

Белугин В.М.¹, Мартыненко М.А.²,
Прокофьев Б.В.², Ярмоленко М.И.²

¹АО «Московский радиотехнический институт РАН»

²АО «НПП «Торий»

Волноводные окна баночного типа для широкополосных ЭВП СВЧ

Представлен обзор современных достижений в области разработки волноводных окон баночного типа с беспаразитной полосой пропускания до 55% для мощных широкополосных электровакуумных приборов СВЧ.

Ключевые слова: окно баночного типа, широкополосность, симметричное и асимметричное волноводное окно, гермофланец, короткий волноводный трансформатор сопротивлений.

Изобретенная в 50-х годах прошлого века конструкция баночного окна [1] в настоящее время широко используется во всем мире разработчиками мощных ЭВП СВЧ. Повсеместное признание этот тип волноводных окон получил благодаря высокой технологичности и возможности получения широкой (до 40-50%) полосы пропускания, достигаемой при оптимизации размеров узла.

В классической конструкции окна, представленной на рис. 1, для получения наилучшего согласования предлагалось выбирать волновые сопротивления прямоугольного и круглого волноводов равными друг другу. Это означает, что при применении отечественных стандартных прямоугольных волноводов с отношением размеров стенок, заключенным в пределах $2,0 \leq a/b \leq 2,33$, отношение диаметра круглого волновода к диагонали прямоугольного волновода должно лежать в пределах $1,05 \leq D/\sqrt{a^2 + b^2} \leq 1,08$.

В том виде, как она была впервые предложена, классическая конструкция баночного окна до сих пор используется в разработках электровакуумных СВЧ приборов. Ее пропускные способности, а также составляющая не более 15% полоса частот, свободная от паразитных резонансов, оказываются достаточными для большинства приборов. Тем не менее, порой возникает потребность в волноводных окнах с более широкой беспаразитной полосой. Так, рабочие полосы частот т. н. «прозрачных» ламп бегущей волны, спиральных ЛБВ с волноводным выводом энергии и плазменно-пучковых ЛБВ в настоящее время достигают 25-40% при средней или непрерывной выходной мощности от сотен Вт до десятков кВт. При таких уровнях мощности паразитные резонансы окна в рабочей полосе частот могут представлять реальную опасность для работоспособности прибора.

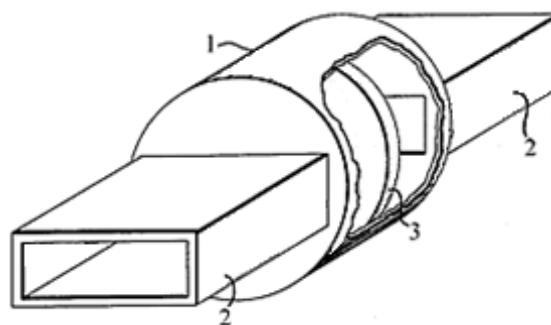


Рис. 1. Простейшее баночное окно.
1 – отрезок круглого волновода; 2 – прямоугольные волноводы; 3 – диэлектрическая перегородка.

Наиболее эффективным способом расширения полосы частот, свободной от паразитных видов колебаний, является уменьшение объема диэлектрической перегородки, отделяющей вакуумную часть прибора от атмосферы. В результате повышаются резонансные частоты видов колебаний диэлектрического резонатора и сокращается число видов, попадающих в полосу пропускания окна. Уменьшение толщины перегородки ограничивается величиной давления газа, заполняющего волноводный тракт со стороны нагрузки, а также требованиями к надежности металлодиэлектрического спая. В то же время, принципиально не меняя конструкцию, диаметр круглого волновода можно уменьшить, применив индуктивные или резонансные диафрагмы на стыке с прямоугольными волноводами (рис. 2). При этом оказалось, что в полосе частот, достигающей в отдельных случаях 50% от полосы пропускания, диаметр круглого волновода может быть запредельным для всех типов волн, включая основную волну H_{11} . Окно в этом случае работает как проходной диэлектрический резонатор, нагруженный на прямоугольные волноводы. Благодаря уменьшению диаметра круглого волновода максимальная беспаразитная полоса пропускания диафрагмированных окон оказывается более широкой, чем у баночных окон классической конструкции, и может достигать 25-30%.

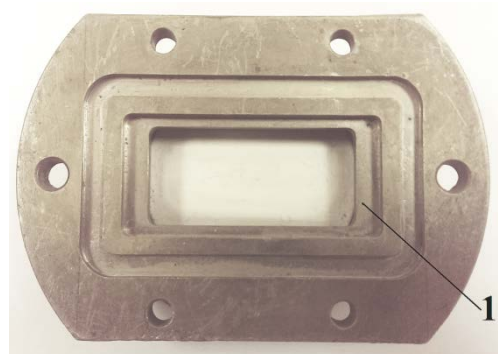


Рис. 2. Диафрагмированное баночное окно. Вид со стороны присоединительного фланца. 1 – резонансная диафрагма.

Беспаразитную полосу пропускания, достигающую 45%, впервые удалось получить в баночном окне фирмы Thomson-CSF [2], разработанном для широкополосной ЛБВ (рис. 3). Для получения такой полосы пришлось пойти на одновременное уменьшение диаметра круглого волновода, составляющего 0,8 от ширины широкой стенки волновода, и уменьшение толщины диэлектрической перегородки в 1,5-2 раза по сравнению с обычным баночным окном. Для расширения полосы пропускания окна используются небольшие емкостные четвертьволновые ступеньки в прямоугольных волноводах. Серьезными недостатками этого окна является малая толщина диэлектрической перегородки, снижающая запас прочности окна в отношении перепада давлений, и, в сочетании с применением короткого отрезка круглого волновода, затрудняющая получение надежного металлокерамического соединения.

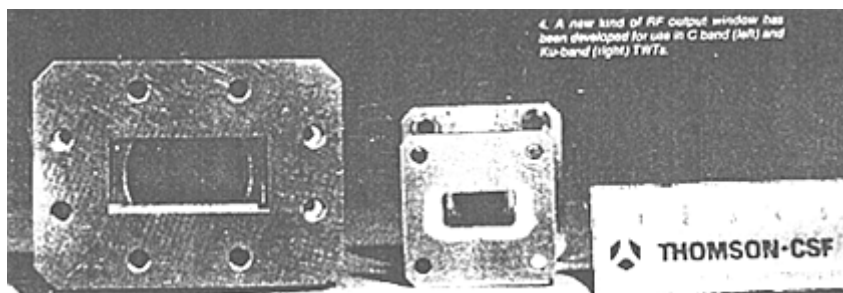


Рис. 3. Широкополосные окна фирмы Thomson-CSF (Thales) с передачей СВЧ энергии на затухающих типах волн. Фото из журнала MSN &CT[3].

Отметим все же, что эффект резкого уменьшения длины баночного окна при использовании круглого волновода уменьшенного сечения позволяет создавать окна-герметизаторы волноводных трактов, имеющие вид относительно тонких волноводных фланцев с запаянным в них диэлектрическим диском. Такая «банка-фланец» вставляется в разрыв волноводного тракта и позволяет герметизировать часть тракта, защищая ее от вредного воздействия окружающей среды и/или повысить ее электрическую прочность путем заполнения волновода электрически прочным газом. Пример такой конструкции, разработанной во ФГУП «НПП «Торий», показан на рис. 4.



Рис. 4. Гермофланец с запаянным в него керамическим диском.

Значительный прогресс в исследовании и разработке высокотехнологичных и широкополосных баночных окон был достигнут благодаря созданию в 80-90-х годах математических моделей и программ [4,5], позволивших проводить оперативный анализ и оптимизацию относительно сложных конструкций этих устройств. Таким образом были резко сокращены сроки разработки окон с требуемыми электродинамическими и технологическими характеристиками.

Первые же проведенные исследования показали возможность создания высокотехнологичных баночных окон с беспаразитной полосой пропускания до 55% путем оптимизации всех геометрических размеров конструкции, включая поперечные размеры прямоугольных волноводов [6]. Так, оптимальная толщина керамического диска и длина отрезка круглого волновода оказались примерно в 2 раза большими, чем в конструкции окна фирмы Thomson-CSF. Впервые такое окно было применено в разработанной на предприятии НПП «Исток» спиральной ЛБВ с рабочей полосой частот, равной 40%.

Недостатком «полностью оптимизированного» окна оказались нестандартные размеры прямоугольных волноводов, потребовавшие его подключения к внешнему тракту через широкополосный волноводный переход. Известные в то время широкополосные трансформаторы сопротивлений чебышевского типа на основе четвертьволновых отрезков линии передачи [7] оказывались слишком громоздкими. На замену им были предложены новые конструкции компактных волноводных переходов с использованием резонансных диафрагм [8], длина которых при одинаковых или лучших полосовых характеристиках оказалась в 3-4 раза меньше, чем у конструкций на основе четвертьволновых волноводных ступенек. Как правило, длина таких трансформаторов сопротивлений составляет около 0,4 от волноводной длины волны при полосе пропускания до $\approx 50\%$. Внешний вид одного из компактных широкополосных переходов, изготовленного во ФГУП «МРТИ РАН», представлен на рис. 5.

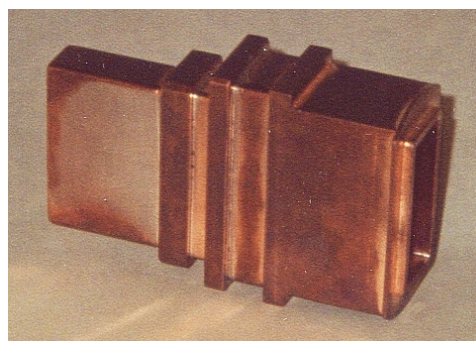


Рис. 5. Компактный широкополосный двухступенчатый переход с резонансной диафрагмой.

Переход имеет две ступеньки и одну резонансную диафрагму. Предложенные переходы позволяют также получить более высокое качество согласования по сравнению с плавными переходами [8]. Это делает их применение безусловно предпочтительным в «прозрачных» ЛБВ, в которых отражения на концах замедляющей системы оказывают существенное влияние на характеристики лампы и ее устойчивость к самовозбуждению.

Наилучшие результаты, однако, были достигнуты путем встраивания асимметричного баночного окна в волноводный переход. Подобные конструкции оказываются наиболее

компактными и обеспечивают возможность получения широкополосной связи с замедляющей системой ЛБВ без применения дополнительных согласующих устройств. Простейшие конструкции асимметричных окон показаны на рис. 6(1,2). В первой конструкции входной и выходной волноводы имеют стандартные сечения $48 \times 24 \text{ мм}^2$ и $58 \times 25 \text{ мм}^2$.

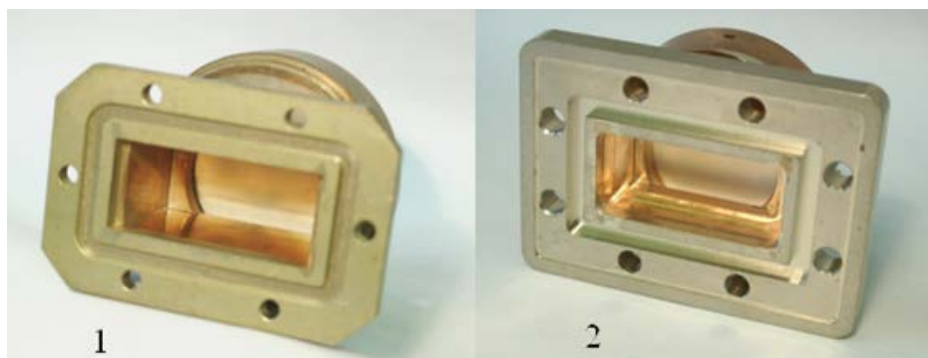


Рис. 6. Широкополосные асимметричные окна. 1 – окно с индуктивной ступенькой в выходном волноводе; 2 – окно с короткой ступенькой в выходном волноводе.

Второе окно предназначено для работы с волноводным трактом сечением $47,55 \times 22,15 \text{ мм}^2$ (волновод WR-187). Для присоединения к прибору используется отрезок волновода сечением $40 \times 17,5 \text{ мм}^2$. Вместо волноводной ступеньки в этом окне применена толстая (толщиной около 5 мм) резонансная диафрагма. Беспаразитные полосы пропускания обоих окон достигают 35-37%. Окна разработаны во ФГУП «НПП «Торий».

При необходимости получения более широкой беспаразитной полосы пропускания и большего перепада волновых сопротивлений в конструкцию асимметричного баночного окна вводится еще одна волноводная ступенька, к которой припаян присоединительный фланец (рис. 7). Окно использовано в лампе бегущей волны, разработанной во ФГУП «МРТИ РАН».

Последующие исследования показали возможность создания еще более компактной конструкции волноводного окна, не уступающей по величине беспаразитной полосы пропускания окну, изображенному на рис. 7. Результаты расчета коэффициента отражения от такого окна по программе H-WINDOW (кривая 1) и разработанной в ЛЭТИ под руководством А.Д. Григорьева трехмерной программе MEMFIS [9] (кривая 2) представлены на графике рис. 8. На этом же рисунке схематически изображена конструкция окна, в которой одна из волноводных ступенек заменена толстой диафрагмой. Еще одна толстая индуктивная диафрагма установлена вблизи стыка волноводов в вакуумной части окна. По габаритам подобное асимметричное окно соизмеримо с обычными баночными окнами.



Рис. 7. Асимметричное баночное окно, встроенное в волноводный переход. Беспаразитная полоса пропускания окна составляет около 50% по уровню КСВН $\leq 1,2$.

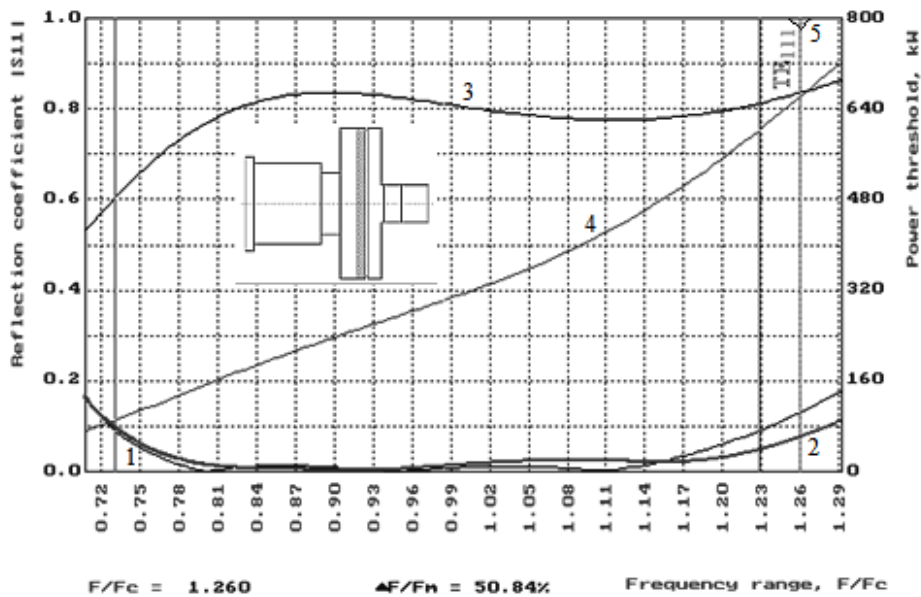


Рис. 8. Короткое асимметричное окно с беспаразитной полосой пропускания около 50%. Кривые 3 и 4 – пороговые мощности термомеханического разрушения и мультипакторного разряда. Кривая 5 – резонанс на виде колебаний H_{111} («запертая» поляризация основной волны H_{11}).

Таким образом, в процессе проведенных исследований были разработаны и внедрены в широкополосные электровакуумные приборы СВЧ простые, технологичные и компактные конструкции волноводных окон баночного типа с беспаразитной полосой пропускания, достигающей 50% и превышающей рабочие полосы частот стандартных прямоугольных волноводов. Следует также отметить, что предложенные широкополосные окна могут применяться и в некоторых клистронах с целью предотвращения генерации приборов за счет снижения внешней добротности выходного резонатора на нежелательном виде колебаний.

Библиографический список

1. Symons R.S., Schoennauer A. E. Sealed wave guide window: Pat. USA No.2958834; заявл. June 13 1956; опубл. Nov.1 1960. Cl.333-98.
2. Kuntzman J.-C., Tikes J. Fenêtre circulaire pour guide d'onde hyperfréquence: Pat. EP 0 153 541; Cl. H01P 1/08. заявл. 17.01.84 FR 8400664; опубл. 20.09.89. Bulletin 89/38.
3. Kuntzman J.-C., Smith B.L., Tikes J. Wideband, high-power TWTs designed for telecommunications // MSN & CT. – March 1986. – No.3.
4. Прокофьев Б.В. Расчёт согласования диафрагмированных баночных окон // Электронная техника. – Сер.1. Электроника СВЧ. – 1985. – Вып.2(374). – С.37,38.
5. Прокофьев Б.В. Расчёт матриц рассеяния баночных окон сложной конфигурации для волноводных вводов (выводов) энергии ЭВП СВЧ // Электронная техника. – Сер.1. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып.3(437). – С.4-9.
6. Прокофьев Б.В. Баночное окно ввода и/или вывода энергии СВЧ: а.с. СССР №1628762; заявл. 6.10.88; опубл. 15.10.90. Кл.Н01 j 23/36. Бюл. «Изобретения». – 1993. – №37-38.
7. Фельдштейн А.П., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники // Советское радио. – М. – 1967.
8. Прокофьев Б.В., Мартыненко М.А. Короткие волноводные трансформаторы сопротивлений // Журнал радиоэлектроники. – №11. – 2013 г. – [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov13/7/text.pdf>
9. Grigoriev A.D., Salimov R.V., Tikhonov R.I. Modeling of Complicated Microwave Devices by RFS Code // Conf. Proc.: 2012 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Device Engineering, APEDE 2012. – 2012. – С.175-182.