

Поглотитель энергии для СВЧ-приборов

Леонид ЛЯПИН
Мargarита ПАВЛОВА
Сергей СЕМЕНЮК

Рассмотрена возможность экспериментального выбора материалов, конструкции и технологии изготовления надежных металлокерамических узлов (МКУ) с поглощающей СВЧ-энергию керамикой типа КТ-30. По результатам проведенных испытаний определена оптимизированная конструкция поглощающего узла нетипового вида.

Поглотители СВЧ-энергии — неотъемлемая часть преобладающего большинства электровакуумных, радиоэлектронных и других приборов и устройств [1]. Их назначение чрезвычайно разнообразно: высокочастотные развязки, поглотители паразитных видов колебаний, согласующие нагрузки и др.

Среди множества известных поглощающих СВЧ-энергию материалов наиболее перспективны так называемые объемные поглотители. В частности, широкое применение нашел материал типа полупроводник-диэлектрик марки КТ-30 [2]. Это керамический материал на основе оксида алюминия, в котором добавка двуокиси титана обеспечивает необходимую электропроводимость, диэлектрические потери и поглощающие свойства спеченной монолитной керамики.

Поглотитель из КТ-30 имеет комплекс необходимых технических свойств. Он механически прочный, технологичный, со стабильными электрическими характеристиками (табл. 1). В КТ-30 основной поглощающей СВЧ-энергию фазой является полупроводниковое соединение Ti_3O_5 , которое образуется

при восстановлении оксида TiO_2 при изготовлении, в процессе обжига керамики в водороде. Кроме того, материал вакуумно-плотный (герметичный), с низким уровнем газовой выделенности (при $900\text{ }^\circ\text{C}$ $3,0\text{ мм рт. ст. /см}^2$), практически не содержит стеклофазы, а остаточная закрытая пористость не превышает 5%.

Поглощающие свойства керамики КТ-30 контролируются посредством измерения так называемого коэффициента ослабления, по сути являющегося коэффициентом затухания [3]. Электромагнитная волна проходит через слой поглощающего материала и ослабляется пропорционально значениям ϵ и $tg\delta$. Для КТ-30 коэффициент ослабления составляет 16–24 дБ, тогда как для многих других поглощающих материалов он не превышает 12 дБ. Поглощающий энергию материал КТ-30 в приборах и устройствах успешно применяется в виде разнообразных по конструкции и назначению металлокерамических узлов, получаемых, главным образом, способами пайки, например с предварительной металлизацией керамики [4]. При этом надежность соединений в МКУ зависит от многих конструктивных и технологических факторов.

На рис. 1 показана зависимость механической прочности при статическом изгибе соединений керамики КТ-30, металлизированной по толстопленочной технологии пастой типа ПСТМ-1, с конструкционными металлами и сплавами от толщины металлической прокладки [5]. Пайка производилась твердыми припоями — ПСр-72В или ПЗлМ35 (при пайке с медью). Для соединений керамики КТ-30 с медью при высоких значениях исходной прочности характерно снижение прочности с ростом толщины медной прокладки. Это падение прочности можно объяснить увеличением с ростом толщины прокладки остаточных напряжений в соединении из-за большого различия в температурных коэффициентах линейного расширения материалов (ТКЛР).

Существенную роль при получении надежных металлокерамических узлов с керамикой КТ-30 играет конструирование и расчет вероятного напряженного состояния МКУ. Их цель — получить узлы с минимальными остаточными механическими напряжениями, высоким запасом надежности при последующей эксплуатации МКУ в приборах и устройствах. Одним из вариантов оптимальной конструкции узлов считается такая, в которой соединены материалы с близкими ТКЛР. Это связано с появлением минимальных остаточных механических напряжений в узлах после пайки. Однако не редки случаи, когда требуется найти компромиссное решение при выборе конструкции и материалов, чтобы получить надежные узлы, наиболее полно соответствующие особенностям их функционального назначения в электронных изделиях [6].

На рис. 2 показан экспериментальный макет одного из таких МКУ нестандартной и неоптимальной конструкции, которая представляет собой металлическое основание и соединенные с ним торцами поглощающие керамические цилиндры из КТ-30. Такая конструкция не поддается расчету и определению оптимальных соотношений геометрических размеров конструктивных элементов (одно из необходимых условий надежности узла). Следовательно, выбор — за экспери-

Таблица 1. Характеристики поглощающего материала КТ-30

Качественный химический состав	Параметры					
	Прочность на изгиб, МПа	Плотность, г/см ³	ТКЛР 10^{-7} , 1/°C	Теплопроводность, Вт/м·K	ϵ при частоте 10 ГГц	$tg\delta \times 10^{-4}$ при 20 °C и частоте 10 ГГц
Al_2O_3, TiO_2, MgO	300–350	4	65–78	5	25–40	0,3–0,4

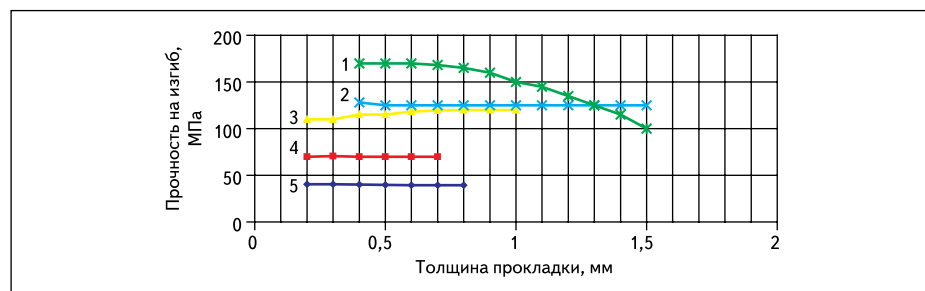


Рис. 1. Зависимость механической прочности соединений керамики КТ-30 с металлами и сплавами от толщины металлической прокладки: 1 — Cu; 2 — псевдосплав МД15НП; 3 — ковар 29НК; 4 — 42НА-ВН; 5 — Mo

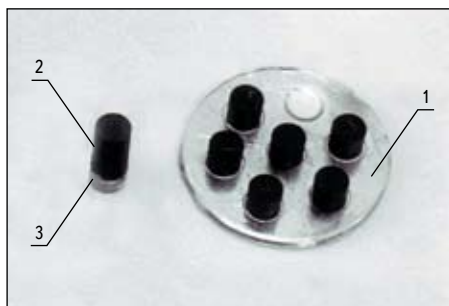


Рис. 2. Макет экспериментального МКУ: 1 — основание; 2 — поглотитель из КТ-30; 3 — молибден

ментальным подбором оптимальной конструкции и технологии изготовления, а также опытным определением запаса надежности и условий безопасной работы конкретного узла в электронном изделии.

Необходимость максимального отвода тепла от керамики в процессе работы МКУ, например, в аппаратуре спутниковой связи, потребовала применения в основании узла высокотеплопроводной конструкционной меди. При этом ее температурный коэффициент линейного расширения примерно в 3,5 раза больше, чем у поглотителя КТ-30. В представленном варианте МКУ торцевой конструкции с односторонними соединениями КТ-30 с медью и большим различием по ТКЛР соединяемых материалов неизбежно появление после пайки значительных по величине остаточных механических напряжений. Наиболее опасные из них — изгибающие напряжения — могут превысить как предел текучести конструкционного металла, так и предел прочности керамики и даже привести к ее разрушению. А с увеличением толщины металла опасные изгибающие напряжения возрастают.

Для представленной конструкции МКУ уменьшить величину напряжений можно с помощью конструкционного металла и припоя, обладающих высокой пластичностью и низким пределом текучести (рис. 3) [7].

При охлаждении спаянного узла уменьшение остаточных напряжений происходит в основном за счет пластичности меди и в значительной степени — за счет релаксации напряжений в пластичном припое. МКУ, в котором имеются десятки соединений поглотителя с металлом, должен по услови-

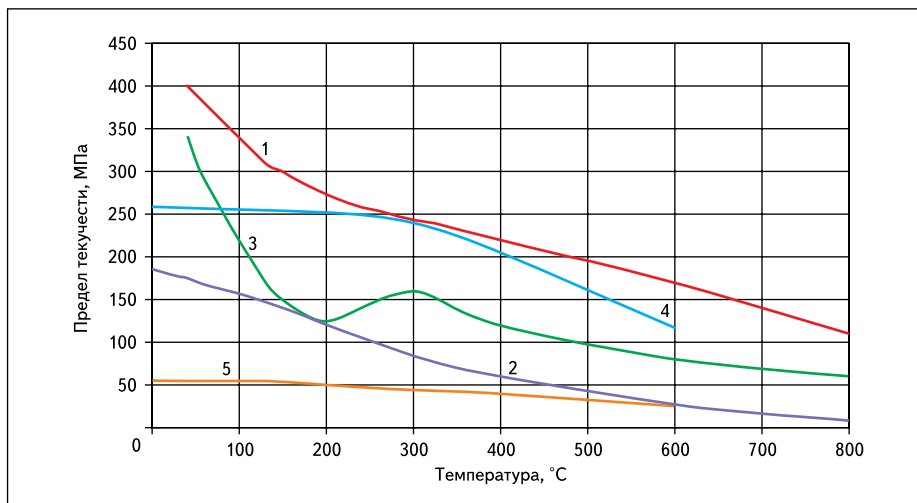


Рис. 3. Зависимость предела текучести от температуры для металлов: 1 — 29НЖ; 2 — Cu; 3 — Mo; 4 — ПСr72В (толщина 50 мкм); 5 — Cu (50 мкм)

ям эксплуатации выдержать без потери термомеханической прочности и поглощающих свойств керамики следующие испытания:

- охлаждение струей жидкого азота керамики в течение не менее 10 мин при одновременном подогреве медного основания на воздухе до 300...350 °С;
- периодические нагревы в водороде до температуры 550...600 °С с выдержкой 5 мин и быстрым охлаждением со скоростью не менее 100 °С/мин.

В исследованиях использовались цилиндрические детали из КТ-30 с диаметром и высотой 7 мм. Все поверхности обработаны шлифовкой по 7–8 классу чистоты с последующей финишной очисткой. Одна из торцевых плоскостей предварительно металлизировалась пастой типа ПСтМ1. На рис. 4 и в таблице 2 приведены результаты выбора конструктивного решения МКУ и проведенных испытаний макетов — узлов экспериментальных конструкций (рис. 2).

Пайку МКУ проводили в среде остро осушенного сетевого водорода твердым припоем ПСr72В при температуре 800...830 °С и выдержке до 1,5 мин. Для сравнения исследовались образцы соединений, изготовленных способом термореактивной (активной) пайки в вакууме не хуже $1,33 \times 10^{-3}$ Па [5] припоем на основе меди, содержащим до 3 вес. % титана.

Таблица 2. Результаты испытаний макетов с КТ-30

№ макета	Время испытания на воздухе (до разрушения), мин	Количество нагревов в водороде	Характер разрушения при испытании
1	20	3	Разрушение керамики
2	40	10	Разрушение керамики
3	45	27	Без разрушения
4	50	30	Без разрушения
5*	50	3	Разрушение керамики

* Конструкция по типу макета 4. Соединение термореактивной пайкой.

Основная задача экспериментов — выбор минимально напряженной конструкции МКУ за счет использования керамического либо молибденового компенсатора толщиной 1 мм и 50 мкм соответственно. Как следует из таблицы 2, наилучшие результаты получены на узлах-макетах под номерами 3 и 4. Поэтому для дальнейшего применения выбрана конструкция 4, позволяющая фиксировать поглощающую керамику при пайке и обеспечивающая наилучший отвод тепла от керамики на медное основание по сравнению с конструкцией макета № 3.

На рис. 5 показан конкретный поглотительный узел, собранный в специальной оправке для пайки. Реальная конструкция МКУ

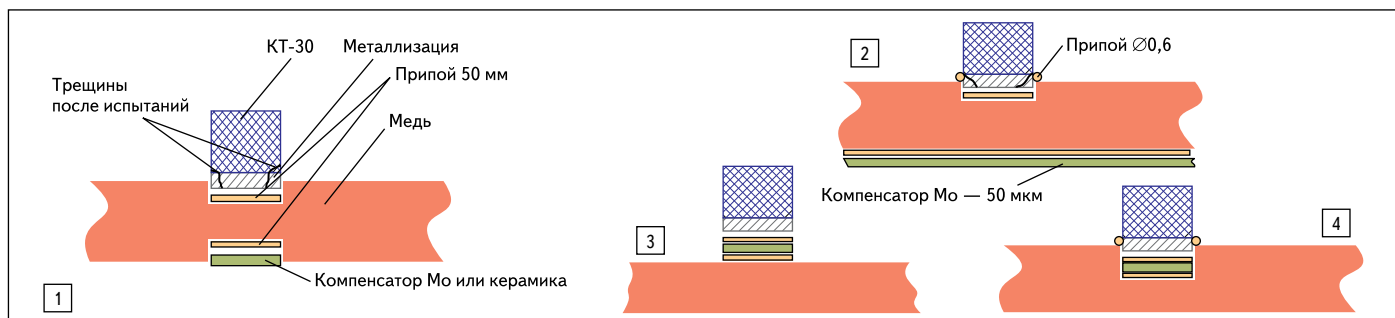


Рис. 4. Варианты конструкций макетов МКУ: 1, 2, 3, 4 — номера макетов

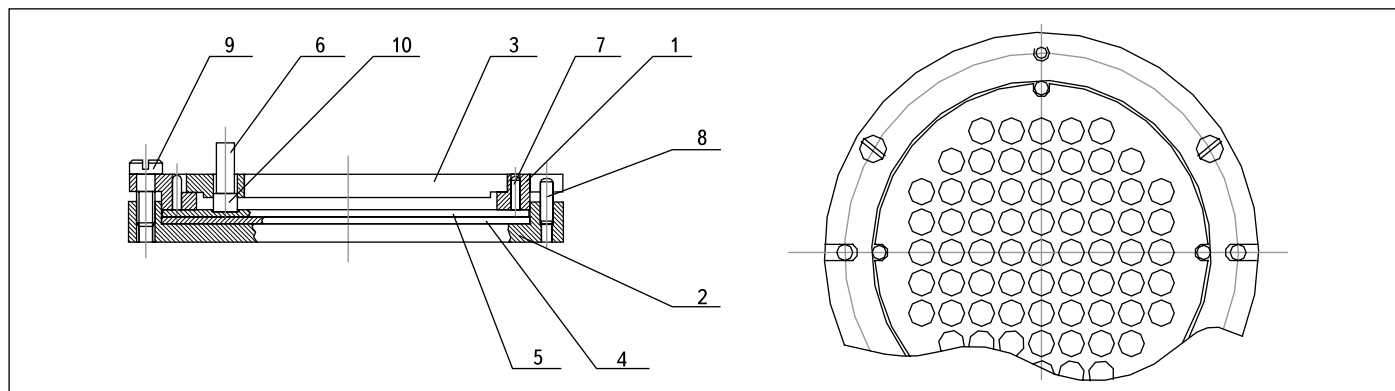


Рис. 5. МКУ в оправке для сборки и пайки:

1 — кондуктор; 2 — основание; 3 — направляющая; 4 — вкладыш; 5 — медный диск; 6 — груз; 7 — штифт $\varnothing 3$; 8 — штифт $\varnothing 4$; 9 — винт М5; 10 — элемент решетки с КТ-30

с условным названием «решетка» представляет собой металлическое (медное) основание — диск толщиной 2 мм, к которому металлизированными торцами припаиваются 69 цилиндров из керамики КТ-30 диаметром и высотой по 7 мм. В гнезда стальной оправки на основании (2) предварительно закладываются молибденовые компенсаторы толщиной 0,3 мм.

Сверху и снизу компенсаторов помещается припой ПСр72В в виде фольги толщиной 50 мкм, а затем на них устанавливаются керамические цилиндры с металлизированным основанием. С целью дополнительной, более строгой центровки керамики на нее сверху накладывается кондуктор (1), фиксирующая крышка — направляющая (3) с отверстиями под керамику. В отверстия крышки для достижения необходимого поджима и 100%-ного контакта соединяемых конструктивных элементов устанавливаются молибденовые грузы (6). Детали оправки между собой также фиксируются штифтами (7 и 8) и тремя винтами (9). По отработанному режиму пайки в такой оправке изготовлены МКУ — решетки требу-

емого качества. Они не только термомеханически надежны, но и без потери надежности допускают при необходимости проведение последующей операции шлифовки торцов керамики для получения необходимого точного размера МКУ по высоте.

В результате проведенной работы определены возможности выбора конструкции и материалов для надежных МКУ с поглощающей СВЧ-энергию керамикой КТ-30, предназначенных для электронных приборов и других изделий. На примере исследования узла, не поддающегося расчету и содержащего десятки металлокерамических соединений, получены оптимальные значения не только конструктивного, но и технологического решения. Положительные результаты работы подтверждены данными проведенных термомеханических испытаний, как макетов, так и конкретного МКУ. ■

Литература

1. Ирюшкина Л. Ф., Воробьева Н. И. Материалы для внутриламповых поглотителей СВЧ-энер-

гии. Обзор по электронной технике. Сер. 6 // Материалы. 1988.

2. Батыгин В. Н., Ефимова Н. В., Иноземцева А. В., Мазурова Л. Г. Объемные поглотители для мощных ЛБВ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1970. Вып. 11.

3. Павлова М. А., Рыбкин В. Н., Немогай И. К. Поглотители СВЧ-энергии и их соединения с металлами // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2009. Вып. 4 (503).

4. Самохина Р. А., Парилова Г. А., Решетников А. М., Пикун Н. К. Металлизация и пайка поглощающей керамики типа КТ-30 // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1974. Вып. 10.

5. Метелкин И. И., Скальская В. П., Чередица Л. Ф. Спаи КТ-30 с металлами // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 5 (429).

6. Батыгин В. Н., Метелкин И. И., Решетников А. М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. М.: Энергия, 1973.

7. Метелкин И. И., Поздеева Н. В. Влияние пластичности конструкционного металла и релаксации напряжений в припое на величину напряжений в торцевых спаих керамики с металлами // Сб. Труды конференции по электронной технике. 1966. № 1.