

# Методы фокусировки ленточного пучка в линейном ондуляторном ускорителе

Э.С. Масунов, А.С. Рошаль, Л.П. Шевченко

*Московский государственный инженерно-физический институт  
(технический университет), Россия*

В докладе рассматривается трехмерная динамика ленточного ионного пучка в ондуляторном ускорителе с электростатическим ондулятором. Изучается вариант ускорителя, в котором ондулятор, состоящий из периодической последовательности поперечных стержней, конструктивно совмещен с высокочастотной резонансной системой. На основе простых модельных представлений находится связь параметра ленточности и степени неоднородности полей для обеспечения фокусировки. Рассматриваемая задача имеет важное практическое значение, так как позволяет оценить предельную интенсивность пучка в ондуляторном ускорителе.

## Введение

Ранее в работе [1] было предложено использовать компактные линейные высокочастотные ускорители в системе нейтральной инжекции (СНИ) для экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, где используются быстрые нейтральные атомы дейтерия с энергией 1,3 МэВ для нагрева и поддержания стационарного тока в плазме токамака. Из всех типов ВЧ-ускорителей на энергии 1-2 МэВ для СНИ подходят сильноточные ускорители с ленточными пучками. Использование в инжекторе ИТЭР ускорителей с ленточными пучками перспективно по следующим причинам:

1. При заданном токе пучка удается снизить погонную плотность тока ионных источников, что облегчает формирование пучка перед инжекцией в ускоритель.
2. Малое влияние пространственного заряда при большом поперечном сечении пучка дает возможность получить ускоренные пучки высокого качества.
3. Ленточные пучки позволяют естественным образом совместить ускоряющий канал с источником отрицательных ионов, имеющим щелевые отверстия.

В хорошо изученных и успешно работающих в настоящее время ВЧ-ускорителях с пространственно-однородной квадрупольной фокусировки (ПОКФ) нельзя ускорять ленточные пучки из-за ограниченности апертуры фокусирующего канала. Поэтому в [1] было предложено использовать ВЧ-ускорители, где ионы ускоряются и фокусируются в комбинационном поле двух и более волн. В простейшем случае это может быть система с так называемой фазопеременной фокусировкой (ФПФ), когда в резонаторной структуре содержатся как синхронные, так и несинхронные с пучком волноводные волны. Компонента  $E_z$  синхронной волны ускоряет пучок в продольном направлении, а несинхронные волны фокусируют пучок в поперечном направлении.

Близким к ускорителю с ФПФ является линейный ондуляторный ускоритель (ЛОУ). В ЛОУ используется комбинация поперечного ВЧ-поля и периодического поля ондулятора (магнитного или электростатического) для ускорения ионного пучка с низкой энергией инжекции [2]. Как и в случае ПОКФ, предельная величина линейной плотности пространственного заряда при ФПФ и в ЛОУ ограничена и, как правило, меньше, чем в ускорителях с ПОКФ. Но в отличие от ПОКФ размеры пучка в одном из поперечных направлений здесь могут быть сделаны большими, что позволяет повысить ток в ускорителе за счет увеличения площади поперечного сечения ленточного пучка.

В данной работе рассматривается трехмерная динамика ленточного ионного пучка в ондуляторном ускорителе с электростатическим ондулятором, где учитываются неоднородности распределения электрических полей в поперечном сечении пучка.

## 1. Выбор полей и анализ поперечной фокусировки пучка

Расчет динамики ленточных ионных пучков в ЛОУ с плоским поперечным электростатическим ондулятором, где электрические поля были функциями только от одной поперечной координаты, был подробно изложен в работе [2]. Обычно при рассмотрении динамики ленточных пучков изучается фокусировка в направлении, перпендикулярном плоскости ленты, и основной задачей является сохранение толщины ленты. Между тем при учете поля пространственного заряда важно обеспечить фокусировку частиц и в другом поперечном направлении: вдоль ширины ленты. Сфокусировать частицы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях возможно, если менять форму каждой пары стержней или выбирать угол между соседними парами знакопеременным.

Выберем декартовую систему координат, где ось  $x$  расположена в плоскости ленты, а ось  $y$  — перпендикулярно ей. Сам пучок движется вдоль продольной оси  $z$ . Рассмотрим простейший случай, когда форма стержней выпукла (поперечное поле нарастает от центра). Потенциал электрического поля, создаваемого периодической последовательностью разноименно заряженных электродов, можно записать в виде ряда Фурье по  $z$

$$U_0 = - \sum_1^{\infty} \Phi_n \cosh(k_x n x) \sinh(k_y n y) \cos(k_z n z), \quad (1)$$

где  $k_{x,y}$  — поперечные волновые числа;  $k_z = \frac{2\pi}{D}$  — продольное волновое число;  $D$  — период ондулятора;  $k_x^2 + k_y^2 = k_z^2$ .

Для создания ВЧ-поля можно использовать те же электроды, что и для электростатического поля, т.е. конструктивно совместить ВЧ-систему и ондулятор. При этом на верхний ряд электродов подается потенциал  $+\Phi_b \cos(\omega t)$ , на нижний  $-\Phi_b \cos(\omega t)$ . В результате ВЧ-потенциал можно представить в виде ряда, аналогичного (1). Только теперь суммирование проводится по четным гармоникам, включая  $n = 0$ .

$$U_b = - \left( \Phi_{b,0} + \sum \Phi_{b,2n}(x, y) \cos(2k_z n z) \right) \sin(\omega t). \quad (2)$$

Вычисляя поля и подставляя их в уравнение движения, после усреднения по быстрым осцилляциям получаем уравнение в гладком приближении

$$\frac{d^2 \hat{R}}{d\tau^2} = -\frac{1}{4} \nabla_{\hat{R}} U_{\omega\phi}, \quad (3)$$

где  $\hat{R} = \frac{2\pi r'}{\lambda}$ ;  $\tau = \omega t$ , а  $U_{\omega\phi}$  — эффективная потенциальная функция, зависящая от амплитуды гармоник ВЧ-поля и поля ондулятора, а также от медленной фазы  $\Psi = 2\pi \int_0^z \frac{dz}{D} - \omega t$  в поле комбинационной волны. В простейшем случае, когда в (1) из

всей суммы по  $n$  учитывается только первая основная гармоника, а в (2) основная нулевая гармоника, выражение для  $U_{эф}$  следует записать так:

$$U_{эф} = a_{ox}^2 \cosh(2k_x x) \sinh^2(k_y y) + a_{oy}^2 \cosh^2(k_x x) \cosh(2k_y y) - 2a_{b,o} a_{o,y} \cosh(k_x x) \cosh(k_y y) \sin \psi. \quad (4)$$

Здесь  $a_{ox} = \frac{eE_{ox}\lambda}{2\pi mc^2}$ ;  $a_{b,o} = \frac{eE_{b,o}\lambda}{2\pi mc^2}$  — безразмерные амплитуды основных гармоник поля ондулятора и ВЧ-поля.

Простейший анализ уравнения (3) для приосевых частиц ( $k_x x \ll 1, k_y y \ll 1$ ) показывает, что одновременную фокусировку по  $x$  и  $y$  можно получить при условии, что  $a_{oy} > a_{bo} \sin \psi$ . Причем частота колебаний по  $y$  ( $\Omega_y$ ) будет всегда больше частоты колебаний по  $x$  ( $\Omega_x$ )

$$\Omega_y^2 = c^2 k_y^2 \left( \frac{a_{ox}^2 + a_{oy}^2}{2} \right) + \frac{k_y^2}{k_x^2} \Omega_x^2 > 0. \quad (5)$$

Чтобы учесть кулоновскую дефокусировку частиц, надо в правую часть уравнений (3) добавить поле пространственного заряда пучка, и решение уравнений искать самосогласованным образом.

## 2. Расчет полей пространственного заряда и динамики пучка

При вычислении поля пространственного заряда для простоты будем считать сечение ускоряюще-фокусирующего канала прямоугольным с проводящими стенками шириной  $2b$  и толщиной  $2a$  (рис.1). Как будет показано ниже, введение торцевых стенок при больших значениях отношения  $\frac{b}{a}$  и при ширине ленты меньше  $b$  оказывает малое влияние на конечный результат расчета.

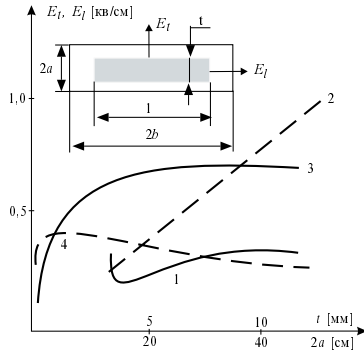


Рис. 1:

в пучке эллиптического сечения. В то же время абсолютные значения  $E_l, E_t$  с ростом  $\frac{l}{t}$  при постоянной плотности тока  $j$  сильно убывают, например для пучка однозарядных ионов дейтерия прямоугольного поперечного сечения с энергией 50 КэВ, током 0.2 А и площадью  $5.75 \text{ см}^2$  (при  $j = 0.0348 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ ) от  $1.18 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$  и  $1.18 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$  при  $\frac{l}{t} = 1$  до  $0.67 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$  и  $0.41 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$  при  $\frac{l}{t} = 25$  соответственно. Следовательно, при том же токе можно значительно ослабить поле собственного объемного заряда, используя пучки с большим отношением  $\frac{l}{t}$ .

Экранирующее действие электродов щели еще более усиливает этот эффект. На рисунке изображено изменение  $E_l$  (сплошные кривые) и  $E_t$  (штриховые) с изменением толщины пучка  $t$  при постоянной плотности тока ( $j = 0.0348 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ ) и неизменных размерах щели  $a = 0.6$  см,  $b = 8.5$  см (кривые 1, 2), а также с изменением толщины щели  $2a$  при неизменных  $j = 0.0348 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ ,  $t = 0.5$  см,  $l = 11.5$  см,  $b = 8.5$  см (кривые 3, 4). Заметим, что началу и концу кривых 1, 2 отвечают соответственно значения  $\frac{l}{t} = 23$  и 9.6.

С убыванием  $\frac{l}{t}$  напряженность  $E_l$  (кривая 1) также убывает (как в свободном пространстве), достигает минимума, а затем начинает медленно нарастать из-за постепенного снижения экранирующего действия щели. Компонента  $E_t$  при отношениях  $\frac{l}{t} \geq 10$  линейно возрастает с увеличением  $t$  как в свободном пространстве (кривая 2). Наибольший интерес представляет кривая 3, показывающая, что сужение щели при постоянных размерах пучка приводит к сильной экранировке и уменьшению компоненты  $E_l$  почти на порядок. Компонента  $E_t$  при сужении щели сначала несколько возрастает, а при дальнейшем уменьшении  $2a$  от значения  $4t$  до  $t$  также быстро падает из-за экранировки (кривая 4).

Приведенные оценки подтверждаются результатами моделирования самосогласованной динамики ионов дейтерия в ускорителях с различными геометрическими параметрами ускоряющей системы и входными параметрами пучка. Рассмотрим, например, ускоритель однозарядных ионов дейтерия, имеющий следующие параметры: длина ускоряющей системы 2.5 м, длина волны ускоряющего поля 1.5 м, амплитуда напряженности ВЧ-поля  $150 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ , амплитуды напряженности поля ондулятора на входе в систему  $E_x = 6.5 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ ,  $E_y = 150 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ , волновые числа  $k_x = 14.2 \frac{1}{\text{м}}$ ,  $k_y = 332 \frac{1}{\text{м}}$ , щель с размерами  $a = 3.5$  мм и  $b = 8.5$  см, начальная энергия ионов 150 кэВ, размеры пучка на входе  $t = 0.5$  см и  $l = 5.75$  см, дисперсия углового разброса скоростей ионов 0.001. В такой системе пучок с током 0.6 А ускоряется без потери частиц, достигая энергии 1.065 МэВ. Однако если в этом же ускорителе пренебречь экранировкой поля объемного заряда в щели, то уже при входном токе 0.2 А около 0.06 тока теряется на стенках щели, а при токе 0.6 А потери достигают уже 0.36 А, причем потери происходят исключительно на торцевых стенках.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №95-02-05886-а.

## Литература

[1] Э.С.Масунов, В.Д.Данилов, А.А.Панасенков. Концепция многоцелевого ВЧ-ускорителя отрицательных ионов дейтерия для инжектора ИТЭР. Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. – Протвино, 1994, с. 53.

[2] Э.С.Масунов, А.П.Новиков. Динамика ионных пучков в линеондугтроне с плоским электростатическим ондулятором. — Препринт МИФИ 055-90, Москва, 1990.