

## УСКОРЕНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНО-ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

Е. Г. КОМАР

*Научно-исследовательский институт электрофизической  
аппаратуры им. Д. В. Ефремова, СССР*

В настоящем докладе рассматривается возможность ускорения положительно заряженных частиц, находящихся внутри вращающегося пучка релятивистских электронов. Захват ионов пучком может быть осуществлен, например, ионизацией нейтральных атомов, оказавшихся внутри пучка. Двигаясь вдоль пучка под влиянием центробежной силы, ионы постепенно увеличивают радиальную и тангенциальную составляющие скорости. Энергия их возрастает.

Устройство для вращения пучка может быть выполнено по схеме, представленной на рис. 1. Системы 3 и 4 здесь представляют собою подобие статоров асинхронных двигателей.

Напряженность радиально направленного электрического поля пучка растет внутри его пропорционально радиусу и достигает максимального значения на поверхности.

$$E = 18 \cdot 10^{11} \frac{I}{cr}, \quad (1)$$

где  $I$  — ток пучка;  $r$  — радиус пучка;  $c$  — скорость света. При  $I = 10^6$  А и  $r = 1$  см,  $E = 6 \cdot 10^7$  в/см.

Положительно заряженная частица, попавшая внутрь электронного пучка, будет устойчиво находиться в потенциальной яме и сможет свободно перемещаться только вдоль пучка. При каждом отклонении ее от оси, на нее будет действовать линейно нарастающая фокусирующая сила. Число положительных ионов должно быть таким, чтобы компенсировать объемный заряд пучка. При вращении пучка с постоянной угловой скоростью  $\omega$  на достаточно удаленном от центра вращения расстоянии, фазовая скорость электронного пучка и действительная окружная скорость потенциальной ямы вместе с находящимися в ней ионами может

достигнуть скорости близкой к скорости света. Сами электроны движутся по прямолинейным траекториям по радиусу.

В некоторый момент времени электроны займут в пространстве область в виде спирали Архимеда (рис. 2), уравнение которой в полярных координатах

$$\chi = R_c \cdot \varphi, \quad (2)$$

где  $\chi$  и  $\varphi$  — координаты;  $R_c$  — радиус окружности, на которой фазовая скорость равна скорости света.

Радиус кривизны спирали:

$$\rho = R_c \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{\chi}{R_c}\right)^2 + 1\right]^3}}{\left(\frac{\chi}{R_c}\right)^2 + 2} \quad (3)$$

При движении электронного пучка в магнитном поле, силовые линии которого параллельны оси вращения источника и их направление выбрано так, что частицы поворачиваются в сторону противоположную направлению спирали (рис. 3), возможно ее выпрямление (рис. 4). Закон изменения напряженности магнитного поля  $H$  в зависимости от  $\chi$  подбирается так, чтобы траектория частиц в магнитном поле была бы зеркальным отражением Архимедовой спирали. Каждый отдельно взятый электрон не вращается вокруг центра системы, а движется по неподвижной траектории, искривленной корректирующим магнитным полем с радиусом кривизны

$$\rho = \frac{W_e}{300H}, \quad (4)$$

где  $W_e$  — энергия электронов в эв;  $H$  — напряженность поля в данной точке.

Приравнявая (3) и (4) имеем

$$H = \frac{W_e}{300R_c} \frac{\left(\frac{\chi}{R_c}\right)^2 + 2}{\sqrt{\left[\left(\frac{\chi}{R_c}\right)^2 + 1\right]^3}} \quad (5)$$

Подставив численные значения, например,  $W_e = 3 \cdot 10^6$  эв и  $R_c = 1000$  см, получим величину напряженности магнитного поля и изменяющуюся ( $\chi = 0$  до  $\chi = R_c$ ) в пределах

$$H = 20 \div 10 \text{ эрст}$$

Таким образом, для «выпрямления» спирали требуется сравнительно слабое магнитное поле. Уравнение (5) описывает спадающее по ра-

диусу магнитное поле. Оно обеспечивает вертикальную фокусировку электронного пучка.

Рассмотрим механизм ускорения для случая радиального луча. На положительно заряженную частицу с массой покоя  $m_0$ , находящуюся внутри пучка на расстоянии  $x$  от центра, действуют две силы—центробежная  $P_c$  и ускоряющая в тангенциальном направлении  $P_\varphi$ .

$$P_c = m_0 \gamma \omega^2 x = m_0 \gamma a_c \quad (6)$$

Здесь  $\gamma = 1 + \frac{W}{E_0}$  — релятивистский коэффициент, и  $a_c$  — ускорение, вызванное центробежной силой. Из (6) видно, что ускорение растет пропорционально радиусу, также как и радиальная составляющая скорости

$$a_c = \omega^2 x, \quad (7)$$

$$V_c = \omega \cdot x. \quad (8)$$

Очевидно, что радиальная и тангенциальная составляющие скорости и ускорения равны, т. е.

$$V_c = V_\varphi \text{ и } a_c = a_\varphi. \quad (9)$$

Сила, ускоряющая частицы в тангенциальном направлении, равна:

$$P_{\varphi i} = m_0 \gamma \omega^2 x = m_0 \gamma a_\varphi, \quad (10)$$

что соответствует (6). Эта сила создается за счет отклонения ускоряемого протона от оси электронного пучка полем  $E$ , растущим пропорционально радиусу пучка.

Из (1)

$$P_{\varphi E} = \frac{eZE10^7}{k} = \frac{18 \cdot 10^{18} eZI}{kcr}, \quad (11)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $Z$  — кратность заряда частицы;  $k$  — коэффициент запаса устойчивости.

При сверхвысоких энергиях протонов к концу ускорения начинает сказываться дефокусирующее действие магнитного поля внутри электронного пучка.

Дефокусирующая сила

$$P_{\varphi H} = 0.1eZH_{\Delta r} V_c, \quad (12)$$

где  $H_{\Delta r}$  — напряженность магнитного поля на расстоянии от оси пучка а  $V_c$  — скорость протона вдоль оси.

Как известно при  $V_c = c$ ,  $P_{\varphi H} = P_{\varphi E}$  и протон пучком не удерживается. Если предположить, что протон ускорен до  $V=c$ , то из равенства радиальной и тангенциальной скоростей (9) полная скорость частицы в лабораторных координатах равна  $V = \sqrt{2} V_c$ , тогда

$$V_c = \frac{c}{\sqrt{2}} = 0.7c \quad (13)$$

и протон сфокусируется силой  $P_{\varphi} = P_{\varphi E} - P_{\varphi H} = 0,3P_{\varphi E}$ . Подставляя сюда значение  $P_{\varphi E}$  из (11), получим

$$P_{\varphi} = \frac{5,4 \cdot 10^{18} e Z I}{k c r} \quad (14)$$

Максимальное значение силы, ускоряющей протон в тангенциальном направлении из (10)

$$P_{\varphi \text{lm}} = m_0 \gamma \omega^2 R \quad (15)$$

Полагая  $V = c$ , отсюда  $R = \frac{R_c}{\sqrt{2}}$  и

$$P_{\varphi \text{lm}} = 0,8 \frac{\gamma}{R} \cdot 10^{-12} \cdot \quad (16)$$

Приравнивая (14) и (16) и решая относительно  $I$ , получим

$$I = \frac{k \gamma E_0}{36 Z R} \quad (17)$$

Для  $k=1,5$ ;  $r=0,5$  см;  $\gamma=100$  ( $W=100$  Гэв);  $R=1500$  см,  $E_0=10^9$  эв, получим  $I=1,3 \cdot 10^6$  А.

Время и угол поворота электронного пучка для одного цикла ускорения

$$\tau = \frac{\sqrt{2} R}{c} \ln R; \quad \varphi = \ln R \quad (18)$$

при  $R=1000$  см,  $\tau = 3,25 \cdot 10^{-7}$  сек,  $\varphi=395^\circ$ .

Интенсивность ускоренных протонов будет на несколько порядков ниже, чем интенсивность электронов, однако, она может достигать единиц и даже десятков ампер.

Для нерелятивистских энергий ускоряемых ионов аналогично предыдущему могут быть выведены следующие приближенные формулы:

$$W = \frac{60 Z I x}{k r}; \quad \omega = \frac{1,26 \cdot 10^{-6}}{x} \sqrt{\frac{W}{m_0}}$$

Подставляя, например,  $Z=1$ ;  $k=1,5$ ;  $r=0,5$  см;  $I=1000$  А;  $x=500$  см, имеем  $W=40$  Мэв;  $\omega = 12,7 \cdot 10^6$ .

Приведенные расчеты показывают, что предлагаемый способ ускорения целесообразно подвергнуть дальнейшему теоретическому и экспериментальному рассмотрению.

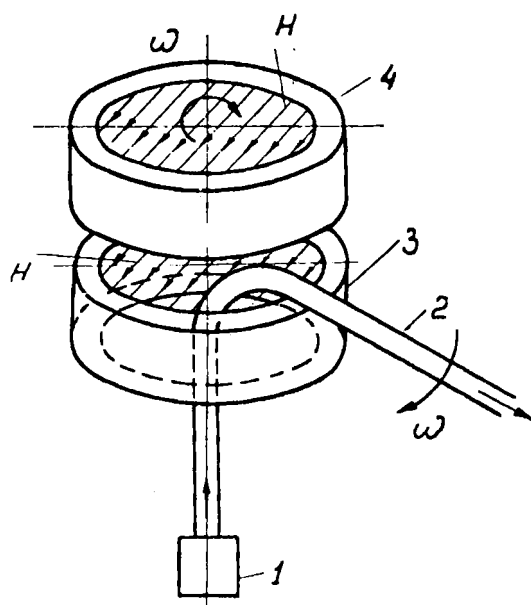


Рис. 1. Устройство для вращения пучка:  
1—источник электронов; 2—пучок электронов; 3 и 4—электромагнитные системы с  
вращающимся вокруг вертикальной оси магнитным полем со скоростью  $\omega$   
и с напряженностью  $H$

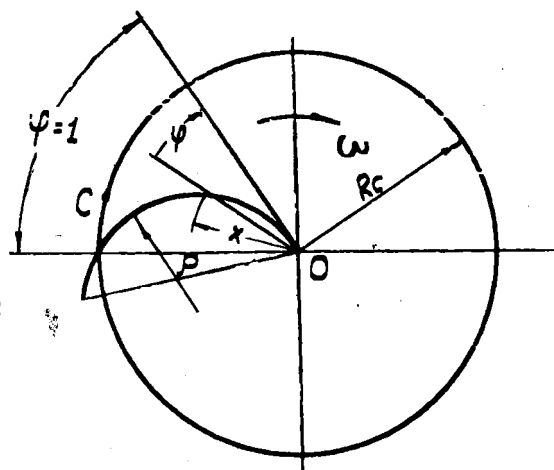


Рис. 2. Вращающийся электронный пучок.

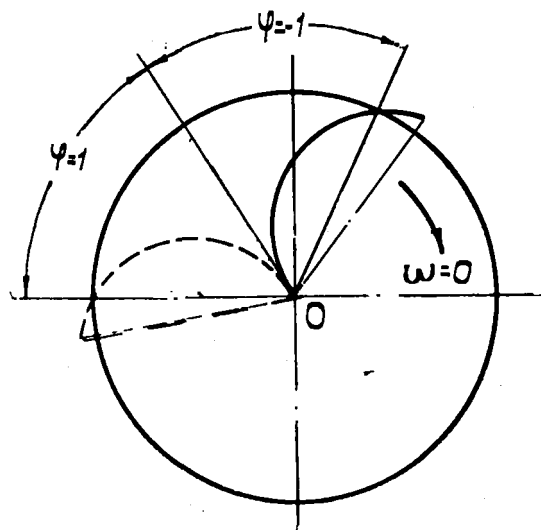


Рис. 3. Неподвижный электронный пучок в магнитном поле.

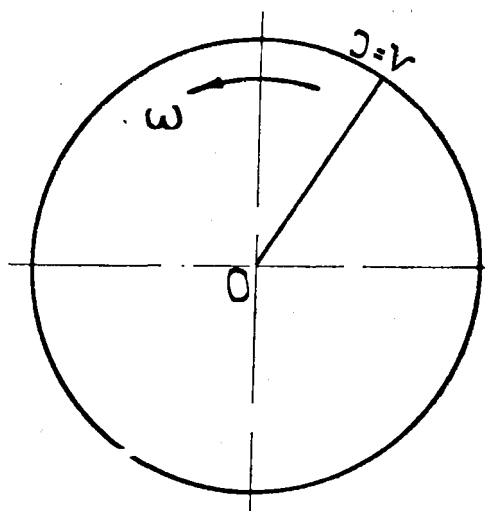


Рис. 4. Выпрямленный магнитным полем вращающийся электронный пучок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. I. Budker, CERN Symposium, 1, 68, 1956.
2. I. Dress, Proc. Intern. Conf. on High En. Acc., Dubna, p. 1036, 1963
3. IEEE Trans. NS-14, № 3, June 1967.

## ДИСКУССИЯ

**Воробьев:** Каким образом предполагается компенсировать потери энергии сверхрелятивистских вращающихся электронов при выбранных Вами параметрах рассматриваемого ускорителя?

**Комар:** Электроны имеют сравнительно низкую энергию порядка 2—3 Мэв и потери на излучение здесь достаточно малы.

**Перельштейн:** Каков способ удержания размеров электронного луча?

**Комар:** Я не рассматривал здесь сложные проблемы устойчивости и сохранения сечения пучка, так как эти проблемы являются общими для систем с коллективным методом ускорения и накопительных колец. Исследования последних лет показали, что получение сильнооточных электронных пучков малого сечения и большой длины является разрешаемой задачей.

**Шехтман:** Какова частота вращения электронного пучка, какие мощности потребуются для вращения, какие электрические поля возникнут в развертывающем устройстве?

**Комар:** Частота вращения электронного пучка порядка единиц и десятков мегагерц. Для вращения пучка не требуется никакой мощности. Энергия ускоряемых ионов берется из энергии электронного пучка. Мощность высокочастотной системы определяется добротностью небольшого устройства с вращающимся магнитным полем, поворачивающим электронный пучок и она сравнительно не велика. Электрические поля в этом устройстве могут быть весьма малы, так как поворачивает пучок магнитное поле.