

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)

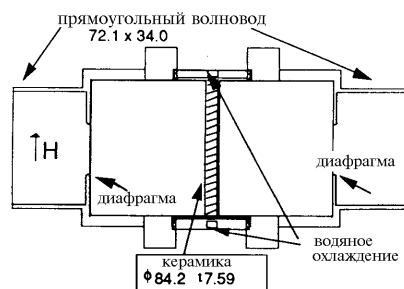
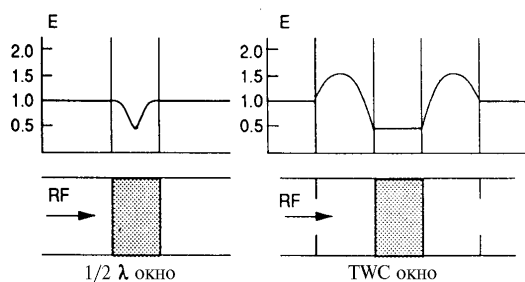


Рис. 1. Принцип работы TWC окна.

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 $1/\sqrt[3]{\epsilon} \approx 0.57$ 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" (Фрязино) (>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

N o	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.

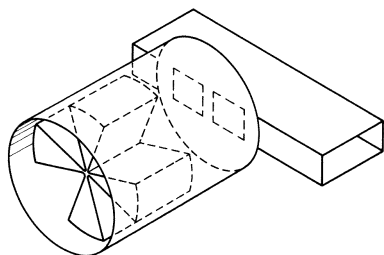


Рис. 3 Схема конвертора #1.

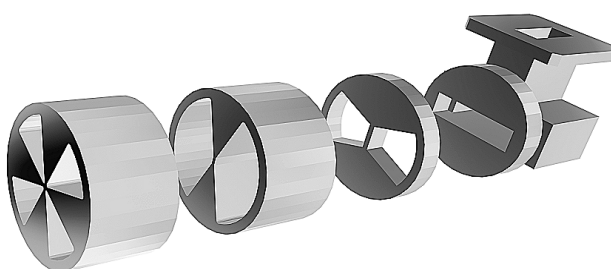


Рис. 4 Схема конвертора #2.

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 E плоскости входного волновода.

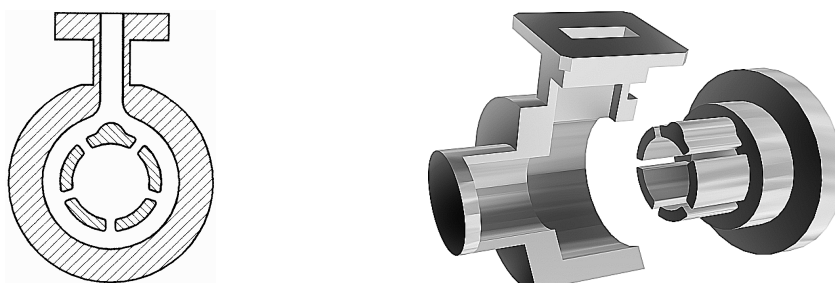


Рис. 5 . Схема конвертора #3.

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.Noag et al., "Flow-Petal Mode Converter for NLC", Particle Accelerator Conference, Washington, DC, 1993.