

# Возможность ускорения ионов на высших модах встречно-штыревой ускоряющей структуры

В.А.Бомко, А.Ф.Кобец, Ю.П.Мазалов, Б.И.Рудяк  
ННЦ Харьковский физико-технический институт, Украина

## Введение

Встречно-штыревая ускоряющая структура (ВШУС), разработанная в ННЦ ХФТИ для целей ускорения тяжелых ионов [1,2,3], положена в основу заново созданного линейного ускорителя многозарядных ионов (ЛУМЗИ) и показала свою высокую эффективность [4,5,6,7]. Среди преимуществ этой ускоряющей структуры перед структурой Альвареца наиболее важными являются ее малогабаритность (возможность увеличения рабочей длины волны в 3-4 раза), высокое значение шунтового сопротивления (в 2-4 раза), более высокий темп ускорения (в 2 раза).

Встречно-штыревая структура, внесенная в цилиндрический резонатор, коренным образом преобразует распределение электрических и магнитных полей исходной волны  $H_{111}$ , создавая продольную составляющую электрического поля в зазорах между трубками дрейфа. Разработанные специальные настроечные устройства резонансного и нерезонансного типа позволяют получить равномерное по всей длине резонатора ускоряющее поле, преобразуя моду  $H_{111}$  в  $H_{110}$ . Методика и системы настройки в ВШУС и преобразования синусоидального характера распределения электрического поля вдоль зазоров между трубками дрейфа меняющейся длины показали высокую эффективность в новом ЛУМЗИ [3,4,5,8].

Наряду с волной  $H_{111}$  в ненагруженном резонаторе существует множество мод типа  $H_{mn1}$ , где индексы означают число вариаций полей по азимуту, радиусу и длине резонатора соответственно. Несколько мод обоих типов нашли свое применение в ускорительной технике. На их базе решены коренные проблемы физики ускорителей. Кроме волн  $E_{010}$  и  $H_{111}$ , на базе которых созданы ускоряющие структуры Альвареца и ВШУС, волны  $H_{011}$  и  $H_{211}$  положены в основу структур с ПОКФ [9,10], волна  $E_{020}$  — в основу структуры с дисками и шайбами [11]. Трансформация волны  $E_{011}$  в  $E_{010}$  позволила решить проблему плавного регулирования энергии ускоренных ионов в структуре Альвареца [12]. Результаты выполненных нами дальнейших разработок показали, что и в структуре ВШУС, возбужденной на волне  $H_{110}$ , возможно осуществление режима плавного регулирования энергии ускоренных частиц в диапазоне  $(0,3-1) W_0$  [6,13].

В настоящем докладе рассматривается новый метод изменения энергии ускоренных ионов уже в сторону увеличения по отношению к номинальной.

## 1. Принципы метода

В цилиндрическом резонаторе среди множества волн  $H_{mn1}$  наиболее низкая частота соответствует моде  $H_{111}$ . Остальные моды с большими значениями индексов значительно отличаются по частоте. Так, мода  $H_{121}$  например, соответствует резонансной частоте в 2,89 раза большей, чем резонанс моды  $H_{111}$ .

Мы обратили внимание на эту моду, так как в распределении ее электрического поля при осевой области просматривается некоторая аналогия с полем волны  $H_{111}$ . На рис.1 приведено схематически распределение поля на волне  $H_{111}$  и соответствующее распределение для волны  $H_{121}$  (рис.2). При внесении в резонатор такой сильной емкостной и индуктивной

нагрузки, какой является ВШУС, положение корней может измениться и частоты этих мод в зависимости от характера нагрузки могут значительно сближаться сколь угодно близко.

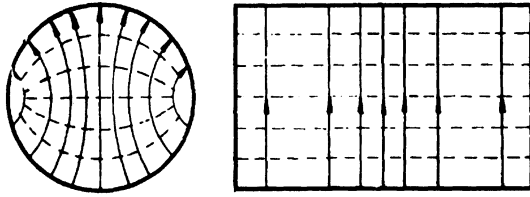


Рис. 1: Схематическое изображение распределения полей в резонаторе на  $H_{111}$  волне.

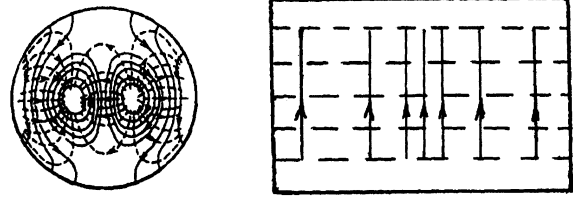
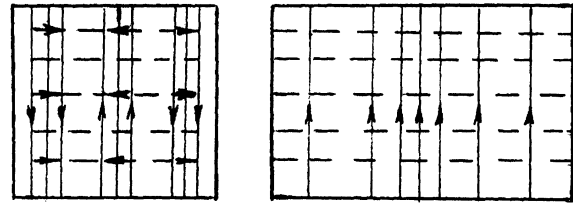


Рис. 3: Схематическое изображение распределения полей в резонаторе на  $H_{121}$  волне.

Рис. 2: Схематическое изображение распределения полей в резонаторе на  $H_{301}$  волне.



Ускоряющая структура линейного ускорителя ионов состоит из последовательности ячеек, длина которых для  $\pi$ -волны определяется по формуле  $L_n = \beta_n \lambda / 2$ , где  $\beta_n$  — относительная скорость синхронной частицы;  $\lambda$  — рабочая длина волны. Приращение длины ячейки за один период ВЧ-колебаний приближенно оценивается по формуле

$$\Delta L_n = qeE_n G_n \cos \varphi_s \lambda / (A m c^2),$$

где  $E_n$  — усредненное по длине ячейки электрическое поле;  $G_n$  — фактор времени пролета;  $\varphi_s$  — синхронная фаза;  $e, m$  — заряд и масса протона;  $q$  и  $A$  — зарядовое и массовое число ядра иона.

Если возбудить ускоряющую структуру на частоте большей, чем номинальная, то для выполнения постоянства  $L_m$  должна быть увеличена скорость частиц. Это может быть достигнуто соответствующим подбором величины  $E_n$  в допустимых пределах или уменьшением отношения  $q$  к  $A$ . Таким путем можно достичь определенного увеличения конечной энергии частиц на выходе ускорителя по сравнению с номинальной.

## 2. Экспериментальные результаты

Мы провели исследование этой проблемы на имеющейся в нашем распоряжении большой экспериментальной базе ускорителя ЛУМЗИ. Основная секция представляет собой резонатор длиной 11,4 м и диаметром 1,5 м, нагруженный 40 трубками дрейфа, соединенными с резонатором по встречно-штыревому принципу (рис.4).

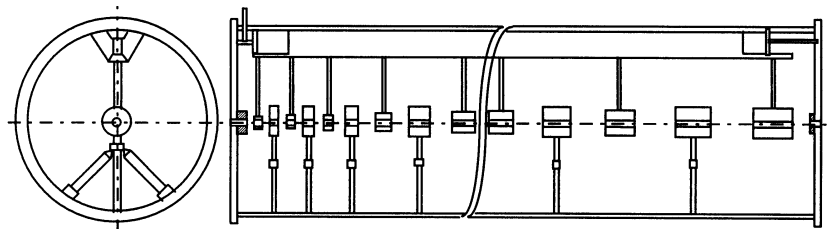


Рис. 4: Схематический вид ускоряющей структуры встречно-штыревого типа основной секции ЛУМЗИ.

Рабочая частота составляет 47,2 МГц. Предобдирочная секция имеет иные геометрические характеристики. Прямоугольный резонатор длиной 4 м и поперечными размерами 116 × 90 см нагружен 46 трубками дрейфа также по встречно-штыревому принципу. Имеются модели обеих секций, построенные еще до сооружения реальных структур, на которых отрабатывались проблемы конструкций, методики настройки и формирования распределения ускоряющего поля и измерялись ВЧ-характеристики. Вид этих моделей изображен на рис.5 и 6.

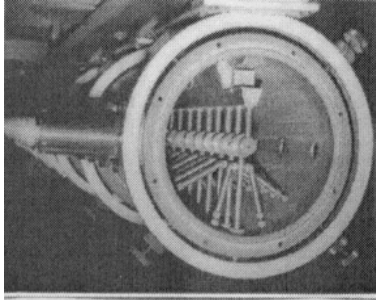


Рис. 5: Модель основной секции ЛУМЗИ.

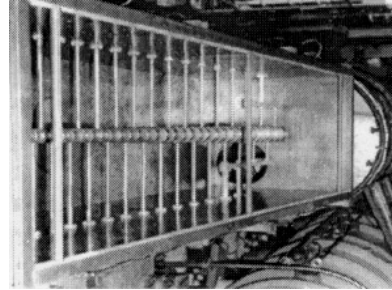


Рис. 6: Модель предобдирочной секции ЛУМЗИ.

Модель основной секции сооружена в масштабе 1:6, частота, соответствующая рабочей моде  $H_{110}$ , составила 282,3 МГц. Эта величина в 2,46 раза меньше, чем в ненагруженном резонаторе. На этом резонаторе мы осуществили поиск и идентификацию более высоких мод. При этом четко определялась дисперсионная зависимость волн  $H_{11l}$ . Поиск мод со структурой поля, аналогичной  $H_{120}$ , в сравнительно далеком диапазоне не дал результатов. Находка оказалась неожиданной: частота этой волны составила всего лишь 310 МГц, т.е. отличается от частоты рабочей волны всего лишь в 1,08 раза. Характер распределения поля вдоль оси структуры, возбужденной на волне  $H_{120}$  и  $H_{110}$ , примерно одинаков.

Такое малое удаление между частотами  $H_{120}$  и  $H_{110}$  свидетельствует о том, что в резонаторе, нагруженном структурой ВШУС, для волны  $H_{120}$  доминирующую роль играет средняя вариация распределения электрического поля рис.2, а боковые вариации незначительно влияют на ВЧ-характеристики структуры.

Несколько другой характер волн более высокого порядка имеет место в структуре предобдирочной секции. Прямоугольный резонатор и иная конструкция элементов настройки привели к другим результатам. В резонаторе с прямоугольным сечением применяется своя методика нумерации волн. Мода, являющаяся аналогом рабочей, обозначается индексами  $H_{101}$ , а интересующая нас более высокая мода представляется символом  $H_{301}$ . Распределение полей моды  $H_{301}$  изображено схематически на рис.3.

На модели предобдирочной секции в масштабе 1:3 мы провели исследования, аналогичные описанным выше. Результаты показали, что частота искомой  $H_{300}$  волны в нагруженном резонаторе в 1,6 раза превышает частоту рабочей волны  $H_{100}$ , распределение поля в зазорах между трубками дрейфа также отличается от равномерного. Это, очевидно, произошло за счет смещения от резонанса концевых резонансных элементов настройки.

В конечном счете, настройкой с помощью этих элементов было сформировано и на волне  $H_{300}$  требуемое равномерное распределение ускоряющего поля.

## Выводы

Экспериментальные исследования показали, что в режиме работы на высших модах возможно достичь более высоких энергий ускоренных ионов по сравнению с номинальной.

Практически для случая основной секции ЛУМЗИ энергия ускоренных частиц может быть без всякой перестройки увеличена с 8,5 до 10 МэВ/н при небольшом (16%) практически допустимом увеличении напряженности ускоряющего поля.

Для предобдирочной секции возможно увеличение энергии частиц с 1 до 2,56 МэВ/н, поэтому оно достижимо только для более легких ионов. Вместо ионов с отношением массового числа к зарядовому  $A/q \leq 15$  при тех же полях возможно ускорять ионы с  $A/q \leq 6$ .

### Список литературы

- [1] Бомко В.А., Ревуцкий Е.И. Исследование ускоряющей системы на  $H_{111}$ -волне. // ЖТФ, 1964, т.34, в.7. С.1259-1265.
- [2] Бомко В.А. и др. Разработка и изучение электромагнитных характеристик модификаций ускоряющей структуры линейного ускорителя тяжелых ионов. Препринт ХФТИ АН УССР, 82-10, Харьков, 1982. 47 с.
- [3] Бомко В.А., Дьяченко А.Ф., Кобец А.Ф., Рудяк Б.И. Исследование структур для ускорения тяжелых ионов. М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. 26 с.
- [4] Бомко В.А., Дьяченко А.Ф., Пипа А.В. и др. Основная секция ЛУМЗИ на волне типа  $H_{111}$ . // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер.: Техника физ. эксперимента, 1979, в.1 (3), с.55-57.
- [5] Бомко В.А., Рудяк Б.И., Кобец А.Ф. и др. Предобдирочная секция ЛУМЗИ с  $A/q = 15$ . ВАНТ. Сер.: Ядерно-физ. Исследования, 1989, в.6 (6), с.23.
- [6] Bomko V.A., Dyachenko A.F., Kobets A.F. et al. // Nuck. Instr. and Methods in Phys. Res. Section A 406 (1998), 1-5.
- [7] Бомко В.А., Рудяк Б.И., Скоромный Г.М., Хижняк Н.А. Завершающие работы на ускорителе многозарядных ионов. Труды 9 Всес. совещ. по ускорителям зар. частиц. — М.: Наука, 1985, т.1. С.68-71.
- [8] Бомко В.А., Дьяченко А.Ф., Пипа А.В. Резонансные системы настройки ускоряющей структуры типа Н. ВАНТ. Сер: Техника физ. эксперимента, 1981, в.3 (9), С.28-31.
- [9] Тепляков В.А., Степанов В.Б. Исследование  $H$ -резонатора. // Радиотехника и электроника, 1968, т.13, № 11, с.1965-1975.
- [10] Капчинский И.М. Сильноточные линейные ускорители ионов. // УФН, 1980, т.132, вып.4, с.639-661.
- [11] Андреев В.Г. // ЖТФ, 1971, т.11, вып.4, с.788.
- [12] Бомко В.А., Ключарев А.П., Рудяк Б.И. Линейный ускоритель протонов с плавной регулировкой энергии ускоренных частиц. // Атомная энергия, 1971, 31(2), с.123.
- [13] Бомко В.А., Дьяченко А.Ф., Кобец А.Ф., Мазалов Ю.П., Рудяк Б.И. Пассивные резонансные элементы в системе плавного регулирования энергии в линейных ускорителях ионов. Тр. 15-го совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1996, т.2. С.54-57.