

Электродинамические характеристики и тепловой режим баночного окна вывода энергии ($TE_{11}+TM_{11}$)

Е. В. Медянкова, Е.А. Богомолова, А.Н. Савин

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: Приведены результаты расчетов электродинамических характеристик и теплового режима перспективной конструкции вакуумно-плотного вывода энергии. Проведено сравнение теплорассеивающей способности перспективной конструкции вакуумно-плотного вывода энергии при использовании различных диэлектриков.

Ключевые слова: W -диапазон, окно баночного типа, типы волн ($TE_{11}+TM_{11}$), выходная мощность 100 Вт.

1. Введение

Основная тенденция развития электровакуумных приборов (ЭВП) – продвижение вверх по частоте [1-4]. С увеличением рабочей частоты прибора возникает много проблем, особенно с тепловым режимом. Для надежной работы всех узлов ЭВП разработчики модернизируют их конструкции, а также рассматривают возможность применения материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, например, поликристаллический (CVD) алмаз.

Одним из важнейших функциональных узлов ЭВП является вакуумно-плотное окно вывода СВЧ-энергии. Данный узел должен обеспечивать пропускание больших уровней импульсных и непрерывных СВЧ-мощностей в широкой полосе частот. При разработке выводов энергии в W -диапазоне особенно обостряются проблемы, связанные с обеспечением технологичности конструкции, ее электрической и тепломеханической прочностей.

В представленной работе проведено моделирование баночного окна круглого сечения, формирующего электрическое поле на поверхности керамического диска волнами ($TE_{11}+ TM_{11}$). Рассчитаны электродинамические характеристики (ЭДХ) и тепловой режим перспективной конструкции в составе работы мощного ЭВП (на примере ЛБВ) W -диапазона с выходной непрерывной мощностью 100 Вт.

2. Конструкция баночного окна вывода энергии ($TE_{11}+TM_{11}$)

Разрабатываемая конструкция вывода энергии ЭВП W -диапазона в виде баночного окна с вакуумно-плотной перегородкой из диэлектрика, приведена на рис.1. Баночное окно вывода СВЧ-энергии представляет собой отрезок круглого волновода, в поперечной плоскости которого равноудаленно от его торцов расположен диэлектрический диск, вакуумно-плотно спаянный со стенкой отрезка круглого волновода, а также первый и второй отрезки прямоугольных волноводов, расположенные соосно с отрезком круглого волновода и присоединенные к нему с противоположных торцов, содержит дополнительные согласующие элементы на входе и выходе баночного окна, выполненные в виде усеченных конусов, в сочетании с согласующими настроечными элементами в виде индуктивных диафрагм, расположенных во входном и выходном прямоугольных волноводах (заявка на изобретение №2022131136, приоритет 30.11.2022). С целью повышения запаса

прочности в отношении перепада давлений и получения надежного металлокерамического соединения толщина керамического диска (см. табл. 1) имеет вдвое большую величину по сравнению с конструкциями, используемыми в данном диапазоне [3]. При этом для расширения полосы пропускания на входе и выходе окна используются индуктивные диафрагмы, которые компенсируют влияние на АЧХ из-за технологических допусков изготовления элементов конструкции и параметров керамического диска.

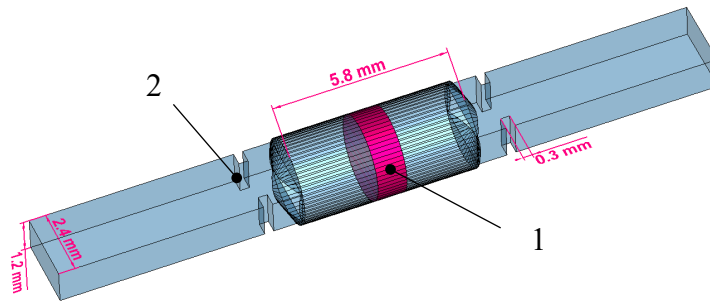


Рисунок 1. Конструкция баночного окна вывода энергии с выходом на волновод стандартного сечения 1.2×2.4 мм: 1 – диэлектрический диск, 2 – индуктивная диафрагма

Диэлектрический материал, используемый в качестве вакуумно-плотной перегородки вывода энергии, должен иметь: малую диэлектрическую проницаемость ϵ' , незначительную величину тангенса угла диэлектрических потерь ϵ'' , значительную механическую и электрическую прочности, высокую теплопроводность и термостабильность, и, при этом, хорошую технологичность обработки и пайки.

Чаще всего для изготовления вакуумно-плотных перегородок применяют материалы на основе оксида алюминия (ВК94-1) или бериллия (ВБ100), а также поликристаллический нитрид бора (BN) и поликристаллический алмаз (С) [5-7].

3. Электродинамические характеристики баночного окна вывода энергии (TE₁₁+TM₁₁)

В процессе оптимизации по обеспечению заданной частотной характеристики были минимизированы (за счёт выбора амплитуд мод (TE₁₁+TM₁₁) круглого волновода) тангенциальные компоненты электрического поля не только на краю поверхности керамического диска для снижения вероятности пробоя в области сая, но и в центральной области поверхности керамического диска для минимизации диэлектрических потерь в нём (рис. 2).

Анализ результатов моделирования электрического поля (рис.2) показал, что максимальные электрические поля, располагающиеся в области конусообразных выемок, являются незначительными. Керамический диск находится в минимуме электрического поля всего окна. Это означает, что снижаются диэлектрические потери, которые приводят к нагреву диска, и соответственно, уменьшается вероятность пробоев в нём.

График КСВН входа баночного окна с диэлектрическими дисками из рассматриваемых видов керамики в рабочей частотной области приведён на рис. 3. Параметры керамических дисков, полосы частот выбирались по уровню КСВН ≤ 1.1, диэлектрические потери в дисках и поверхностные на металлических стенках на

центральной рабочей частоте $f_0=93.8$ ГГц при выходной мощности $P_{вх}=100$ Вт даны в табл. 1.

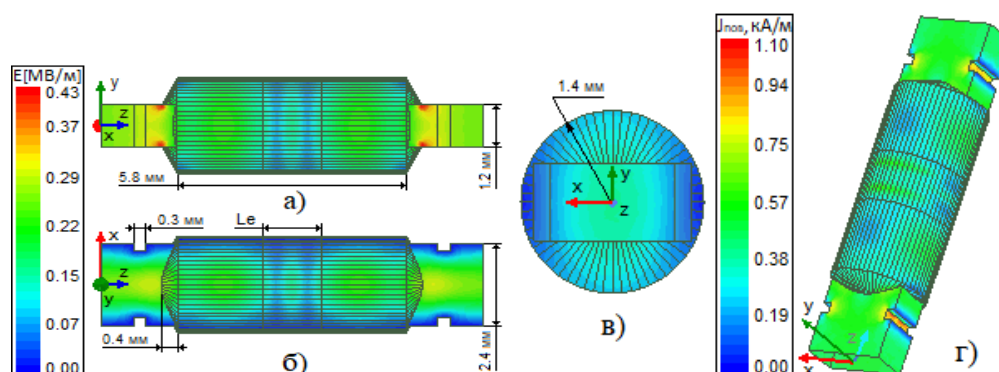


Рисунок 2. Амплитуда напряжённости электрического поля в E-плоскости (а), в H-плоскости (б) баночного окна, на поверхности изготовленного из поликристаллического нитрида бора диска (в) и поверхностных токов (г) на рабочей частоте $f_0=93.8$ ГГц при входной мощности 100 Вт

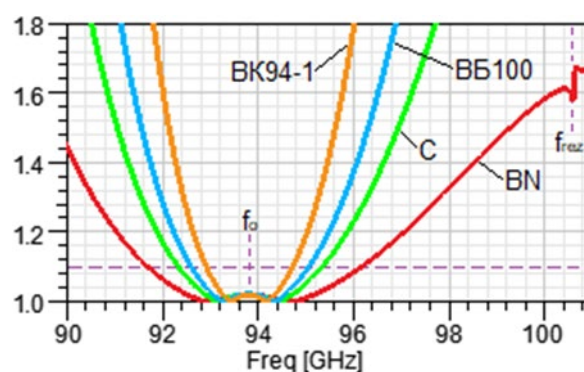


Рисунок 3. КСВН разрабатываемой конструкции баночного окна

Таблица 1. ЭДХ конструкции баночного окна

Тип диэлектрика	ϵ_r	$\tan\delta$	L_e , мм	$\Delta f/f_0$, %	$P_{д\text{ пот}}$, Вт	$P_{повнопот}$, Вт
BN	4.65	0.0003	1.5	4.71	0.226	2.89
C	5.7	0.00005	1.3	3.17	0.036	3.12
ББ100	6.7	0.0005	1.17	2.6	0.347	3.34
БК94-1	9.3	0.0015	0.962	1.9	0.989	3.81

4. Расчет теплового режима баночного окна вывода энергии ($TE_{11}+TM_{11}$)

Оценка теплового режима диэлектрического диска проводилась в 3D- программе с граничными условиями 1 рода на металлических поверхностях с тепловыделением СВЧ-мощности в 100 Вт. Требуемая АЧХ баночного окна обеспечивалась изменением толщины диэлектрического диска, положением и шириной согласующих диафрагм. На рисунке 4 представлены расчетная модель, распределение температуры и мощности потерь в диэлектрическом диске для приведённых в таблице 1 материалов.

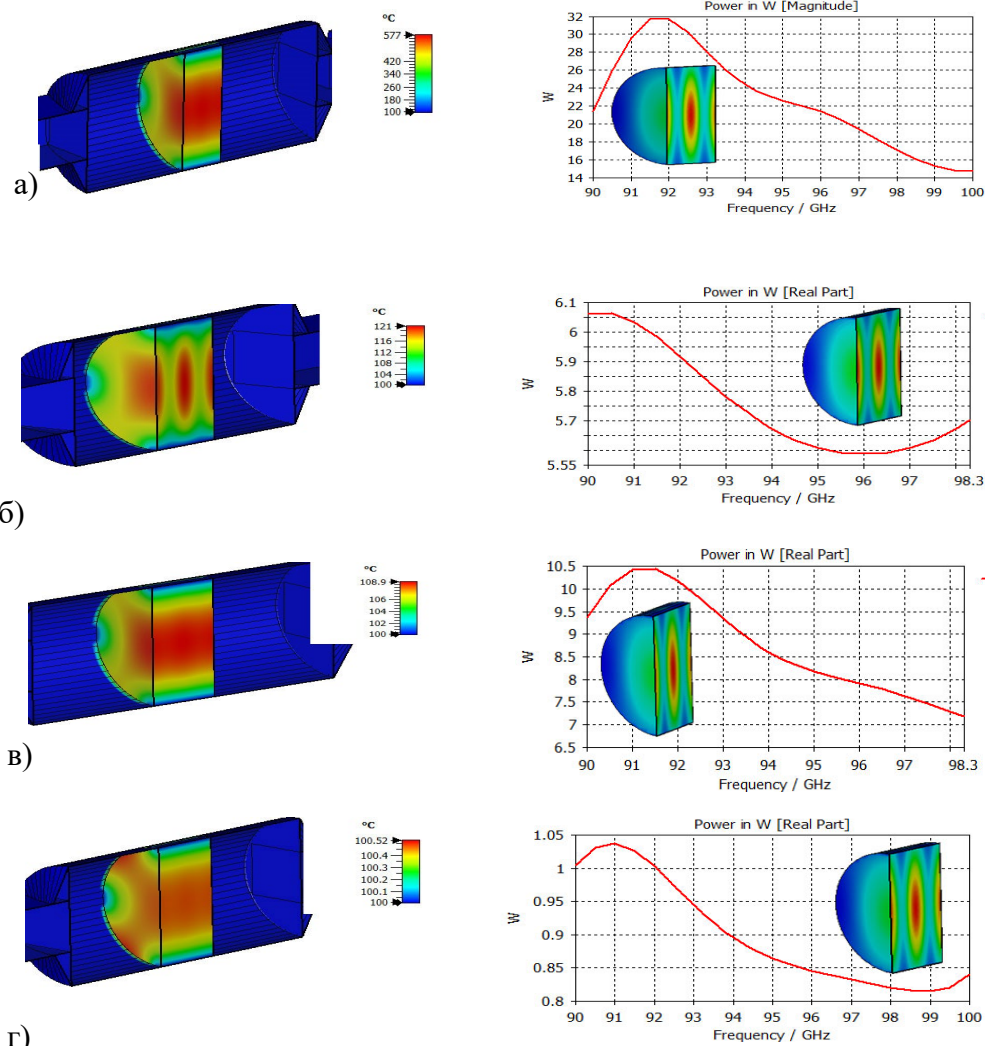


Рисунок 4. Модель и распределения температуры на частоте 94 ГГц и потерь в диэлектрическом диске в полосе прозрачности баночного окна: а) – керамика ВК94-1 толщиной 1 мм; б) – керамика CVD нитрид бора толщиной 1.5 мм; в) – керамика ВБ100 толщиной 1.17 мм; г) – керамика CVD алмаз толщиной 1.3 мм

Как показывает анализ полученных результатов, керамика ВК94-1 имеет существенные недостатки, связанные с высоким значением ϵ'' и низким коэффициентом теплопроводности, что приводит к перегреву в центральной части диска, а значительное ϵ' приводит также к сужению полосы пропускания баночного окна и к усложнению его технологии сборки из-за малой толщины диска.

CVD алмаз и керамика ВБ100 в качестве материала вакуумно-плотного диска обладают хорошими электродинамическими, тепловыми и прочностными характеристиками, а также технологичны. Однако при всех достоинствах первый материал имеет очень высокую стоимость, а второй – токсичен при обработке, что ограничивает их использование при серийном производстве.

CVD нитрид бора обладает оптимальным набором параметров при использовании в качестве материала диэлектрического диска.

3. Заключение

В результате проведенного расчета ЭДХ и теплового режима конструкции вывода СВЧ-энергии для ЭВП W-диапазона можно сделать вывод, что использование

керамики из нитрида бора (BN) обеспечивает рабочую полосу прибора 4.71 %, мощности диэлектрических потерь и поверхностных составили 0,226 Вт и 2,89 Вт соответственно. Полученные результаты соответствуют надежной работе узла ЭВП, при этом материал BN является доступным и безопасным.

Список литературы

1. Frederic Andre et al. Technology, Assembly, and Test of a W-band TWT for New 5 G High-Capacity Networks //IEEE Transactions on electron devices, vol.67, NO.7, July 2020, pp.2919-2924
2. Glyavin M.Y, Idehara T., Sabchevski S.P. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and highpower THz technologies // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. Vol. 5. No. 5. P. 788-797.
3. Dayton J.A., Kory C.L., Mearini G.T. Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2015). April 27-29, 2015, Beijing, China.
4. А.В. Галдецкий, Л.А. Сапрынская, И.М. Соколова, И.П. Натура, А.И. Корчагин Мощная ЛБВ миллиметрового диапазона с прецизионной технологией изготовления согласующих элементов конструкции// Радиотехника. – М: ЗАО «Издательство Радиотехника», 2019. – Том 83. № 7(10). – С 73-82. – ISSN 0033-8486.
5. Duo Xu, Wei Shao et al. A semi-analytic numerical algorithm of diamond pillbox windows for terahertz vacuum electron device applications//IEEE Electron Device Letters PP(99):1-1 DOI:10.1109/LED.2020.3045531
6. Прокофьев Б.В. и др. Волноводные окна баночного типа для широкополосных ЭВП СВЧ//Материалы конференции Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», стр. 106-110
7. www.gycom.ru
8. Прокофьев Б.В. Выбор диэлектрических материалов для применения в выводах энергии мощных ЭВП СВЧ //Сборник статей VII Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 29 мая – 1 июня 2018г., г. Санкт-Петербург, стр. 176-181
9. Г.В. Бакунин, А.А. Батраков, А.В. Галдецкий, И.П. Натура, Е.А. Ракова, Л.А. Сапрынская, И.М. Соколова, И.П. Чепурных Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона// Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 1(524) – 2015, стр. 54-67.
10. Галдецкий А.В., Савин А.Н., Ключников Н.А. Вывод энергии баночного типа сверхмощного клистрона S-диапазона // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 4(547) – 2020, стр. 64-76.