

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ЭВП. 2. МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ УЗЛЫ И ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

Керамические узлы и металлокерамические соединения, а также постоянные магнитные системы являются достаточно важными элементами мощных современных ЭВП [1-3], так как от них зависят динамические параметры приборов, их качество, надёжность и долговечность.

Остановимся подробнее на керамических изделиях. Они нашли широкое применение в качестве защитных оболочек, изоляторов катодных ножек, изоляторов анодов, а также в выводах энергии. Наличие замечательных свойств металлокерамики обуславливает её широкое применение при производстве ЭВП СВЧ. Вакуумно-плотные керамические материалы непроницаемы для газов, поглощают весьма мало энергии электромагнитных колебаний, обладают большой механической прочностью, могут работать в условиях высокого вакуума и в широком интервале температур. В широком диапазоне температур от 500 до 1000°С характеристики керамики практически не меняются. Такая высокая термодинамическая прочность даёт возможность получить с помощью пайки жесткие вакуумно-плотные соединения керамических деталей с деталями из металла или сплавов, выдерживающие температуры до 700-1000°С и выше. Керамика надёжно паяется с медью и никелем, молибденом и вольфрамом, а также со сплавами на основе железа и никеля. Газовыделение вакуумно-плотной керамики, определяемое главным образом её сорбционными свойствами, относительно мало, а после предварительного обезгаживания почти отсутствует. По газопроницаемости керамика сочетает в себе положительные свойства стекла и металла: она непроницаема для водорода подобно стеклу, а для гелия – подобно металлам.

Для увеличения вибропрочности и жесткости металлокерамических соединений в ряде случаев массивную металлическую деталь паяют с тонкой медной или коваровой манжетой, которая припаяна к керамическому изолятору. В электровакуумной промышленности наиболее часто используют алюмооксидную керамику, основным компонентом которой является синтетический оксид алюминия. Это химически инертное тугоплавкое вещество, имеющее высокое электрическое сопротивление, хорошую теплопроводность, устойчивость к воздействию восстановителей и обладающее достаточной плотностью, в пределах температур до 1700-1800°С не подвергается коррозии под действием активных газов (за исключением фтора).

Металлокерамические конструкции принято разделять на электроизоляционные и конструкционные сборочные единицы, хотя чёткой классификации конструктивных металлокерамических узлов пока не имеется [1] ввиду разнообразия областей их применения. Электроизоляционные единицы в том или ином виде связаны с передачей электрической или электромагнитной энергии и объединяют следующие группы: проходные изоляторы, опорные изоляторы, окна выводов электромагнитной энергии.

Проходные изоляторы обеспечивают ввод и вывод электрических потенциалов и токов сквозь стенки ЭВП, а также ввод и вывод жидких теплоносителей к частям приборов, находящимся под потенциалом. Опорные изоляторы, как следует из их названия, служат для механического крепления электродов, находящихся под напряжением, кроме того, они могут осуществлять функции теплопередачи или, наоборот, теплоизоляции. Металлокерамические окна выводов энергии представляют собой вакуумно-плотные оболочки, отделяющие вакуумную полость от внешней атмосферы. Они должны быть максимально прозрачными для электромагнитных волн и вместе с тем механически прочными и химически устойчивыми.

При работе прибора происходит его разогрев. Дело в том, что часть атомов, испарившихся с поверхностей нагретых деталей внутри прибора, оседает на керамике, образуя на их поверхностях проводящие плёнки толщиной в несколько монослоев металла. Как правило, основным металлическим напылением на поверхности керамических деталей является медь. Когда плёнка достигает определённой толщины, она становится проводящей: происходит закорачивание электродов – электрический или высокочастотный пробой.

Сопротивление толстой металлической плёнки зависит от её толщины (d) и удельного сопротивления металла (ρ):

$$R = \frac{\rho}{d}.$$

Однако на практике это соотношение не выполняется, так как удельное сопротивление с уменьшением толщины плёнки возрастает. Это увеличение начинается тогда, когда толщина плёнки становится соизмеримой со средней длиной пробега электрона в металле λ , которая при $t = 20^\circ\text{C}$ в никеле равна 122Å , в железе – 202Å , в серебре – 532Å . В реальности сопротивление плёнки металла на керамике выше по сравнению с теоретическим по двум причинам:

- из-за неровностей на поверхностях изоляторов;
- из-за прерывного характера плёнок, когда их сопротивление определяется незаполненными участками поверхностей керамики.

Отметим, что проводящие плёнки на поверхностях керамических деталей образуются достаточно часто и являются причиной одного из наиболее распространённых видов брака. Поэтому исследование физико-химических свойств напылённых плёнок и разработка методов их удаления является важной научной и практической задачей регенерационных технологий.

Отделение керамики от металла проводится путём травления в смесях агрессивных кислот (азотной, серной). При этом происходит растравление всех металлов, оставшихся на керамике после извлечения её из изделия механическим способом. Металлы остаются в виде солей в растворе травления и оседают на поверхности керамики после травления. В нашем случае такими элементами явились соли марганца, железа, титана, кальция, магния, калия, натрия, которые в большинстве случаев легко удаляются во время химической очистки в смеси кислот.

Далее проводится струйная обработка деталей электрокорундом. Высокая шероховатость поверхности керамики после струйной обработки деталей электрокорундом затрудняет образование сплошных проводящих плёнок (появление которых возможно, например, при использовании распыляемых геттеров или в результате перегрева электродов) в результате конденсации мигрирующих паров металла. При этом возможно поверхностное напыление на керамику материалов (элементов), загрязняющих электрокорунд с течением времени: Са, Мо, Na, Si.

Для окончательной очистки деталей от органических и неорганических загрязнений проводится отжиг керамики на воздухе при 1100°C .

В ряде случаев на некоторых керамических деталях наблюдаются тёмные пятна на наружной поверхности. Исследования состава поверхности и объёма керамических деталей до и после реставрации показали значительное обеднение приповерхностной зоны (50-100 мкм) керамики окисью марганца. Содержание марганца на поверхности приблизительно в 10 раз меньше, чем в объёме керамики. Уменьшение содержания марганца в приповерхностной области может быть обусловлено несколькими факторами:

- избирательным травлением компонентов при химической обработке деталей;
- окислительно-восстановительными процессами при обжиге деталей в различных газовых средах;

- различной летучестью компонентов в вакууме при высокой температуре в процессе эксплуатации.

Отмеченные изменения химического состава поверхностного слоя не сказываются на физических и эксплуатационных свойствах керамики, таких как диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, пробивное напряжение, термостойкость, тепловое расширение и другие, которые определяются химическим и фазовым составом объёма керамики. Очевидно, эти поверхностные изменения состава не должны сказываться и на прочности паяных металлокерамических соединений, поскольку пасты, используемые для металлизации керамики, содержат достаточно большое количество марганца. Однако уменьшение содержания марганца в приповерхностной области может вызвать изменение цвета керамики, появляющееся в виде тёмных пятен, создавая впечатление наличия загрязнений, примесей, напылений.

К достаточно перспективной технологии очистки следует отнести очистку с применением физико-химических свойств галлия. Известно, что галлий обладает рядом замечательных качеств: способностью смачивать при комнатной температуре оксиды, свойством диффузионного твердения в смеси порошков переходных металлов, способностью расширяться при кристаллизации, растворять (разрушать) легированные металлы в контакте с ними [4].

Теперь перейдём к рассмотрению магнитных систем. Основная роль магнитных систем связана с формированием, фокусировкой и стабилизацией электронных потоков в приборах. При отклонении электронного потока от оптимального положения не только ухудшаются выходные характеристики ЭВП, но и происходит нежелательная бомбардировка электронами электродов, что вызывает их перегрев, эрозию и даже расплавление.

В СВЧ-приборостроении активно используются постоянные магнитные системы на магнитотвёрдых материалах [3,5,6]. Магнитный материал тем лучше будет выполнять своё назначение стабильного источника интенсивного магнитного потока, чем лучше удовлетворяются некоторые требования для ряда его основных характеристик и параметров [7-9]. К последним, в частности, относятся намагниченность, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила.

В основе современных теоритических представлений о механизме магнитных свойств лежит понятие магнитного момента. Магнитный момент в широком смысле – это векторная величина, характеризующая магнитные свойства элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов и др.), атомных ядер, атомов, молекул, микроскопических тел, а также контуров макроскопическим током.

Магнитные моменты отдельных элементарных частиц обусловлены наличием у них собственного механического момента – спина. Для электрона спин $L_s = \hbar/2$, где \hbar – постоянная Планка. Соответственно, спиновый магнитный момент:

$$P_{ms} = -\frac{e}{2m_e} \hbar,$$

где e – заряд электрона; m_e – масса электрона. Величина $\frac{e}{2m_e} \hbar$ называется магнетоном Бора.

Магнитные моменты атомных ядер определяются из спиновых моментов протонов, нейтронов, из их орбитальных моментов внутри ядра, магнитные моменты атомов и молекул – из спиновых моментов электронов, орбитальных, магнитных моментов ядер, вращательных магнитных моментов молекул. Магнитные моменты ядер примерно на три порядка меньше орбитального и спинового моментов электрона. Поэтому магнитные свойства атомов определяются целиком электронами.

Постоянные магниты, применяемые в магнитных системах ЭВП, состоят из ферромагнитных материалов, которым присущ магнитный порядок [8, 10, 11]: спонтанная параллельная ориентация магнитных доменов соседних атомов в макроскопических областях, называемых доменами. Домены намагничены до насыщения даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

Как следует из теории ферромагнетизма Я.И. Френкеля и В. Тейнзберга, спонтанная намагниченность создаётся за счёт сил обменного взаимодействия, которые носят чисто квантовый характер, хотя являются электростатическими по своему происхождению. Энергия обменного взаимодействия возникает при перекрытии электронных оболочек (обобществлении электронов соседними атомами). Для ферромагнетиков энергия обменного взаимодействия положительна (больше нуля). В магнитомягких материалах (например, сплавах железа с кремнием) домены, как правило, большие. Магнитомягкие материалы легко намагничиваются и размагничиваются. Магнитотвёрдые материалы имеют очень малые домены (их нельзя разглядеть в обычный микроскоп). Эти материалы трудно намагнитить и размагнитить.

Условия стабильности магнитных свойств постоянных магнитов на ферромагнетиках связаны, прежде всего, с их ярко выраженными гистерезисными свойствами, отражаемыми кривой намагничивания. В эксплуатации постоянные магниты должны быть устойчивы к воздействию внешних факторов, в первую очередь размагничивающих полей и температуры, а также вибраций, ударных нагрузок и т.п. Необратимые потери магнитной индукции (гистерезисные, связанные с магнитной вязкостью, и потери при магнитном резонансе) снижаются путём применения специальных технологических операций: воздействием нормированных размагничивающих полей и нагреванием.

Наилучший метод стабилизации магнитов с выпуклой кривой размагничивания – температурная обработка во всем интервале температур работы СВЧ-прибора с последующим снижением рабочей магнитной индукции переменным электромагнитным полем на 3-10% (последнее имеет значение для любых магнитов) [3, 9].

В качестве объектов регенерации в работе рассматривались магнитные системы типа МФС (магнитные фокусирующие системы), создающие поперечное магнитное поле, для приборов М-типа.

Основным методом регенерации магнитов является так называемое «перемагничивание», то есть размагничивание и последующее намагничивание до насыщения. При этом восстанавливается первоначальная петля гистерезиса и все магнитные параметры. С этого момента можно исчислять срок сохраняемости магнитов. В ненамагниченном состоянии срок хранения магнитов не ограничивается.

Магнитные системы типа МФС (материалы типа ЮНДК, феррит-барий, феррит-стронций), состоящие обычно из двух магнитов, как правило, используются в приборах многократно, без предварительной настройки, путём намагничивания непосредственно на изделии в статическом и динамическом режимах. Кроме того, они используются в технологических целях: для настройки и испытания изделий.

В заключение хотелось бы отметить, что свойства материала после процессов реставрации керамических деталей сохраняются на первоначальном уровне, так как в процессе вжигания металлизационного покрытия при $t=1350^{\circ}\text{C}$ происходит «залечивание» поверхностных дефектов за счёт размягчения стеклофазы и заполнения этих дефектов, полностью восстанавливается механическая прочность материала до первоначальной, восстанавливается тангенс угла диэлектрических потерь. А такие свойства керамики как объёмный вес, диэлектрическая проницаемость, пробивное напряжение и термостойкость после процессов реставрации не изменяются, так как перечисленные свойства не зависят от состояния поверхностного слоя керамических деталей.

Список литературы: 1. *Ерошев В.К., Козлов Ю.А., Павлова В.Д.* Конструирование и технология паянных металлокерамических узлов. Ч. 1 Свойства материалов и технология изготовления металлокерамических узлов: Справ.материалы. М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. 2. *Ерошев В.К., Козлов Ю.А., Павлова В.Д.* Конструирование и технология паянных металлокерамических узлов. Ч. 2 Расчёт и конструирование металлокерамических узлов: Справ.материалы. М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. 3. *Мельников Ю.А.* Постоянные магниты электровакуумных СВЧ приборов .М.:Сов.радио, 1967. 183 с. 4. *Семёнов А.С., Коблов А.И., Жевалев О.Р., Решенова М.А.* Исследования возможности очистки керамических деталей электронной техники от металлизации // Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике: Тр. 4-го раб. сем. IEEE Saratov-Penza Chapter. Саратов, 2000. 5. *Несбитт Е., Верник Дж.* Постоянные магниты на основе редкоземельных элементов. М., 1977. 6. *Преображенский А.А.* Магнитные материалы и элементы.М.: Высш. школа, 1976. 335с. 7. *Ягола Г.К., Спиридонов Р.В.* Измерение магнитных характеристик современных магнитотвёрдых материалов. М.: Изд-во стандартов, 1989. 196 с. 8. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. М.: Наука, 1984. 208 с. 9. *Миткевич А.В.* Стабильность постоянных магнитов. Л., 1971. 10. *Пасынков В.В., Сорокин В.С.* Материалы электронной техники. 2-е изд. М.: Высш. школа, 1986. 366 с. 11. *Мишин Д.Д.* Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 28.01.2003