

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. м.гн.
Макс. Магнитное поле	4.5 кГс
Период	64 мм
Число периодов	14.5
Акцептанс	0.1 π 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.

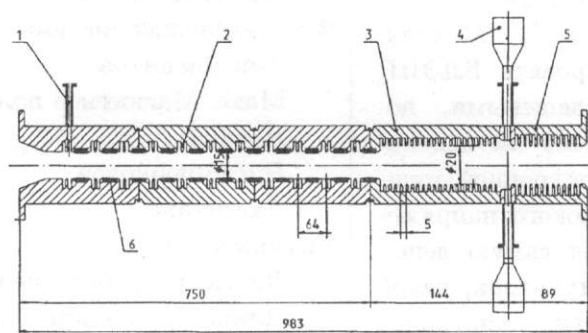


Рис. 1: Схема клистрона с СВЧ поглощающими вставками. Здесь (1) — входной волновод, (2) — резонаторы группирователя, (3) — выходная структура, (4) — СВЧ нагрузка, (5) — СВЧ фильтр для E_{01} типа волн, (6) — СВЧ поглощающие вставки (расположены внутри дрейфовых трубок).

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 заперделным 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-

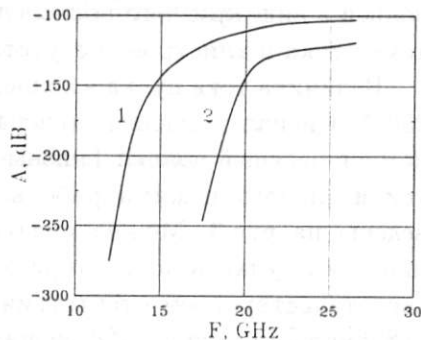


Рис. 2: Интегральные частотные характеристики фильтра с распределенным подавлением паразитных волн, состоящего из 10 СВЧ поглощающих вставок (1 — H_{11} мода и 2 — E_{01} мода).

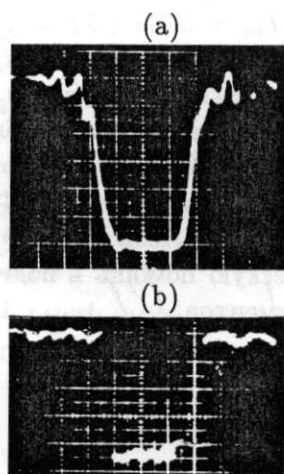


Рис. 3: Осциллограммы усилительного режима. Здесь (a) — ток пучка в коллекторе, (b) — СВЧ-сигнал, соответствующий 100 МВт выходной мощности.

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).

На Рис.5 — частотные характеристики клистрона, где Δ — $P_{in} = 0,5$ 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.

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.

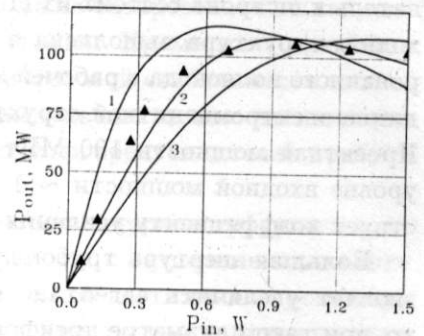


Рис. 4: Амплитудные характеристики клистрона.

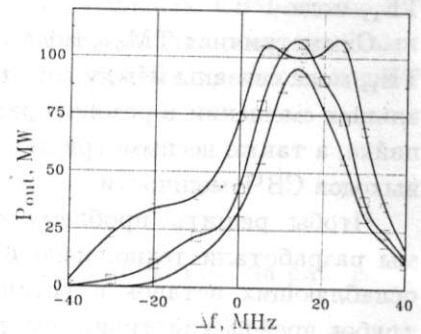


Рис. 5: Частотные характеристики клистрона.

СВЧ-окна S- и X- диапазонов с бегущей волной в диэлектрике

С. Казаков, А. Лунин

Филиал института ядерной физики СО РАН, Протвино, Россия

H. Mizuno, Y. Saito, S. Michizono

National Laboratory for High Energy Physics (KEK), 1-1 Oho, Tsucuba, Ibaraki 305, Japan

Представлены результаты расчетов и испытаний различных вариантов СВЧ-окон S- и X- диапазонов на большую мощность с бегущей волной в диэлектрике.

Введение

Существующие сейчас проекты линейных коллайдеров предполагают использование ускоряющих структур с темпом ускорения до 100 МэВ/м, что, в свою очередь, требует применения источников СВЧ-питания с уровнем мощности 100 МВт и более. Одной из возникающих при этом проблем является создание СВЧ окон, способных пропускать вышеуказанную мощность. Решению этой проблемы уделяют значительное внимание производители мощных СВЧ-приборов и ускорительные центры, такие как SLAC (США) и КЕК (Япония) [1,2].

Как показывает опыт, одной из причин, приводящих к разрушению окон, служит высокая напряженность электрического поля на поверхности керамики, особенно в месте спая керамики с металлом, что вызывает ВЧ-пробой. Другим фактором, отрицательно влияющим на время жизни и, возможно, на максимальный уровень пропускаемой мощности, является мультипакторный разряд на поверхности окна.

Существуют следующие способы улучшения параметров СВЧ-окон:

- Использование высокочистых, качественных керамик.
- Нанесение на поверхность керамики покрытий снижающих коэффициент вторичной эмиссии (TiN).
- Использование электродинамических структур позволяющие снизить напряженность электрического поля как на поверхности, так и в месте контакта металла с керамикой.
- Использование TE_{01} типа волны, позволяющего исключить наличие электрического поля в месте спая металла с керамикой.

В течение нескольких последних лет Филиалом Института ядерной физики (ФИЯФ, Протвино) и Национальной Лабораторией по физике высоких энергий (КЕК, Япония) была проведена серия совместных работ по изготовлению СВЧ-окон S- и X- диапазонов, сочетающих вышеперечисленные методы. Результаты испытаний опытных образцов таких окон приводятся в данной статье.

TWC-окна

Концепция TWC-окон была предложена в [3] и заключается в следующем. С помощью двух неоднородностей волновода можно создать такое распределение полей, когда в материале окна будет существовать чисто "бегущая" волна при локальном перенапряжении в пространстве волновода между керамикой и неоднородностью. (см. рис. 1)

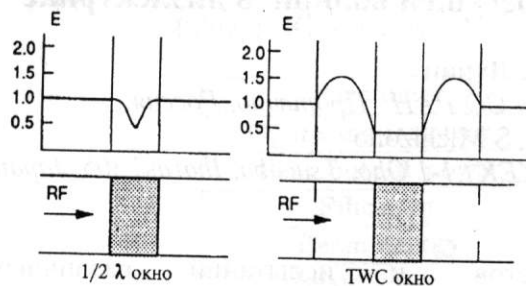


Рис. 1. Принцип работы TWC окна.



Рис. 2. Конструкция окна S диапазона.

В результате достигается уменьшение величин компонент E-полей на поверхности и в объеме керамики, и снижение ВЧ потерь в пересчете на единицу толщины окна. Например, для окна из традиционного материала Al_2O_3 с $\epsilon \approx 9.8$ коэффициент снижения тангенциальной компоненты E-поля на поверхности составляет $1/\sqrt{\epsilon} \approx 0.57$ по сравнению с обычным полуволновым окном.

Экспериментальные результаты

В ФИЯФ были изготовлены TWC-окна S- и X- диапазонов. Конструкция окна S диапазона представлена на рис. 2. Керамика для окон была произведена ГНП "Исток" ($>95\% Al_2O_3$, $\epsilon \approx 9.0$) и фирмой NTK (Япония, HA997, $>99.7\% Al_2O_3$, $\epsilon \approx 9.8$).

Таблица 1. Результаты испытаний окон S- диапазона

No	Тип окна	Материал	Покрытие TiN, нм	Характеристики импульса	Примечание
1	TWC	NTK	1.5	> 400 МВт/2 мкс/50	
2	TWC	Исток	1.5	400 МВт/2 мкс/50 Гц	Разрушение окна
3	Pill-box	NTK	1.5	400 МВт/1 мкс/50 Гц	Разрушение окна
4	TWC	NTK	нет	400 МВт/1 мкс/50 Гц	

Таблица 2. Результаты испытаний окон X- диапазона

No	Тип окна	Материал	Покрытие TiN, нм	Характеристики импульса	Примечание
1	TWC	NTK	1.5	80 МВт/0.2 мкс/25 Гц	
2	TWC	NTK	1.5	40 МВт/0.7 мкс/25 Гц	
3	TWC	Исток	1.5	35 МВт/0.2 мкс/25 Гц	Разрушение окна

Испытания проходили в КЕК. Окна тестировались в режиме бегущей волны в резонаторных кольцах, позволяющих пропускать через окно мощность более 400 МВт на частоте 2856 МГц и более 100 МВт на частоте 11424 МГц. Диаметр керамики окна S диапазона составлял 84.2 мм и окна X диапазона - 26 мм. Для уменьшения вторичной эмиссии керамика покрывалась пленкой TiN толщиной 1.5 нм. Результаты испытаний сведены в таблицы 1 и 2. Для сравнения приведены так же результаты для серийного окна типа Pill-box используемого в КЕК.

Окна с рабочим типом TE_{01}

Кроме упомянутого ранее отсутствия электрического поля в самом критичном для окон месте - спая металла с керамикой, TE_{01} тип волны обладает так же малым затуханием при распространении в круглом волноводе. Это свойство является основой для высокоэффективных систем компрессии ВЧ импульса [4,5].

Использование TE_{01} типа подразумевает наличие конвертора типа волны TE_{10} прямоугольного волновода в моду TE_{01} круглого. Желательно иметь такой конвертор достаточно компактным и технологичным. Эти свойства присущи конвертору "Flower-Petal", используемый в SLAC, но он обладает высокой напряженностью электрического поля на поверхности [6]. ФИЯФ были разработаны три варианта компактных TE_{10} - TE_{01} конверторов с пониженной напряженностью поля.

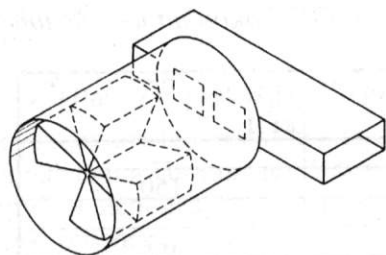


Рис. 3 Схема конвертора #1.

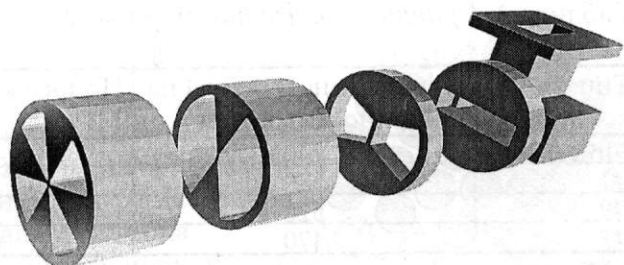


Рис. 4 Схема конвертора #2.

Конверторы первых двух типов представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Основным их элементом является протяженная диафрагма, состоящая из четырех секторных одномодовых волноводов. Диаметр образующего круглого волновода выбран таким, что мода TE_{14} является для него запредельной. Если в четырех секторных волноводах амплитуда и фаза волн совпадают, то возбуждаемая ими мода в круглом волноводе будет чистой TE_{01} . Как следует из условий симметрии все четыре секторных волновода будут возбуждаться с одинаковой амплитудой и фазой при правильной их ориентации относительно возбуждающей моды с четным числом азимутальных вариаций. В конверторе #1 требуемая мода возбуждается с помощью двух щелей в узкой стенке прямоугольного волновода, расположенных на расстоянии половины длины волны друг от друга. В конверторе #2 требуемый тип генерирует волна TE_{20} прямоугольного волновода, которая образуется поворотом в Е плоскости входного волновода.

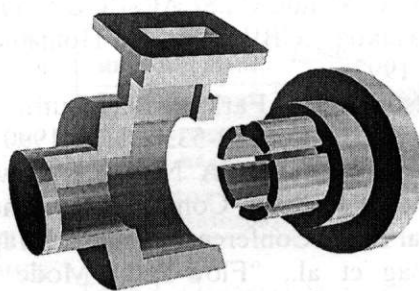
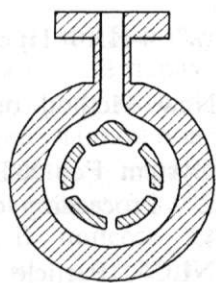


Рис. 5. Схема конвертора #3.

Принцип работы конвертора #3 ясен из рис. 5. Прямоугольный волновод обхватывает в Е-плоскости круглый и связан с ним пятью щелями, которые расположены на расстоянии длины волны в прямоугольном волноводе и азимутально однородно в круглом. Можно ожидать, что щели связи будут возбуждаться с одинаковой амплитудой и фазой, и вызовут распространение в круглом волноводе TE_{01} волны.

На базе конверторов #1 и #3 были изготовлены TWC-окна, которые в ближайшее время планируется испытать в КЕК. Результаты расчетов максимального электрического поля на поверхности и холодных измерений конверторов и TWC окон на их основе приведены в таблице 3. Экспериментально измеренная энергетическая чистота получаемого TE_{01} типа составляет для всех конверторов более 99%.

Таблица 3. Сравнительные параметры конверторов и TWC окон на их основе

Тип конвертор	Напряженность поля на поверхности*, кВ/см	Полоса конвертора**, МГц	Полоса TWC окна**, кГц
Flower-	740	--	--
#1	680	390	150
#2	520	270	--
#3	470	460	65

* Максимальная напряженность электрического поля на поверхности при 100 МВт пропускаемой мощности

** Полоса по КСВ < 1.2

Заключение

Изготовлены и испытаны TWC-окна S- и X-диапазонов. Достигнут уровень пропускаемой мощности более 400 МВт / 2 мкс для окон S-диапазона и 80 МВт / 0.2 мкс для X-диапазона, что заметно превышает параметры окон Pill-box типа. Разработано три варианта компактных TE_{10} - TE_{01} конверторов. На основе двух из них изготовлены TWC-окна X-диапазона с рабочим типом TE_{01} , которые планируется испытать в ближайшее время.

Литература

- [1] Y.Otake, S.Tokumoto and H.Mizuno, "Design and High-power Test of a TE_{11} -mode X-band RF Window with Taper Transitions", КЕК Preprint 95-30, May 1995.
- [2] W.R.Fowkes, R.S.Callin, S.G.Tantawi, E.L.Wright, "Reduced field $TE(01)$ X-Band Traveling Wave Window", SLAC-PUB-6777, Mar. 1995.
- [3] С.Ю. Казаков, "СВЧ Окно На Повышенную Мощность", ФИЯФ Препринт 92-2, Протвино, 1992.
- [4] P.B.Wilson, Z.D.Farkas, R.D.Ruth, "SLED II: A New Method of RF Pulse Compression", SLAC-PUB-5330, Sept. 1990
- [5] H.Mizuno, Y.Otake. "A New RF Power Distribution System For X-Band Linac, Equivalent to RF Pulse Compression Scheme of Factor 2", Proceeding of the 1994 International Linac Conference, Tsukuba, Japan, August 1994.
- [6] H.A.Hoag et al., "Flow-Petal Mode Converter for NLC", Particle Accelerator Conference, Washington, DC, 1993.