

## Конструкторско-технологические основы создания пассивной части высоконадежных микрополосковых СВЧ-устройств дециметрового диапазона с повышенным уровнем мощности

В.И. Крючатов

ФГУП «ФНИЦ “Радиоэлектроника” им. В.И. Шимко»  
420029, Россия, г. Казань  
ул. Журналистов, 50/3

Рассмотрены проблемы улучшения электрических и эксплуатационных характеристик пассивной части микрополосковых СВЧ-устройств дециметрового диапазона с повышенным уровнем мощности. Приводятся принципы и разработанные на их основе методы проектирования и технологии изготовления, которые позволяют проектировать высоконадежные микрополосковые СВЧ-устройства с малыми потерями энергии в микрополосковых линиях, повышенной импульсной мощностью согласованных резистивных нагрузок и высокой стабильностью резистивных элементов. Предложены системы автоматизированного проектирования резистивных элементов и статистического контроля качества, анализа и регулирования технологических процессов изготовления микрополосковых плат с резистивными элементами для обеспечения высокой воспроизводимости электрических параметров в условиях серийного производства и надежности в процессе эксплуатации.

*Ключевые слова:* микрополосковые СВЧ-устройства, пассивная часть, конструирование, технология, контроль качества, надежность.

### Введение

В связи с актуальностью применения радиотехнических систем опознавания с дальностью действия до 300 км большое значение приобретает задача создания высоконадежных микрополосковых (МП) СВЧ-устройств, с импульсной мощностью до 5–10 кВт, работающих на частотах дециметрового диапазона.

В микрополосковой технике СВЧ большие успехи достигнуты в области построения теоретических основ, разработки инженерных методик анализа и синтеза МП-устройств и технологической базы для их изготовления [1–4]. По мере освоения серийного производства разработаны принципы и методы проектирования микроэлектронных СВЧ-устройств по критерию минимальных производственных затрат при учете конструктивно-технологических погрешностей микрополосковых линий (МПЛ) передач [3]. В монографии [4] изложены перспективные конструкторско-технологические решения, позволяющие улучшить электрические, тепловые, массогабаритные характеристики и надежность ГИС СВЧ для диапазона частот 2,7–11,4 ГГц. Однако в этих работах основное внимание уделяется улучшению характеристик элементов на

основе МПЛ, и отсутствуют сведения по исследованию потерь энергии в МПЛ для дециметрового диапазона, надежности тонкопленочных резистивных нагрузок (ТРН) при воздействии коротких СВЧ-импульсов повышенной мощности, а также не рассмотрены конструктивно-технологические особенности проектирования и контроля качества тонкопленочных резистивных элементов (ТРЭ) микрополосковых плат (МПП) при раздельном формировании резистивных и проводящих слоев. Тем не менее при серийном изготовлении МПП выход годных плат с резисторами существенно меньше выхода годных плат, которые содержат только МПЛ.

Конструкторско-технологические основы проектирования ТРЭ интегральных схем (ИС), изложенные в последних монографиях [6, 7], не содержат сведений по исследованию статистических характеристик переходных сопротивлений контактов и системам автоматизированного проектирования (САПР) ТРЭ, статистического контроля качества (АСК), анализа и регулирования технологических процессов (СРТП) изготовления резистивных элементов ИС при учете контактных сопротивлений для обеспечения заданных полей допусков и обеспечения необходимого уровня надежности. Известные автоматизи-

рованные системы технологического обеспечения качества [5], основанные на применении тестовых структур и математических моделей для контроля точности технологических процессов (ТП), не позволяют определять величины контактных сопротивлений, по которым можно оценивать качество технологий формирования пленочных контактов и адгезию МПЛ к подложке. Поэтому актуальной является также проблема разработки математической модели, позволяющей дополнительно контролировать качество контактных пленочных соединений.

В статье приведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований элементов ПЧ СВЧ-устройств, позволившие решить проблемы, возникшие при переводе СВЧ-устройств радиотехнических систем опознавания дециметрового диапазона, использующих волноводную технику, в микроэлектронное исполнение.

### **1. Пути повышения качества и надежности пассивной части СВЧ-устройств**

Основные аспекты объекта и предмета исследований данной работы приведены на рис. 1.

Автор придерживался следующих основных принципов создания высоконадежных элементов ПЧ СВЧ-устройств:

- 1) при испытаниях СВЧ-устройств проводился физический анализ причин и механизмов отказов элементов, результаты анализа учитывались при проектировании;
- 2) при разработке элементов закладывались новые ТП, обеспечивающие повышенную надежность;
- 3) новые конструкции и технологии изготовления элементов МПП, а также методики их расчета и контроля качества по показателям точности ТП в процессе производства разрабатывались с учетом обеспечения необходимого уровня надежности и высокой вероятности выхода годных;
- 4) статистический контроль качества и управление процессом производства на всех стадиях – одно из важнейших средств достижения качества и надежности.

### **2. Исследование потерь энергии многослойных МПЛ в дециметровом диапазоне**

Считается, что отклонения экспериментальных значений коэффициента затухания в МПЛ

от теоретических возрастают с ростом частоты, а на частотах менее 2 ГГц, при толщине основного медного слоя более 3–4 скин-слоев, это отклонение несущественно [2, 4].

Однако переход от структуры многослойной МПЛ Cr-Cu<sub>в</sub>-Ag<sub>г</sub> к структуре V-Cu<sub>в</sub>-Cu<sub>г</sub>-Ni<sub>г</sub>-Au<sub>г</sub> привел к увеличению потерь энергии с 1 дБ/м до 2,6–3,6 дБ/м и невозможности изготовления СВЧ-устройств с высокой надежностью и заданными габаритами. Для выявления причин аномального увеличения потерь проведено экспериментальное исследование потерь энергии в многослойных МП-структурах V(Cr)-Cu<sub>в</sub>-Cu<sub>г</sub>-Ni<sub>г</sub>-Au<sub>г</sub> в зависимости от материала, толщины и технологии изготовления каждого слоя, а также формы микропрофиля на частоте 1,1 ГГц. Результаты исследований ниже сведены в таблицу. В ней МПЛ партии № 7 получены травлением меди, МПЛ партии № 8 – гальваническим осаждением.

Данные таблицы позволяют сделать следующие основные выводы.

Резистивный слой и форма микропрофиля влияют на потери в МПЛ. Поэтому для уменьшения потерь энергии необходимо применять технологию с отдельным формированием резистивных и проводящих слоев и последующим гальваническим наращиванием проводящих слоев на тонкий слой меди, полученный вакуумным напылением. Кроме того, округление кромок проводника при гальваническом наращивании позволяет также повысить электрическую прочность МПЛ [2].

Существенные потери вносит буферный слой из никеля при отсутствии на нем золотого покрытия или при наличии золотого покрытия с плохой электропроводностью, полученного, например, гальваническим осаждением из цитратного электролита, рекомендованного нормативной документацией и работой [2].

Для изготовления многослойной МПЛ со структурой слоев V-Cu<sub>в</sub>-Cu<sub>г</sub>-Ni<sub>г</sub>-Au<sub>г</sub>, имеющих минимальные потери энергии, необходимо применять фосфатный электролит золочения с платиновыми анодами, а толщина золотого покрытия должна быть не менее толщины скин-слоя в золоте [8].

Аномально большие потери, вносимые защитным покрытием с плохой электропроводностью, можно объяснить тем, что по данным работы [9], плотность поверхностного тока на краю и на расстоянии несколько сотен микрон вблизи края на внешней поверхности полоски может значи-



Рис. 1. Основные технические характеристики элементов ПЧ СВЧ-устройств и факторы, влияющие на качество и надежность МПП

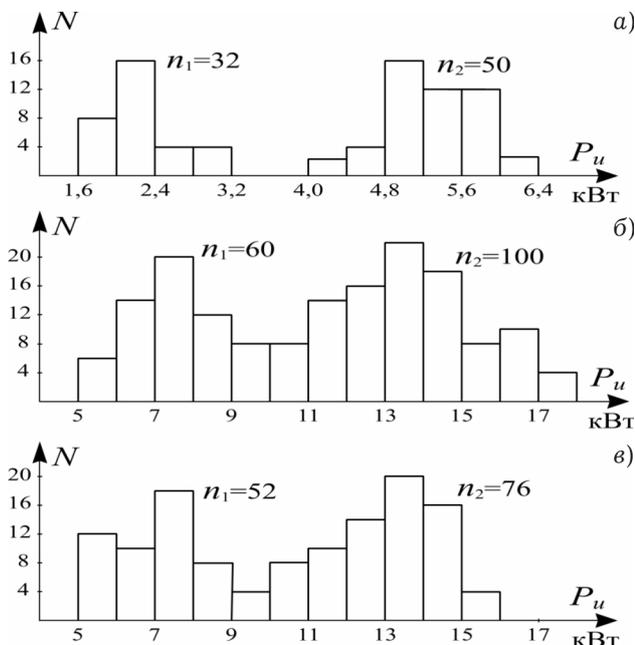


Рис. 2. Гистограммы распределения предельной импульсной мощности рассеяния  $P_u$  пленочных резисторов: а) РС5406К, 25 Ом/кв.; б) тантал, 25 Ом/кв.; в) РТР3473, 25 Ом/кв.  $N$  – число значений импульсной мощности в соответствующем интервале;  $n_1, n_2$  – общее число значений импульсной мощности для первого и второго максимумов соответственно

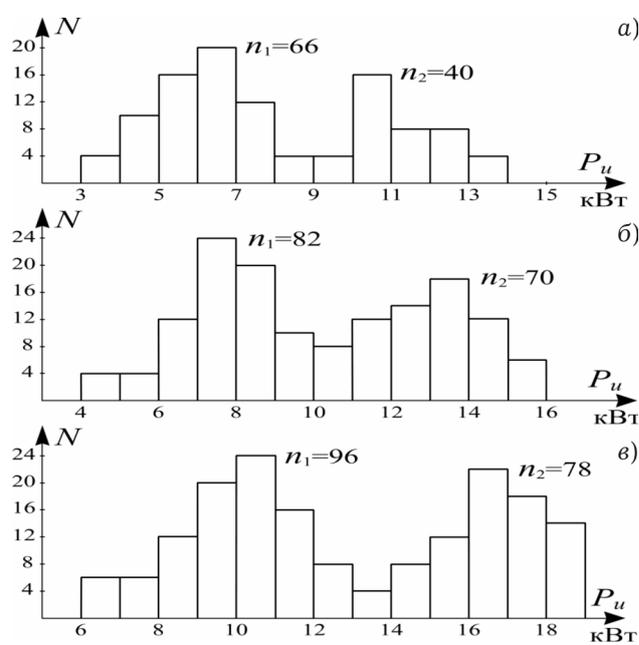


Рис. 3. Гистограммы распределения предельной импульсной мощности рассеяния  $P_u$  пленочных резисторов из сплава РС5406К, 50 Ом/кв. с защитой  $Si_3N_4$  разной толщины: а) 0,4 мкм; б) 0,8 мкм; в) 2,5 мкм.  $N$  – число значений  $P_u$  в соответствующем интервале;  $n_1, n_2$  – общее число значений импульсной мощности для первого и второго максимумов соответственно

тельно превышать плотность тока, протекающего на границе между полоской и подложкой.

Таким образом, проведенные исследования опровергают мнение авторов работы [4], что МПЛ следует рассматривать как слоистую структуру и оптимизировать соотношение в ней слоев, лишь начиная с частоты 8 ГГц, а при меньших частотах это нецелесообразно вследствие малого значения потерь в этом частотном диапазоне и больших толщинах скин-слоев. Экспериментальные данные показывают, что в дециметровом диапазоне теорию скин-эффекта необходимо учитывать также на краях внешней границы между многослойной полоской и газовой средой, вследствие большой плотности поверхностного тока, протекающего по этому участку.

На основе проведенных исследований разработана конструкция и технология изготовления высоконадежной многослойной МПЛ со структурой слоев

$V(50-100 \text{ Ом/кв.})-Cu_B(1-2 \text{ мкм})-$

$Cu_T(10 \pm 3 \text{ мкм})-Ni_T(1 \pm 0,3 \text{ мкм})-$

$Au_T(3 \pm 0,5 \text{ мкм})$

с малыми потерями энергии. Коэффициент затухания многослойной МПЛ в диапазоне частот 1,1–1,5 ГГц имеет значения от 1,14 до 1,32 дБ/м, что оказалось приемлемым для изготовления ПЧ СВЧ-устройств специальной РЭА с заданными массогабаритными характеристиками.

### 3. Исследование предельной импульсной СВЧ-мощности рассеяния ТРН

При испытаниях МП СВЧ-устройств радиотехнических систем опознавания оказалось, что при большой мощности импульсов (2–5 кВт) и их длительности порядка 0,5–1 мкс на частотах 1–1,5 ГГц МП ТРН разрушаются раньше, чем происходит высокочастотный пробой МПЛ. Это привело к необходимости исследования физики отказов резисторов с целью установления причин отказов и разработки конструкции и технологии изготовления ТРН, обеспечивающих надежную работу резисторов при импульсной мощности до 5 кВт с сохранением габаритов СВЧ-устройств.

Экспериментально полученные гистограммы распределения предельной импульсной мощности исследованных резистивных материалов, приведенные на рис. 2 и 3, имеют два максимума, что свидетельствует о влиянии на выход из

строения тонкопленочных резисторов двух доминирующих факторов [13].

Теоретический анализ температурного режима работы ТРН из хрома и тантала на поликоновых подложках при воздействии импульсов длительностью 1 мкс показал, что температура тестовых резисторов из хрома при воздействии импульсной мощности от 0,2 до 3 кВт не превышает 60°C, а температура тестовых резисторов из тантала при импульсной мощности от 5 до 8 кВт не более 120°C. При этом, в резистивной пленке из хрома рассеивается 1 % подводимой мощности, а в резисторе из тантала – около 2 %. Следовательно, отказ резисторов из-за перегрева вследствие аккумуляирования в резистивной пленке тепловой энергии при воздействии импульсов большой мощности маловероятен.

Анализ экспериментальных образцов тестовых резисторов, вышедших из строя в районе первого максимума, показал, что выгорание резистивной пленки происходит по рискам, повторяющим шероховатости подложки. У резисторов, вышедших из строя в районе второго максимума, разрушение резистивной пленки происходит без видимого выгорания по рискам. При этом пленка просто разваливается на отдельные островки, что, по-видимому, происходит при нагреве пленки до температуры выше температуры плавления.

Гистограммы, приведенные на рис. 3, показывают, что отказы резисторов при воздействии импульсного СВЧ-сигнала происходят из-за возникновения коронного СВЧ-разряда, так как покрытие поверхности и краев резистивной пленки диэлектрической пленкой существенно увеличивает предельную импульсную мощность за счет изоляции микроострий, инициирующих коронный разряд.

Данные по среднему значению и среднеквадратическому отклонению предельной удельной импульсной мощности для первого максимума гистограммы  $\bar{P}_{u1yd}$ ,  $\sigma_{u1yd}$  предложено использовать для конструктивного расчета согласованных ТРН при заданных средней  $P_{cp}$ , импульсной  $P_u$  мощностях рассеяния и коэффициенте нагрузки  $K_n$ :

1) рассчитывают волновое сопротивление  $Z_{ep}$  эквивалентной линии передачи без потерь (ширина которой равна ширине резистивной нагрузки):

$$Z_{ep} = Z_0 / \sqrt{3}, \quad (1)$$

где  $Z_6$  – волновое сопротивление подводящей МПЛ;

2) по известным формулам [2] рассчитывают ширину резистора  $b$ , исходя из волнового сопротивления эквивалентной линии передачи и учитывая отношение толщины эквивалентной линии передачи к толщине подложки  $t_p/h \cong 0$ ;

3) рассчитывают площадь резистора  $S_{ср}$ , обеспечивающую необходимую надежность для средней мощности  $P_{ср}$ :

$$S_{ср} \geq P_{ср} / (P_0 K_n); \quad (2)$$

4) рассчитывают длину резистора  $l_{ср}$ , при которой обеспечивается средняя мощность рассеяния:

$$l_{ср} \geq S_{ср} / b; \quad (3)$$

5) рассчитывают длину резистора  $l_u$ , при которой обеспечивается импульсная мощность рассеяния:

$$l_u \geq \frac{P_u}{b(\overline{P_{у1уд.}} - 3\sigma_{у1уд.})K_n}; \quad (4)$$

6) за длину резистора принимают наибольшее значение из двух величин:

$$l \geq \max \{l_{ср}, l_u\}; \quad (5)$$

7) рассчитывают удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки, которое обеспечивает заданное сопротивление нагрузки при расчетных значениях длины и ширины:

$$\rho_s = R_{он} b / l. \quad (6)$$

На основе проведенных исследований физики отказов ТРН при воздействии импульсной СВЧ-мощности разработаны конструкция и технология изготовления ТРН, надежно работающих при воздействии импульсной мощности до 5 кВт при размерах от  $2 \times 2$  до  $4 \times 8$  мм в зависимости от средней мощности [11]. Это позволило решить проблему разработки импульсных МП СВЧ-устройств с повышенным уровнем мощности и заданными габаритами, исключив отказы аппаратуры из-за перегорания резистивных нагрузок.

#### 4. Технологические процессы изготовления элементов МПП

На основе системного анализа конструкторско-технологических проблем проектирования ПЧ высоконадежных МП СВЧ-устройств с повышенным уровнем мощности предложена классификация маршрутов изготовления МПП [12] и разработаны новые технологии и маршруты изготовления МПП с повышенной надежностью [10].

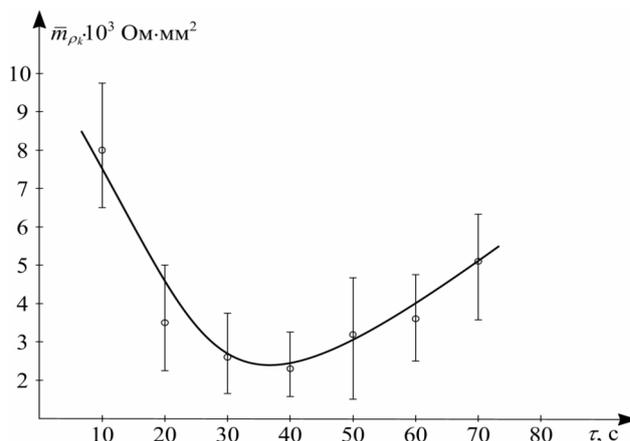


Рис. 4. Зависимость удельного переходного сопротивления контакта от времени межоперационной обработки подложки

Разработана технология гальванического осаждения проводниковых слоев по подслою в зазоре [13] и технология изготовления многослойных МПЛ методом гальванического осаждения проводниковых слоев с использованием «тонких» пленочных технологических переемычек [15]. По сравнению с известной технологией осаждения проводников по подслою [14] и технологий, основанных на применении сварных или пленочных переемычек [12], предложенные технологии обеспечивают высокую равномерность меди по толщине при практически полной защите медного слоя от коррозии.

Разработана технология изготовления резистивно-проводящих элементов с малым переходным сопротивлением путем подбора материала подслоя, технологических режимов и состава раствора для межоперационной обработки [16].

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость средней величины удельного переходного сопротивления контакта  $\bar{m}_{\rho_k}$  от времени обработки в хромовой смеси состава  $K_2Cr_2O_7 - 80$  г,  $H_2SO_4 - 1$  л при температуре  $20^\circ C$ . Кривая получена для низкоомного резистивного материала РС5406К с подслоем из ванадия. Из рисунка следует, что оптимальное время обработки составляет 30–40 с.

В многочисленных источниках, и в том числе в работах [6, 17, 18], отмечается ухудшение стабильности ТРЭ после их подгонки за счет обнажения резистивной пленки в зоне реза и изменения ее структуры при термическом воздействии лазерного луча.

Разработана технология подгонки ТРЭ, практически не ухудшающая стабильность резисторов [19]. Сущность технологии заключается в покрытии резистивной пленки до доводки ди-

электрической пленкой, например, фоторезистом ФН-11С или пленкой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которая поглощает продукты испарения резистивной пленки от воздействия лазерного луча.

Проведенные технологические исследования позволили разработать базовые ТП и маршруты серийного изготовления ПЧ высоконадежных СВЧ-устройств, обеспечивающие малые потери энергии, высокую коррозионную стойкость и адгезию многослойных проводников МПЛ к подложке, надежную работу миниатюрных ТРН при воздействии повышенной импульсной мощности, высокую температурную и временную стабильность ТРЭ.

### 5. Автоматизированные системы технологического обеспечения качества при серийном изготовлении пассивной части СВЧ-устройств с резистивными элементами

Разработаны математические модели сопротивлений ТРЭ с учетом систематических и случайных составляющих погрешностей контактных сопротивлений, а также тестовые структуры и математические модели для оценки точности основных ТП, включая ТП формирования контактов, при производстве ПЧ СВЧ-устройств с помощью АСК и СРТП [20, 21].

Математические модели сопротивлений ТРЭ для средних значений и среднеквадратических отклонений имеют вид

$$m_{R_i} = R_{oi} + \Delta R_i = (\rho_{os} + \Delta\rho_s) \frac{l_{oi} + \Delta l}{b_{oi} + \Delta b} + 2 \sqrt{\frac{(\rho_{os} + \Delta\rho_s) m_{\rho_k}}{b_{oi} + \Delta b}}, \quad (7)$$

$$\sigma_{R_i} = m_{R_i} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_s}}{\rho_{os} + \Delta\rho_s}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l_{oi} + \Delta l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b_{oi} + \Delta b}\right)^2 + \left(\frac{2A}{m_{R_i} (b_{oi} + \Delta b)^C}\right)^2}, \quad (8)$$

где  $R_{oi}$ ,  $m_{R_i}$ ,  $\sigma_{R_i}$ ,  $\Delta R_i$  – номинальное значение, среднее значение, среднеквадратическое отклонение и систематическая погрешность сопротивления резистора  $i$ -го типа соответственно;  $\rho_{os}$ ,  $\sigma_{\rho_s}$ ,  $\Delta\rho_s$  – номинальное значение, среднеквадратическое отклонение и систематическая погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки;  $l_{oi}$ ,  $b_{oi}$ ,  $\sigma_l$ ,  $\sigma_b$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta b$  – номинальное значение, среднеквадратичес-

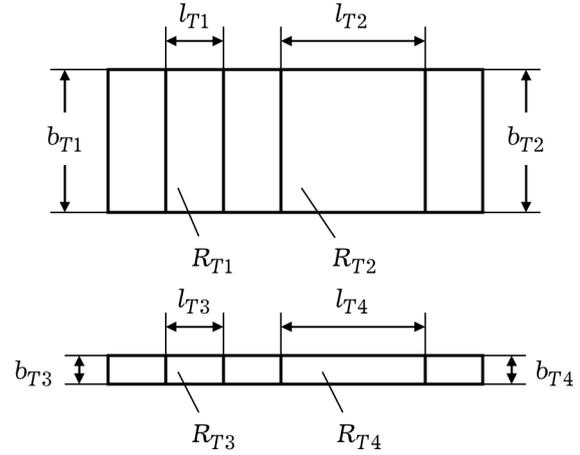


Рис. 5. Тестовая резистивная структура для косвенного определения погрешностей КТП резистивных компонентов МПП, включая величину удельного переходного сопротивления контактов

кое отклонение и систематическая погрешность длины и ширины соответственно;  $m_{\rho_k}$  – среднее значение удельного переходного сопротивления контактов;  $A$ ,  $C$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от технологии изготовления и материалов контактов.

Эти модели послужили основой для вывода формул и разработки САПР резистивных элементов МПП с учетом производственных погрешностей их конструктивно-технологических параметров (КТП), включая контактные сопротивления, для обеспечения заданных полей допусков при серийном производстве [22].

Тестовая структура для определения производственных погрешностей КТП резистивных элементов МПП, включая контактные сопротивления, путем измерения сопротивлений парных тестовых резисторов  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ , и  $R_{T3}$ ,  $R_{T4}$  разной ширины изображена на рис. 5.

Систематическую и случайную составляющие производственных погрешностей удельного поверхностного сопротивления  $\Delta\rho_s$ ,  $\sigma_{\rho_s}$ , ширины  $\Delta b$ ,  $\sigma_b$ , длины  $\Delta l$ ,  $\sigma_l$  и удельного переходного сопротивления контактов  $m_{\rho_k}$ ,  $\sigma_{\rho_k}$  резистивных элементов ИС получают усреднением погрешностей  $\Delta\rho_{sq}$ ,  $\Delta b_q$ ,  $\Delta l_q$ ,  $\rho_{kq}$ , определенных решением  $g$  систем уравнений, составленных для отдельно взятой  $q$ -й тестовой структуры:

$$\Delta\rho_{sq} - 2d_{q1,2}\Delta b_q = 2d_{q1,2}b_{T1,2} - \rho_{os}, \quad (9)$$

$$\Delta\rho_{sq} - 2d_{q3,4}\Delta b_q = 2d_{q3,4}b_{T3,4} - \rho_{os},$$

$$d_{q1,2}\Delta l_q + R_{kq1,2} = a_{q1,2},$$

$$d_{q3,4}\Delta l_q + \frac{b_{T1,2}}{b_{T3,4}} R_{kq1,2} = a_{q3,4},$$

$$R_{kq3,4} = \frac{b_{T1,2}}{b_{T3,4}} R_{kq1,2},$$

где  $q$  – порядковый номер тестовой структуры;  $d_{q1,2}, d_{q3,4}$  – коэффициенты пар резисторов  $R_{T1}, R_{T2}$  и  $R_{T3}, R_{T4}$   $q$ -й тестовой структуры, вычисляемые по формулам:

$$d_{q1,2} = (R_{T2q} - R_{T1q}) / 2(l_{T2} - l_{T1}), \quad (10)$$

$$d_{q3,4} = (R_{T4q} - R_{T3q}) / 2(l_{T4} - l_{T3}); \quad (11)$$

где  $R_{T1q}, R_{T2q}, R_{T3q}, R_{T4q}$  – измеренные сопротивления резисторов  $R_{T1}, R_{T2}, R_{T3}$ , и  $R_{T4}$   $q$ -й тестовой структуры;  $l_{T1}, l_{T2}, l_{T3}, l_{T4}$  – номинально заданные длины пленочных резисторов тестовой структуры;  $b_{T1,2}, b_{T3,4}$  – номинально заданные ширины пар резисторов  $R_{T1}, R_{T2}$  и  $R_{T3}, R_{T4}$  тестовой структуры;  $R_{kq1,2}, R_{kq3,4}$  – величины сопротивлений контактов пар резисторов  $R_{T1}, R_{T2}$  и  $R_{T3}, R_{T4}$   $q$ -й тестовой структуры;  $a_{q1,2}, a_{q3,4}$  – коэффициенты пар резисторов  $R_{T1}, R_{T2}$  и  $R_{T3}, R_{T4}$   $q$ -й тестовой структуры, вычисляемые по формулам:

$$a_{q1,2} = (R_{T1q}l_{T2} - R_{T2q}l_{T1}) / 2(l_{T2} - l_{T1}), \quad (12)$$

$$a_{q3,4} = (R_{T3q}l_{T4} - R_{T4q}l_{T3}) / 2(l_{T4} - l_{T3}); \quad (13)$$

Величину удельного переходного сопротивления контактов резистивных элементов ИС по отдельной взятой  $q$ -й тестовой структуре определяют по формуле

$$\rho_{kq} = \frac{(R_{kq1,2}b_{T1,2q})^2 + (R_{kq3,4}b_{T3,4q})^2}{2\rho_{sq}}, \quad (14)$$

где  $\rho_{sq} = \rho_{os} + \Delta\rho_{sq}$  – величина удельного поверхностного сопротивления в месте расположения  $q$ -й тестовой структуры;  $b_{Ti,jq} = b_{Ti,j} + \Delta b_{q}$ .

На основе разработанных тестовой структуры и математической модели предложены принципы построения и разработаны автоматизированные системы АСК и СРТП при серийном изготовлении МПП с резистивными элементами при учете контактных сопротивлений, позволяющие существенно повысить эффективность произ-

водства: в два раза снизить трудоемкость на операции доводки резисторов и на 30% увеличить процент выхода годных МПП [21].

## Заключение

В результате проведенных исследований и разработок осуществлено решение комплекса конструкторско-технологических проблем по улучшению электрических и массогабаритных характеристик, повышению надежности и контролю качества ПЧ микрополосковых СВЧ-устройств с **повышенным уровнем мощности, необходимыми для создания и серийного изготовления современных радиотехнических систем государственного опознавания дециметрового диапазона для наземной, корабельной и самолетной техники.**

Разработаны новые конструкции, технологии изготовления основных элементов МПП, математические модели, методики, алгоритмы и программные модули расчета ТРЭ, а также методика расчета согласованных ТРН, которые внедрены на предприятии ФГУП «ФНПЦ “Радиоэлектроника”» и используются при проектировании и серийном изготовлении специзделий. Внедрение результатов работы позволило обеспечить заданные массогабаритные характеристики, существенно повысить качество и надежность МП СВЧ-устройств, снизить себестоимость их разработки и изготовления. В том числе до трех раз снизить потери энергии в МПЛ, в 5–10 раз повысить импульсную СВЧ-мощность ТРН, в 3–5 раз **повысить коррозионную стойкость проводников МПЛ** и на порядок повысить стабильность ТРЭ. Внедрение САПР резистивных элементов и автоматизированных систем АСК и СРТП при серийном производстве ПЧ СВЧ-устройств позволило увеличить процент выхода годных МПП с резистивными элементами с 40 до 70 % и в два раза снизить трудоемкость их изготовления.

Таблица

№	Структура и толщина слоев	Потери, дБ/м	
		Поле рассеяния	Среднее значение
Влияние материала подслоя			
1	Cr(75 ± 5 Ом/кв.)- Cu <sub>B</sub> (9 ± 1 мкм)	1,06–1,08	1,07
2	V(75 ± 5 Ом/кв.)- Cu <sub>B</sub> (9 ± 1 мкм)	1,09–1,17	1,13

Таблица (продолжение)

№	Структура и толщина слоев	Потери, дБ/м	
		Поле рассеяния	Среднее значение
Влияние толщины адгезионного подслоя из ванадия и резистивного слоя			
3	V(25 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (9 ± 1 мкм)	1,15-1,25	1,2
4	V(150 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (9 ± 1 мкм)	1,05-1,16	1,1
5	РС 5406К(25 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (9-11 мкм)	1,31-1,42	1,37
Влияние технологии изготовления слоя меди			
6	V(75 ± 5 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (7-9 мкм)	1,08-1,11	1,1
Влияние микропрофиля полосковых линий на величину коэффициента затухания			
7	V(75 ± 5 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (7-9 мкм)	1,08-1,11	1,1
8	V(75 ± 5 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (7-9 мкм)	0,93-0,96	0,95
Влияние толщины слоя никеля			
9	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (7-11 мкм)-Ni <sub>T</sub> (0,4 ± 0,1 мкм)	2,6-2,8	2,7
10	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (7-11 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1,0 ± 0,3 мкм)	3,1-3,3	3,2
11	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (7-11 мкм)-Ni <sub>T</sub> (3,0 ± 0,5 мкм)	3,9-4,4	4,2
Влияние толщины меди при осаждении золота из цитратного электролита			
12	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (6 ± 1 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	2,8-3,7	3,3
13	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (10 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	2,6-3,6	3,1
14	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (20 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	2,2-2,9	2,6
Влияние толщины золота при осаждении из цитратного электролита			
15	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (10 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (6 ± 0,5 мкм)	2,4-3,3	2,9
Влияние толщины золота при осаждении из фосфатного электролита с платиновыми анодами			
16	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (10 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)	1,5-2,1	1,8
17	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (10 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	1,1-1,3	1,2
18	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (10 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (6 ± 1,0 мкм)	1,1-1,2	1,1
Влияние толщины меди при осаждении золота из фосфатного электролита с платиновыми анодами			
19	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (6 ± 1 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	1,2-1,3	1,25
20	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (10 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	1,1-1,2	1,15
21	V(50-100 Ом/кв.)-Cu <sub>B</sub> (1-2 мкм)-Cu <sub>T</sub> (20 ± 3 мкм)-Ni <sub>T</sub> (1 ± 0,3 мкм)-Au <sub>T</sub> (3 ± 0,5 мкм)	1,07-1,11	1,1

## Список литературы

- Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2006.
- Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев [и др.]; под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. 382 с.
- Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / И.П. Бушминский [и др.]; под ред. И.П. Бушминского. М.: Радио и связь, 1987. 272 с.
- Климачев И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера, 2006. 352 с.
- Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры / В.Е. Власов [и др.]; под ред. А.И. Коробова. М.: Радио и связь, 1987. 157 с.
- Лугин А.Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов: монография. Пенза: Информационно-издательский центр Пензенского государственного университета, 2008. 288 с.
- Спирин В.Г. Проектирование и технология тонкопленочных микросборок с топологическими размерами 10–50 мкм: монография. Арзамас: АГПИ, 2005. 146 с.
- Пат. № 2341048 Российская Федерация, С1, Н05К 3/18. Способ изготовления микрополосковых СВЧ-интегральных схем / Крючатов В.И.; заявл. 28.06.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.
- Meinel H., Rembold B., Weisbeck H. Optimization of thin thick film technology for hybrid microwave circuits // *Electro Component Science and Technology*. 1977. V. 4. P. 143–146.
- Крючатов В.И. Технология изготовления микрополосковых линий СВЧ ГИС с повышенной надежностью // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2009. № 2. С. 34–36.
- Пат. № 2339103 Российская Федерация, С1, Н01С 1/032. Резистор с повышенной мощностью рассеяния и способ его изготовления / Крючатов В.И.; Заявл. 17.07.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.
- Крючатов В.И. Технология и конструирование высокостабильных пленочных и мощных микрополосковых СВЧ ГИС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1997.
- Пат. № 2338341 Российская Федерация, С2, Н05К 3/02, Н05К 3/06. Способ изготовления полосковой платы на диэлектрической подложке / Крючатов В.И.; заявл. 28.12.2006; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 31.
- А.С. № 1228770 СССР, МПК Н05К 3/08. Способ изготовления микросхем / И.И. Климачев, Н.В. Потапов., 1982.
- Пат. № 2342812 Российская Федерация, С2, Н05К 3/02, Н05К 3/06. Способ изготовления плат гибридных интегральных схем Крючатова В. И. / Крючатов В.И.; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36.
- Пат. № 2332741 Российская Федерация, С1, Н01С 17/075. Способ изготовления тонкопленочных резисторов / Крючатов В.И.; заявл. 16.04.2007; опубл. 27.08.2008, Бюл. № 24.
- Подгонка пленочных резисторов микросхем / З.Ю. Готра [и др.] // *Зарубежная электронная техника. Сборник обзоров*. 1985. № 1. С. 30–74.
- Пат. № 2232441. Российская Федерация, 7Н01С 17/24. Способ лазерной подгонки пленочных элементов интегральных схем / Лугин А. Н., Власов Г. С., Лугина В. В.; заявл. 18.10.2002; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19.
- Пат. № 2339104 Российская Федерация, С1, Н01С 17/24. Способ изготовления пленочных резисторов / Крючатов В.И.; заявл. 16.03.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.
- Крючатов В.И. Математическая модель для исследования погрешностей сопротивлений резисторов интегральных схем // *Нелинейный мир*. 2009. Т. 7. № 5. С. 70–75.
- Пат. № 2403649 Российская Федерация, С1, Н01Л 21/66. Способ управления групповыми технологическими процессами изготовления резистивных компонентов интегральных схем / Крючатов В.И.; заявл. 17.08.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
- Крючатов В.И. Методика автоматизированного конструктивного расчета тонкопленочных резисторов с учетом производственных погрешностей // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2009. № 3. С. 53–59.

## Bases of designing and technology at creation of the passive part of highly reliable microstrip microwaves-devices of the decimeter range with the increased level of capacity

V.I. Kryuchatov

Problems of improvement of electric and operational characteristics of a passive part of microstrip microwaves-devices of a decimeter range with the increased level of capacity are considered. Principles and, developed on their basis, methods of designing and manufacturing techniques which allow to project highly reliable microstrip microwaves-devices with small losses of energy in the microstrip lines, are resulted by the increased pulse capacity of the coordinated resistive loadings and high stability of resistive elements. Systems of the automated designing of resistive elements and statistical quality assurance, the analysis and regulation of technological processes of manufacturing of microstrip payments with resistive elements for maintenance of high reproducibility of electric parameters in conditions of a batch production and reliability while in service are offered.

*Keywords:* microstrip microwaves-devices, a passive part, designing, technology, quality assurance, reliability.