

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^{1/}) в ферритовых ускоряющих структурах^{2,3,4/}. 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:

$$E = \frac{4J_0}{\epsilon a(R-a)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\sigma^2 + \omega_n^2} \frac{\frac{\sigma}{\omega_n} \sin \omega_n \xi + e^{-\sigma \xi} - \cos \omega_n \xi}{(1 + X_n^2 A^{-2})(1 + X_n^2 D^{-2})}. \quad (I)$$

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

$$A = \frac{2\epsilon(R-a)}{a} ; \quad D = \frac{Y_e B_o \sqrt{\epsilon} (R-a)}{c} ;$$

$$\omega_n = Y_e \sqrt{B_o H_o} (1 + D^2 X_n^{-2})^{-\frac{1}{2}}, \quad X_n \operatorname{tg} X_n = A ;$$

Y_e - гиromагнитное отношение; B_o и H_o - индукция насыщения и продольное намагничивающее поле. Оценки по формуле (I) показывают, что при самоускорении электронных пучков килоамперного диапазона ускоряющее поле может достигать величины $\sim 100 \frac{\text{kV}}{\text{см}}$.

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

$$E = \frac{\chi_e B_o \Delta R}{c} \sqrt{2B_o H_o} \operatorname{sn}^3 \left[K \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right) - \chi_e \sqrt{B_o H_o} t; \frac{\sqrt{2}}{2} \right], \quad (2)$$

где ΔR - толщина колец; sn - эллиптический косинус Якоби; $K \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)$ - полный эллиптический интеграл первого рода. Оценим величину E_{max} , например, при $B_o = 4500$ э (феррит 60 нн), $H_o = 50$ 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 \mathcal{M} . Выражение для ускоряющего поля в этом случае имеет вид

$$E = \frac{2M\beta J_o}{c^2} \ln \frac{\frac{a\sqrt{\mathcal{M}}}{c}}{\sqrt[3]{\sqrt[3]{2}^2 - \frac{a^2 \mathcal{M}}{c^2}}} \sim \frac{2M\beta J_o}{c^2} \ln \frac{2\sqrt[3]{c}}{a\sqrt{\mathcal{M}}}. \quad (3)$$

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

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

В качестве источника импульса сильноточного электронного пучка пилообразной формы с длинным передним и коротким задним фронтами использовалась специально разработанная пушка (П) с холодным катодом^{15/}. Генератор высоковольтных импульсов (Г), собранный по схеме Маркаса, 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 4-10 атм.

Ускоряющая система представляла собой набор ферритовых колец (Φ), 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, созданного соленоидом S_1 . Напряженность магнитного поля регулировалась в пределах от 100 до 3000 Г.

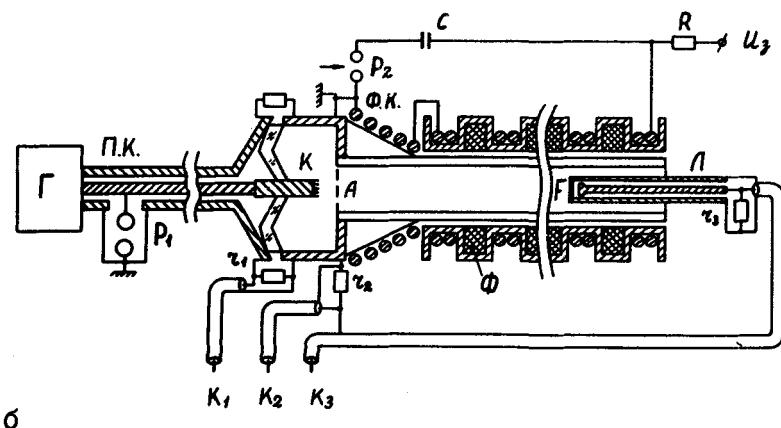
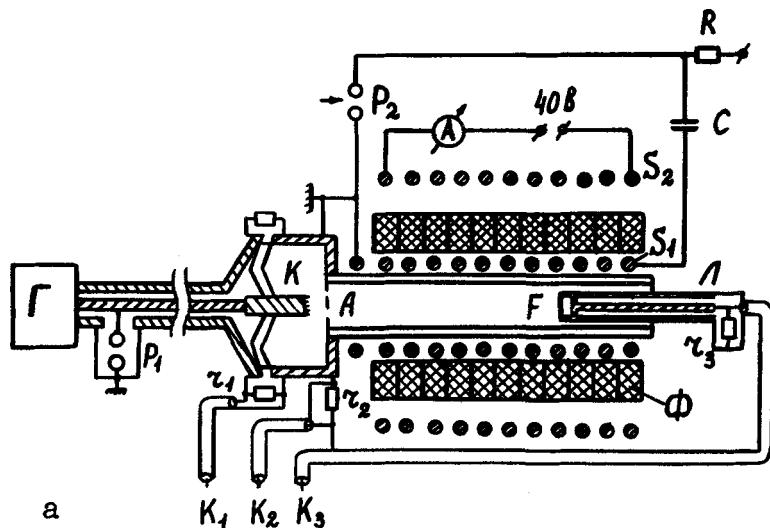


Рис. I

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, расположеннымми 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 ($\zeta_3 = 6$ Ом), импульс напряжения с которой передаётся с помощью коаксиального кабеля K_3 на осциллограф. С помощью сопротивлений ζ_1 и ζ_2 измеряется соответственно ток катода электронной пушки и ток пучка, донедмного 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, донедмного 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 ~ 400 кэВ. Длительность импульса тока ускоренных частиц составляет ~ 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 ~ 7 нс (на уровне 0,5), что с хорошей точностью соответствует расчётной величине $\Delta t = \frac{2(R-a)u_e}{c}$ (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.

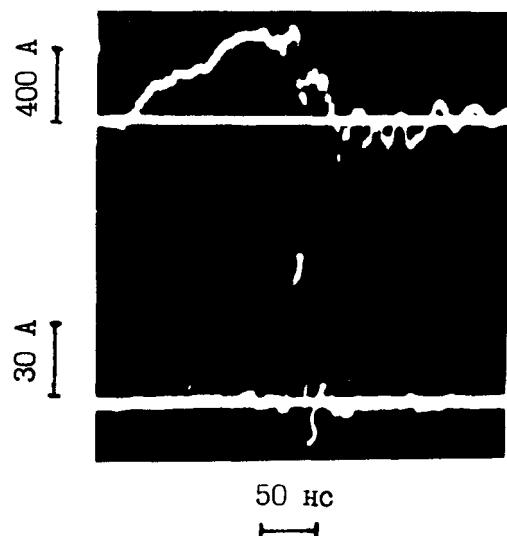


Рис. 2.

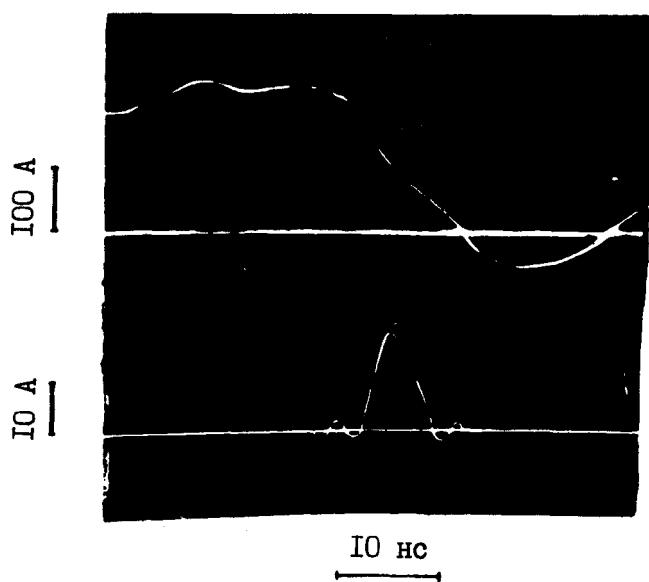


Рис. 3.

При увеличении длины ферритовой системы выше 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 намагниченным 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.Казенский, А.В.Кислцов, А.Н.Лебедев. АЭ, 30, I, 27 /1971/.
2. Ю.А.Баймаков и др. Кр. сообщения по физике, № 5 /1971/.
3. А.А.Рамитянский, А.М.Шендерович. Материалы симпозиума по кол-лективным методам ускорения, Дубна, изд.ОИЯИ, I29 /1972/.
4. Н.Н.Насонов, А.М.Шендерович. Изв.высш.уч.зав. Радиофизика I7, 909 /1974/.
5. В.В.Закутин, Н.Н.Насонов, А.М.Шендерович. ПТЭ, 2, 25 /1975/.