

## АВТОРЕЗОНАНСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ СТАЦИОНАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

А.В. Тимофеев

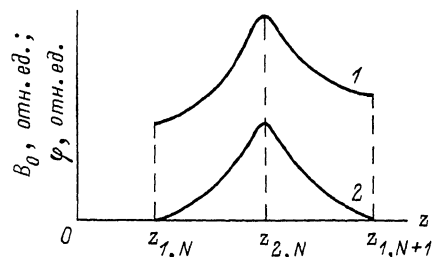
Развитие ускорителей идет по пути увеличения энергии ускоренных частиц и тока. Довольно большие значения тока достигаются в линейных резонансных ускорителях [1]. Однако в таких системах энергия частиц оказывается сравнительно малой. Она ограничивается значением  $eE_{\sim}L$ , где  $E_{\sim}$  – амплитуда ВЧ поля,  $L$  – длина ускорителя. При работе в импульсном режиме можно повысить  $E_{\sim}$ , но в этом случае падает средний по времени ток.

Как энергию частиц, так и ток можно существенно увеличить, если ускорение производить в магнитном поле, параллельном оси ускорителя. ВЧ электрическое поле должно быть направлено перпендикулярно основному магнитному  $\vec{B}_0$ , а его частота равна циклотронной частоте ускоряемых частиц. В магнитном поле заряженная частица движется по спирали. Если ее шаг достаточно мал (скорость частицы поперек магнитного поля  $v_{\perp}$  намного превышает продольную  $v_{\parallel}$ ), то протяженность траектории значительно превысит длину ускорителя. Соответственно при  $E_{\sim} \perp \vec{B}_0$  возрастет и энергия частиц.

Процесс ускорения частиц до релятивистских энергий основывается на явлении авторезонанса (автофазировки), т. е. явлении автоматического поддержания циклотронного резонанса при медленном изменении параметров системы. В авторезонансных ускорителях с импульсным режимом работы, например в синхротронах, основное магнитное поле увеличивается в процессе ускорения. При этом энергия частицы (в дальнейшем будем говорить об электронах) растет по закону  $\mathcal{E}(t) = mc^2 \omega_z(t) / \omega$ , где  $\omega_e = eB_0 / mc$  – электронная циклотронная частота, рассчитанная по массе покоя,  $\omega$  – частота ВЧ поля. Однако авторезонансное ускорение возможно и в системах со стационарным магнитным полем, если оно неоднородно и возрастает вдоль траектории электрона  $\mathcal{E}(t) = mc^2 \omega_e(\vec{r}(t)) / \omega$  [2].

Заметим, что ускорение в волне, бегущей вдоль магнитного поля, также принято называть авторезонансным. В этом случае резонансное условие  $\omega = \omega_e(\mathcal{E}) + k_{\parallel} v_{\parallel}$  не нарушается в процессе ускорения, если  $k_{\parallel} = \omega/c$  [3, 4]. Из этих соотношений следует, что при увеличении  $\mathcal{E}$  на  $\Delta \mathcal{E} \approx mc^2$  скорость  $v_{\parallel}$  должна достичь значений порядка  $c$ . Поэтому ускоритель, основанный на явлении авторезонанса в бегущей волне, не будет иметь существенных преимуществ по сравнению с линейным резонансным ускорителем.

Анализ, проведенный в [5], показывает, что электрон, движущийся в неоднородном магнитном поле, попадает в состояние авто-



Зависимости стационарного магнитного поля и электрического потенциала от продольной координаты: 1 – магнитное поле, 2 – электрический потенциал.

резонанса, если частота ВЧ поля близка к циклотронной, а его амплитуда удовлетворяет условию

$$E_{\perp} \gg V_0 \sigma_{\parallel} \gamma^2 / \ell, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – лоренц-фактор электрона, в состоянии авторезонанса равный  $\omega_e / \omega$ ,  $\ell$  – характерный масштаб изменения магнитного поля. При выполнении условия (1) электрон участвует в двух движениях: быстрых осцилляциях, обусловленных релятивистской зависимостью циклотронной частоты от энергии, и медленном движении, приводящем к регуляторному изменению энергии. Движение электрона вдоль основного магнитного поля описывается гамильтонианом, усредненным по быстрым осцилляциям [5]

$$H = \frac{mc^2}{2} (\gamma(z) + \gamma^{-1}(z)) + \frac{P_{\parallel}^2}{2m} \gamma^{-1}(z) - e\varphi(z), \quad (2)$$

где  $\varphi(z)$  – стационарный электрический потенциал,  $z$  – координата, отсчитываемая вдоль основного магнитного поля.

Из (2) следует, что в неоднородном магнитном поле на электрон действует сила, стремящаяся вытолкнуть его в область более слабого магнитного поля. Действие этой силы можно скомпенсировать электрическим полем, потенциал которого при  $P_{\perp} \gg P_{\parallel}$  определяется соотношением

$$\varphi(z) = \frac{mc^2}{2e} (\gamma(z) + \gamma^{-1}(z)) + \text{const}. \quad (3)$$

На ускоряющем участке стационарное электрическое поле, так же как и высокочастотное, производит работу над электронами, причем количества энергии, получаемые от обоих полей, оказываются сравнимыми. Поэтому если бы ускоритель состоял только из одного ускоряющего участка, то в нем должна была бы поддерживаться разность потенциалов, сравнимая с конечной энергией электронов. По сравнению с таким ускорителем более привлекательным является обычный электростатический.

Чтобы разорвать связь между энергией ускоряемой частицы и электрическим потенциалом, в ускоритель следует ввести замедляющие участки, расположенные поочередно с ускоряющими. На замедляющих участках ВЧ поле отсутствует, а стационарное магнитное

| №   | $B_0(z_1, N), \text{кГс}$ | $B_0(z_2, N), \text{кГс}$ | $\gamma_N, \text{ПЧ}$ | $\mathcal{E}_N, \text{МэВ}$ |
|-----|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 1   | 10.0                      | 58.3                      | 28.0                  | 1.95                        |
| 2   | 24.1                      | 50.2                      | 17.6                  | 3.05                        |
| 3   | 27.8                      | 46.8                      | 13.0                  | 4.10                        |
| 4   | 29.8                      | 44.8                      | 10.4                  | 5.15                        |
| 5   | 31.1                      | 43.6                      | 8.64                  | 6.18                        |
| 10  | 34.0                      | 40.7                      | 4.71                  | 11.3                        |
| 20  | 35.6                      | 39.1                      | 2.48                  | 21.6                        |
| 30  | 36.1                      | 38.5                      | 1.68                  | 31.8                        |
| 40  | 36.4                      | 38.2                      | 1.27                  | 42.0                        |
| 50  | 36.6                      | 38.1                      | 1.02                  | 52.2                        |
| 100 | 37.0                      | 37.7                      | 0.517                 | 103                         |

поле спадает в продольном направлении. При выполнении условия

$$\psi(z) = \frac{mc^2}{e} \left( 1 + \frac{2\mu\omega_e(z)}{mc^2} \right)^{1/2} + const, \quad (4)$$

где  $\mu = P_{\perp}^2 / 2m\omega_e$  — величина, постоянная на траектории электрона в отсутствие ВЧ поля, действие диамагнитной силы так же, как и на ускоряющих участках, компенсируется стационарным электрическим полем. В результате электроны движутся вдоль всего ускорителя равномерно. Параметры ускорителя должны быть подобраны таким образом, чтобы суммарная разность потенциалов на одной ячейке ускорителя, состоящей из ускоряющего и замедляющего участков, равнялась нулю. В этом случае после прохождения ячейки у электрона останется лишь энергия, полученная от ВЧ поля на ускоряющем участке. Ускоритель представляет собой цепочку последовательно расположенных ячеек.

На рисунке схематически изображены зависимости магнитного поля и электрического потенциала в пределах одной ячейки от продольной координаты  $z$ ,  $N$  — номер ячейки. Расчет по формулам (3), (4) показывает, что в одной ячейке электрон набирает энергию  $\mathcal{E}_N - \mathcal{E}_{N-1} = mc^2/2 (\gamma(z_{2,N}) + \gamma^{-1}(z_{2,N}) - \gamma(z_{1,N}) - \gamma^{-1}(z_{1,N}))$ , где  $\gamma(z_{2,N}) = \frac{1}{2} (\alpha_N + (\alpha_N^2 - 4)^{1/2})$ ,  $\alpha_N = \gamma(z_{1,N}) + \gamma^{-1}(z_{2,N}) + \Delta\Phi$ ,  $\Delta\Phi = e/mc^2 \times (\varphi(z_{2,N}) - \varphi(z_{1,N}))$ . Величины  $B_0(z_{1,N})$ ,  $B_0(z_{1,N+1})$  связаны соотношением  $B_0(z_{1,N+1}) = B_0(z_{1,N}) ((\gamma(z_{2,N}) - \Delta\Phi)^2 - 1) (\gamma^2(z_{2,N}) - 1)^{-1}$ . В ультрарелятивистском пределе  $\gamma \gg \max(1, \Delta\Phi)$

нетрудно найти  $\omega_e(z_{2,N})/\omega_e(z_{1,N}) \approx 1 + 2\Delta\Phi/\gamma(z_{1,N})$ ,  $\omega_e(z_{1,N+1})/\omega_e(z_{1,N}) \approx 1 + (\Delta\Phi/\gamma(z_{1,N}))^2$ ,  $\omega_{N+1}/\omega_N \approx 1 - \Delta\Phi/\gamma(z_{1,N})$ ,  $\mathcal{E}_N - \mathcal{E}_{N-1} \approx mc^2\Delta\Phi$ , причем в точке максимума магнитного поля энергия электрона превышает  $\mathcal{E}_{N-1}$  на  $2mc^2\Delta\Phi$ .

В таблице приведены параметры ускорителя, представляющего собой цепочку из 100 ячеек. При расчетах принималось, что перепад потенциала во всех ячейках одинаков и равен  $\Delta\Phi mc^2/e = 2mc^2/e \approx 1$  МВ. Из таблицы следует, что с ростом номера ячейки вариации магнитного поля в ее пределах уменьшаются и величины  $B_0(z_{1,N})$ ,  $B_0(z_{2,N})$  стремятся к постоянным значениям. В то же время частота ВЧ поля от ячейки к ячейке должна падать.

Конечная энергия электронов возрастает с увеличением числа ячеек, т. е. длины ускорителя. Длина одной ячейки определяется условием (1), уменьшаясь с ростом  $\mathcal{E}_\sim$ . Ток ускорителя, по-видимому, будет ограничен неустойчивостью пучка по отношению к раскачке паразитных электромагнитных колебаний. Причиной неустойчивости является неравновесность функции распределения пучка электронов по импульсам ( $\rho_\perp \gg \rho_\parallel$ ). Оценки показывают, что при  $\mathcal{E}_\sim = 1$  кВ/см,  $l = 1$  м, радиусе пучка 10 см, (остальные параметры приведены в таблице), возможно устойчивое ускорение пучка электронов с током  $J \sim 1$  МА.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] В а л ь д н е р О.А. Линейные ускорители электронов. М.: Атомиздат, 1966.
- [2] В о р о н и н В.С., К о н о н о в В.К. // ЖТФ. 1970. Т. 40. № 1. С. 160.
- [3] Д а в ы д о в с к и й В.Я. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 886.
- [4] К о л о м е н с к и й А.А., Л е б е д е в А.Н. // ДАН СССР. 1962. Т. 145. № 6. С. 1259.
- [5] Н е й ш т а д т А.И., Т и м о ф е е в А.В. // ЖЭТФ. Т. 93. № 5. С. 1706.

Институт атомной энергии  
им. И.В. Курчатова

Поступило в Редакцию  
19 июля 1988 г.  
В окончательной  
редакции 2 декабря  
1988 г.