

## ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

621.384.6.01

МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ  
ВОЛН ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА В ВАКУУМЕ И ПЛАЗМЕ

Я. Б. Файнберг, Н. А. Хижняк

В статье пойдет речь о новых методах ускорения тяжелых заряженных частиц, которые были предложены и в настоящее время разрабатываются в ФТИ АН УССР. Возникновение и развитие их в большой степени стимулировано работами В. И. Векслера по коллективным методам ускорения<sup>1</sup>.

Как известно, в основе коллективного метода ускорения лежит идея прямого преобразования энергии сильноточного электронного пучка в кинетическую энергию инжектируемых в пучок ионов. Ускорение ионов, осуществляется при этом самосогласованными электрическими полями до энергий, значительно превышающих кинетическую энергию первичных электронов.

Ускорение ионов до высоких энергий высокочастотными полями сильноточных электронных пучков должно происходить в течение многих периодов высокочастотного поля, что возможно лишь в случаях, когда эти поля достаточно регулярные и при этом обеспечены условия синхронизма между ускоряемой частицей и бегущей электромагнитной волной. Максимальная напряженность самосогласованного электрического поля в пучках равна  $2,7 E_{\max} \approx 4\pi n_0 e \xi$  (здесь и в дальнейшем используется гауссова система единиц), где  $n_0$  — плотность электронов пучка,  $\xi$  — характерный размер, равный  $c/\Omega_p$  в плазменном и — деформации пучка  $\xi_m$  в вакуумном вариантах,  $e$  — заряд электрона,  $c$  — скорость света,  $\Omega_p$  — электронная плазменная частота среды. Как известно, величина  $c/\Omega_p$  определяет глубину проникновения высокочастотного поля в плазму, а  $\xi_m$  — максимальную величину смещения электрона от положения, которое занимал бы он в равномерно движущемся невозмущенном пучке<sup>2</sup>. Величина  $E_{\max}$  теоретически может достигать очень больших значений. При изменении плотности электронов в пучке от  $10^{12}$  до  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> она изменяется от 0,1 до 10 Гев/см. Вопрос заключается в том, как возбудить волны такой напряженности.

Формированию регулярных высокочастотных полей с переменной фазовой скоростью волны плотности заряда в мощных электронных пучках и уделяется сейчас основное внимание. Физические механизмы формирования полей различны в плазменном и вакуумном вариантах. Поэтому рассмотрим их отдельно.

В плазменном варианте используется способ возбуждения продольных волн большей напряженности, основанный на раскачке плазменно-пучковых неустойчивостей<sup>3</sup>. Основное преимущество этого варианта — возможность введения в плазму очень высоких мощностей в пучках. При этом 10—40% кинетической энергии пучка трансформируется в энергию электромагнитных колебаний<sup>4</sup>, что следует из нелинейной теории явления и подтверждено экспериментально. При мощности пучка  $10^{10}$  вт в неоптимальных условиях получены мощности высокочастотных колебаний  $(5-6) \cdot 10^8$  вт<sup>5</sup>. Эти поля действуют на расстояниях 50—60 см, и, если бы они были достаточно монохроматическими, они обеспечивали бы напряженность продольного электрического поля порядка 150—300 кВ/см.

Авторы настоящей работы еще в 1955 г. показали, что при ускорении частиц в плазме осуществляется одновременная радиальная и фазовая устойчивость<sup>2</sup>, поэтому плотность тока ускоренных ионов может достигать очень больших значений. Плотность ионов  $n_i$  может быть равной  $n_i \approx n_0 (m/M) \sqrt{v_f/v_{Te}}$ , где  $v_f$  — фазовая и  $v_{Te}$  — тепловая скорости волны и электронов соответственно. Методы управления фазовой скоростью волны в плазменном волноводе к настоящему времени хорошо известны<sup>5</sup>.

Несмотря на очевидные достоинства рассматриваемого метода ускорения, его развитие задерживалось, поскольку нелинейные эффекты препятствовали возбуждению в плазме регулярных монохроматических колебаний и приводили к уширению

спектра. Необходимо было разработать методы сужения и разрежения спектров по фазовым скоростям и частотам, т. е. разработать эффективные методы управления плазменно-пучковыми неустойчивостями. Необходимо было также устранить нагрев плазмы и ее диффузию, вызванную развивающимися неустойчивостями.

Предложен, теоретически исследован и экспериментально подтвержден метод управления неустойчивостями, заключающийся в задании на входе плазменно-пучковой системы регулярного сигнала, превосходящего уровень флуктуаций, или же в осуществлении первоначальной модуляции пучка, который приводит к возбуждению волн на частоте сигнала или модуляции и к подавлению всех остальных волн. При этом энергия волн перекачивается в узкую спектральную область или же в одну монохроматическую волну. Разработанная нелинейная теория и эксперименты показали, что необходимая для управления мощность составляет всего  $10^{-4} - 10^{-6}$  от мощности возбуждаемых колебаний<sup>6</sup>. Ближайшая задача состоит в том, чтобы перенести эти методы управления неустойчивостями на большие установки.

Переход на высокие уровни ВЧ колебаний имеет свои особенности. С одной стороны, при возбуждении волн большой амплитуды могут быть существенно понижены точность поддержания частоты и степень монохроматичности волны, необходимые для устойчивого ускорения частиц. Однако в процессе нарастания амплитуды волны увеличивается ее обратное действие на плазму, происходит модуляция плазмы по плотности и создаются другие условия, при которых возникает необходимость обеспечения устойчивости волн относительно распадной, модуляционной, параметрической и других неустойчивостей, срыв эффектов, приводящих к насыщению амплитуды возбуждаемых колебаний. Некоторые из этих задач уже решены, другие успешно решаются.

На рисунке представлены результаты экспериментальных работ по сужению спектра колебаний, возбуждаемых в плазме пучком, в одну частоту. Здесь же представлены расчетные корреляционные функции, демонстрирующие регулярность возбуждаемого сигнала.

В вакуумном варианте для возбуждения волн плотности заряда большой амплитуды в мощных электронных пучках используется параметрическая неустойчивость. Элементарным эффектом этой неустойчивости является параметрический эффект Черенкова<sup>3</sup>. Для управления фазовой скоростью волны используется аномальный эффект Дошлера.

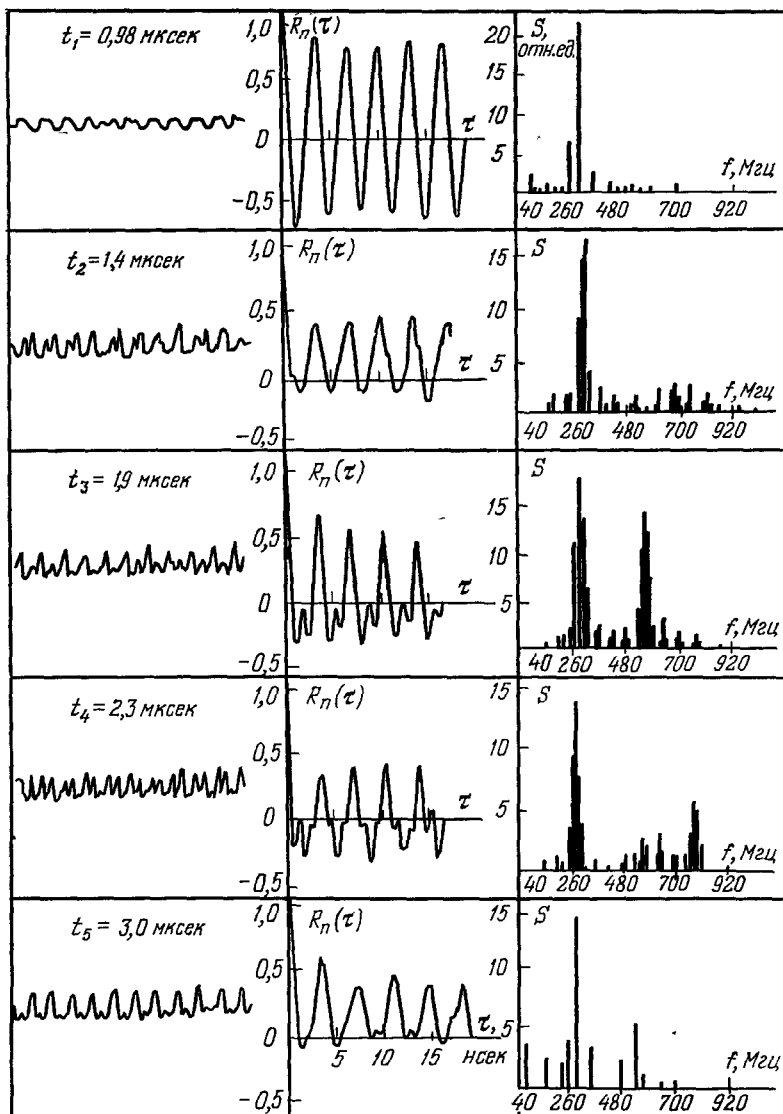
Как известно, первоначальная модуляция пучка по скорости в пространстве дрейфа приводит к глубокой модуляции по плотности (клистронный группирователь частиц), однако кулоновские силы препятствуют этой модуляции. Демодулирующее действие кулоновских сил можно существенно понизить, если электронный пучок пропускать в пространство дрейфа, нагруженное пространственно-неоднородными статическими полями. При совпадении собственной частоты пучка с пролетными частотами нагрузки в пучке развиваются параметрические неустойчивости на частоте, равной частоте модуляции, которые снижают и даже полностью компенсируют демодулирующее действие кулоновских сил<sup>7</sup>. Важно подчеркнуть, что глубокая модуляция высокопоточного электронного пучка осуществляется при этом относительно слабым модулирующим сигналом. В настоящее время параметрическая раскачка интенсивных волн плотности заряда исследована теоретически<sup>7</sup>, а на электронных пучках малой величины и экспериментально<sup>8</sup>, и теперь задача состоит в том, чтобы перенести полученные достижения на высокопоточные электронные пучки.

Несомненно, что при этом требования к пучкам значительно выше, чем в плазменном варианте, поэтому в вакуумном варианте переход к высокопоточным пучкам встречает больше трудностей. Однако заманчивым является то, что в вакуумном варианте значительная часть энергии пучка (до 35%) может быть преобразована в энергию первой гармоники поля, которая представляет собой регулярную монохроматическую волну.

Волны плотности заряда в электронном пучке имеют фазовую скорость, равную скорости электронов  $v_0$ , поэтому они непосредственно неприменимы для ускорения ионов. Однако в случаях, когда потенциал поля на оси пучка промодулирован с некоторым пространственным периодом  $L$ , благодаря аномальному эффекту Дошлера формируются волны с фазовой скоростью  $v_\phi = v_0/[1 + (\pi v_0/\omega L)]$ , которая может быть равной скорости ионов.

В настоящее время экспериментально проверена возможность формирования в быстрых электронных пучках волн плотности заряда с малой фазовой скоростью и показано, что ионы захватываются в процесс ускорения<sup>9</sup>. В качестве пространственно-неоднородной системы использовалась труба с периодически изменяющимся радиусом. Так как радиальное провисание потенциала в пучке зависит от расстояния между границей пучка и экраном, то периодическое изменение радиуса экрана и приводит к появлению на оси пучка продольного модулирующего поля. Кроме того, участки с большим радиусом экрана можно рассматривать как резонаторы, обеспечивающие параметрическую раскачку волн плотности заряда большой амплитуды. Совмещение двух функций в одной периодической структуре не встречает принципиальных трудностей, поскольку глубина модуляции пучка преимущественно определяется меньшим

радиусом отверстий, а собственные резонансные частоты резонаторов — большим радиусом отверстий трубы. Для иллюстрации возможностей вакуумного варианта приводим расчетную таблицу необходимых параметров пучка и фокусирующего магнитного поля (электронный пучок имеет поперечные размеры порядка 1 мм).



Осциллограммы колебаний, их автокорреляционные функции  $R_n(\tau)$  и частотные спектры  $S(f)$  для различных моментов времени взаимодействия модулированного электронного пучка с плазмой <sup>10</sup>.

Параметры пучка и плазмы: энергия пучка — 25 кэВ, ток — 25 а, длительность импульса тока — 4,5 нсек. Мощность начальной модуляции — 6,5 кет, частота модуляционного сигнала — 291 МГц, мощность выходного сигнала — 100—150 кет.

В заключение отметим, что полученные экспериментальные результаты хорошо соответствуют теоретическим, что позволяет надеяться на практическую реализуемость обсуждаемых коллективных методов ускорения. Первые работы по данным направлениям (теория параметрического эффекта Черенкова и исследования по динамике заряженной частицы в плазменном волноводе) выполнены совместно авторами настоя-

Энергия электронов пучка, $\text{кэВ}$	Ток пучка, $\text{а}$	Эффективная напряженность ускоряющего поля $E_{\text{уск}}, \text{кВ/см}$	Фокусирующее магнитное поле, $\text{тл}$
100	200	80	4
200	560	160	5,7
300	1020	240	7,0

шего сообщения. В дальнейшем развитие плазменных методов ускорения выполнялось Я. Б. Файнбергом, А. К. Березиным, Ю. В. Ткачем, В. Д. Шапиро, В. И. Курилко, В. И. Шевченко, Л. И. Болотиным, А. И. Егоровым и др. Вакуумный вариант ускорения в пучках исследовался в работах Н. А. Хижняка, А. Г. Лымаря, В. В. Беликова, Н. С. Репалова, В. Ф. Тырнова, А. И. Пасынка и др.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер В. И.— АЭ, 1957, т. 2, с. 427.
2. Файнберг Я. Б.— Ibid., 1959, т. 6, с. 431.
3. Файнберг Я. Б., Хижняк Н. А.— ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 1882.
4. Шапиро В. Д.— ЖЭТФ, 1963, т. 44, с. 613.
5. Файнберг Я. Б.— АЭ, 1961, т. 11, с. 313.
6. Fa i n b e r g J a . B .— Particle Accelerator, 1975, v. 6, p. 95.
7. Репалов Н. С., Хижняк Н. А.— Радиотехн. и электрон., 1965, г. 10, с. 334.
8. A s e e v G . G ., K h i z h n j a k N . A ., K u z n e t s o v a G . G ., R e p a l o v N . S .— In: Proc. of 8th Intern. Conference on High-Energy Accelerator.— CERN: 1971.—P. 583.
9. Беликов В. В., Лымарь А. Г., Хижняк Н. А.— Письма ЖТФ, 1975, т. 1, с. 615.
10. Березин А. К., Файнберг Я. Б., Безъязычный И. А.— Письма ЖЭТФ, 1968, т. 7, с. 156.
11. Ткач Ю. В., Файнберг Я. Б. и др.— Физ. плазмы, 1975, т. 1, с. 81.