

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

А.С. Алимов, Н.И. Пахомов, В.И. Шведунов, Д.С. Юров

**СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ЛИНЕЙНОМУ УСКОРИТЕЛЮ
ЭЛЕКТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ
1 МэВ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-7/871

Москва, 2011 г.

УДК

А.С. Алимов, Н.И. Пахомов, В.И. Шведун, Д.С. Юров

e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru

**СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ЛИНЕЙНОМУ УСКОРИТЕЛЮ ЭЛЕКТРОНОВ
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 1 МэВ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-7/871

Аннотация

В работе описан процесс разработки промышленного линейного ускорителя электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ и с максимальным током пучка 25 мА.

A.S. Alimov, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, D.S. Yurov

**STATUS OF 1 MeV CONTINUOUS-WAVE LINEAR ELECTRON
ACCELERATOR**

Preprint MSU SINP № 2011-7/871

Abstract

We describe development of industrial continuous-wave linear electron accelerator with beam energy 1 MeV and maximum beam current 25 mA.

© Алимов А.С.,
© Пахомов Н.И.,
© Шведун В.И.,
© Юров Д.С.,

© НИИЯФ МГУ, 2011, <http://www.sinp.msu.ru>

Введение

В НИИЯФ МГУ разрабатывается промышленный компактный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ и мощность пучка 25 кВт, который может быть использован для реализации целого ряда радиационных технологий. По величине энергии ускоритель относится к группе среднеэнергетичных (0.5 кэВ – 5 МэВ) промышленных ускорителей электронов. Ускорители в указанном диапазоне энергий применяются для сшивания полимеров кабельной изоляции, для производства термоусаживающихся изделий и пенополиэтилена, для вулканизации компонентов шин, очистки сточных вод и выбросных газов, стерилизации, для проверки радиационной стойкости материалов, которые используются в условиях облучения и пр. Ускорители с энергией ниже 5 МэВ, используемые в промышленности в настоящее время, создаются, как правило, по схеме прямого действия, в которой ускорение электронов осуществляется напряжением, приложенным между катодом и анодом ускорительной трубки. Достоинством таких ускорителей является высокий, более 80%, коэффициент полезного действия. К недостаткам можно отнести их большие размеры, массу и материалоемкость, обусловленные необходимостью размещать ускорительную трубку в сосуде, заполненном элегазом под большим давлением, большие габариты и массу высоковольтного оборудования, рассчитанного на напряжение равное энергии пучка, высокую вероятность высоковольтных пробоев. Для размещения таких ускорителей требуются специальные помещения большой высоты с подъемным оборудованием, рассчитанным на большой вес, в которых допускается эксплуатация сосудов с высоким давлением.

В НИИЯФ МГУ на основании работ, выполненных при реализации проекта разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 175 МэВ, были разработаны принципы и созданы прототипы линейного ускорителя электронов непрерывного действия на энергии 600 кэВ – 1.2 МэВ, работающие в диапазоне частоты 2450 МГц. В ходе этих работ в ФГУП «НПП»Торий» для питания ускорителя был разработан клистрон непрерывного действия с выходной мощностью 50 кВт и коэффициентом полезного действия 65-70%. Достоинством ускорителя является его компактность и малый вес, что позволяет применять локальную радиационную защиту и включать ускоритель в состав действующих линий по производству материалов, требующих радиационной обработки. В системе питания ускорителя отсутствуют напряжения, превышающие 15 кВ, что исключает возможность высоковольтных пробоев. Система СВЧ питания

ускорителя отличается исключительной простотой, не требует сложных схем подстройки частоты СВЧ сигнала, что особенно важно при работе в непрерывном режиме с высокими тепловыми нагрузками на ускоряющую структуру и в условиях промышленных предприятий, где температура окружающей среды и температура охлаждающей жидкости могут изменяться в широком диапазоне.

Целью данной работы является создание предсерийного образца промышленного линейного ускорителя на энергию 1 МэВ с мощностью пучка до 25 кВт, разработка полного комплекта технической документации и сертификация изделия. Ускоритель создается на основе действующего в настоящее время в НИИЯФ МГУ прототипа - двухсекционного модульного ускорителя электронов непрерывного действия на энергию 1.2 МэВ, обеспечивающего средний ток пучка от 0 до 50 мА [1,2].

1. Описание ускорителя

Проектные параметры ускорителя приведены в таблице 1.

Таблица 1. Проектные параметры ускорителя непрерывного действия

Энергия пучка	1 МэВ
Длина ускоряющей секции	1.2 м
СВЧ мощность, рассеиваемая в стенках секции, $P_{ст}$	20 кВт
Средний ток пучка	от 0 до 25 мА
Максимальная средняя мощность пучка	25 кВт
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность, потребляемая от сети (только клистрон)	~75 кВт
КПД	~30%
Габариты ускорителя (без системы развертки и вывода пучка в атмосферу)	900x1260x400 мм ³

В состав ускоряющего модуля (рис. 1) входят электронная пушка (1) с энергией 15 кэВ и током, регулируемым в пределах от 0 до 250 мА, откачиваемая магниторазрядным насосом и закрепленная непосредственно на входном фланце ускоряющей секции, ускоряющая секция с переменной длиной ячеек с резонансной частотой 2450 МГц (2), которая обеспечивает захват непрерывного пучка и его ускорение до энергии 1 МэВ со средним током на выходе 25 мА (мощность пучка 25 кВт), клистрон непрерывного действия, работающий на частоте 2450 МГц с максимальной выходной мощностью 50 кВт (3), подводящий волновод (4) с вакуумным портом, через который производится откачка секции магниторазрядным насосом (5).

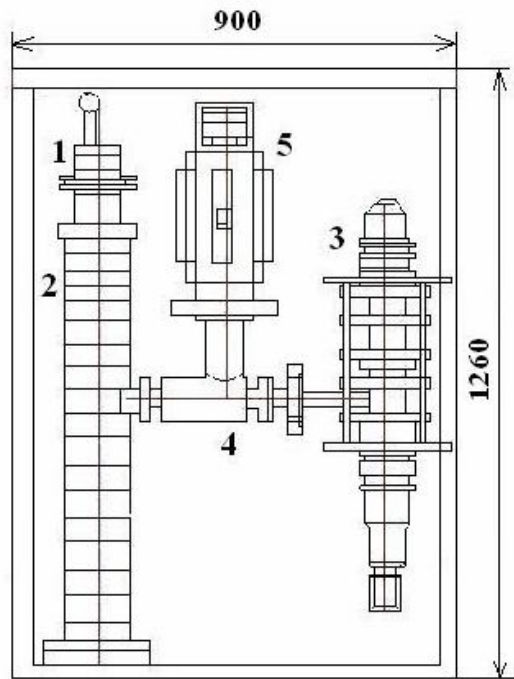


Рис. 1. Схема ускоряющего модуля.

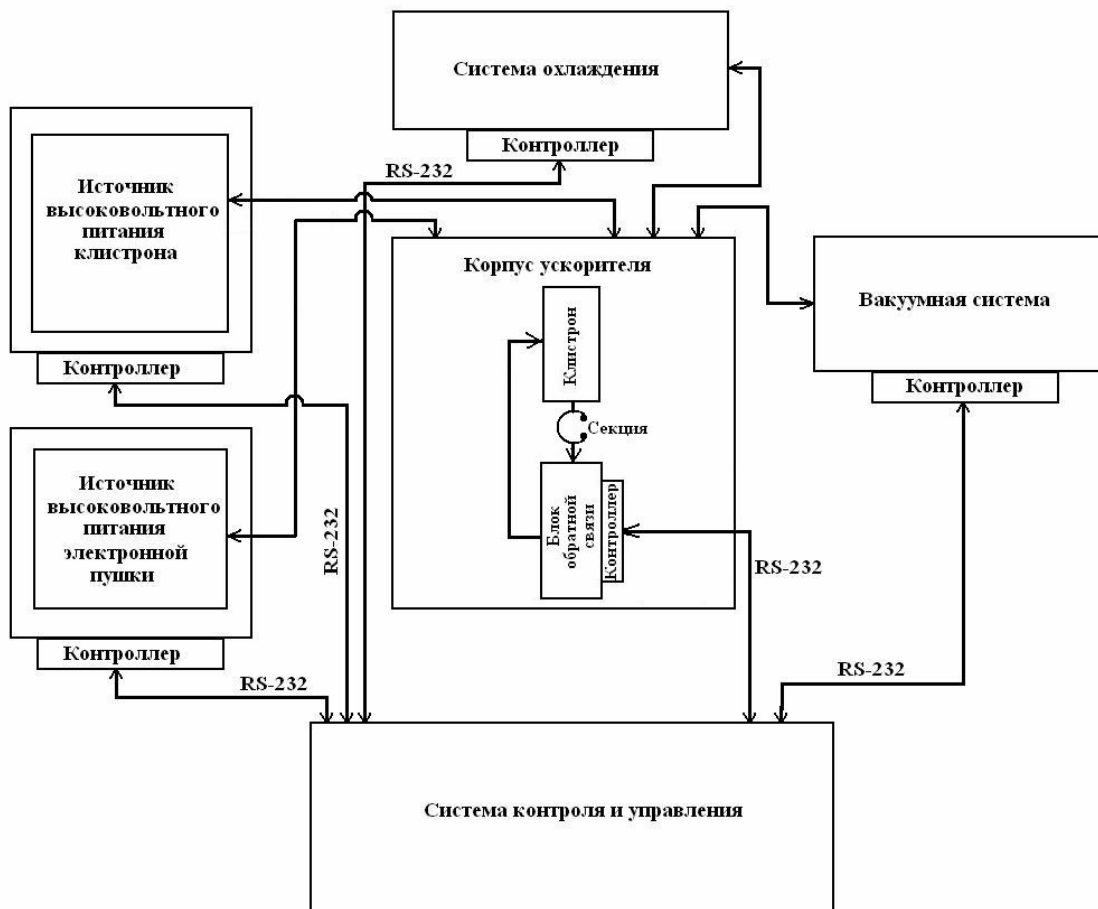


Рис. 2. Блок-схема ускорителя.

Функционирование ускорителя обеспечивается системами СВЧ питания, высоковольтного питания клистрона и электронной пушки, системой контроля и

управления, системой охлаждения клистрона и ускоряющей секции и вакуумной системой. Блок-схема ускорителя показана на рис. 2.

2. Электронная пушка

Значение напряжения электронной пушки, 15 кВ, выбрано совпадающим с напряжением питания клистрона, что упрощает схему высоковольтного питания ускорителя. Электронная пушка имеет два промежуточных анода, позволяющих регулировать ток в диапазоне от 0 до 250 мА без существенных изменений оптических характеристик пучка. Электронная пушка располагается непосредственно на входном фланце ускоряющей секции.

3. Ускоряющая структура

Ускоряющая структура представляет собой бипериодическую структуру с внутренними ячейками связи, работающую в режиме стоячей волны на $\pi/2$ колебании. Щели связи расположены друг напротив друга в ускоряющей ячейке и повернуты на 90° в ячейке связи.

В результате оптимизации динамики пучка и внутренней геометрии ускоряющей структуры получена ускоряющая секция, состоящая из 14 ячеек с переменным $\beta = v/c$ и четырех ячеек с постоянным значением β . Узел ввода мощности располагается в 10 ячейке. По выполняемым функциям часть с переменным β можно условно разделить на 2 составляющие: 1-3 ячейки и 4-14 ячеек.

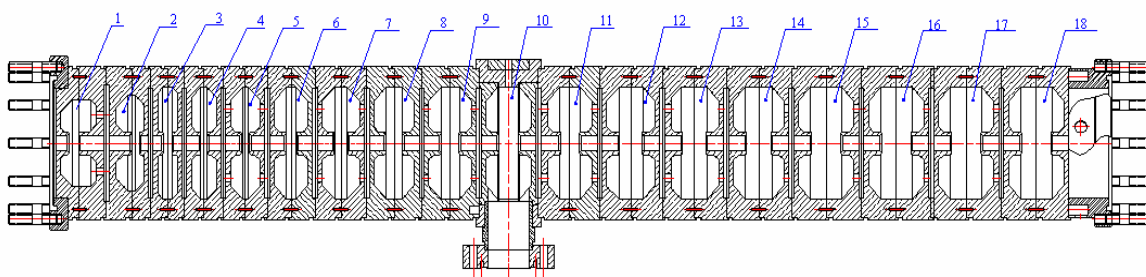


Рис. 3. Ускоряющая секция линейного ускорителя непрерывного действия на энергию 1 МэВ.

Первая ячейка обеспечивает модуляцию электронов по скорости, в результате чего на участке между первой и второй ячейками происходит продольная группировка пучка, обеспечивающая коэффициент захвата более 50%. Во второй ячейке происходит окончательная группировка и захват уже сгруппированного пучка в процесс ускорения. Ускорение в третьей ячейке до

энергии 68 кэВ обеспечивает оптимальное значение фазы входа пучка в следующие ячейки нерегулярной части, где происходит ускорение электронов до скоростей, близких к скорости света.

Распределение поля в секции по заданной геометрии ячеек рассчитывалось с помощью программы SUPERFISH [3]. Далее эти поля служили входными данными для программы численного моделирования продольной и поперечной динамики пучка в линейных ускорителях PARMELA [4], позволяющей производить расчеты с учетом пространственного заряда.

Распределение ускоряющего поля на оси секции, удовлетворяющее оптимальной динамике пучка показано на рис. 4.

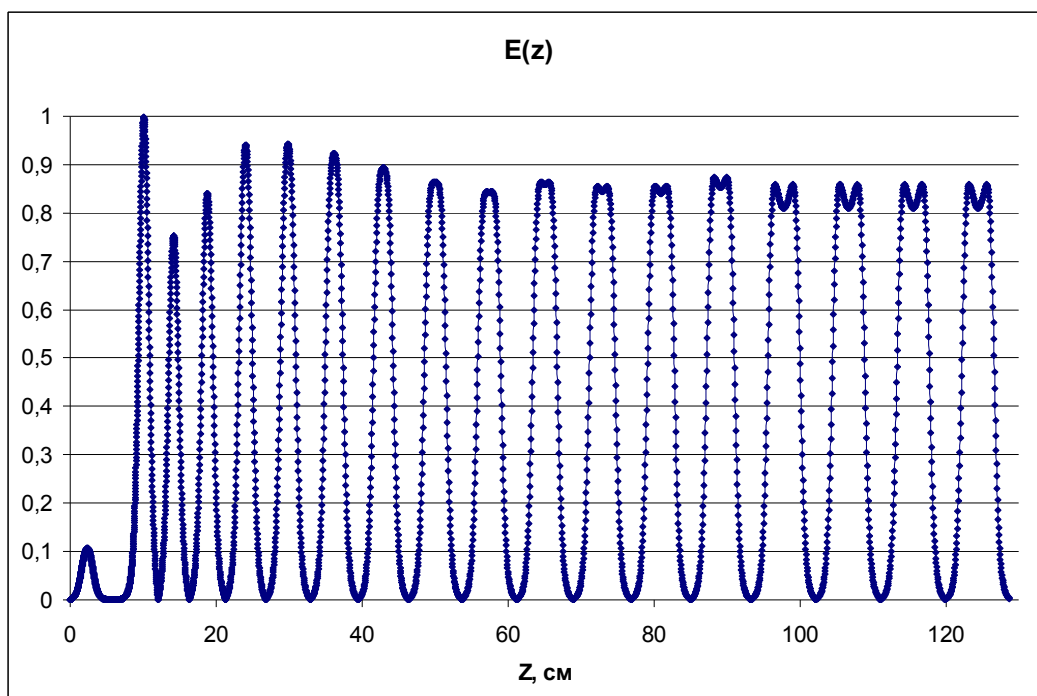


Рис. 4. Распределение поля, рассчитанное по программе SUPERFISH.

После предварительного расчета с помощью программ SUPERFISH и PARMELA в расчетах с помощью трехмерных программ были выбраны размеры щелей связи, обеспечивающие необходимое распределение ускоряющего поля на оси и уточнена геометрия ячеек с целью настройки на рабочую частоту. Исходная геометрия ячеек совпадала с геометрией ячеек ускоряющих структур, описанных в [1,2], настройка резонансной частоты производилась изменением размера “Z” (рис. 5).

Настройка 4-9, 11-18 ячеек проводилась на макете (рис. 6), состоящем из двух ускоряющих полуячеек и одной ячейки связи между ними с выбором электрических граничных условий на концах макета.

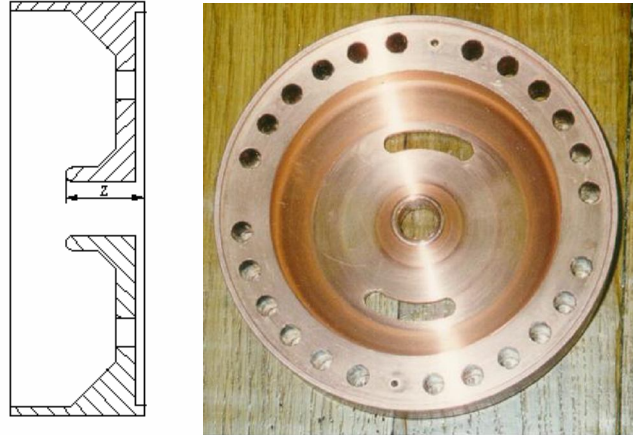


Рис. 5. Геометрия половины ускоряющей ячейки.

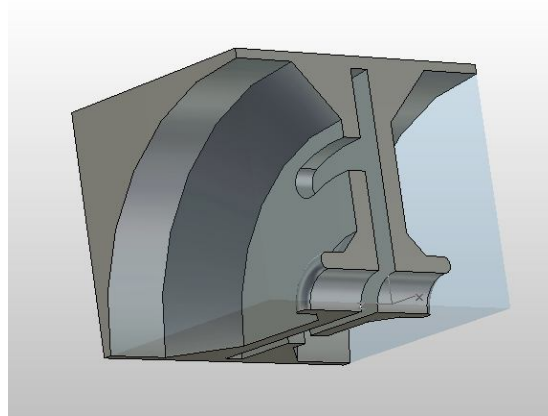


Рис. 6. Макет для расчета геометрии регулярной ячейки.

Также, вследствие поперечной симметрии структуры, выбор магнитных граничных условий позволяет в расчетах использовать $\frac{1}{4}$ структуры, что существенно сокращает время расчетов.

Расчет колебаний ячейки связи производился на том же макете с выбором магнитных граничных условий на концах макета.

Трехмерная картина распределения электрического поля в регулярной ячейке изображена на рис. 7.

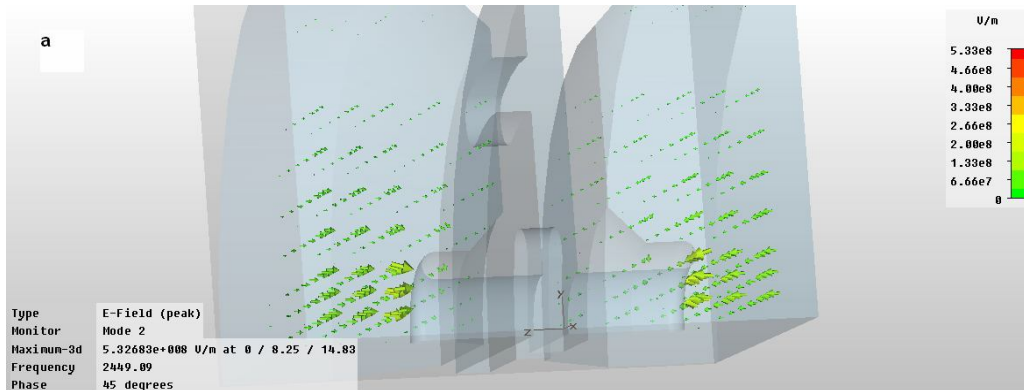


Рис. 7. Распределение электрического поля в ячейках с постоянным β .

Полученные данные проверялись путем сравнения частот ячеек без щелей связи, рассчитанных с помощью программ SUPERFISH и с помощью программы трехмерных расчетов. Результаты настройки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты настройки ячеек ускоряющей структуры.

N	Z_{in}	Z_f	F_{3D}	F_{sf}	F_{3D_wc}
4	13.45	11.75	2448.84	2511.14	2511.53
5	14.77	13.05	2449.03	2506.16	2505.91
6	15.31	13.62	2448.99	2498.28	2497.72
7	15.75	14.01	2449.02	2492.8	2492.72
8	16.05	14.32	2449.31	2488.57	2489.02
9	16.3	14.56	2449.47	2486.48	2486.49
11	16.63	14.9	2449.16	2482.54	2482.81
12	16.75	15.01	2448.97	2482.27	2481.41
13	16.86	15.12	2449.09	2481.84	2480.85
14	16.94	15.2	2449.33	2480.6	2480.43
15,16,17	16.94	15.58	2449.09	2477.03	2477.21
18	16.94	16.03	2448.91		

где N – номер ячейки, Z_{in} – начальное значение параметра Z, Z_f – конечное значение параметра Z, F_{3D} – частота, рассчитанная по трехмерной программе при параметре Z_f , F_{sf} – частота, рассчитанная по программе SUPERFISH при параметре Z_f , F_{3D_wc} – частота, рассчитанная по трехмерной программе при параметре Z_f на макете без щелей связи.

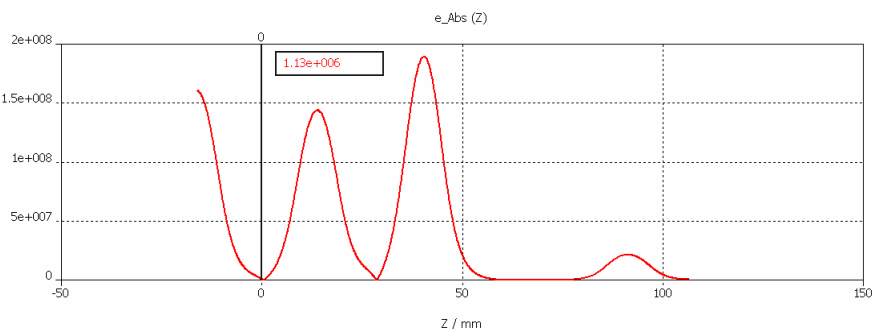
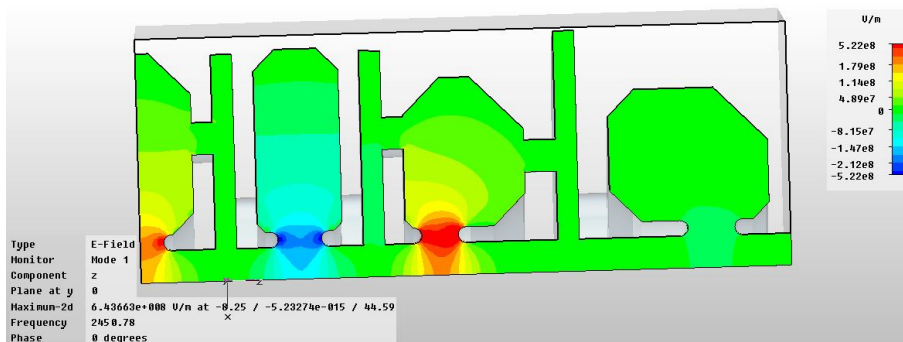


Рис. 8. Распределение поля на оси трех первых ускоряющих ячеек.

При настройке первых трех ячеек наиболее важным является соотношение амплитуд полей. Настройка проводилась на макете, состоящем из трех первых ускоряющих ячеек и половины четвертой.

Полученная в результате оптимизации трехмерная геометрия первых трех ячеек и распределение поля на оси в них приведены на рис. 8. Получено соотношение амплитуд полей близкое к проектному.

На основании проведенных расчетов были изготовлены отдельные полужайки ускоряющей структуры и проведены измерения и настройка ускоряющей структуры.

Измерения параметров ячеек и секции в сборе проводились с использованием сетевого анализатора “Hewlett Packard” – 8752C (300 кГц – 6 ГГц) на основании методики с использованием штырей связи. Все измерения до пайки проводились под прессом под давлением ~2 тонн (рис. 9).



Рис. 9. Общий вид стенда для измерений и настройки параметров ячеек ускоряющей структуры в целом.

Для измерения электрического поля на оси структуры использовалась методика протягивания пробного тела вдоль оси структуры. Сетевой анализатор использовался при этом в режиме измерения переходного ослабления между коаксиально-волноводным переходом, закрепленном на входном фланце секции и

петлей связи секции, расположенной в узле ввода мощности напротив окна ввода мощности.

Результаты измерений ячеек и электрического поля в секции после изготовления ячеек приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры ячеек ускоряющей секции после изготовления.

Комбинации полуячеек	$f_{уск}$, МГц	$f_{св}$, МГц	Q
1-2	2455.1		5300
2-3		2489.75	2100
3-4	2458.8		5250
4-5		2459.15	2100
5-6	2447.65		5100
6-7		2448.4	2050
7-8	2447.4		6000
8-9		2447.1	2400
9-10	2436		7500
10-11		2450.8	2400
11-12	2447.35		7500
12-13		2450.1	2450
13-14	2448.3		7300
14-15		2451.4	2200
15-16	2448		9500
16-17		2448.05	2250
17-18	2448.7		9000
21-22	2446.5		9100
22-23		2445.7	2500
23-24	2448.29		9800
24-25		2447.8	2350
25-26	2447.7		9500
26-27		2449	2450
27-28	2448.38		11000
28-29		2448.5	2350
29-30	2447.18		10800
30-31		2446.3	2300
31-32	2447.41		11300
32-33		2446.5	2300
33-34	2447.35		10900
34-35		2445.7	2250
35-36	2446.5		10800

Настройка ячеек перед пайкой осуществлялась расточкой на токарном станке диаметра ячеек для снижения их частоты и уменьшением длины носика для повышения частоты. Итоговое распределение поля в секции приведено на рис. 10.

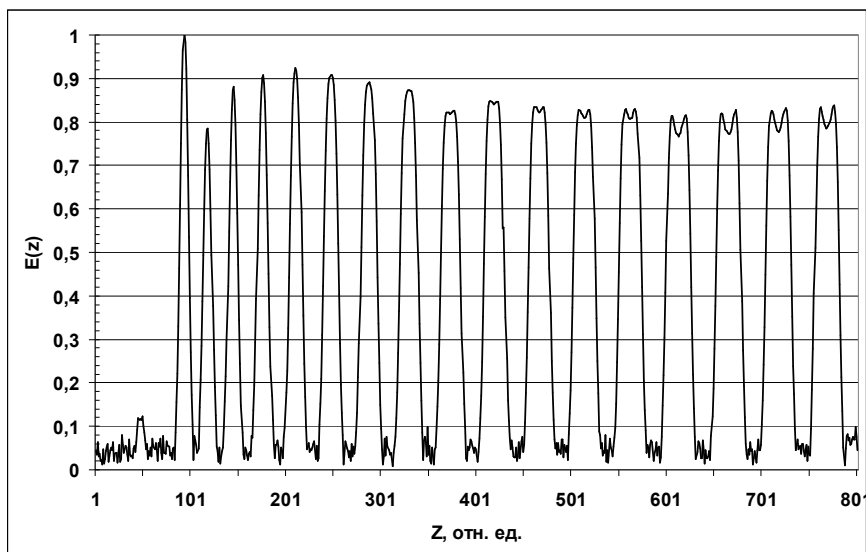


Рис. 10. Измеренное распределения электрического поля в настроенной секции перед пайкой.

Параметры секции перед пайкой:

$$f_{рез} = 2449.83 \text{ МГц}$$

$$Q_H = 4000$$

$$\beta_c = 1.57$$

Соотношение полей в первых трех ячейках близко к проектному.

4. Система СВЧ питания

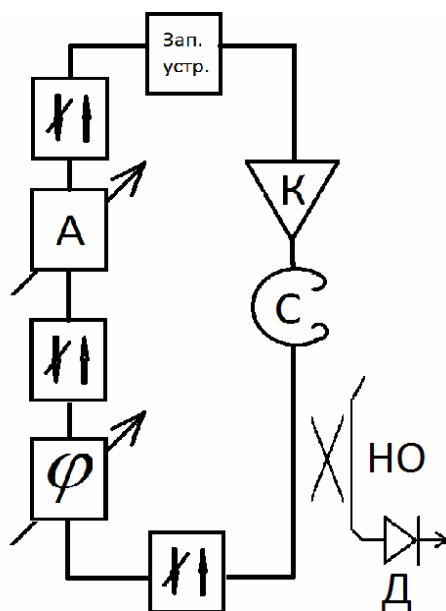


Рис. 13. Блок-схема системы СВЧ-питания.

В основе системы высокочастотного питания ускорителя лежит автоколебательный принцип работы клистрона с ускоряющей секцией в цепи обратной связи. Секция (С), соединенная с клистроном (К) через подводящий

волновод и цепь обратной связи, схематически показанные на рис. 11, образуют замкнутый автоколебательный контур.

Сигнал с петли связи секции через управляемые $p-i-n$ аттенюатор (А) и фазовращатель (φ) поступает на вход клистрона. Ввиду высокой нагруженной добротности секции, составляющей 6000-7000, автоколебания имеют место вблизи ее собственной резонансной частоты. Фазовращатель и аттенюатор служат для выбора условий автоколебаний, регулирования их амплитуды и частоты в определенных пределах. Ферритовые вентили предохраняют аттенюатор, фазовращатель от взаимного влияния и влияния на диод а также изолируют указанные элементы от отраженной от входа клистрона мощности. Сигнал, снимаемый с диода (Д) через направленный ответвитель (НО), используется системой контроля и управления для стабилизации амплитуды ускоряющего поля на уровне $\sim 0.1\%$, что является существенным условием успешной работы ускоряющей структуры в условиях большой, $\sim 50\%$, нагрузки током пучка. Помимо высокой стабильности и надежности работы такой схемы высокочастотного питания автоматически решается проблема ввода высокочастотной мощности. По мере разогрева секции частота автоколебаний меняется с собственной частотой секции, асимптотически выходя на рабочее значение. Постоянная времени данного процесса составляет для используемой конструкции секции и ее системы охлаждения ~ 30 сек. Сдвиг частоты секции в установившемся режиме составляет ~ 1.8 МГц, т.е. в диапазоне рабочей частоты 2450 МГц превышает полуширину, ~ 0.4 МГц, резонансной кривой ускоряющей структуры. Ширина рабочей полосы клистрона более 10 МГц и, таким образом, не влияет на данный процесс. Практически для любого коэффициента усиления клистрона за счет выбора переходного ослабления петли связи секции и ослабления аттенюатора в цепи обратной связи может быть обеспечен требуемый уровень сигнала на входе клистрона. При работе клистрона в автоколебательном режиме, за счет выбора фазы отраженного сигнала (за счет длины подводящего волновода) возможно непосредственное подключение выхода клистрона ко входу секции, без использования циркулятора. Таким образом, исключается весьма дорогостоящий и ненадежный элемент, а система, состоящая из клистрона и секции, становится чрезвычайно компактной.

5. Заключение

В процессе разработки компактного промышленного ускорителя электронов выполнены расчеты геометрии ячеек ускоряющей секции, проделана работа по настройке ячеек после изготовления, собран СВЧ тракт от выхода секции до входа клистрона. В настоящее время производится пайка ускоряющей секции и разрабатывается система контроля и управления ускорителя.

Литература

1. А.С. Алимов, Д.И.Ермаков, Б.С.Ишханов, В.И.Шведунов, В.П. Сахаров, W.P. Trower, **Линейный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 600 кэВ, средний ток пучка 50 мА**, ПТЭ №5 (2002) 121.
2. А.С. Алимов, Д.И.Ермаков, Б.С.Ишханов, В.И.Шведунов, В.П. Сахаров, W.P. Trower, **Двухсекционный линейный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1,2 МэВ, средний ток пучка 50 мА**, ПТЭ №5 (2002) 114.
3. K.Halbach, R.F. Holsinger, **SUPERFISH – a Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry**, Particle Accelerators Vol. 7 (1976).
4. PARMELA – originally developed by K. R. Crandall.

**Андрей Сергеевич Алимов
Николай Иванович Пахомов
Василий Иванович Шведунов
Дмитрий Сергеевич Юров**

**СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ЛИНЕЙНОМУ УСКОРИТЕЛЮ
ЭЛЕКТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 1 МэВ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-7/871

Работа поступила в ОНТИ 17.10.2011 г.