизм которой виден на фиг. 1. Для ускорения пучка протонов на систему накладывают переменное поле,

индукция которого в зоне ускорения за  $\tau = 1$  с увеличивается от  $B_{\min} = 1 \cdot 10^{-3}$  тл до  $B_{\max} = 40$  тл, что обеспечивает на радиусе вращения пучка вихревое магнитное поле, создающее электрическую силу

$$\vec{F} = \frac{q \cdot r}{2} \left| \frac{d\vec{B}}{dt} \right| e_{\varphi}$$

ускоряющую протонный пучок при  $B_{\max} = 40$  тл до максимальной энергии

$$W_p = \frac{q \cdot r}{2} \left| \frac{d\vec{B}}{dt} \right| \cdot l \cdot \omega_c \approx 30 \text{ ГэВ},$$

где

$l = 1,57$  м - длина траектории протона за 1 оборот.

Если в расчетах энергии протонного пучка учесть изменение массы за счет релятивистского эффекта и неравномерность преобразования магнитного поля в процессе ускорения, расчетная энергия может быть снижена до значений  $W_p = 3 \dots 10$  ГэВ, что значительно превышает возможно достижимую энергию в ускорителях такого класса по самым оптимистическим прогнозам. Известен вес обычного электронного бетатрона на энергию  $W_i = 360$  МэВ равный 340 Т. Вес сверхпроводящего магнита с криостатом с  $B_{\max} = 40$  тл равен порядка 0,4 Т. Оценки показывают, что суммарный вес системы питания, вакуумной системы, инжекции и вывода пучка, а также системы криогенного обеспечения может быть ограничен несколькими тоннами, что на 2...3 порядка меньше веса существующих ускорительных систем такого типа.

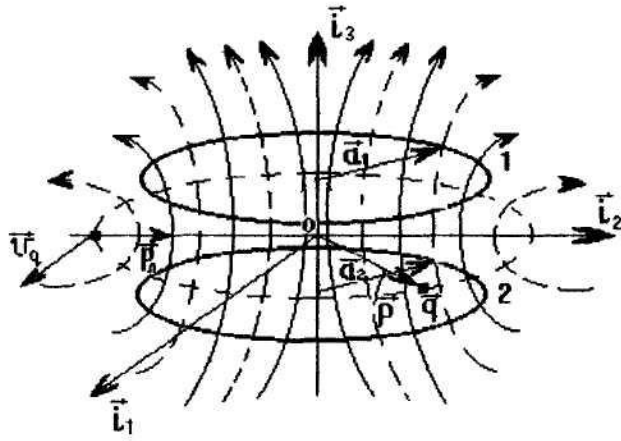
Таким образом, предложенный способ характеризуют следующие важные черты:

- эффект МПЯ в системе "вращающийся пучок - четыре сверхпроводящих витка" сохраняется при наложении на систему внешнего постоянного (переменного) магнитного поля;
- наличие МПЯ в области вращения и ускорения протонного пучка препятствует дрейфовому движению пучка со скоростью к центру системы и обеспечивает нахождение его на постоянной траектории;

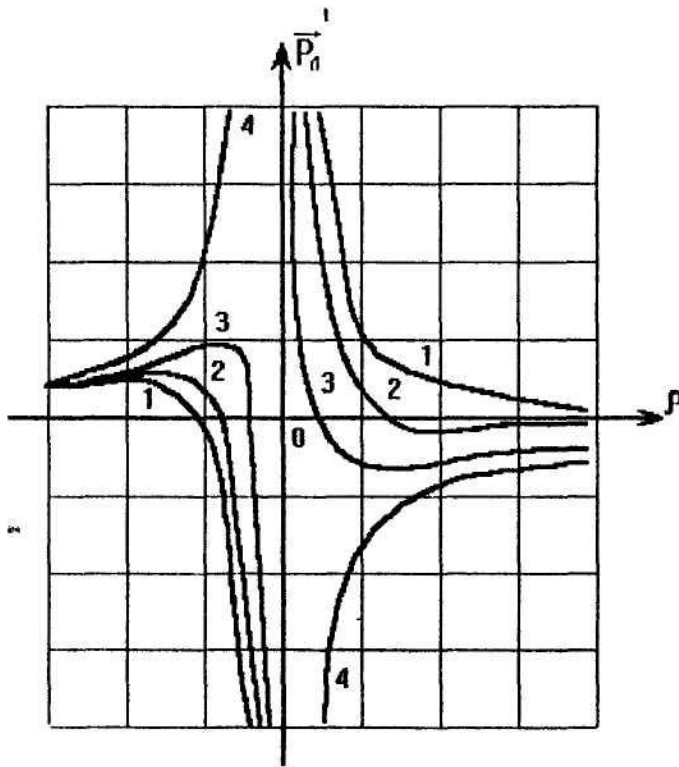
$$\vec{V}_{др} = \frac{\vec{E}_{\varphi} \cdot \vec{B}_z}{B_z^2}$$

- наличие МПЯ и ограничение дрейфового движения, равно как и собственное магнитное поле пучка, формируют его поперечное сечение и препятствуют разлетанию частиц под действием кулоновских сил.

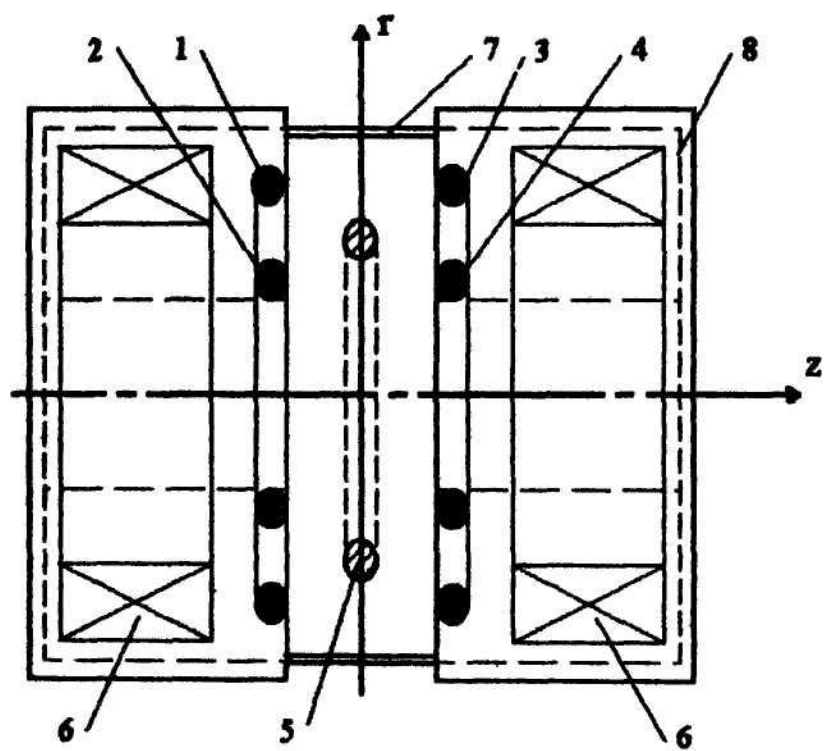
Предлагаемый способ позволяет также существенно уменьшить габариты и массу ускорителя, поскольку отпадает необходимость в использовании железного сердечника. Для ускорителей циклотронного типа уменьшается потребляемая мощность ВЧ-системы и стоимость ВЧ-генератора, которая, как известно, пропорциональна квадрату напряжения или кубу энергии частиц.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3