

50/2-77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Б-817

10/1-77

P9 - 10093

А.Г.Бонч-Осмоловский, С.Н.Доля

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ
В МОДУЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

1976

P9 - 10093

А.Г.Бонч-Осмоловский, С.Н.Доля

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ
В МОДУЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Направлено на II симпозиум по коллективным
методам ускорения, Дубна, 1976 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Создание плотных электронных сгустков для ускорения ионов связано с рядом трудностей физического порядка из-за необходимости компенсации кулоновских сил расталкивания и различных неустойчивостей, а также с техническими - при больших γ_{ϕ} /релятивистский фактор вращательного движения/ удержание сгустков требует больших магнитных полей.

В последнее время разрабатывались интересные идеи получения движущихся электронных сгустков методом аксиальной компрессии из отрезков трубчатого пучка в статических магнитных полях ^{/1,2/}.

В данном сообщении формулируется следующий подход к проблеме коллективного метода ускорения: плотность электронов и энергия их вращательного движения ограничиваются относительно малыми значениями /но при этом эффективное ускоряющее ионы поле составляет не менее 10 МэВ/м/, соответственно сравнительно малы числа электронов и ионов в отдельном сгустке, число же создаваемых сгустков в единицу времени велико, так что потоки ускоряемых ионов могут быть значительными. При этом:

а/ влияние коллективных эффектов, в частности, неустойчивостей, может быть скомпенсировано разработанными методами;

б/ используются статические магнитные поля умеренной напряженности и ряд известных технических устройств.

Рассмотрим в сжатом виде отдельные аспекты реализации этого метода.

Сформировать трубчатый пучок можно электронной пушкой типа Пирса-Харриса^{1/}, магнетронной пушкой^{3/}, а также кольцевым автокатодом в магнитном поле^{2/}. Необходимо, чтобы обобщенный момент был одинаков для всех частиц пучка и энергетический разброс не превышал величины ~1%. Экспериментально доказано, что можно получить полый пучок электронов с током 1 кА и выше с отношением толщины трубки к ее радиусу не более 0,1^{2-4/}. Такой пучок модулируется по плотности с помощью группирователя клистронного или автофазирующего типа. Известны пролетные кристроны мощностью 100 МВт в импульсе и даже больше; такого же порядка мощности и автофазирующих систем - ЛБВ, генераторы СВЧ с релятивистскими электронными пучками^{4/}. Степень модуляции пучка достигает при этом 10, а максимальная плотность электронов - 10¹¹ эл/см³ и более.

Пучок, модулированный одним из указанных способов и представляющий собой последовательность цилиндрических полых сгустков, направляется в область магнитного каспа /поле остроугольной геометрии/, образованную, например, двумя встречно включенными соленоидами^{5/}. Функции каспа состоят в аксиальном торможении пучка, создании вращательного движения электронов и дополнительном увеличении плотности /до $n_e \approx 10^{12}$ эл/см³/. Подробное рассмотрение показывает, что продольная скорость сгустков может быть уменьшена в результате прохождения каспа до 0,1 с, где с - скорость света, а плотность электронов увеличена примерно на порядок за счет продольного сжатия сгустков. Потери частиц и расширение пучка малы при следующих

условиях: $L/R < 1$, $\frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{a^2}{R^2} + \frac{\Delta r_0}{R} < \left(\frac{V}{V_0}\right)^2$, где L - длина

области каспа, R - радиус трубчатого пучка, 2a - толщина трубки, Δr_0 - разброс радиусов вылета электронов с катода, V_0 и V - продольные скорости до и после прохождения каспа, γ - полная энергия электронов /в единицах mc^2 /.

После прохождения каспа пучок состоит из кольцевых сгустков с продольными размерами $b \sim a$ и вращательной энергией $\sim \gamma$. На начальном участке тракта

ускорения происходит захват ионов либо путем ионизации атомов в струе нейтрального газа, либо при инжекции ионов извне. В первом случае необходимо дополнительное торможение сгустков до скорости $V \lesssim 10^{-2} c \sqrt{Z/A}$, eZ - заряд и A - атомный вес ионов. Торможение осуществляется нарастающим за каспом продольным магнитным полем. На всем тракте ускорения должна быть обеспечена фокусировка сгустков, для чего предполагается использовать метод H_ϕ -фокусировки^{6/} или фокусировку анизотропным металлическим экраном^{7/}. Азимутальное магнитное поле, созданное центральным проводником с током, центрирует сгустки относительно оси системы и фокусирует их при условии

$$1 < \frac{2\nu_e}{\beta_z^2 \gamma^3} \left(\frac{R}{a}\right)^2 < \frac{(1+p^2)^2}{4p^2}, \quad \text{где } \nu_e - \text{погонный электрон,}$$

$$p = H_\phi / H_z, \quad \beta_z^2 \ll 1.$$

К недостаткам метода следует отнести ограничение длины тракта ускорения, в частности, из-за действия силы Лоренца на ионы. Фокусировка полями изображения в анизотропном экране эффективна, если движение электронов происходит вблизи экрана, $h \sim a$, h - расстояние центра тяжести поперечного сечения трубки от экрана. Условие фокусировки тогда таково: $\gamma > 2h/a$. Чтобы приблизить пучок к стенке и при этом не вызвать его потери, используются создающие мультипольное магнитное поле проводники с противоположно направленными токами, расположенные вдоль цилиндрической поверхности вне пучка. Как показано в^{8/}, при этом возможно эффективное центрирование пучка, а также подавление наиболее опасной из неустойчивостей, в данных условиях - продольной неустойчивости типа НОМ. Для этого необходимо, чтобы $\gamma < \gamma_{кр} = \nu_r = \sqrt{1+q}$, где q определяется уравнением $qe^q = p^2$ и $p = H_M / H_z$, H_M - амплитуда мультипольного магнитного поля, ν_r - безразмерная частота радиальных колебаний. Мультиполи стабилизируют и прецессионные неустойчивости, в частности, дипольную двухпучковую.

Приведем возможный набор параметров ускорителя. При энергии электронов 500 кэВ ($\gamma=2$) и токе пучка 1 кА модуляция производится на длине волны $\lambda = 30$ см.

При этом число электронов в сгустке не менее $N_e = 2 \cdot 10^{12}$. После прохождения каспа с $H_0 = \pm 0,9$ кЭ размеры сгустков таковы: $R = 3$ см, $a_r \approx a_z = 0,15$ см. Поле, ускоряющее ионы, $E_i = 12$ МэВ/м, допустимое ускоряющее

сгустки поле $E_e = E_i \frac{m\gamma}{M} (1 + \beta^2) \leq 1,9$ кВ/см. При фокуси-

ровке азимутальным магнитным полем его величина равна $H_\phi = 3,8$ кЭ, амплитуда мультипольного поля $H_M = 6,8$ кЭ. При длительности импульса пушки $\tau = 2$ мкс число сгустков составляет $N_{сг} = 2 \cdot 10^3$ 1/имп и при частоте повторения импульсов $f = 10^2$ Гц число ускоряемых ионов может достигать $10^{13} \div 10^{14}$ и/с/протоны, легкие ядра/.

Литература

1. А.Л. Минц и др. "Радиотехника и электроника", 20, 2524, 1975.
2. W. Destler et al. Proc. IX Int. Conf. High En. Accel. p.218, Stanf., 1974.
3. M. Friedman. M. Ury. Rev. Sci. Instr., 43, 1659, 1972.
4. Y. Carmel et al., Phys. Rev. Lett., 33, 1278, 1974.
5. M. Rhee, W. Destler. Phys. Fluids, 17, 1574, 1974.
6. А.Г. Бонч-Осмоловский. ЖТФ, 11, 1345, 1971.
7. Г.В. Долбилов и др. ОИЯИ, Р9-4737, Дубна, 1969.
8. А.Г. Бонч-Осмоловский, В.И. Данилов. ОИЯИ, Р9-9886, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 сентября 1976 года.