

## Технология соединения диэлектрических материалов с металлической арматурой СВЧ-приборов

*Р. А. Каракулов, К.С. Косарева, Ю. В. Панфилов, А.В. Шубников*  
МГТУ им Н. Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, д. 5  
e-mail: [ruslankarakulov@yandex.ru](mailto:ruslankarakulov@yandex.ru)

*В статье описана разработка тонкопленочной структуры для металлизации диэлектрических материалов перед пайкой с медными манжетами, обеспечивающей требуемую термоциклическую надежность спаев. Предложена оптимальная технология нанесения. Представлен план оптимизации толщин слоев покрытия по критерию максимальной адгезии, проведены эксперименты и проанализированы полученные результаты касательно толщин слоев.*

*The technology of the dielectric materials connection with metal fittings in the microwave devices. R.A. Karakulov, K.S. Kosareva, Y.V. Panfilov, A.V. Shubnikov. The article describes the development of thin film structure for metallization of dielectric materials before soldering with copper cuffs which ensures the desired thermal cycling reliability of the junction. The optimum application technology is presented. The plan for optimization of the coating layers thickness is considered in this article, the experiments on the optimization are performed and the results with regards to the thickness of the layers are analyzed.*

### Введение

Постоянное развитие СВЧ-техники влечёт за собой увеличение мощности энергии излучения, выводимого из приборов. Этим обусловлено применение материалов с повышенными требованиями к таким характеристикам, как тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ), теплопроводность, коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР). Поэтому широкое применение получили корундовая (22ХС) и алюмонитридная керамики (AlN), поликристаллический CVD-алмаз; исследуется возможность использования карбида кремния (SiC).

Однако ввиду большой разницы КТЛР между приведёнными материалами и конструкционными металлами СВЧ-приборов, таких как гиротроны, клистроны, ЛБВ существует проблема соединения окон вывода энергии с металлической арматурой и получения вакуумно-плотных, механически прочных, термоциклически надёжных спаев.

Целью данной работы является разработка металлизационной структуры и технологии ее нанесения на диэлектрические материалы с учетом последующей пайки с металлической арматурой.

### Разработка металлизационной структуры

В данной работе начато решение частной задачи соединения алмазного диска узла вывода энергии гиротрона с металлической арматурой путём предварительной двухсторонней металлизации алмазного диска трёхслойной тонкопленочной структурой Ti-Cu-Ni кольцевой конфигурации ( $\Phi_{\text{вн}} = 86$  мм,  $\Phi_{\text{нар}} = 96$  мм) (рис. 1).

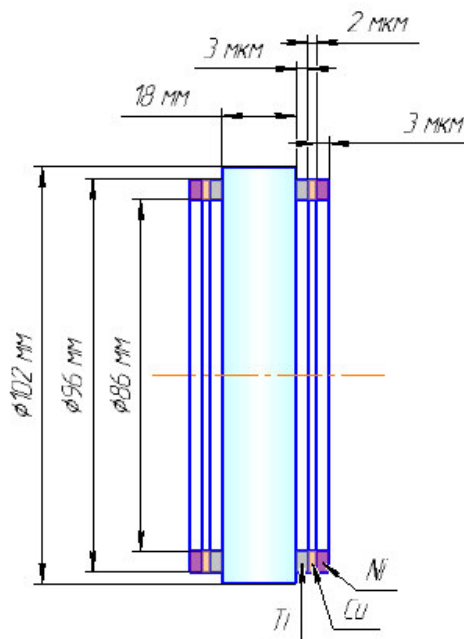


Рис. 1. Область металлизации алмазного диска.

Известно, что наилучшими адгезионными показателями обладает титан (Ti) – это первый слой металлизации. Так как манжеты под пайку медные, то целесообразно использовать припой с близким к меди коэффициентом термического расширения ПСР – 72. Температура пайки данным припоем составляет 780 °С. Наиболее прочные и герметичные соединения при данных температурах образуются между никелем и медно-серебряной эвтектикой (ПСР - 72), т. е. никель (Ni) – заключительный слой металлизации. Для образования монолитной структуры без резких границ целесообразно применить в качестве второго слоя медь (Cu), так как при температуре порядка 860 °С образуется эвтектическое соединение Ti-Cu, а на границе медь-никель твёрдый раствор CuNi. Таким образом, трёхслойная структура металлизации имеет вид Ti-Cu-Ni, считая от поверхности диэлектрика.

Температура перитектического взаимодействия титана с углеродом приблизительно равна 880 °С (при процентном количестве углерода от 2% до 35%). В то же время температура образования эвтектики Ti-Cu (при содержании титана от 8% до 98%) изменяется от 800 °С до 1000 °С. Поэтому при выборе режима термообработки важно учитывать, чтобы титан взаимодействовал и с углеродом, и с медью. Таким образом, назначенная температура отжига должна быть 800 °С при выдержке 30 мин. В качестве среды используется аргон во избежание окисления титана. При термообработке на границе между медью и никелем протекают активные диффузионные процессы. Таким образом, спроектирована трехслойная металлизационная структура Ti-Cu-Ni с рекомендуемыми режимами термообработки.

### Оптимизация тонкопленочной структуры

Для исключения образования оксида титана на границе слоёв Ti-Cu решено использовать установку с двумя магнетронами и источником ионов.

На данном этапе работы предложена модель оптимизации толщин каждого из покрытий методом полнофакторного эксперимента (ПФЭ) по критерию максимальной адгезии, так как данный параметр является одним из наиболее значимых. Предполагается, что модель имеет вид полинома первого порядка, поэтому необходимое количество экспериментов  $N = u^k = 2^3 = 8$ , где  $u$  - число уровней каждого фактора (должно быть на 1 больше порядка полинома),  $k$  - число исследуемых факторов.

Была разработана и сконструирована оснастка для проведения данного ряда экспериментов по металлизации и последующих измерений адгезионной прочности.

В качестве диапазона варьирования толщин были выбраны значения 200 нм - 1000 нм каждого слоя на основании существующих разработок по данной тематике [2], при этом, если тенденция увеличения адгезии будет приближаться к границе одного из диапазонов, то эта граница будет сдвинута в соответствующую сторону, а ПФЭ проведён заново.

Решение проблемы оптимизации толщин покрытия было начато на примере керамики 22ХС. Проведены все эксперименты по металлизации керамического (22ХС) диска, а также операция по отжигу (рис. 2) в рабочей среде аргона при температуре 850 °С в течение 30 минут.



*Рис. 2. Диск после отжига.*

После этого к отдельным площадкам припаявались медные образцы посредством припоя ПСр-72 (рис. 3). Режимы пайки: подъём температуры до 650 °С за 20 мин, выдержка 10 мин, подъём температуры до 780 °С, выдержка 2 мин.







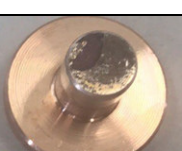

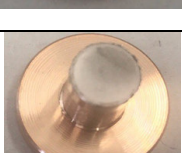
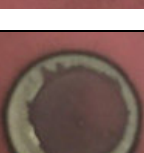
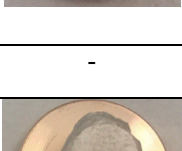

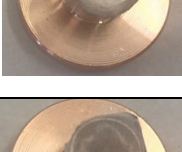



*Рис. 3. Диск с припаянными образцами.*

Измерения адгезионной прочности проводились методом отрыва с помощью прибора «Elcometer 106». Данный метод основан на измерении минимального разрывного напряжения, необходимого для отделения или разрыва покрытия в направлении, перпендикулярном поверхности с нанесенным материалом [3]. Полученные результаты представлены в таблице 1.

На всех образцах, толщина слоя титана на которых составляла 200 нм, наблюдается отслоение практически всего покрытия, что свидетельствует о большой роли первого адгезионного слоя, а так же о необходимости увеличения толщины этого слоя. Кроме того, образцы с достаточным слоем титана (1000 нм), но с минимальными слоями меди и никеля так же демонстрируют плохую адгезию, хоть она и несколько лучше адгезии образцов, о которых было сказано ранее. Наилучшей адгезией обладает образец №4, а именно, его прочность составила 7,5 МПа; в процессе измерения адгезии вместе с покрытием была оторвана и часть керамического диска. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о необходимости изменения границ варьирования толщин каждого из слоев. Решено выбрать диапазон варьирования толщин титана и меди от 1000 до 1500 нм, а для никеля оставить его прежним, так как на образцах с наилучшими показателями адгезии слой никеля составлял 200 нм.

Таблица 1 – Результаты проведения ПФЭ.

№	Толщина Ti, нм	Толщина Cu, нм	Толщина Ni, нм	Фото образца	Фото покрытия	Примечание/адгезия
1	200	200	200			Отрыв при установке адгезиметра (покрытие осталось на образце)
2	1000	200	200			Отрыв при незначительном усилии
3	200	1000	200			Разрушение соединения при остывании в камере (после пайки)
4	1000	1000	200			Максимальная прочность/7,5 МПа (частичное разрушение керамики)
5	200	200	1000			Отслоение при незначительной нагрузке/1,25 МПа (покрытие осталось на образце)
6	1000	200	1000	-	-	-
7	200	1000	1000			Разрушение соединения при остывании в камере (после пайки)
8	1000	1000	1000			Отрыв при нагрузке/2 МПа

### Выводы и заключение

В рамках данной работы была поставлена проблема получения термоциклически надежного спая дисков из диэлектрических материалов с металлической арматурой СВЧ-приборов. Предложена многослойная тонкопленочная структура Ti-Cu-Ni для операции предварительной металлизации диска. Выбрано оборудование для металлизации и отработаны режимы металлизации и дальнейшего отжига для достижения заявленной цели. Предложен план оптимизации толщин каждого из покрытий по критерию максимальной адгезии и проведены соответствующие эксперименты. Наилучшая адгезия была обнаружена на образце с толщинами 1000, 1000, 200 нм для титана, меди и никеля соответственно. Был сделан вывод о

необходимости увеличения диапазона варьирования титана и меди до 1000-1500 нм. В дальнейшем планируется продолжать эксперименты ПФЭ с целью получения оптимальных значений толщин для данной многослойной тонкопленочной структуры.

#### Литература

1. Мясников В. Е. Развитие сверхмощных длинноимпульсных и непрерывных гиротронов в диапазоне 110...170 ГГц / В. Е. Мясников и др. // Радиотехника. – 2000. - №2 – с. 67.
2. Патент РФ 2005135030/09. Способ изготовления окна вывода энергии СВЧ / Ляпин Л.В., Сытилин С.Н., Павлова М.А.; Заявл. 11.11.2005. Оpubл. 11.11.2005. Бюл. № 15.
3. «Снипов.нет» [Электронный ресурс]: ВРД 39-1.10-030-2001. Методика определения качества полимерных адгезионных внутренних покрытий после воздействия коррозионно-агрессивных сред методом автоклавного испытания – Режим доступа: [http://snipov.net/database/c\\_4294956053\\_doc\\_4293799494.html](http://snipov.net/database/c_4294956053_doc_4293799494.html) , свободный (дата обращения: 02.12.2016).

## Исследование жидкофазного магнетрона с двумя областями плазмы

*А.А. Храмова, А.Р. Матанин, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев*  
*Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*  
*e-mail: annakhramova3@gmail.com*

*В статье представлен процесс моделирования и сборки магнетрона с двумя областями плазмы с целью повышения магнитной индукции на поверхности мишени в процессе жидкофазного магнетронного распыления. Представлены варианты конструкций и собраны магнитные системы с двумя зонами распыления. Проанализирована причина отсутствия центральной плазмы при запуске и представлены способы устранения этой проблемы.*

*Investigation of the magnetron with liquid-phase target and two plasma zones. A.A. Khramova, A.R. Matanin, D.D. Vasiliev, K.M. Moiseev. The article briefly describes modelling and assembling magnetron with two plasma fields to increase magnetic induction at the magnetron surface during magnetron sputtering with liquid-phase target process. The construction variants are presented and magnet systems with two sputtering fields are assembled. The reason of central plasma field absence during launching is analyzed and methods to solve this problem by launching are presented.*

#### Введение

Для формирования тонких плёнок из различных материалов в вакууме одним из наиболее распространенных методов является магнетронное распыление [1].

Развитием метода стандартного магнетронного распыления является магнетронное распыление с жидкой мишенью. Расплавленный материал мишени обладает высоким давлением насыщенных паров, что позволяет отключить подачу инертного газа при достижении процессом режима «самораспыления», что снижает концентрацию примесей в формируемом покрытии [1, 2]. К преимуществам данного метода так же относят высокие показатели адгезии из-за наличия ионизированной фазы [3], почти 100% использование материала и низкие энергозатраты от 50 до 100 В/атом на выбивание одного атома распыляемого материала.

Одним из наиболее важных параметров процесса ЖФ магнетронного распыления является мощность разряда. Совокупность напряжения разряда, рабочего давления и индукции магнитного поля должна обеспечивать мощность разряда, необходимую для плавления медных гранул, а затем и перехода процесса в режим «самораспыления» [4]. При недостатке мощности