

10;12

## Ускоритель ионов с пространственно-временной модуляцией релятивистского электронного пучка

© П.Е. Беленсов, А.К. Геворков

Сухумский физико-технический институт

Поступило в Редакцию 14 января 1998 г.

Рассмотрена возможность коллективного ускорения ионов путем сочетания пространственной модуляции потенциала в электронном пучке с модуляцией его тока во времени. Предложена конструктивная схема модели.

Перспективы развития коллективных методов ускорения связаны с возможностью возбуждения в электронных пучках электрических полей объемного заряда, которые могут быть использованы для ускорения ионов до высоких энергий [1].

Несмотря на экспериментальное подтверждение во многих исследовательских центрах высокой эффективности ускорения ионов в электронных пучках [2], до настоящего времени не удалось создать модель реально действующей физической установки, в которой осуществлялось бы ускорение заряженных частиц коллективными полями.

Один из возможных путей коллективного ускорения ионов открывается при сочетании пространственной модуляции потенциала в электронном пучке с модуляцией его тока во времени [3]. Пространственная модуляция потенциала в электронном пучке может создаваться пространственной модуляцией плотности при пропускании электронного пучка через гофрированное магнитное поле. При этом ускоряющее электрическое поле создается избыточной плотностью зарядов в областях максимумов магнитного поля. Сочетание пространственной модуляции плотности (с периодом магнитного поля  $L$ ) и временной модуляции тока пучка (с периодом  $T$ ) приводит к возникновению необходимой для ускорения ионов медленной бегущей волны с фазовой скоростью

$$V_{ph} = \frac{L}{T + \frac{L}{v_{el}}} = \frac{v_{el}}{1 + \frac{\Omega}{\omega}}, \quad (1)$$

где  $\Omega = \frac{2\pi v_{el}}{L}$ ,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ,  $v_{el}$  — скорость электронов пучка. Частицы, движущиеся синхронно с фазовой скоростью волны, при определенных условиях могут захватываться ею и ускоряться. Для ускорения захваченных ионов необходимо увеличить фазовую скорость волны, что может быть достигнуто изменением периода пространственной модуляции магнитного поля при неизменной частоте модуляции тока пучка во времени. Структура электрического поля в ускорителе, основанного на рассматриваемом методе, позволяет одновременно с ускорением обеспечить радиальную фокусировку ионов.

Анализ движения ионов в подобной системе показывает, что возможно устойчивое ускорение в области синхронных фаз, лежащих в интервале  $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ .

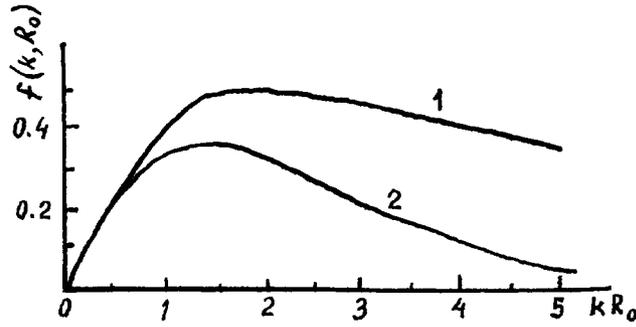
Амплитуда ускоряющего электрического поля в рассматриваемом ускорителе зависит от величины тока электронного пучка

$$E_{20} = \frac{4I_0 a_0}{c\beta R_0} f(k, R_0, b) \sin(kz), \quad (2)$$

где  $I_0$  — ток пучка;  $\beta = \frac{v_{el}}{c}$ ,  $c$  — скорость света;  $R_0$  — средний радиус электронного пучка в гофрированном магнитном поле;  $R = R_0[1 + a_0 \cos(kz)]$ ,  $k = \frac{2\pi}{L}$ ;  $a_0$  — параметр модуляции границы пучка;  $b$  — радиус проводящей дрейфовой трубы, через которую проходит пучок;  $f(k, R_0, b)$  — функция, определяющая структуру поля пространственного заряда пучка (рис. 1). Для получения высоких значений напряженности ускоряющих полей целесообразно использовать высоко-точные электронные пучки, сплошные или трубчатые. Несмотря на то что при одинаковых токах и отношениях  $\frac{b}{R_0}$  максимальное ускоряющее поле на оси трубчатого пучка составляет лишь 70% от поля сплошного пучка, использование трубчатого электронного пучка оказывается более предпочтительным, поскольку в этом случае можно формировать и транспортировать электронные потоки с большим предельным током:

$$\frac{I_{0pipe}}{I_{0unif}} \Big|_{R_0 \rightarrow b} = \left( 1 + \frac{1}{2 \ln \frac{b}{R_0}} \right) \gg 1. \quad (3)$$

Так, при  $\gamma \sim 1.5 - 2.0$  устойчивые токи трубчатого релятивистского электронного пучка (РЭП) могут достигать значений  $\lesssim 20$  кА, где  $\gamma$  — релятивистский фактор.



**Рис. 1.** Структура ускоряющих полей в случае сплошного (кривая 1) и трубчатого (кривая 2) пучков.

Процесс модуляции РЭПа во времени с заданной частотой основан на взаимодействии электронов с узкой щелью резонатора в области токов, близких к предельному [4,5]:

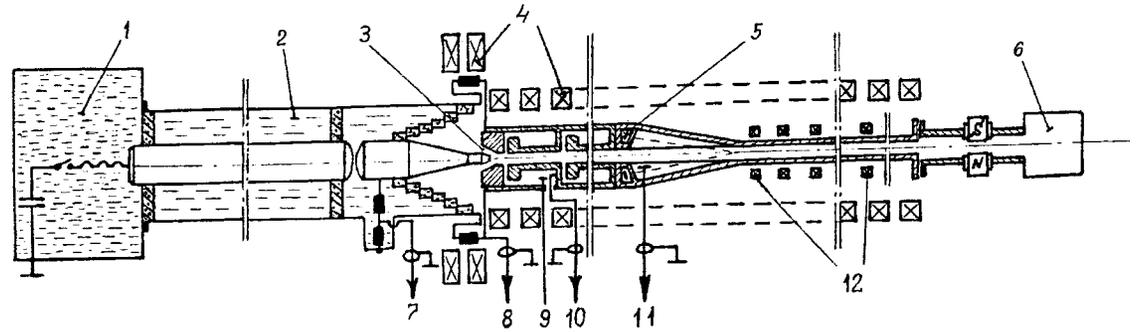
$$I_0 \rightarrow I_{0\text{ultim}} = \frac{m_0 c^3}{e} \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{2 \ln \frac{b}{R_0}}, \quad (4)$$

где  $m_0, e$  — масса и заряд электрона.

Для получения надежной 100%-й модуляции РЭПа используются три четвертьволновых укороченных резонатора с электронной положительной обратной связью [5].

Модулированный во времени РЭП поступает в полость магнитного гофра с переменным шагом, куда предварительно инжектируются ионы со скоростью, равной начальной фазовой скорости ускоряющей волны. Эти ионы, движущиеся синхронно с полем волны, ускоряются и регистрируются анализатором.

Конструкция модели ускорителя, представленная на рис. 2, состоит из генератора импульсного напряжения Аркадьева–Маркса (ГИНа), заряжающего низкоомную водяную коаксиальную линию с обострителем [6], нагрузкой которой является пушка магнетронного типа. Соосно с магнетронной пушкой крепится модулятор, состоящий из



**Рис. 2.** Принципиальная схема ускорителя: 1 — ГИН; 2 — коаксиальная линия; 3 — электронная пушка; 4 — катушки ведущего магнитного поля; 5 — инжектор ионов; 6 — анализатор ионов; 7 — измерение напряжения на диоде; 8 — измерение тока диода; 9 — резонатор; 10 — измерение тока в резонаторе; 11 — электростатический датчик; 12 — катушки магнитного гофра.

набора резонаторов. За модулятором установлен инжектор ионов.<sup>1</sup> За инжектором размещается дрейфовая труба с магнитным гофром, к которой пристыкован анализатор Томсона с двойным времяпролетным анализом.

### Основные расчетные параметры ускорителя

Ток РЭПа	20 kA
Энергия электронов	360 keV ( $\gamma \simeq 1.7$ )
Длительность импульса тока РЭПа	60 ns
Частота модуляции РЭПа	166 MHz
Начальная энергия протонов	41 keV
Конечная энергия протонов	3 MeV
Амплитуда тока ускоренных протонов	$\gtrsim 100$ A
Полная длина ускорения	0.8–1.0 m

### Список литературы

- [1] Файнберг Я.Б. // Физика плазмы. 1977. Т. 3. В. 3. С. 442–446.
- [2] Плотто А.А., Беленсов П.Е., Корон Е.Д., Мхеидзе Г.П., Рыжков В.Н., Суладзе К.В., Темчин С.М. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6. В. 3. С. 540–541; Rander I., Ecker B., Yonas G. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. N 6. P. 283–286; Luce S., Sahlin L., Grites K. // IEEE Trans. Nud. Sci. 1973. V. S-10. P. 336–341.
- [3] Лымарь А.Г., Хихняк Н.А., Беликов В.В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. физ. высоких энергий и атомного ядра. Харьков, 1973. В. 3. С. 78–80; Лебедев А.Н., Пазин К.Н. // Атомная энергия. 1976. Т. 41. С. 244–246; Геворков А.К., Солдатенков Т.Р. Препринт СФТИ-7. Сухуми, 1980. С. 20.
- [4] Краснопольский В.В., Калинин В.И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 6. С. 1160–1163.
- [5] Fridman M., Seftin V., Drabof A., Seftor L. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. N 24. P. 1922–1924.
- [6] Зверев Г.И., Суровцев В.Г., Волков Л.С. // Всесоюзн. совещание по инж. пробл. УТ.С. Л., 1975. Т. 2. С. 153.

<sup>1</sup> На рис. 2 изображена схема инжекции ионов с периферии. Случай инжекции ионов в торец РЭПа не показан.