

Выбор параметров линейного ондуляторного ускорителя ионов на малые энергии

Э.С. Масунов, Р.А. Нечаев, С.М. Полозов

Московский государственный инженерно-физический институт, Москва, Россия

Рассматривается возможность повышения эффективности группировки и ускорения ленточных ионных пучков в линейном ондуляторном ускорителе. Рассмотрены два типа ускорителя: с использованием электростатического ондулятора и без него. Приведены результаты численного моделирования динамики для двух вариантов ускоряюще-фокусирующей структуры. Дано сравнение эффективности фокусировки и ускорения ленточных ионных пучков для этих вариантов ускорителя. Обсуждаются вопросы конструкции ускорителя на энергию около 1 МэВ.

Введение

В настоящее время одной из важнейших задач ускорительной техники является повышение интенсивности ионных пучков. Сильноточные ионные пучки необходимы как для научных, так и для прикладных целей. Из всех типов ускорителей легких ионов с большой интенсивностью наибольший ток (100–150 мА) получен в системах с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ). Дальнейшее повышение тока в структурах типа ПОКФ, где поперечные размеры пучка ограничены, становится невозможным из-за наличия предельной величины погонной плотности пространственного заряда. Поэтому необходима разработка новых методов получения сильноточных ионных пучков. Для этих целей в работе [1] был предложен новый тип ВЧ-ускорителя (UNDULAC), в котором ионный пучок с током выше 1 А может быть ускорен до энергии в несколько мегаэлектронвольт. В нем ускорение реализуется в комбинационном поле волны, возникающей при сложении нескольких несинхронных гармоник.

В работе [2] предложен вариант ускорителя (UNDULAC-E), в котором ускорение возможно при сложении нулевой гармоники поперечного ВЧ-поля и первой гармоники поля плоского электростатического ондулятора. Проведенные исследования показали, что в таком ускорителе могут быть получены ленточные ионные пучки с током около 1 А при большом коэффициенте токопрохождения и достаточно высоком темпе ускорения. Однако практическая реализация такого ускорителя сопряжена со значительными трудностями, обусловленными необходимостью создания больших напряженностей электростатического поля. Поэтому в работе [2] было предложено использовать вместо поля электростатического ондулятора еще одну (вторую) несинхронную гармонику ВЧ-поля, что позволяет значительно упростить конструкцию ускорителя (UNDULAC-RF). Ниже будут рассмотрены результаты расчета динамики для обоих типов ускорителей.

1. Ускоритель с электростатическим ондулятором

Рассмотрим вначале линейный ондуляторный ускоритель с электростатическим ондулятором. Исследование динамики ленточных ионных пучков в UNDULAC-E подробно рассматривается в работах [3, 4]. В ондуляторном ускорителе, как в любой периодической структуре, электростатическое и ВЧ-поля для любого вида колебаний μ могут быть представлены как сумма ряда по пространственным гармоникам. Причем амплитуды гармоник будут быстро

убывать с ростом номера. Поэтому при рассмотрении динамики ионов достаточно ограничиться основными гармониками. Было показано, что в UNDULAC-E уравнение для прироста скорости частиц может быть записано в виде

$$\frac{d\beta}{dz} = \frac{1}{4\pi} \frac{\lambda}{\beta^2} \frac{e^2 E_0^v E_0^o}{W_0^2} \cos \varphi, \quad (1)$$

где E_0^o — амплитуда основной гармоники электростатического поля ($\mu = \pi$); E_0^v — амплитуда основной гармоники ВЧ-поля ($\mu = 0$); λ — длина волны ВЧ-поля; W_0 — энергия покоя иона. Были найдены условия поперечной фокусировки пучка. Показано, что для фокусировки приосевых частиц пучка в направлении, перпендикулярном плоскости ленты, достаточно, чтобы $E_0^o \geq E_0^v/2$. Однако для фокусировки пучка в другом поперечном направлении (в плоскости ленты) этого не достаточно: необходимо, чтобы $E_0^o \geq E_0^v$.

Проведенное исследование трехмерной динамики ленточного ионного пучка в щелевом канале UNDULAC-E с учетом поля пространственного заряда показало, что ускоритель должен состоять из двух частей. На начальном участке, где происходит группировка пучка, амплитуды полей должны нарастать, а значение синхронной фазы уменьшаться. На втором (ускоряющем) участке происходит основной набор энергии, при этом амплитуды полей и синхронная фаза постоянны. Найдено [3, 4], что в UNDULAC-E можно ускорить до энергии 1–1.1 МэВ пучки отрицательных ионов дейтерия с током до 1.4 А (при оптимальных параметрах ускорителя). Амплитуды напряженностей электростатического и ВЧ полей были выбраны одинаковыми: $E_0^o = E_0^v = 150$ кВ/см. Показано, что наибольшее влияние на токопрохождение оказывают параметры группирователя.

Значения коэффициента токопрохождения K и средней энергии сгустка на выходе из ускорителя при различных длинах участков изменения синхронной фазы L_{group} и амплитуд полей L_{field} даны в табл. 1. Видно, что оптимальным является равенство этих длин, причем с увеличением длины группирователя коэффициент токопрохождения растет, а средняя выходная энергия падает. Исходя из этого, длина группирователя была выбрана равной 0.75 м (полная длина ускорителя 2.5 м).

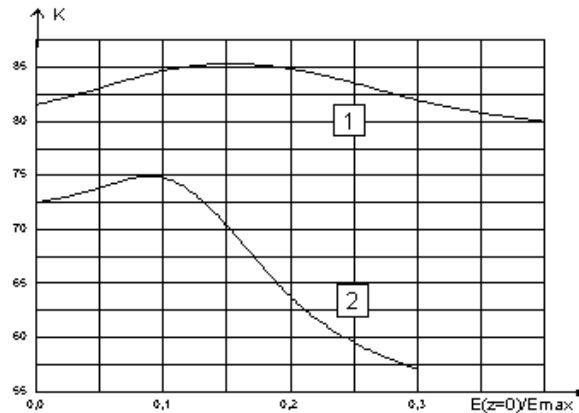


Рис. 1: . Зависимость коэффициента токопрохождения от отношения амплитуд полей на входе в группирователь к максимальным значениям амплитуд полей: 1 – UNDULAC-CE; 2 – UNDULAC-RF.

Исследовалось влияние отношения величин напряженностей полей на входе в группирователь к их максимальным значениям: при малых начальных полях токопрохождение меняется слабо, а при больших резко падает (см. рис. 1, кривая 1). Также было исследовано влияние высших гармоник ВЧ и электростатического полей на динамику пучка. Показано, что существенное влияние оказывает только первая гармоника ВЧ-поля (для структуры с $\mu = \pi$). При

небольших значениях она улучшает фокусировку и увеличивает коэффициент токопрохождения пучка, который достигает максимума ($K=0.9$) при относительной величине амплитуды второй гармоники, равной 0.15 [3].

2. Ускоритель без электростатического ондулятора

Как уже говорилось в [2], для упрощения конструкции ускорителя было предложено использовать в периодическом резонаторе вместо электростатического поля еще одну несинхронную гармонику ВЧ-поля (UNDULAC-RF). В структуре с видом колебаний $\mu = \pi$ фокусировка пучка имеет место при любом соотношении между амплитудами нулевой и первой пространственных гармоник ВЧ-поля. Но для поддержания высокого темпа ускорения амплитуды должны быть сравнимы между собой. Для UNDULAC-RF уравнение для прироста энергии запишется в виде

$$\frac{d\beta}{dz} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{\beta^2} \frac{e^2 E_0^v E_1^v}{W_0^2} \sin 2\varphi, \quad (2)$$

где E_1^v — амплитуда первой гармоники ВЧ-поля. Предварительные результаты численного моделирования динамики показали, что коэффициент токопрохождения в UNDULAC-RF (при равных значениях ускоряющего градиента) достигает 0.75, что несколько ниже, чем в UNDULAC-E. При этом пучок имеет на выходе среднюю энергию 1.2-1.3 МэВ. Была исследована также зависимость коэффициента токопрохождения и средней энергии пучка на выходе из ускорителя от параметров группирователя (см. табл. 2). Найдено, что токопрохождение растет с увеличением L_{field} , при этом выходная энергия пучка спадает, но в отличие от UNDULAC-E, а выбор L_{group} оказывает меньшее влияние на токопрохождение.

Исследовалась и зависимость коэффициента токопрохождения от отношения амплитуды ускоряющего поля на входе в группирователь к ее максимальной величине. Из рис. 1 (кривая 2) видно, что при малых отношениях коэффициент токопрохождения незначительно возрастает, достигает максимума при величине отношения около 0.1, а затем начинает резко спадать. Моделирование показало, что коэффициент токопрохождения и средняя выходная энергия слабо зависят от соотношения амплитуд нулевой и первой гармоник ВЧ-поля (при одинаковой величине ускоряющего градиента), что позволяет использовать малые значения амплитуды первой гармоники, которые сравнительно легко получить на практике, для эффективного ускорения ионов в ондуляторном ускорителе.

Таблица 1–2.

Зависимости коэффициента токопрохождения K и средней энергии ионов на выходе из ускорителя W от длины группирователя и длины участка нарастания поля

$L_{group}, \text{ см}$	$L_{field}, \text{ см}$					$L_{group}, \text{ см}$	$L_{field}, \text{ см}$				
		40	50	75	100			50	70	100	110
40	$K, \%$	73.8	75.5	76.7	77.6	50	$K, \%$	50.3	63.5	68.7	69.5
	$W, \text{ кэВ}$	1070	1058	1030	991		$W, \text{ кэВ}$	1411	1380	1330	1304
50	$K, \%$	75.7	78.0	78.1	80.0	70	$K, \%$	54.8	63.5	74.5	73.8
	$W, \text{ кэВ}$	1056	1050	1020	985		$W, \text{ кэВ}$	1384	1362	1315	1297
75	$K, \%$	73.8	78.9	81.4	84.0	100	$K, \%$	44.5	64.7	75.7	73.3
	$W, \text{ кэВ}$	1027	1018	1005	971		$W, \text{ кэВ}$	1327	1310	1275	1246
100	$K, \%$	71.5	76.3	80.3	89.9	110	$K, \%$	39.7	67.2	70.0	73.3
	$W, \text{ кэВ}$	991	988	973	949		$W, \text{ кэВ}$	1308	1293	1266	1246

3. Сравнение двух предложенных типов ускорителей

Приведенные выше результаты показывают, что два предложенных типа ускорителей имеют сходные параметры. Так, коэффициент токопрохождения UNDULAC-E достигает 0.8 (без учета влияния высших гармоник), а в UNDULAC-RF — 0.75. Выходная энергия при этом

(при длине ускорителя 2.5 м и длине группирователя 0.75 м) соответственно равна 1.0–1.1 и 1.2–1.3 МэВ.

Важной особенностью UNDULAC-RF является то, что группировка и ускорение пучка происходит на удвоенной рабочей частоте. Это позволяет использовать его в качестве инжектора в ускоритель на большую энергию с удвоенной частотой ускоряющего ВЧ-поля. Тем самым удастся отказаться от использования системы сложения пучков при переходе на кратную частоту ускорения. Несколько меньший коэффициент токопрохождения в UNDULAC-RF может быть увеличен, по-видимому, за счет положительного влияния высших гармоник ВЧ-поля (аналогичного тому, которое оказывает вторая несинхронная гармоника ВЧ-поля в UNDULAC-E). Предполагается также, что токопрохождение в ускорителях обоих типов можно будет еще увеличить за счет оптимального выбора функций нарастания амплитуд полей и спада синхронной фазы в группирователе, что и планируется сделать в дальнейшем.

4. Некоторые особенности конструкции UNDULAC

Выше неоднократно отмечалась сложность создания ускорителя с электростатическим ондулятором. Для работы ускорителя необходимо, чтобы на электроды ондулятора был подан высокий электростатический потенциал. Положительным моментом является то, что для создания ВЧ и электростатического полей могут быть использованы одни и те же электроды. В работе [5] рассматривается один из возможных вариантов такой системы. Электростатический потенциал подается на электроды от двух пространственно разделенных общих шин, которые выводятся из резонатора через торцевые стенки. Это обеспечивает необходимую изоляцию электродов по постоянному току, но вносит дополнительные элементы в ВЧ-систему. Это приводит к появлению дополнительных потерь ВЧ-мощности, усложняет требования к электрической прочности структуры, кроме того, усложняется расчет ВЧ-системы и ее настройка. Поэтому отказ от использования электростатического поля существенно упростит создание подобного ускорителя.

Для успешной работы UNDULAC-E необходима величина амплитуды второй несинхронной гармоники ВЧ-поля, составляющая 15 процентов от величины основной гармоники, а для UNDULAC-RF эта величина должна составлять 30-40 процентов. В работе [6] с помощью простой модели показано, что такие соотношения гармоник могут быть получены в ондуляторе с электродами прямоугольного сечения без всяких технических ухищрений (другая модель показывает, что это возможно и при использовании ондулятора с цилиндрическими электродами).

Список литературы

- [1] Э.С. Масунов. Динамика частиц в линейном ондуляторном ускорителе. ЖТФ, 1990, т. 60, N 8, с. 152-157.
- [2] E.S. Masunov. Using of undulator in low energy linac. Program and Abstracts of ICAP'2000. Darmstadt, 2000, p. 136.
- [3] Э.С. Масунов, С.М. Полозов, А.С. Рoshаль. Нахождение предельного тока для ленточного пучка в линейном ондуляторном ускорителе ионов. Вопросы Атомной Науки и Техники, серия Ядерно-физические исследования, выпуск 4,5 (31,32), Харьков, с. 105- 107, 1997.
- [4] E.S. Masunov, S.M. Polozov, A.S. Roshal. 3D modeling of ion ribbon beam focusing and acceleration in undulator linac. In Proc. PAC'1999, New York, 1999, p. 2858-2860.
- [5] E.S. Masunov, S.M. Polozov, A.S. Roshal. Undulator linear accelerator as a generator of ribbon high power ion beam. Radiation Physics and Chemistry, v.6, 2000. Elsevier Science. 2000.
- [6] Е.С. Масунов, С.М. Полозов. Анализ гармонического состава полей в ондуляторном ускорителе. В сб.: Научная сессия МИФИ - 2000, Москва, изд-во МИФИ, 2000, т. 7, с. 142-143.