

01;09;10

ЭФФЕКТ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ИХ УСКОРЕНИИ В СКРЕЩЕННЫХ EH -УБИТРОННЫХ ПОЛЯХ

© В.В.Кулиш, П.Б.Козел, О.Б.Крутько, И.В.Губанов

Обнаружен эффект охлаждения пучка заряженных частиц при его ускорении в скрещенных поперечных периодически-реверсивных электрическом и магнитном полях. Показано, что этот эффект может сопровождаться компрессией в поперечном направлении. На основании этих явлений предложен новый механизм формирования высококачественных релятивистских пучков заряженных частиц. Построена теория эффекта охлаждения неплотных пучков.

В данной работе предлагается новый физический механизм охлаждения пучков заряженных частиц при их движении в скрещенных поперечных электрическом (вихревом) и магнитном периодически-реверсивных (EH -убитронных) полях. Как выяснено, данное явление реализуется на фоне еще двух весьма интересных (как в прикладном, так и общефизическом отношении) эффектов, а именно ускорения заряженных частиц [1] и поперечной компрессии пучка как целого. Произведенный анализ показал, что для практики одновременное комплексное использование всех трех указанных явлений может иметь далеко не тривиальные следствия. Наиболее важное из них — появление обнадеживающих перспектив для создания новых технологий формирования высоко- и сверхвысококачественных пучков релятивистских заряженных частиц. Здесь в качестве исходной базы могут быть использованы достаточно “теплые” инжекторные системы, характеризующиеся значительным разбросом частиц по энергиям и эмитансом. Заслуживают также внимания вновь появляющиеся возможности формирования модулированных (в том числе и иерархически модулированных) по плотности пучков с абсолютно малым динамическим разбросом частиц по энергиям (за счет группирования) в пределах каждого банча (либо микробанча соответственно [2]).

Суть обсуждаемого явления состоит в следующем. При движении заряженных частиц в скрещенных EH -убитронных полях, как известно [1], может иметь место их ускорение. При этом движение частиц характеризуется синусоподобными траекториями, а поперечное вихревое электрическое поле оказывает наиболее эффективное ускоряющее

воздействие в промежутках между двумя соседними полюсами электромагнитов. Или, другими словами, на участках траекторий, заключенных между двумя соседними поворотами (поперечными реверсами) частиц. Ключевым здесь является факт, что при движении релятивистского потока частиц, обладающего начальным разбросом по энергиям, частицы с меньшими начальными энергиями характеризуются большими амплитудами осцилляций и наоборот. Это объясняется в том числе эффектом релятивистской массы (более “энергичные” частицы оказываются более “тяжелыми”). Следовательно, при равных (вдоль траектории) значениях напряженности вихревого электрического поля последнее совершает большую работу по ускорению именно менее “энергичных” частиц (и наоборот). Как следствие, в процессе ускорения параллельно реализуется механизм выравнивания энергий частиц, что и трактуется нами как эффект охлаждения. Что касается механизма поперечной компрессии, то он обусловлен реализацией в данной EH -убитронной системе хорошо известного в ускорительной технике явления жесткой фокусировки [2].

Количественный анализ эффекта охлаждения произведем на модели ленточного релятивистского электронного пучка (РЭП). Последний считаем обладающим конечной толщиной по оси OY , безграничным по оси OZ и дрейфующим как целое вдоль оси OZ . Электрическую и магнитную компоненты ускоряющего EH -поля полагаем линейно поляризованными. Причем вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} — вдоль оси OX , а магнитного \mathbf{B} — вдоль оси OY . Вектор-потенциал результирующего EH — поля задаем в виде

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}_x A_0(y, z, t) \sin kz, \quad (1)$$

где \mathbf{e}_x — единичный вектор вдоль оси OX , $A_0(y, z, t)$ — медленно меняющаяся амплитуда векторного потенциала, t — время в лабораторной системе, $\psi = kz$ — фаза, $k = 2\pi/\lambda$ — частота ондуляции EH -поля, λ — период ондуляции. Кулоновским взаимодействием частиц (на фоне их взаимодействия с внешним полем (1)) пренебрегаем. Это естественно ограничивает рамки применимости развиваемой здесь теории областью относительно неплотных РЭП.

Использовались гамильтонова формулировка задачи о движении заряженной частицы во внешних полях и метод асимптотического интегрирования исходных систем уравнений движения (метод Боголюбова) [3]. В наинищем (по Боголюбову) приближении нелинейную динамику частицы

в поле (1) можно описать системой укороченных уравнений:

$$\frac{dy}{dz} = \frac{\mathcal{P}_y}{\mathcal{P}_z}; \quad \frac{d\mathcal{P}_y}{dz} = -\frac{e^2}{2c^2\mathcal{P}_z} A_0 \frac{\partial A_0}{\partial y};$$

$$\frac{d\mathcal{P}_z}{dz} = -\frac{e^2}{2c^2\mathcal{P}_z} A_0 \frac{\partial A_0}{\partial z}; \quad \frac{d\mathcal{H}}{dz} = \frac{e^2}{2c^2\mathcal{P}_z} A_0 \frac{\partial A_0}{\partial t}, \quad (2)$$

где \mathcal{P}_y, z — компоненты вектора канонического импульса P частицы, \mathcal{H} — гамильтониан частицы, e — заряд частицы, c — скорость света в вакууме.

Прежде всего обращаем внимание на структуру уравнений (2). А именно, на то обстоятельство, что заряд e входит в правые части только как e^2 . Это означает, что система (и следовательно, и описываемые ею эффекты) инвариантны относительно знака заряда — факт, отмечавшийся еще в работе [1]. В этой связи все сделанные в данной работе выводы качественного характера применимы как к электронным и ионным, так и к квазинейтральным плазменным пучкам.

Количественно динамику частиц в поле (1) исследуем методом крупных частиц. Поле (1) полагалось неоднородным по осям OY и OZ . Причем неоднородность по оси OY моделировалась функцией вида $ch(\chi y)$, а по си OZ — $\exp(\Gamma z)$ (где

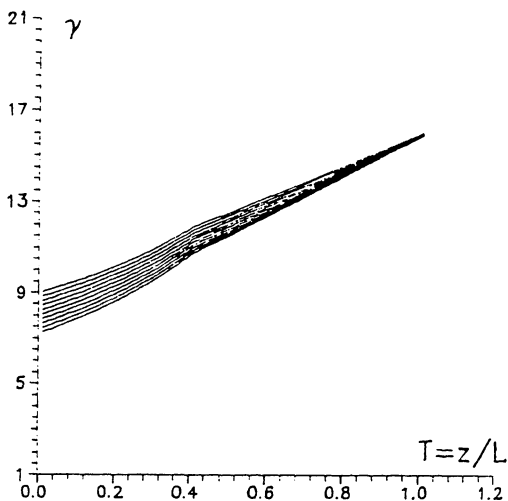


Рис. 1. Эффект охлаждения электронного пучка при его движении в EH -убитронном поле. Зависимости релятивистских факторов отдельных частиц от безразмерной длины ускоряющей секции $T = z/L$ ($\langle B \rangle = 5$ кГс, $\langle E \rangle_1 = 160$ ед. СГС, $\langle E \rangle_2 = 230$ ед. СГС, $\lambda = 2$ см, $\Gamma_1 = 0.01$ см $^{-1}$, $\Gamma_2 = 0.02$ см $^{-1}$, $\chi = 0.04$ см $^{-1}$, $L = 1$ м, $D_k = 2$ мм).

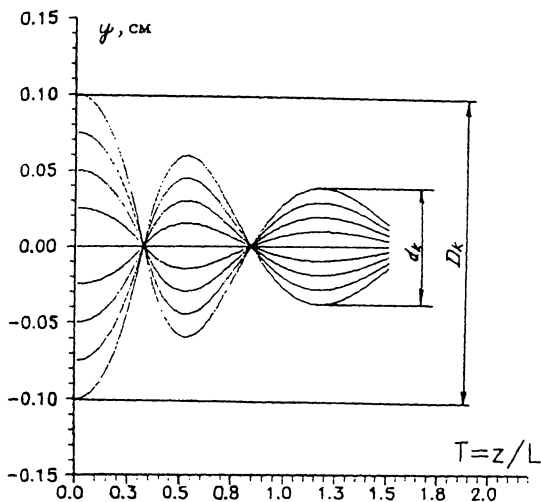


Рис. 2. Эффект компрессии ленточного электронного пучка при его движении в EH -убитронном поле. Зависимости траекторий отдельных частиц в плоскости YOZ (ось OZ представлена безразмерной координатой $T = z/L$, параметры те же, что и на рис. 1).

χ , Γ — известные коэффициенты). Рассчитывалась двухсекционная модель EH — убитрона, в которой секции отличались степенью неоднородности Γ и амплитудой вихревого электрического поля E . Результаты численных расчетов представлены на рис. 1 и 2. Здесь выбирались следующие параметры: средняя амплитуда магнитной компоненты поля $\langle B \rangle = 5$ кГс, электрической в первой секции $\langle E \rangle_1 = 160$ ед. СГС, во второй $\langle E \rangle_2 = 230$ ед. СГС, период ондуляции $\lambda = 2$ см, $\Gamma_1 = 0.01$ см $^{-1}$ в первой секции, $\Gamma_2 = 0.02$ см $^{-1}$ во второй секции, $\chi = 0.04$ см $^{-1}$, длина ускоряющей секции $L = 1$ м, размер пучка в поперечном направлении $D_k = 2$ мм.

На рис. 1 представлены зависимости релятивистского фактора разных частиц $\gamma = \mathcal{H}/mc^2$ (m — масса покоя) от безразмерной продольной координаты $T = z/L$. Как наглядно видно, при выбранных параметрах системы пучок, обладающий на входе средним релятивистским фактором $\gamma \sim 8$ и энергетическим разбросом $\sim 16\%$, в процессе взаимодействия с EH -убитронным полем трансформируется в высокоэнергетический пучок с $\gamma \sim 16$ и разбросом по энергиям $\sim 0.4\%$. На втором графике (рис. 2) проиллюстрирован эффект поперечной компрессии, сопровождающий описанный выше эффект охлаждения. Как видим, достижение

коэффициентов компрессии $D_k/d_k \sim 3$ и более на практике не должно сопровождаться чрезмерными экспериментальными трудностями.

Анализ известной литературы показал, что наиболее подходящей базой для экспериментальной реализации описанных выше EH -убитронных индукционных ускорителей могут служить линейные индукционные ускорители (ЛИУ) типа АТА либо ЕТА [5]. Путем непринципиальной их конструкторской модернизации такие системы могут быть относительно просто преобразованы в EH -убитронные.

Список литературы

- [1] Кулиш В.В., Крутько О.Б. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 9. С. 52-55.
- [2] Артюх И.Г., Камальдинова Г.Ш., Сандалов А.Н. // Обзоры по электронной технике. 1987. Сер. 1. Электроника СВЧ. В. 19 (1314).
- [3] Kochmanski S., Kulish V. // Acta Physica Polonica. 1984. V. A66. N 6. P. 713-740.

Сумский госуниверситет
Украина
Университет Пинциннати
США

Поступило в Редакцию
31 мая 1996 г.

