

Разработка ускоряющих секций для линейных ускорителей электронов

Н.И.Айзацкий, Е.З.Биллер, А.Н.Довбня, В.В.Митротченко, В.И.Кушнир

НИК "Ускоритель" ННЦ ХФТИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускоряющие секции, в которых непосредственно происходит передача энергии внешнего электромагнитного поля заряженным частицам, являются основным элементом любого ускорителя. ХФТИ является одним из центров, которые начинали и активно проводят до настоящего времени разработку линейных резонансных ускорителей как электронов, так и тяжелых частиц. В течение нескольких десятилетий в институте проводятся НИР и ОКР по исследованию и созданию новых замедляющих структур. В ускорителях электронов, разработанных в ХФТИ в 50-е годы (ЛУЭ-0.7¹, ЛУЭ-3.5, ЛУЭ-90), были использованы разработанные и изготовленные в институте ускоряющие секции на базе круглых диафрагмированных волноводов. После запуска в эксплуатацию ускорителей ЛУЭ-300 и ЛУЭ-2000, в которых были использованы изготовленные в НИИЭФА однородные ускоряющие секции ("Харьков-65") (параметры см. в табл.1, I), в ХФТИ продолжались работы по совершенствованию характеристик ускоряющих структур. В качестве основных направлений исследований в этот период необходимо отметить повышение пороговых и критического токов поперечной неустойчивости в ускоряющих секциях за счет снижения добротности аксиально-несимметричных колебаний при нанесении разрезов на диафрагмы (см., например, [1]) и разработку инжекторных кусочно-однородных секций [2]. В начале 70-х годов для вакуумной пайки элементов секций на основе мощного высокочастотного источника (P=100 кВт, f=80-100 кГц) была создана установка ВПУС-2. В середине 80-х годов в связи с планировавшимися созданием кольца НР-2000 и реконструкцией ускорителя ЛУЭ-2000 в ХФТИ был создан участок точной механики, оснащенный станками повышенной и особо высокой точности типа 1И611П, 16Б16КА, позволявшими проводить предварительную обработку внутренних поверхностей с точностью до 0.01 мм и окончательную для базовых с точностью до 0.005 мм, и станками сверхвысокой точности типа МК6501 и МК6562 для окончательной

обработки внутренних поверхностей, проводимой последовательно с измерениями электродинамических характеристик элементов секций.

2. РАЗРАБОТКА НЕОДНОРОДНЫХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР

В ходе реконструкции ускорителя ЛУЭ-2000 планировалось повышение энергии ускоренных электронов [3]. Для достижения этого без увеличения длины ускорителя и числа используемых клистронов была разработана кусочно-однородная секция "Харьков-85" (табл., II) [3]. Для отработки технологии, методов настройки и испытания было изготовлено и установлено на ускорителе ЛУЭ-2000 7 секций этого типа.

Для ускорителя ЛУЭ-60 [4], предназначенного служить инжектором компактного технологического источника СИ СКН-600, была разработана кусочно-однородная ускоряющая секция с повышенным темпом ускорения (табл.1, - III).

Во всех описанных выше ускоряющих секциях рабочий тип колебания был равен $\theta = \pi/2$.

Кусочно-однородные ускоряющие волноводы являются разновидностью неоднородных структур. При сохранении основных преимуществ, присущих неоднородным волноводам с плавным изменением параметров, они более просты в изготовлении и настройке. Кусочно-однородные диафрагмированные волноводы представляют собой структуры, состоящие из ряда однородных участков, соединенных между собой переходными ячейками. Электродинамические характеристики однородных участков выбираются в соответствии с требованиями, предъявляемыми к ускоряющей секции (квазиоднородность стороннего или действующего поля, повышенное значение критического тока поперечной неустойчивости и т.д.). Основной трудностью при разработке кусочно-однородных диафрагмированных волноводов является выбор параметров переходных ячеек. Эти ячейки должны не только обеспечивать согласование однородных участков, но и реализовывать во всей структуре, включая и их самих, режим бегущей волны, синхронной с ускоряемыми частицами.

¹ Везде ниже после аббревиатуры ЛУЭ (линейный ускоритель электронов) цифра указывает проектную энергию (в единицах МэВ) электронов на выходе

При использовании симметричных переходных ячеек (имеющих по обе стороны от диска полукольца равного диаметра) их длина должна быть равна четверти длины волны независимо от типов колебаний однородных участков [5]. При этом переходные участки должны настраиваться путем изменения как диаметров резонаторов, так и диаметров пролетных отверстий в дисках. Расчеты геометрических параметров по методике, изложенной в [5], не обеспечивали необходимой для производства секций точности, а процедура экспериментального выбора диаметра пролетных отверстий является очень трудоемкой. Кроме того, поскольку конструктивной основой диафрагмированного волновода в новой технологической цепочке ХФТИ была выбрана несимметричная ячейка (кольцо и диск), то введение симметричных ячеек в структуру существенно усложнило бы процесс изготовления секций.

ячеек при фазовом набеге $\theta = 2\pi/3$ ($D = \lambda/3$) без подстройки диаметров пролетных отверстий.

Для проведения расчетов были разработаны новые математические модели связанных цилиндрических резонаторов и диафрагмированного волновода [7-9] и на их основе был развит метод эквивалентных схем. Было показано, что согласование однородных участков диафрагмированных волноводов с разными значениями коэффициента нагружения a/λ при соответствующем фазовом распределении, обеспечивающем постоянный синхронизм с релятивистскими частицами, может быть выполнено несимметричными ячейками. При этом, как и в случае использования симметричных ячеек, строгое согласование возможно лишь при определенном законе изменения радиусов пролетных участков. Однако согласование с фазовой неоднородностью, лежащей в пределах точности изготовления, а также обеспечение соответствующей полосы

Таблица

Характеристики ускоряющих структур, разработанных в НИЦ ХФТИ (I- "Харьков-65"- секции изготовлены в НИИЭФА, II- "Харьков-85", III- ЛУЭ-60, IV- КУТ-1, V- КУТ-4)

Секция	I	II	III	IV	V
Частота, МГц	2797.2	2797.2	2797.2	2797.2	2797.2
Длина секции, м	4.44	4.4	3.3	1.25	1.25
Время заполнения, мксек	0.42	1.15	1.6	0.38	0.38
Затухание, Н/сек.	0.33	0.9	1.22	0.24	0.24
Мощность на входе, МВт	18	18	23	13	13
Приращение энергии при нулевом токе $I=0$, МэВ	40	57	60	18.8	18.8
Выходная мощность при $I=0$, МВт	9.3	3	2	8	8
Среднее приращение энергии при $I=0$, МэВ/м	9.1	13	18	15	15
Токовая подгрузка, МэВ/А	28	74	72	7.8	7.8
Число однородных участков	1	4	3	4	-
Диаметр пролетных отверстий, мм					
Участок №1	30	25.441	21.821	25.441	25.441-
№2		23,630	19.620	23,630	19.62
№3		21.821	16.59	21.821	
№4		19.620	19.620	19.620	

Поэтому при настройке элементов секций типа "Харьков-85" была предпринята попытка обеспечить согласование однородных участков несимметричными ячейками без подстройки по диаметру пролетных отверстий. Закон изменения этих диаметров выбирался линейным. Однако использованные общепринятые методы настройки не обеспечивали в полной мере желаемую фазовую однородность. В связи с этим были проведены теоретические и экспериментальные исследования методов настройки переходных участков в кусочно-однородных структурах на базе диафрагмированных волноводов. На возможность использования ячеек с длиной отличной от $D = \lambda/4$ в качестве переходных указывали результаты работ, проведенных при разработке ускоряющих секций инжектора LEP [6], в которых эффективное согласование однородных участков удалось обеспечить на основе симметричных

пропускания возможно при линейном изменении коэффициента нагружения на переходном участке и сравнительно небольшом числе ячеек. Исследования показали, что фазовые неоднородности минимальны при четном числе переходных ячеек (нечетное количество дисков) и типах колебаний отличных от $\pi/2$. Отметим, что геометрия симметричных ячеек секций инжектора LEP [6] не позволяла использовать четное число переходных ячеек. В рамках использованной математической модели было показано, что существуют резонаторные макеты, обеспечивающие настройку несимметричных переходных ячеек по внутреннему диаметру с необходимой точностью. На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов были разработаны экспериментальные методы настройки переходных ячеек для диафрагмированных

волноводов с рабочим типом колебаний $\theta = 2\pi/3$ [10,11].

При создании технологических сильноточных ускорителей типа КУТ [12] были разработаны и изготовлены четыре короткие неоднородные ускоряющие секции с $\beta_{ph}=1$ и $\theta=2\pi/3$, три из которых (КУТ-1-3) имели кусочно-однородный закон изменения радиусов пролетных отверстий с линейным уменьшением радиусов на переходных ячейках (табл.1 -IV), а в четвертой – (КУТ-4) радиусы пролетных отверстий линейно уменьшались от входа до выхода (табл.1 -V).

Ячейки секции КУТ-1 до пайки были настроены по разработанной нами методике, но с использованием такого же количества вспомогательных ячеек в резонаторном макете и с той же процедурой замены, как и в [6]. Резонаторы второй, третьей и четвертой секций были настроены последовательно в резонаторных макетах с новыми вспомогательными ячейками. После пайки ячейки секций подстраивались путем небольшой внешней деформацией колец до достижения необходимой однородности фазового сдвига ($\pm 1^\circ$). Секция КУТ-1 была установлена на ускорителе КУТ [12]. Результаты измерения характеристик пучка на ее выходе совпали с расчетными.

3. НОВЫЕ МОДИФИКАЦИИ ДИАФРАГМИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДОВ

Для целей ускорения короткоимпульсных ($\tau=3-10$ нсек) интенсивных пучков электронов в ННЦ ХФТИ были разработаны новые модификации диафрагмированных волноводов. Ускоряющие секции на базе таких волноводов получили название СТРУМ (СТРуктура Ускоряющая Модернизированная). Ускорение заряженных частиц в таких структурах осуществляется первой пространственной гармоникой встречной волны. Разработка таких волноводов была стимулирована необходимостью создания короткоимпульсного ускорителя с суммарным зарядом в сгустке до 500 нКл при значениях величины импульсной мощности $P \approx 16 \div 18$ МВт, получаемой на выходе клистронов КИУ-12.

Одной из основных характеристик короткоимпульсных резонансных ускорителей, работающих в режиме запасенной мощности, является предельный импульсный заряд. Общепринятый способ его увеличения – повышение импульсной мощности СВЧ-генераторов и снижение групповой скорости ускоряющей электромагнитной волны, что приводит к увеличению величины запасенной в структуре энергии. Предельный заряд растет как корень квадратный из мощности источника, поэтому увеличение импульсной мощности является дорогостоящей процедурой, поскольку при этом требуется существенная модернизация или новая разработка СВЧ-источников. Возможен другой путь

увеличения числа ускоряемых частиц, а именно: уменьшение темпа ускорения при сохранении величины запасенной в структуре энергии. Это достигается, например, при уменьшении частоты ускоряющей волны. Проведенный нами анализ [14,15] показал, что это также может быть реализовано при переходе к структурам, в которых синхронной с частицами является одна из пространственных гармоник бегущей волны.

В качестве рабочей нами была выбрана первая пространственная гармоника [16,17]. Обеспечение синхронизма этой гармоники с релятивистскими электронами ($\beta_{ph}=c$) в классе диафрагмированных волноводов достигается выбором пространственного периода D большим половины длины волны электромагнитной волны. При этом волна должна распространяться навстречу ускоряемым частицам и СВЧ-питание секции должно осуществляться через выходной трансформатор типа волны. Необходимо отметить, что существует ограничение на выбор периода волновода. Оно определяется тем, что с ростом периода уменьшается частота волн, связанных с TE_{111} колебаниями резонаторов, и при определенных значениях D полоса их распространения может пересечься с полосой основной ускоряющей аксиально-симметричной волны. Такая ситуация является недопустимой при работе в режиме бегущей волны. С учетом этого обстоятельства нами был выбран период волновода, равный двум третям длины волны. Для рабочей частоты $f=2797.16$ МГц период равен $D=71.45$ мм.

В ННЦ ХФТИ были изготовлены три ускоряющие секции на основе диафрагмированных волноводов данного типа.

Две из них – СТРУМ-90 – имеют следующие геометрические размеры: диаметр пролетного отверстия в диафрагмах $2a=30$ мм, толщина диска $t=4$ мм. Третья – СТРУМ-91 – имеет существенные отличия от всех разработанных для целей ускорения диафрагмированных волноводов. При том же периоде она имеет увеличенные пролетные отверстия $2a=50$ мм и толщину диафрагм $t=50$ мм.

Ускоряющие секции типа СТРУМ-90 были предназначены для работы в режиме рекуперации СВЧ-мощности. В связи с этим они имеют небольшую длину $L=170$ см, малое затухание $\alpha=4.6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, большую групповую скорость $\beta_g=0.04$. Экспериментально измеренное значение последовательного сопротивления составило $R=148 \text{ Ом/см}^2$. Одна из этих секций была установлена и испытана на универсальном инжекторном комплексе ускорителя ЛУЭ-300 [18]. При испытаниях секция с регулируемым кольцом обратной связи запитывалась от источника с мощностью до 18 МВт и длительностью импульса 2 мкс. При оптимальном фазировании кольца

обратной связи максимальная величина мощности, поступающей на выход секции, составляла 72 МВт, при этом частота электрических пробоев не превышала допустимых. Величину последовательного сопротивления измеряли по приращению энергии ускоренного пучка при малых токах как в режиме рекуперации, так и в случае отсутствия обратной связи.

Анализ расчетных и экспериментальных значений последовательного сопротивления показал, что в структурах рассматриваемого типа величина последовательного сопротивления существенно зависит от величины радиуса скруглений диафрагм. Так, например, изменяя радиус скруглений от 0 до $t/2$ при $t=4$ мм последовательное сопротивление уменьшается почти в два раза, что дополнительно увеличивает предельный заряд.

Ускоряющая секция СТРУМ-91 была предназначена для ускорения пучков электронов наносекундной длительности с зарядом до 16 нКл без использования схемы рекуперации и установлена на ускорителе ЛИК (Лазерный Инжекторный Комплекс) [19,20]. Ее длина $L=234$ см. В ходе предварительных исследований и настройки секции были измерены ее основные электродинамические характеристики: последовательное сопротивление $R=530$ Ом/см², затухание $\alpha=2,2 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹, групповая скорость $\beta_g=0.01$. При подаче на ее выход мощности $P=20$ МВт набор энергии составляет 18 МэВ при величине предельного тока около 800 нКл. Такие параметры обеспечивают возможность получения ускоренных сгустков электронов с зарядом до 16 нКл при энергетическом разбросе меньшем 2%. В такой структуре наблюдается снижения амплитуд возбуждаемых пикосекундным пучком высших типов волн, что приводит к дополнительному уменьшению энергетического разброса [15]. Встречная волна большой амплитуды (нулевая гармоника ускоряющего поля) обеспечивает также радиальную высокочастотную фокусировку пучка [21].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание технологической базы и разработка ускоряющих структур позволила ННЦ ХФТИ активно включиться в деятельность по созданию новых линейных резонансных ускорителей электронов как для использования внутри института, так и за его пределами. За последние 20 лет наряду с частичной реконструкцией ускорителей ЛУЭ-2000 и ЛУЭ-300 было разработано и создано шесть типов ускорителей, предназначенных как для промышленного использования, так и проведения научных исследований. Большой вклад в создание технологической базы, проведение НИР и ОКР по

исследованию и изготовлению замедляющих структур для электронных ускорителей внесли:

Айзацкий Н.И.,	Биллер Е.З.,	Вишняков В.А.,
Довбня А.Н.,	Забашта Г.П.,	Зыков А.И.,
Иванов Г.М.,	Крамской Г.Д.,	Кондратенко В.В.,
Колот З.М.,	Курилко В.И.,	Кушнир В.И.,
Махненко Л.А.,	Митротченко В.В.,	Мондрус И.Н.,
Мякушко Л.К.,	Опанасенко А.Н.,	Герехов Б.А.,
Шаповалов А.Н.,	Шендрик В.А.	

Литература

1. Гришаев И.А., Зыков А.И., Крамской Г.Д. и др. Труды 3 всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1973, т.1, с.156-160.
2. Вишняков В.А., Гришко В.М., Сафронов Б.Г. и др. Атомная энергия, 1977, т.42, №3, с.231.
3. Биллер Е.З., Вишняков В.А., Довбня А.Н. ВАНТ. Серия: Техника физического эксперимента. Харьков, 1988, вып.1(36), с.3-7.
4. Акчурин Ю.И., Белоглазов В.И., Биллер Е.З. и др. ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования (Теория и эксперимент). Харьков, 1989, вып.5(5), с.3-10.
5. Вальднер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В. и др. Диафрагмированные волноводы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1977.
6. Bienvenu G., Bourdon JC, Brunet P. et al. Proceedings of the 1984 Linear Accelerator Conference. 1984. GSI-84-11.
7. Aizatsky N.I. Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerator, v.3, p.1773-1775.
8. Айзацкий Н.И. ЖТФ, 1996, т.66, вып.9, с.137-147.
9. Ayzatsky M.I. Proceedings of the EPAC96, Barcelona, 1996, v.3, p.2023-2025.
10. Ayzatsky M.I. Proceedings of the EPAC96, Barcelona, 1996, v.3, p.2026-2028.
11. Айзацкий Н.И., Биллер Е.З., Довбня А.Н. и др. Труды 13 совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1993, т.1, с.216-218.
12. Ayzatsky M.I., Biller E.Z. Proceedings of the XVIII International Linear Accelerator Conference, Geneva, 1996, v.1, p.119-121.
13. Ayzatsky M.I., Akchurin Yu.I., Beloglazov V.I. et al. Труды 14 совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т.4, с.259-263.
14. Aizatsky N.I. Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerator, v.5, p.3229-3231.
15. Айзацкий Н.И. ЖТФ, 1995, т.65, вып.6, с.153-158.
16. Айзацкий Н.И., Биллер Е.З., Волобуев В.В. и др. ВАНТ, Серия: Ядерно-физические исследования, Харьков, 1991, вып.3(21), с.16-18.
17. Айзацкий Н.И., Биллер Е.З., Довбня А.Н. и др. Труды 13 совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1993, с.205-207.

18. Иванов Г.М., Курилко В.И., Махненко Л.А. и др. ЖТФ, 1994, т.64, вып.4, стр.115-123.
19. Айзацкий Н.И., Биллер Е.З, Борискин В.Н. и др. Физика плазмы 1994, том 20, №7,8, с. 671-673.
20. Ayzatsky M.I. Biller E.Z., Dovbnya A.N. et al. Proceedings of the EPAC96, Barcelona, 1996, v.1, p.795-797.
21. Айзацкий Н.И., Кушнир В.А., Митроченко В.В. и др. ЛУЭ. ВАНТ, Серия: Ядерно-физические исследования, Харьков, 1997, вып.2,3(29,30), с.72-74.

Статья поступила: в редакцию 15 мая 1998 г.,
в издательство 1 июня 1998 г.