

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В СВЧ-УСТРОЙСТВАХ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Важную роль в улучшении параметров СВЧ резонансных систем играют низкотемпературные явления, связанные с изменением электрических характеристик конструкционных материалов при низких температурах. К этим характеристикам относится поверхностный импеданс, в значительной степени определяющий такие параметры СВЧ резонансных систем, как добротность и резонансная частота. В качестве конструкционных материалов, обладающих малым поверхностным сопротивлением на СВЧ при нормальных и криогенных температурах, чаще всего используются медь и алюминий [1; 2]. В ряде случаев целесообразно изготовление СВЧ-устройства из произвольного конструкционного материала с последующим нанесением на него необходимого токопроводящего покрытия, например алюминия, меди.

Для получения высококачественных покрытий из алюминия применили метод электрохимического осаждения металла из расплава электролитов. Основным критерий качества покрытия — поверхностное сопротивление R_s на сверхвысоких частотах.

Измерение активной составляющей поверхностного импеданса на СВЧ осуществлялось методом объемного резонатора, при котором поверхностное сопротивление определялось как отношение геометрического фактора резонатора G к его ненагруженной добротности $Q_{\text{нен}}$ [3]. Для измерения использовался цилиндрический медный резонатор; работающий на колебаниях H_{011} . Отсутствие продольных токов позволило выполнить конструкцию резонатора разъемной и изготавливать его торцовую стенку из исследуемого материала (меди, алюминия либо алюминированной меди). Для выбранной конструкции резонатора используемый метод позволил определять как относительное сопротивление $\frac{R_{s \text{ обр}}}{R_{s \text{ мет}}}$ (по отношению к поверхностному сопротивлению материала стенок), так и абсолютное значение $R_{s \text{ мет}}$, если торцовая стенка и корпус измерительного резонатора изготавливались из одного материала. Измерение поверхностного сопротивления сводилось к измерению ненагруженной добротности резонатора. Абсолютные и относительные значения R_s вычислялись по формулам

$$R_{s \text{ мет}} = \frac{G}{Q_{\text{нен мет}}}; \quad \frac{R_{s \text{ обр}}}{R_{s \text{ мет}}} = \left(\frac{\chi^2 L + \gamma^2 D}{\frac{Q_{\text{нен обр}}}{Q_{\text{нен мет}}}} - \chi^2 L - \gamma^2 \frac{D}{2} \right) \frac{1}{\gamma^2 \frac{D}{2}}$$

Здесь $R_{s \text{ обр}}$ — поверхностное сопротивление образца; $R_{s \text{ мет}}$ — поверхностное сопротивление материала измерительного резонатора; D ,

L — диаметр и длина резонатора; $Q_{\text{нен обр}}$ — ненагруженная добротность резонатора с исследуемым образцом; $Q_{\text{нен мет}}$ — ненагруженная добротность измерительного резонатора

$$\chi = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}; \quad \gamma = \frac{\pi}{L},$$

где λ — резонансная длина волны.

Измерительный резонатор, изготовленный из меди, состоял из корпуса в виде цилиндрического стакана и сменных торцовых крышек. Для снятия вырождения и разнесения колебаний H_{011} , E_{111} по частоте в торцовой крышке предусмотрена фигурная проточка высотой $h = 2$ мм и шириной $\Delta R = 1$ мм, позволяющая разнести колебания при 77 К на 22 МГц. В дне корпуса располагалась щель связи. Для снижения теплового потока от измерительного устройства к резонатору в качестве линии передачи использовалась тепловая развязка. Она представляла собой отрезок прямоугольного волновода с толщиной электропроводящего слоя, полученного электролитическим осаждением меди, порядка 15 — 20 мкм. Для придания конструкции жесткости на электропроводящий слой наносилась эпоксидная смола, армированная стеклотканью.

В теплой зоне волновода располагалось вакуумное окно из слюды. Для компенсации реактивности, вносимой вакуумным окном, использовалась индуктивная диафрагма. Размеры диафрагмы определялись расчетным путем по диаграмме Вольперта-Смита, а затем уточнялись экспериментально. Резонатор вакуумировался со стороны торцовой крышки индиевой прокладкой и откачивался до остаточного давления 1,33 Па через отверстие в широкой стенке волновода, качество вакуумирования при криогенных температурах контролировалось по стабильности резонансной частоты при фиксированной температуре резонатора.

Электролитическое алюминирование торцовых крышек резонатора велось из расплавленной смеси хлоридов алюминия и натрия $2\text{MAlCl}_3 - 1\text{MNaCl}$ (AlCl_3 — 66,6 моль, или массовое содержание — 82,02 %, NaCl — 33,4 моль, или массовое содержание — 17,92 %, карбид — 0,01 %) с применением растворимых анодов [4]. Для приготовления электролита применялись реактивы безводного AlCl_3 и NaCl квалификации ч. д. а.

Электролит алюминирования имел следующие физико-химические характеристики: удельный вес расплава при 200 °С — 1,64 г/см³; вязкость при 210 °С — 0,032 Па; удельная электропроводность при 182 °С — 0,070 Ом⁻¹ см⁻¹; удельная теплоемкость смеси $2\text{MAlCl}_3 - 1\text{MNaCl}$, рассчитанная в точке плавления, 879,3 дж/кг · К. Алюминирование проводили с применением анодов из алюминия чистотой 99,999. Катодом служил металлируемый образец. Осаждение покрытия осуществлялось при плотности тока 0,1 А/дм². Толщина покрытия не превышала 15—20 мкм. Хорошая адгезия покрытия к подложке обеспечивалась обезжириванием образцов 10—20 % раствором кальцинированной соды. Температура раствора 70—80 °С, время обезжи-

ривания 15—20 мин. При сильном загрязнении использовали органические растворители. Травление меди проводили в 5 — 10 % растворе H_2SO_4 или 10 — 20 % растворе HCl в течение 10 — 15 мин. Затем проводилась промывка и сушка образцов.

Измерение добротности резонатора осуществлялось методом полного сопротивления с учетом влияния потерь в элементе связи [3]. Экспериментальная установка состояла из высокочастотного генератора Г4-56, сигнал от которого через развязывающий вентиль ЗВВС-100, поляризационный аттенуатор ДЗ-33А и второй развязывающий вентиль ЗВВС-100 поступает на измерительную линию Р1-28. Затем сигнал через волноводный изгиб в E -плоскости, пройдя компенсирующую диафрагму, вакуумное окно и тепловую развязку, подается на измерительный резонатор. Падающий и отраженный от резонатора сигналы образуют стоячую волну, параметры которой измеряются с помощью измерительной линии и индикатора Ф283/3. Со второго выхода генератора сигнал через коаксиально-волноводный переход поступает на электронно-счетный частотомер ЧЗ-54, работающий совместно с преобразователем частот Я34-87.

Измерение ненагруженной добротности сводилось к измерению методом замещения минимального коэффициента стоячей волны $K_{ст\ V\ рез}$ и соответствующей ему резонансной частоты $f_{рез}$, а также нерезонансного $K_{ст\ V\ нер}$ на частотах, лежащих на 3 МГц выше и ниже $f_{рез}$. По данным значениям вычислялся $K_{ст\ V\ 0,5}$, соответствующий половинному уровню мощности.

$$K_{ст\ V\ 0,5} = \frac{2 + \beta^2 (1 + \gamma^2) + \sqrt{4 + \beta^2 (1 + \gamma^4) - 2\gamma\beta^2 (4 - \gamma\beta^2)}}{2\beta (1 + \gamma)},$$

где $\gamma = \frac{K_{ст\ V\ рез}}{K_{ст\ V\ нер}}$; β — коэффициент связи, $\beta = K_{ст\ V\ рез}$, $\beta = \frac{1}{K_{ст\ V\ рез}}$, и измерялись частоты f_1 , f_2 , на которых коэффициент стоячей волны равен $K_{ст\ V\ 0,5}$. Ненагруженная добротность рассчитывалась по формуле

$$Q_{нен} = \frac{f_1 + f_2}{2(f_2 - f_1)}.$$

СВЧ-резонаторы с различными элементами связи изготавливались токарной обработкой меди марки М1 без последующей шлифовки и полировки. На частоте 10 ГГц были проведены измерения ненагруженной добротности и поверхностного сопротивления меди при температуре плавления льда 273 К и температуре жидкого азота 77 К. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, при температуре 273 К ненагруженная добротность медного резонатора составила 29500, а поверхностное сопротивление — $2,64 \cdot 10^{-2}$ Ом. Повторные измерения вакуумированного резонатора через 10, 20 и 30 сут показали, что его добротность практически не изменилась. Охлаждение резонатора до 77 К приводило к возрастанию ненагруженной добротности до 69000 и уменьшению поверхностного сопротивления до $1,13 \cdot 10^{-2}$ Ом. Аналогичные результаты получены для всех исследованных резонаторов. Различие результатов находилось в пределах абсолютной погрешности изме-

Таблица 1

Температура, К	Ненагруженная добротность, $Q_{\text{нен}}$	Поверхностное сопротивление, $R_s \cdot 10^{-2}$ Ом	Примечание
273	29500	2,640	
273	29200	2,670	Измерения проведены через 10 сут
273	29100	2,680	» » » 20 сут
273	29100	2,680	» » » 30 сут
77	68200	1,144	
77	69000	1,132	Измерения проведены через 10 сут
77	69000	1,132	» » » 20 сут
77	67900	1,149	» » » 30 сут
273	30640	2,550	Резонатор отожжен
77	73800	1,060	Резонатор отожжен

рений. После проведенного цикла измерений резонатор отжигался в вакуумной печи при 700°C и остаточном давлении $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в течение 30 мин, после чего он охлаждался в течение 24 ч до 20°C . Такой отжиг приводил к увеличению ненагруженной добротности на 4,0 % при 273 К и на 8,0 % при 77 К. Полученные результаты соответствуют данным, приведенным в работе [2].

Алюминирование торцовых крышек резонатора проводилось по приведенной ранее технологической схеме. Толщина металлического покрытия составляла 18—20 мкм и контролировалась по скорости осаждения, которая определялась весовым способом. В связи с повышенными требованиями, предъявляемыми к шероховатости токопроводящей поверхности, производился контроль чистоты поверхности торцовой стенки резонатора до и после алюминирования. Среднее арифметическое отклонение профиля R_z меди составило 0,25 мкм, что соответствовало $\nabla 9$. Алюминиевое покрытие несколько сгладило микронеровности, при этом $R_t = 0,15$, а класс чистоты — $\nabla 10$. Важный параметр тонких алюминиевых пленок — адгезия. В случае, если толщина металлического покрытия не превышает 15—20 мкм, известные стандартные методики не дают объективной оценки прочности сцепления. В связи с этим контроль качества адгезии алюминия осуществлялся визуально по отслоению и растрескиванию покрытия после термиспытаний и по изменению его поверхностного сопротивления. Результаты измерений поверхностного сопротивления монокристаллического алюминия чистотой 99,999 и алюминиевых гальванических покрытий (образец I, II) при 273 К и 77 К приведены в табл. 2.

Как показали результаты измерений, поверхностное сопротивление алюминиевых гальванических покрытий, полученных из расплава солей, составляет от $3,87 \cdot 10^{-2}$ до $4,83 \cdot 10^{-2}$ Ом при 273 К и от $1,46 \cdot 10^{-2}$ до $1,7 \cdot 10^{-2}$ Ом при 77 К. Многократные (до 20 раз) термоудары до температуры жидкого азота не выявили растрескивания и отслаивания алюминиевой пленки и ухудшения поверхностного сопротивления.

Как показали измерения, оптимальная плотность тока электролиза составляет $0,1$ А/дм². Увеличение плотности тока до 1 А/дм² приво-

Таблица 2

Температура, К	Ненагруженная добротность, $Q_{\text{нен}}$	$\frac{R_s \text{ обр}}{R_s \text{ мет}}$	Примечание
-273	29400	1	Резонатор с медной торцовой крышкой
77	67340	1	—»—
273	29060	1,16	Торцовая крышка А1 99,999
77	67300	1,004	—»—
273	28380	1,49	Крышка 1
77	65760	1,33	—»—
273	27660	1,86	Крышка 2
77	64606	1,58	—»—

дит к образованию алюминиевой пленки, обладающей крупнозернистой структурой. Добротность резонатора с такими образцами уменьшилась до 52000 — 54000, а значение $R_s \text{ обр}/R_s \text{ мет}$ — 5,5—4,8. Уменьшение плотности тока по сравнению с оптимальным практически не оказало влияния на электрические параметры покрытия, но увеличивало время электролиза. Из полученных данных следует, что алюминиевые покрытия, полученные из расплава солей по предлагаемой технологической схеме, обладают достаточно стабильными параметрами в широком диапазоне температур и могут быть использованы в СВЧ-устройствах.

Список литературы: 1. Байчурин А. С. Расчет, конструирование и изготовление волноводных устройств и объемных резонаторов. М.; Л., 1963. 349с. 2. Viquard F., Septier A. Amelioration de la conductivite superficielle du cuivre et de l'aluminium den hyperfrequences, par abaissement de temperature // Nuclear instr. and method. 1966. 44. P. 18 — 28. 3. Гинзтон Э. Г. Измерение на сантиметровых волнах: Пер. с англ. М., 1960. 620 с. 4. А. с. 451800 СССР. Расплавы для электролитического алюминирования / Делимарский Ю. К., Туманова Н. Х., Сарнавский Н. М., и др. // Открытия. Изобретения. 1973. № 44. С. 69.

Поступила в редколлегию 20.04.87

УДК 621.372

П.Е. МИНКО, А. Г. НЕРУХ, канд. физ.-мат. наук

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ РАСЩЕПИВШИМИСЯ ВОЛНАМИ ПРИ РЕЗКОМ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

При измерении энергетических параметров электромагнитных колебаний возможны ситуации, в которых среда, заполняющая высокочастотные тракты, испытывает изменения во времени, влияние которых на процесс измерения должно быть учтено.

Для исследования происходящих при этом преобразований электромагнитного поля представляет интерес модельная задача о прохождении электромагнитной волны в среду, параметры которой изменяются во времени. В качестве среды рассматривается холодная изотропная плазма. Концентрация плазмы является ступенчатой функцией времени. Исследование такого нестационарного явления