

Достижение выходной мощности 100 МВт в широкоапертурном клистроне для ВЛЭПП

Г.В. Долбилов, Н.И. Азорский, Н.И. Лебедев, В.А. Петров, А.А. Фатеев,
В.С. Швецов, М.В. Юрков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В.Е. Балакин, С.Ю. Казаков, В.Е. Теряев, В.Ф. Фогель

Филиал института ядерной физики, Протвино, Россия

Введение

Стоимость СВЧ-систем составляет существенную часть полной стоимости линейного коллайдера. Для того чтобы реализовать минимальную стоимость и обеспечить наибольшую эффективность и надежность СВЧ-системы, все ее элементы (модуляторы, электродинамическая и фокусирующая системы клистрона, система задающих генераторов низкого уровня мощности) не должны рассматриваться как независимые части. Необходима общая оптимизация систем.

Работы по исследованию и развитию релятивистского клистрона для ВЛЭПП были начаты в Институте ядерной физики СО РАН более десяти лет назад. Фокусирующая система ВЛЭПП-клистрона базируется на постоянных магнитах, поскольку это существенно уменьшает эксплуатационные расходы по сравнению с системами, использующими соленоидальное магнитное поле [1]. Модуляторы клистронов в проекте ВЛЭПП считаются самыми дешевыми, поскольку они базируются на использовании триодной электронной пушки и постоянного высокого напряжения [1,2]. Обеспечивая самую дешевую конструкцию модулятора, такой подход требует развития клистронов с большой апертурой потому, что качество электронного пучка пушки с сеточным управлением хуже, чем у обычной диодной пушки. Выбор оптимальной величины коэффициента усиления мощности клистрона не может быть проведен независимо от системы задающих генераторов низкого уровня СВЧ-мощности. Полупроводниковые приборы обеспечивают возможность

Таблица 1: Параметры клистрона

Основные параметры	
Энергия электронов	1 МэВ
Ток пучка	250 А
Частота	14.0 ГГц
Коэффициент усиления	80 дВ
Пиковая мощность	100 МВт
Эффективность	40 %
Фокусирующая система	
Тип магнитов	Пост. мгно.
Макс. Магнитное поле	4.5 кГс
Период	64 мм
Число периодов	14.5
Акцептанс	0.1π см·рад
Группирователь	
Диаметр трубок дрейфа	15 мм
Длина трубок дрейфа	52 мм
Число трубок дрейфа	10
Длина резонаторов	12 мм
Число резонаторов	11
Рабочая мода	π
Выходная структура	
Рабочая мода	$\pi/2$
Число ячеек	22
Длина	110 мм
Апертура	20 мм

создания дешевых, надежных и компактных СВЧ-усилителей сантиметрового диапазона с выходной мощностью порядка 1 Вт. Если клистрону требуется более высокий уровень входной мощности, система предусилителей должна базироваться на вакуумных СВЧ-приборах, которые менее надежны и более сложны. Кроме того, при больших уровнях СВЧ-мощности проблемы фазирования и фазовой стабильности становятся более серьезными. Принимая во внимание, что импульсная мощность клистрона должна быть ~ 100 МВт, применение полупроводниковых предусилителей требует выбора коэффициента усиления ~ 80 дБ.

В результате этих исследований была развита концепция широкоапертурного клистрона с большим коэффициентом усиления. Опыт работы с экспериментальными образцами таких клистронов показал, что главной проблемой достижения проектных параметров является самовозбуждение клистрона. Для клистронов сантиметрового диапазона с большим коэффициентом усиления традиционные методы подавления паразитных колебаний оказались неэффективными. В работах [3,4] мы использовали другой метод подавления паразитных колебаний, который заключается в распределенном подавлении паразитных колебаний СВЧ поглощающими трубками дрейфа. В данной работе мы приводим результаты экспериментов по усилению СВЧ-мощности в широкоапертурном (15 мм) 14-ГГц клистроне с СВЧ поглощающими трубками дрейфа. Мы получили проектные параметры и достигли 100 МВт уровня выходной мощности при отсутствии паразитных мод самовозбуждения.

1. Конструкция клистрона

Параметры клистрона приведены в таблице 1, а его схема показана на рис. 1.

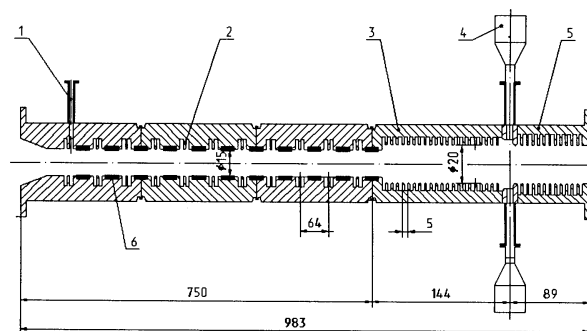


Рис. 1: Схема клистрона с СВЧ поглощающими вставками. Здесь (1) — входной волновод, (2) — резонаторы группирователя, (3) — выходная структура, (4) — СВЧ нагрузка, (5) — СВЧ фильтр для E_{01} типа волн, (6) — СВЧ поглощающие вставки (расположены внутри дрейфовых трубок).

Характерной особенностью клистрона являются высокий коэффициент усиления, большая величина отношения $a/\lambda = 0.7$ [5] и использование постоянных магнитов для фокусировки пучка.

Рабочее напряжение и ток клистрона составляют 1 МэВ и 250 А соответственно. Группирователь клистрона состоит из 11 резонаторов. Выходная структура выполнена в виде диафрагмированного волновода с рабочей модой $\pi/2$. Общая длина электромагнитной структуры равна 0,7 м. Проектная мощность 100 МВт достигается при уровне входной мощности ~ 1 Вт (что соответствует коэффициенту усиления ~ 80 дБ).

Большая апертура трубок дрейфа (15 мм) позволяет увеличить аксептанс клистрона. Однако, при таком диаметре дрейфовых трубок основной TE_{11} тип волны не является запредельным для клистрона. В результате клистрон самовозбуждается в рабочем диапазоне частот 14 ГГц из-за наличия положительной обратной связи на TE_{11} моде.

Симметричная TM_{010} мода группирователя и TE_{11} мода связаны между собой вследствие радиальных смещений в резонаторах при их сборке и пайке, а также несимметричности нагрузок двух выходов СВЧ-мощности.

Чтобы решить проблему самовозбуждения, мы разработали технологию изготовления СВЧ ослабляющих вставок и установили их внутри трубок дрейфа клистрона (см. рис.1). В качестве СВЧ поглощающего материала мы выбрали стекло углерод. Этот материал мы можем изготовить на имеющемся у нас оборудовании. Такие СВЧ фильтры с распределенным поглощением обеспечивают существенное затухание паразитных волн и не влияют на рабочую моду клистрона (см. рис.2).

Исследования динамики пучка показали, что наличие таких вставок в клистроне не приводит к развитию резистивной неустойчивости.

2. Исследование режима усиления

Исследования проведены в ОИЯИ на пучке линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 (энергия 1 МэВ, ток пучка до 250 А, эмиттанс 0.05π см·рад, длительность импульса 250 нс). Датчики тока пучка позволяли измерять ток на выходе ускорителя, на входе и выходе клистрона и потери тока пучка в клистроне. Для того, чтобы получить более детальную информацию о СВЧ-излучении, коллектор пучка был вы-

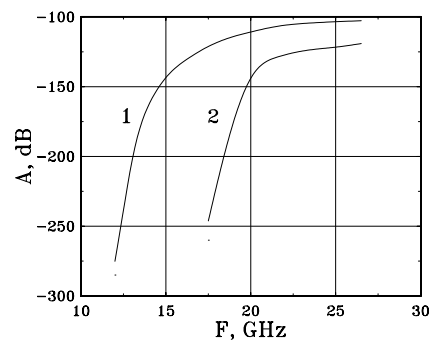


Рис. 2: Интегральные частотные характеристики фильтра с распределенным подавлением паразитных волн, состоящего из 10 СВЧ поглощающих вставок (1 — H_{11} мода и 2 — E_{01} мода).

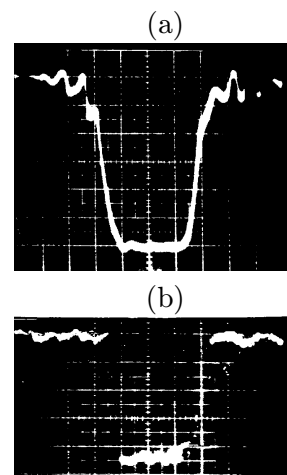


Рис. 3: Осциллограммы усилительного режима. Здесь (a) — ток пучка в коллекторе, (b) — СВЧ-сигнал, соответствующий 100 МВт выходной мощности.

полнен в виде круглого волновода диаметром 20 мм. Измерения показали, что потери тока пучка в клистроне отсутствуют.

Величина тока пучка в коллекторе составляла 250 А. Сигнал задающего генератора усиливался лампой бегущей волны. Типовые осциллограммы усилительного режима работы клистрона приведены на рис.3. Можно видеть, что флуктуации тока пучка в коллекторе отсутствуют. Это свидетельствует об отсутствии поперечных неустойчивостей пучка. Измерения спектра частот на выходе клистрона показали отсутствие каких-либо частот, кроме рабочей частоты 14 ГГц. На Рис.4 приведена амплитудная характеристика клистрона, где \blacktriangle — экспериментальные результаты, а сплошные линии — теоретические расчеты (1- $U = 1$ МВ; 2- $U = 1,025$ МВ; 3- $U = 1,05$ МВ).

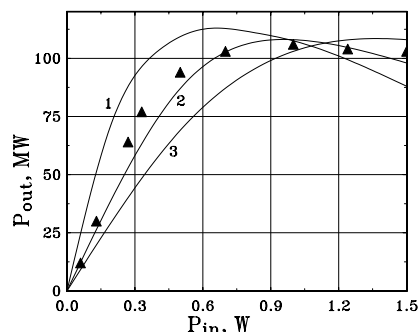


Рис. 4: Амплитудные характеристики клистрона.

На Рис.5 — частотные характеристики клистрона, где \triangle — $P_{in} = 0,5$ Вт, \square — $P_{in} = 1$ Вт и \circ — $P_{in} = 2$ Вт ($\Delta f = f - 14$ ГГц). Имеется хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

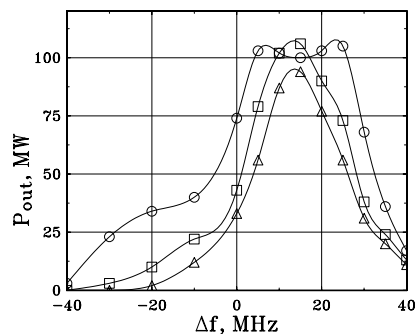


Рис. 5: Частотные характеристики клистрона.

В заключение авторы благодарят И.Н. Иванова за поддержку в работе и А.М. Бирюкова, В.И. Клементьева, А.Ф. Кратко, В.В. Косухина, Н.А. Леонова и В.И. Скорлупкина за техническую помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] L.N. Arapov et al. Proc. of the 3rd European Particle Accelerator Conference (Berlin, Germany, 1992), Vol.1, p.330.
- [2] V.E. Balakin. Proc. of the LC'92 ECFA Workshop on e^+e^- Linear Colliders (July, 25 – August, 2, 1993, Germany), MPI-PhE/93-14, ECFA 93-154, p. 243.
- [3] N.I. Azorsky et al. Proc. of the 1994 International Linac Conference (KEK, Japan, 1994, Vol.1, p. 421.
- [4] G.V. Dolbilov et al. AIP Conf. Proc. **337**(1994)122.
- [5] G.V. Dolbilov et al. "Achieving of 100 MW Output Power in a Wide Aperture VLEPP Klystron with Distributed Suppression of Parasitic Modes", presented at the International Workshop on Pulsed RF Sources for Linear Colliders, Shonan Village, Japan, April 1996.