

# ИССЛЕДОВАНИЕ САМОУСКОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ФЕРРИТОВОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ

В.В.Закутин, Н.Н.Насонов, А.А.Ракитянский, А.М.Шендерович  
Харьковский физико-технический институт

Одним из перспективных методов ускорения сильноточных электронных пучков является их самоускорение (автоускорение<sup>/1/</sup>) в ферритовых ускоряющих структурах <sup>/2,3,4/</sup>. В настоящей работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования самоускорения при прерывании электронного пучка в структурах с ненасыщенным и намагниченным до насыщения ферритом.

Линейная теория самоускорения при прерывании пучка в волноводе, заполненном продольно-намагниченными ферритовыми кольцами, даёт следующее выражение для ускоряющего поля:

$$E = \frac{4J_0}{\varepsilon a(R-a)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma}{\sigma^2 + \omega_n^2} \frac{\frac{\sigma}{\omega_n} \sin \omega_n \xi + e^{\sigma \xi} - \cos \omega_n \xi}{(1 + \chi_n^2 A^2)(1 + \chi_n^2 D^2)}. \quad (I)$$

Здесь  $J_0$  и  $\frac{1}{\sigma}$  - амплитуда и длительность фронта пучка;  
 $R$  и  $a$  - внешний и внутренний радиусы колец;  $\xi = t - \frac{z}{v}$  ;

$\varepsilon$  - диэлектрическая постоянная феррита;

$$A = \frac{2\varepsilon(R-a)}{a} ; \quad D = \frac{\gamma_e B_0 \sqrt{\varepsilon}(R-a)}{c} ;$$

$$\omega_n = \gamma_e \sqrt{B_0 H_0} (1 + D^2 \chi_n^{-2})^{-\frac{1}{2}}, \quad \chi_n \operatorname{tg} \chi_n = A ;$$

$\gamma_e$  - гиромагнитное отношение;  $B_0$  и  $H_0$  - индукция насыщения и продольное намагничивающее поле. Оценки по формуле (I) показывают, что при самоускорении электронных пучков килоамперного диапазона ускоряющее поле может достигать величины  $\sim 100 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ .

Существенно больших значений  $E$  можно достичь в случае нелинейной процессии (большой амплитуды) магнитного момента феррита.

Полученное в магнитостатическом приближении выражение для возникающего при этом ускоряющего поля имеет вид

$$E = \frac{\gamma_e B_0 \Delta R}{c} \sqrt{2 B_0 H_0} \operatorname{cn}^3 \left[ K \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right) - \gamma_e \sqrt{B_0 H_0} t; \frac{\sqrt{2}}{2} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta R$  - толщина колец;  $\operatorname{cn}$  - эллиптический косинус Якоби;  $K(\frac{\sqrt{2}}{2})$  - полный эллиптический интеграл первого рода. Оценим величину  $E_{\max}$ , например, при  $B_0 = 4500$  э (феррит 60 НН),  $H_0 = 50$  э,  $\Delta R = 2$  см имеем  $E_{\max} \sim 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ . Таким образом, амплитуда ускоряющего поля в рассматриваемом методе может достигать значительной величины.

Другой возможностью является самоускорение при прерывании пучка в диафрагмированном волноводе, заполненном ненасыщенными ферритовыми кольцами с магнитной проницаемостью  $\mu$ . Выражение для ускоряющего поля в этом случае имеет вид

$$E = \frac{2\mu_0 J_0}{c^2} \ln \frac{\frac{\alpha \sqrt{\epsilon \mu}}{c}}{\sqrt{1 - \frac{\alpha^2 \epsilon \mu}{c^2}}} \sim \frac{2\mu_0 J_0}{c^2} \ln \frac{2\beta c}{\alpha \sqrt{\epsilon \mu}}. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива в течение промежутка времени, равного меньшей из двух величин  $\frac{1}{\sigma}$  или  $\Delta t = \frac{2(R - \alpha \sqrt{\epsilon \mu})}{c}$ , отсчитываемого от начала заднего фронта.

Эксперименты по самоускорению электронного пучка с помощью ферритовой структуры производились на установке, схема которой показана на рис.1.

В качестве источника импульса сильноточного электронного пучка пилообразной формы с длинным передним и коротким задним фронтами использовалась специально разработанная пушка (П) с холодным катодом<sup>/5/</sup>. Генератор высоковольтных импульсов (Г), собранный по схеме Мариса, формирует на нагрузке, которой является волновое сопротивление передающего кабеля  $\rho = 50$  Ом, импульс напряжения амплитудой до 200 кВ. Длительность импульса напряжения и его задний фронт формируется закорачивающим разрядником ( $P_1$ ), который находится в азоте под давлением  $4 \pm 10$  атм.

Ускоряющая система представляла собой набор ферритовых колец (Ф), общая длина которого изменялась от 40 до 200 см (см.

рис. I, а). Соленоид  $S_2$ , в который помещены ферритовые кольца, служит для намагничивания до насыщения этих колец в продольном направлении. Транспортировка пучка осуществлялась в вакуумной трубе (либо керамической, либо стеклянной) с апертурой 35 мм с помощью продольного импульсного магнитного поля, создаваемого соленоидом  $S_1$ . Напряжённость магнитного поля регулировалась в пределах от 100 до 3000 Э.

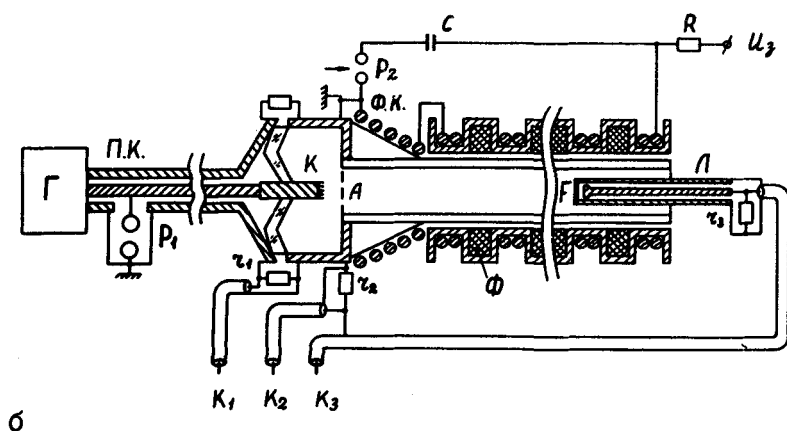
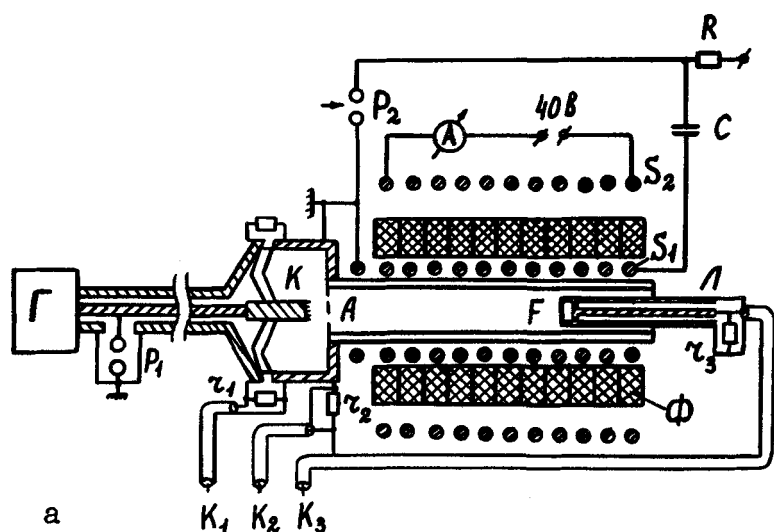


Рис. I

В экспериментах по самоускорению при прерывании пучка в дифрагмированном волноводе, заполненном ненасыщенными ферритовыми кольцами (см.рис.1,б), транспортировка пучка осуществлялась с помощью продольного магнитного поля, создаваемого витками, расположенными между ферритовыми кольцами. Такое расположение витков, создающих фокусирующее магнитное поле, исключало влияние этих витков на ускоряющее поле.

Измерение энергии ускоряющих частиц осуществлялось с помощью алюминиевой фольги  $F$ . Ускоренный пучок, пройдя через фольгу, возбуждает измерительную коаксиальную линию  $\mathcal{L}$  с волновым сопротивлением 6 Ом, согласованную на конце ( $\gamma_3 = 6$  Ом), импульс напряжения с которой передаётся с помощью коаксиального кабеля  $K_3$  на осциллограф. С помощью сопротивлений  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  измеряется соответственно ток катода электронной пушки и ток пучка, дошедшего до фольги.

Эксперименты проведены при начальной энергии частиц пучка 100-130 кэВ и токе 200-400 А.

Результаты измерения приведены на рис.2,3. Осциллограммы, показанные на рис.2, получены при общей длине набора ферритовых колец 80 см; наружный диаметр кольца 10 см, внутренний - 6 см; марка феррита - 2000 НН (см.рис.1,а).

На верхней осциллограмме изображен импульс тока пучка, дошедшего до фольги ( $F$ ), на нижней - импульс тока пучка, прошедшего через эту фольгу. Из осциллограмм видно, что при выбранной толщине фольги (200 мкм) частицы пучка, не получившие прироста энергии в ускоряющей структуре, полностью поглощаются фольгой, узкий пик на нижней осциллограмме соответствует ускоренным частицам заднего фронта пучка, которые получили прирост энергии

$\sim 400$  кэВ. Длительность импульса тока ускоренных частиц составляет  $\sim 12$  нс. Таким образом, максимальная напряжённость ускоряющего поля, полученная в этом эксперименте, составляла 5 кВ/см.

Аналогичные осциллограммы (см.рис.3) были получены на установке, изображённой на рис.1,б. В этом случае общая длина набора ферритовых колец составляла 40 см; наружный диаметр кольца - 18 см, внутренний - 6 см; марка феррита - 60 НН. Прирост энергии частиц равнялся 170 кэВ; длительность импульса тока ускоренного пучка  $\sim 7$  нс (на уровне 0,5), что с хорошей точностью соответствует расчётной величине  $\Delta t = \frac{2(R-a)\sqrt{\epsilon_m}}{c}$  (см.раздел I). Расчёт ускоряющего поля по формуле (3) с использованием эксперимен-

тельных данных даёт значение напряженности поля 3 кВ/см, что хорошо совпадает с экспериментом.

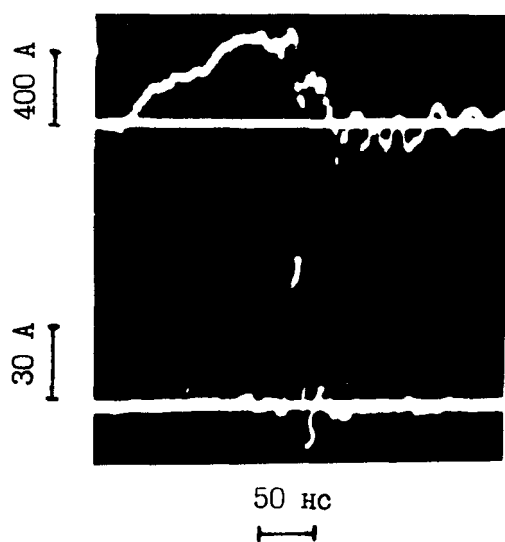


Рис. 2.

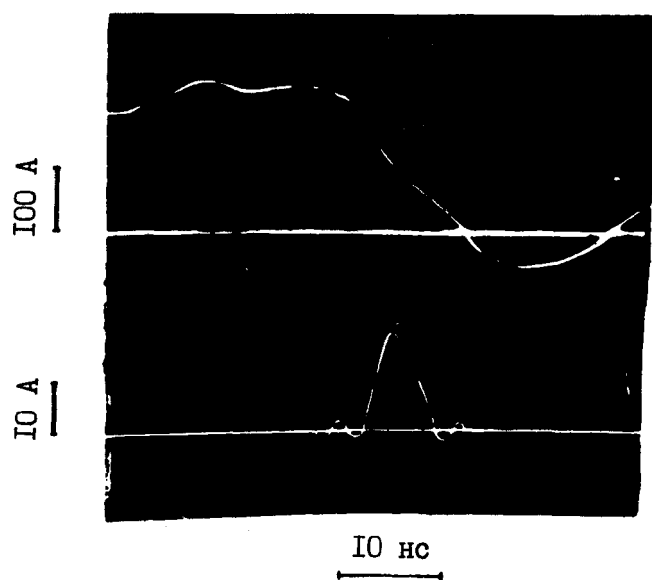


Рис.3.

При увеличении длины ферритовой системы свыше 80 см были обнаружены быстрые колебания интенсивности пучка на её выходе, связанные с развитием продольной неустойчивости пучка. За счёт этого эффекта при длине ускоряющей системы с немагнитным до насыщения ферритом (марки 60 НН) два метра получено увеличение энергии частиц пучка с током 100–200 А в 2 раза (от 110 до 220 кэВ).

#### Литература

1. Л.Н.Казанский, А.В.Кислецов, А.Н.Лебедев. АЭ, 30,1,27/1971/.
2. Ю.А.Башмаков и др. Кр. сообщения по физике, № 5 /1971/.
3. А.А.Ряктынский, А.М.Шендерович. Материалы симпозиума по коллективным методам ускорения, Дубна, изд.ОИЯИ, 129 /1972/.
4. Н.Н.Насонов, А.М.Шендерович. Изв.высш.уч.зав. Радиофизика 17, 909 /1974/.
5. В.В.Закутин, Н.Н.Насонов, А.М.Шендерович. ПТЭ, 2, 25 /1975/.