

На правах рукописи

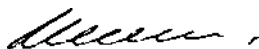
**КЛИМАЧЕВ Иван Иванович**

УДК.621.37.:367.732.

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ  
МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЛАТ ДЛЯ БЕСФЛЮСОВОЙ  
СБОРКИ ГИС СВЧ С ВЫСОКОЙ  
ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ И  
НАДЕЖНОСТЬЮ ИЗДЕЛИЙ**

**Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты,  
микро- и нанoeлектроника, приборы  
на квантовых эффектах» и  
Специальность 05.27.06 «Технология и оборудование  
для производства полупровод-  
ников, материалов и приборов  
электронной техники»**

**А в т о р е ф е р а т** диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук



**г. Фрязино 2005 г.**

Диссертация выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Исток».

**Научный руководитель:**  
доктор технических наук Королёв Александр Николаевич.

**Научный консультант:**

кандидат технических наук Иовдальский Виктор Анатольевич.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Новоселец Виктор Исидорович,

доктор технических наук, профессор Шахнов Вадим Анатольевич

**Ведущая организация:** ФГУП «НПП «Салют», г. Нижний Новгород.

Защита состоится 29 марта 2005 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д409.001.01 в большом конференц-зале ФГУП «НПП «Исток», 141190 г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток».

Автореферат разослан 22 февраля 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Погорелова Э.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы - Развитие электроники СВЧ диапазона происходит по пути усложнения РЭА и повышения требований к её характеристикам, в том числе, к одной из главных — надёжности.

Основными составляющими частями РЭА СВЧ диапазона являются твердотельные модули в гибридном исполнении. При их изготовлении широко применяются процессы пайки и микросварки.

В настоящее время достигнут высокий уровень технологий, базирующийся на процессах сборки с применением флюсов. Однако использование флюсов на сборочных операциях провоцирует коррозионные процессы в загерметизированных микросборках и модулях. Это приводит к деградации электрических характеристик, к выходу из строя активных и пассивных элементов микрополосковых плат при эксплуатации или длительном хранении СВЧ приборов.

По этой причине развиваются и внедряются в промышленность процессы бесфлюсовой пайки при сборке, предполагающей проведение операций микросварки и пайки со ступенчатым снижением температуры в диапазоне 290...420°C.

Изучение опыта предшествующих разработок показывает, что конструкторские и технологические аспекты проектирования и изготовления СВЧ ГИС с использованием бесфлюсовой сборки были изучены недостаточно полно и представляют собой актуальную научную задачу, решение которой изложено в диссертационной работе.

Цель работы - разработка послойной структуры и технологии изготовления ГИС СВЧ для бесфлюсовой сборки в диапазоне 300...420°C, позволяющих обеспечить высокую воспроизводимость параметров и надежность твердотельных модулей СВЧ. Постановка задачи - для достижения поставленной цели решались следующие задачи: на основе исследования особенностей диффузионных процессов в температурном диапазоне 300...400°C в многослойных микрополосковых структурах и влияния этих процессов на прочность сварных термокомпрессионных соединений, коэффициента затухания СВЧ энергии, а также исследования растворения покрытий в процессе пайки, определялись области оптимального применения традиционных структур на основе золота и меди для бесфлюсовой сборки;

- разрабатывалась универсальная структура МПП, обеспечивающая оптимальные условия для микросварки на лицевой стороне микроплат и оптимальные условия для микропайки на экранной стороне; разрабатывалась технология формирования микрополосковых плат для бесфлюсовой сборки ГИС;
- исследовалось явление высокотемпературного расслаивания покрытий МПП;
- разрабатывалась технология изготовления МПП с формированием металлизированных отверстий, внутрисхемных соединений, тонкопленочных резисторов, индуктивностей и конденсаторов методами планарной технологии; разрабатывалась технология монтажа кристаллов навесных элементов ГИС СВЧ в объеме подложки платы в сквозных отверстиях, совмещение лицевых поверхностей кристаллов и платы, относительная ориентация топологических рисунков металлизации платы и кристаллов навесных элементов, закрепления кристаллов и подключения контактных площадок кристаллов к проводникам платы.

**Объектом исследования** - служат МПП ГИС СВЧ, их многослойные металлизационные покрытия, конструкция ГИС и МПП для них, технология их изготовления. **Предметом исследования служат:** прочность соединения, состав металлизации МПП, технологические операции, взаимодействие слоев структуры металлизации топологического рисунка МПП между собой и с припоями при выполнении сборочных операций.

**Метод исследования** - комплексный, характеризуемый последовательным использованием современных теоретических представлений, современных физико-химических методов исследования, методик исследования по прохождению сигналов в платах ГИС СВЧ, технологических методик.

**Научная новизна.** В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Исследована надежность сварных термокомпрессионных соединений золотой проволоки с микрополосковыми линиями (МПЛ), имеющими структуру Cr/Cu/Ni/Au в зависимости от толщины барьерного слоя гальванически осажденного никеля и от режима отжига.
2. Разработана структура металлизации МПП ( $Ti_{\text{вак}} - Pd_{\text{вак}} - Au_{\text{гальв}}$  - на лицевой стороне подложки и  $Cr_{\text{вак}} - Cu_{\text{вак}} - Cu_{\text{гальв}} - Au_{\text{гальв}}$  - на экранной стороне), обеспечивающая высокотемпературную ( $400^{\circ}\text{C}$ ) сборку ГИС на лицевой стороне платы и надежную пайку МПП на металлическое основание.
3. Исследованы причины расслоения структуры металлизации топологического рисунка МПП при нагреве её на операциях сборки ГИС.
4. Разработан процесс последовательного усиления металлизации переходных отверстий в МПП взамен торцевой металлизации для коммутации элементов ГИС СВЧ, расположенных на разных сторонах МПП.
5. Разработаны оригинальные конструкция и технология формирования внутренних перемычек, защищенных авторскими свидетельствами, позволяющих повысить воспроизводимость электрических параметров ГИС СВЧ, улучшить их электрические характеристики, повысить надёжность внутренних соединений.
6. Разработана оригинальная технология монтажа кристаллов навесных элементов ГИС в отверстия МПП, их закрепление, совмещения с топологическим рисунком и подключения в схему, защищенная авторским свидетельством.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Высокая надежность, низкие и воспроизводимые потери СВЧ сигнала достигаются применением системы металлизации микрополосковых линий на основе меди в следующих значениях:  $Cr_{\text{вак}}$  (80... 150 Ом/□) -  $Cu_{\text{вак}}$  1 мкм - -  $Cu_{\text{гальв}}$ -, 3 мкм - -  $Ni_{\text{гальв}}$ - (0,5...0,9) мкм -  $Au_{\text{гальв}}$ - 3 мкм) и ее можно рекомендовать для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ при  $T=330^{\circ}\text{C}$  со временем выдержки не более 10 мин, а при  $T=420^{\circ}\text{C}$  - не более 3 мин.
2. Оптимальные условия для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ с применением термокомпрессионной сварки и пайки микроплат на основания легкоплавкими припоями обеспечиваются при структуре металлизации лицевой стороны микроплат на основе золота (система  $Ti/Pd/Au$ ), а экранной стороны - на основе меди (система  $Cr/Cu/Ni/Au$ ), с барьерным слоем, ограничивающим растворение в процессе пайки.
3. Повышение надёжности соединений ГИС СВЧ, улучшение электрических и массогабаритных характеристик, их воспроизводимость достигается за счет внутрисхемных соединений через металлизированные отверстия, а также формирования соединительных проводников с длиной 50...500 мкм, шириной 20...40 мкм, вы-

сотой воздушного промежутка 5... 15 мкм над пленочными элементами высотой 3...8 мкм, методами напыления, фотолитографии, гальванического осаждения и последующего травливания технологических слоев.

4. Дополнительное повышение надёжности соединений ГИС СВЧ, улучшение электрических и массогабаритных характеристик, их воспроизводимость достигается за счет размещения кристаллов навесных элементов в отверстиях в подложке МПП, совмещения лицевых поверхностей кристаллов и платы, относительной ориентации топологических рисунков металлизации платы и кристаллов, закрепления кристаллов в отверстиях и формирования соединительных проводников методами напыления, фотолитографии и гальванического осаждения.

#### **Практическая ценность работы.**

Полученные новые научные результаты и разработанные технологические процессы составляют основу базовых технологий изготовления ГИС СВЧ в ФГУП «НПП «Исток», заводе «Радиоизмеритель» г. Киев и др. и нашли применение при проведении большого числа НИР и ОКР в крупносерийном производстве модулей СВЧ на протяжении многих лет.

#### **Апробация и публикация результатов работы.**

Результаты работы опубликованы в материалах двух международных конференций, в 9 научно-технических статьях, 12 научно-технических отчетах, изложены на 4 семинарах главных конструкторов ФГУП «НПП «Исток», 3 технологических семинарах по программе «Гибрид», совещании КНТС главных технологов; по результатам работы получено 4 авторских свидетельства и 2 положительных решения на выдачу патентов РФ.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, приложения, списка литературы. Работа выполнена на 150 страницах текста, содержит 78 рисунков, 27 таблиц и список литературы из 144 наименований и приложение на 17 страницах.

#### **Содержание и результаты работы.**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы работы по разработке конструкции и технологии МПП для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ с высокой воспроизводимостью параметров и надёжностью изделий, определены цели и задачи исследования, перечислены основные результаты работы, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

**Первый раздел** посвящен обзору современного состояния разработки послойной структуры полосковых проводников МПП ГИС СВЧ. Большое внимание уделено выявлению уровня надёжности ГИС СВЧ на начало работы и перспективности применения бесфлюсовой сборки для её повышения, проблемам сборки и перспективам оптимизации структуры металлизации МПП. Проведён тщательный анализ состояния многослойных структур металлизации МПП ГИС СВЧ. Рассмотрено диффузионное взаимодействие в металлических слоях проводников МПП, в частности рассмотрены системы хром-медь, медь-золото, медь-никель, никель-золото, а также многослойная система хром-медь-никель-золото. Проанализировано затухание энергии в проводниках МПП с различными слоями в составе структуры проводников и их различными соотношениями.

Кроме того, в первом разделе проанализированы наиболее распространённые на начало работы технологические маршруты изготовления МПП ГИС СВЧ, выявлены недостатки развития конструкции и технологии ГИС СВЧ и определены основные задачи диссертационной работы.

Во втором разделе разработана методика расчёта коэффициента затухания волны в многослойной полосковой линии, обусловленного потерями в металле, с учетом того, что различные участки сечения (и слои проводников) полосковых проводников обладают разной проводимостью и шероховатостью поверхности.

Это позволяет рассчитать затухание в реальных микрополосковых структурах, сформированных по различным технологическим маршрутам, оценивать вклад каждого участка сечения проводников линии в общей потери с учётом структуры слоёв тонкоплёночной металлизации. Результаты исследования коэффициентов затухания от толщины слоёв многослойных структурах МПП представлены на Рис.1 и 2.

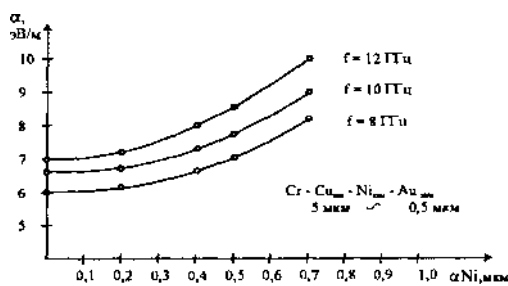


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания от толщины слоя никеля при фиксированной толщине золотого покрытия ( $t_{Au} = 0.5$  мкм)

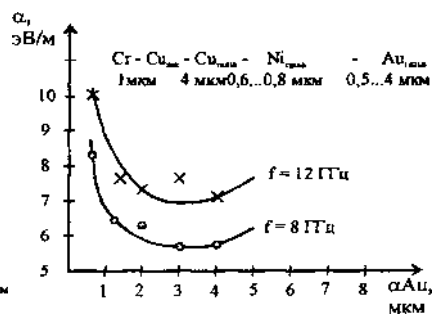


Рис.,2. Зависимость коэффициента затухания от толщины золотого покрытия

На рис. 3 показаны результаты исследования влияния толщины покрытий на воспроизводимость коэффициента затухания.

1. Cr	Cu <sub>вак</sub>	Cu <sub>гальв</sub>	Ni <sub>гальв</sub>	Au <sub>гальв</sub>
$p_s = 100 \text{ Ом/+}$	1 мкм	4 мкм	0,6...0,8 мкм	3 мкм
2. Cr	Cu <sub>вак</sub>	Cu <sub>гальв</sub>	Ni <sub>гальв</sub>	Au <sub>гальв</sub>
$p_s = 100 \text{ Ом/+}$	1 мкм	8 мкм	0,6...0,8 мкм	3 мкм

Результаты исследования влияния структуры полосковой линии на величину и разброс коэффициента затухания представлены в таблице 1.

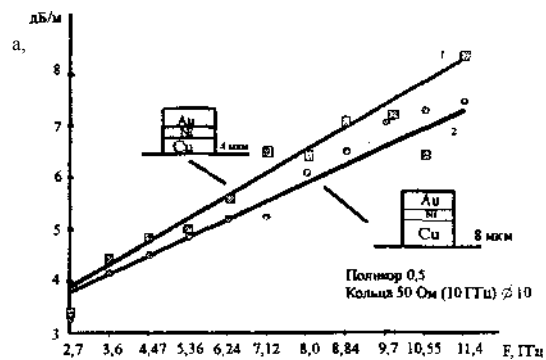


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания от толщины полосковой линии.

Таблица 1.

№ п/п	Структура	Разброс	Уровень
		коэффициента затухания, а дБ/м	коэффициента затухания, а дБ/м
1	Сг Cu <sub>вак</sub> Rs < 1 мкм 5 мкм	1	5. ..6
2	Сг Cu <sub>вак</sub> Rs = 2.. 3 мкм 5 мкм	1,7	7,8. ..8,5
3	Сг Cu <sub>вак</sub> Cu гальв 1 мкм 4 мкм	1,5	5,4. ..6,8
4	Сг Cu <sub>вак</sub> Ni <sub>хим</sub> 5 мкм 0,2 мкм	1	6,4. ..7,4
5	Сг Cu <sub>вак</sub> Ni <sub>хим</sub> Au <sub>хим</sub> 5 мкм 0,4 мкм 0,5 мкм	1	6,1. ..7,1
6	Сг Cu <sub>вак</sub> Cu гальв Ni гальв Au гальв 1 мкм 4 мкм 0,4...0,6 мкм	2,5	5,5. ..8,5
7	Сг Cu <sub>вак</sub> Cu гальв Ni гальв Au гальв 1 мкм 4 мкм 0,4...0,6 мкм	1,5	5,5 ...7
8	Сг Cu <sub>вак</sub> Cu гальв Ni гальв Au гальв 1 мкм 4 мкм 0,4...0,6 мкм	1	6,2... ..7,2
9	Сг Cu <sub>вак</sub> Cu гальв Ni гальв Au гальв 1 мкм 4 мкм 0,4...0,6 мкм	0,7	6... 6,7
10	Ti Pd <sub>вак</sub> Au гальв 0,2 мкм 4 мкм	1	7,5. ..8,5

Подтверждено, что края полосковой линии вносят существенный вклад в потери. Показано, что они составляют примерно 30% потерь для 50 - Омной линии на подложке с  $\epsilon = 10$ , несмотря на то, что их поверхность занимает ничтожно малую долю от общей поверхности металла в линии. Установлено, что шероховатость края полосковой линии существенным образом влияет на разброс коэффициента затухания.

Наименьшие потери и разброс коэффициента затухания обеспечиваются в полосковых линиях, сформированных методом вакуумного напыления, благодаря меньшей шероховатости верхней грани и более высокой проводимости напыленных слоев металла по сравнению со слоями, полученными гальваническими и химическими методами. Уровень потерь определяется соотношением толщины скин-слоя  $\Delta$  на всех гранях полосковой линии и толщинами ( $t$ ) покрытий на этих гранях. При  $\Delta < t_{\text{AuCu}}$  уровень потерь воспроизводимый и низкий; при  $\Delta > t_{\text{AuCu}}$  уровень потерь высокий, а воспроизводимость определяется точностью формирования толщин покрытия. Пленки, полученные вакуумными методами и химическим осаждением (разброс толщины не превышает 10%), характеризуются малым разбросом, а гальванические, вследствие большого разброса по толщине ( $> 40\%$ ), - большим. При  $\Delta \geq t_{\text{Au}}$  полосковую линию можно рассматривать как однослойную. Из расчетов и экспериментальных измерений следует, что воспроизводимость и низкий уровень коэффициента затухания в микрополосковых структурах, помимо удельного сопротивления и шероховатости края, определяются соотношением толщин и точностью формирования покрытий и обеспечиваются при разбросе толщин покрытий менее 10% при условии, если толщина верхнего слоя покрытий на всех гранях полосковой линии превышает 2...3 скин-слоя. Толщину адгезионного слоя при рабочих частотах до 18 ГГц целесообразно выбирать в диапазоне  $100 + 30 \text{ Ом/п}$ , при этом уровень потерь не изменяется, а величина адгезии составляет не менее  $300 \text{ кг/см}^2$ . Толщина слоя золота в диапазоне частот 8...18 ГГц должна быть не менее 2 мкм, при этом барьерный слой никеля полностью экранируется, и его толщину следует выбирать исходя из требований к покрытиям для бесфлюсовой сборки. Толщина меди в основании микрополосков должна быть не менее 1 мкм.

В третьем разделе представлена разработка послойной структуры для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ. Для этого вначале проведено исследование диффузионных процессов и элементарного состава поверхности в системе  $\text{Cr}_{\text{вак}} - \text{Cu}_{\text{вак}} - \text{Cu}_{\text{гальв}} - \text{Ni}_{\text{гальв}} - \text{Ni}_{\text{гальв}} - \text{Au}_{\text{гальв}}$ .

Результаты исследования представлены на рис.4, 5 и 6.

Проведены исследования температурно-временного интервала стабильности системы  $\text{Cr}_{\text{вак}} - \text{Cu}_{\text{вак}} - \text{Cu}_{\text{гальв}} - \text{Ni}_{\text{гальв}} - \text{Ni}_{\text{гальв}}$  - и системы  $\text{Ti}_{\text{вак}} / \text{Pd}_{\text{вак}} / \text{Au}_{\text{гальв}}$ , а также влияние диффузионных процессов на свойства микрополосковых структур, в частности влияния структуры микрополосковых проводников и режимов их термообработки на прочность сварных термокомпрессионных соединений. Результаты исследований в таблице 2 и рис. 7,8 и 9.



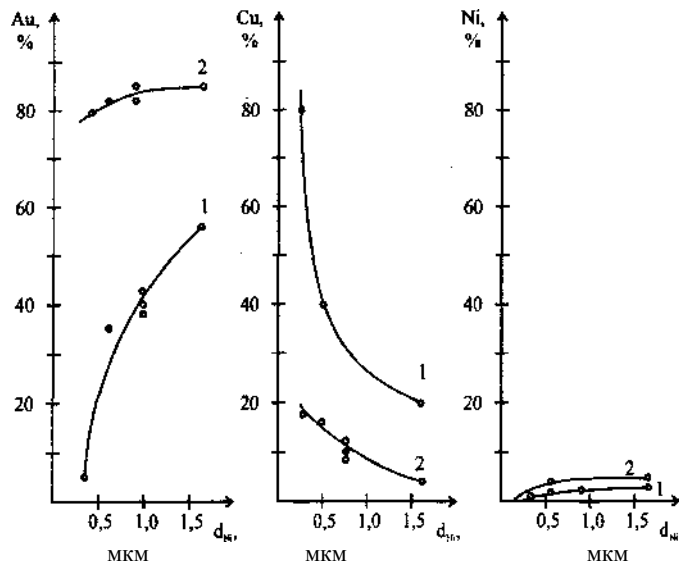


Рис. 4. Зависимость процентного содержания Cu, Ni, Au в поверхностном слое образцов системы Cr/Cu<sub>вак</sub>/Cu<sub>гальв</sub>/Ni<sub>гальв</sub>/Au<sub>вак</sub> после отжига при 420°C в течение 20 мин в вакууме и на воздухе в зависимости от толщины барьерного слоя никеля. 1 - отжиг на воздухе; 2 - отжиг в вакууме.

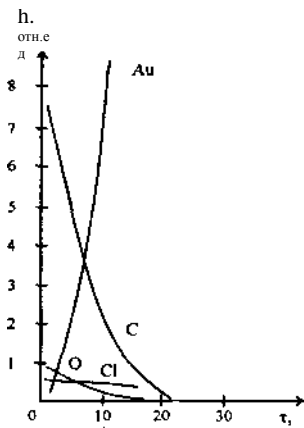


Рис. 5. Изменение высоты пиков Au, C, O, Si на Оже-спектрах поверхности Cr/Cu<sub>вак</sub>/Cu<sub>гальв</sub>/Ni<sub>гальв</sub>/Au<sub>гальв</sub> в исходном состоянии в зависимости от времени ионного травления.

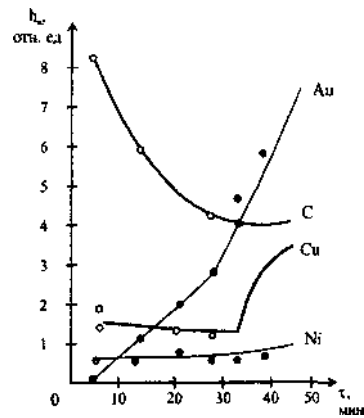


Рис. 6. Изменение высоты пиков Au, C, Si на Оже-спектрах поверхности Cr/Cu<sub>вак</sub>/Cu<sub>гальв</sub>/Ni<sub>гальв</sub>/Au<sub>гальв</sub> в зависимости от времени ионного травления после отжига на воздухе при 400°C.

Таблица 2. Влияние высокотемпературного прогрева МПП на величину и разброс коэффициента затухания.

№	Структура	Температура прогрева °С	Время прогрева мин.	Уровень потерь, дБ/м	Разброс потерь, дБ/м
1	Cr-Cu <sub>вак</sub> -Cu <sub>гальв</sub> -Ni <sub>гальв</sub>	без прогрева	-	7,4	1
		150	10	7,4	1
		250	10	7,3	1,5
		300	10	7,4	2
		420	1	8,1	2
2	Cr-Cu <sub>вак</sub> -Cu <sub>гальв</sub> -Ni <sub>гальв</sub> -Au <sub>гальв</sub>	без прогрева	-	7,2	1
		250	30	7,2	1
		300	1	7	1
			3	7	1
			5	6,9	1
			10	6,9	1
			30	6,9	1
			1	6,9	1,5
			5	6,9	1,5
			15	7,5	2
			20	8	2,5
			250	-	8
		3	Ti <sub>вак</sub> -Pd <sub>вак</sub> -Au <sub>гальв</sub>	300	5
420	20			8	1

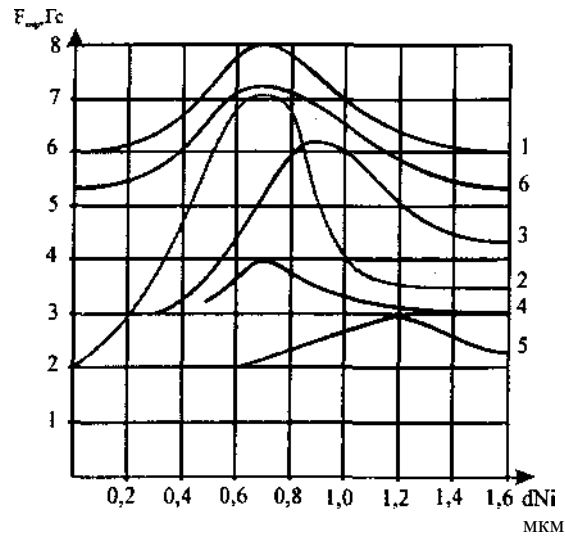


Рис. 7. Зависимость прочности сварных соединений, выполненных термокомпрессионной сваркой, от толщины слоя никеля и температуры отжига микрополосковых плат:

1. без предварительной термообработки (с подготовкой поверхности);
2. после отжига на воздухе при 300°C в течение 10 минут;
3. после отжига при 420°C в течение 1 минуты;
4. после отжига при 420°C в течение 4-х минут;
5. после отжига при 420°C в течение 9 минут;
6. после отжига на воздухе при 30(ГС в течение 5 минут

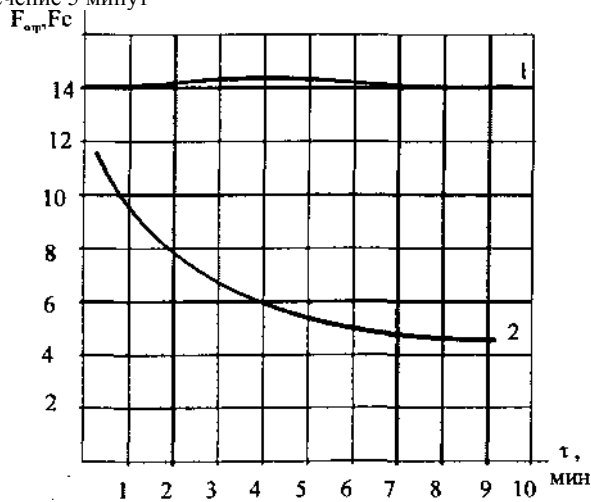


Рис. 8. Изменение усилия прочности сварных термокомпрессионных соединений от времени прогрева при температуре отжига 420°C: 1. металлизация Ti - Pd - Au; 2. металлизация Cr - Si - Ni - Au.

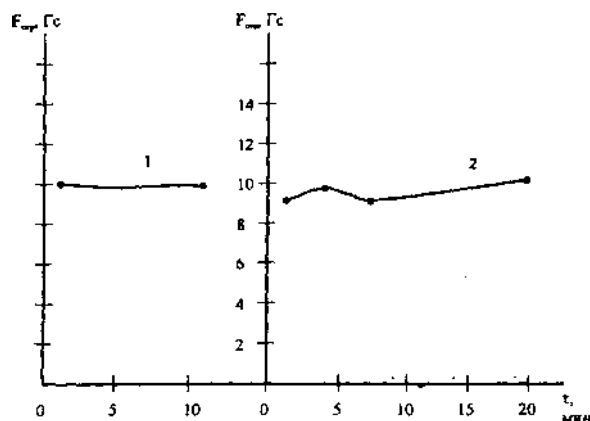


Рис. 9. Прочность сварных термокомпрессионных соединений на структуре Ti-Pd-Au:

1. после отжига на воздухе при температуре 300°C в течение 20 мин;
  2. после отжига на воздухе при температуре 420°C в течение 20 мин;
- Проведено исследование растворимости покрытия при пайке микроплат на основания. Результаты отражены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Изменение состояния слоев в паяном шве в результате пайки по золотому покрытию.

№ п / п	Структура полосковой линии	Температура пайки, °С	Толщина слоя, мкм					Припой
			до пайки			после пайки		
			Cu <sub>мл.</sub>	Ni	Au	Cu <sub>суп</sub>	интерм <sub>е</sub>	
1	Cr-Cu <sub>вак</sub> - Cu <sub>гальв</sub> - Au <sub>гальв</sub>	135	10	-	3	4...6	8...20	ПОИ <sub>н</sub> -52
		200	8	-	2	0...3	5...10	ПОИ <sub>н</sub> -52
		250	8	-	2	0...2	12...20	ПОИ <sub>н</sub> -52
		150	1	-	2	5...6	2...5	ПОСК50-18
2	Cr-Cu <sub>вак</sub> - Cu <sub>гальв</sub> - Ni <sub>гальв</sub> -Au <sub>гальв</sub>	250	6	0,3	3	3...4	7..8	ПОВи-0,5
		250	6	0,5	3	4...6	6...8	ПОВи-0,5
		285	6	0,3	3	1	6...7	ВПр9
		200	6	0,5	2	4...5	2...4	ПОС61
		330	6	0,7	3	2...4	6...8	ПСИ <sub>н</sub> 12
3	Cr-Cu <sub>вак</sub> -Ni <sub>вак</sub> Cu <sub>вак</sub> -Au <sub>гальв</sub>	200	4	-	3	4	2...6	ПОС61
		330	4	-	3	2...4	2...6	ПСИ <sub>н</sub> 12
4	Ti-Pd-Au	200	-		3	-	4...8	ПОС61 покрытие полностью растворилось
		330	-		3	-		ПСИ <sub>н</sub> 12 полностью растворилось золотое покрытие

Таблица.4. Изменение соотношения слоев в паяном шве в результате пайки по медному покрытию\*

№ п/п	Припой	Температура пайки, °С	Толщина слоя, мкм		
			до пайки	после пайки	интерметаллид
			Си,ач	С^сохр	
1	ОСК Ин	120	10	4...8	4...8
2	ПОИ <sub>н</sub> -52	140	10	4...6	4... 10
3	ПОИ <sub>н</sub> -52	200	10	1...4	2...12
4	ОСК Ин	200	10	4...6	2...12

\*) Медненные подложки перед пайкой лудились

Проведена разработка послойной структуры МПП для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ. Рис. 10

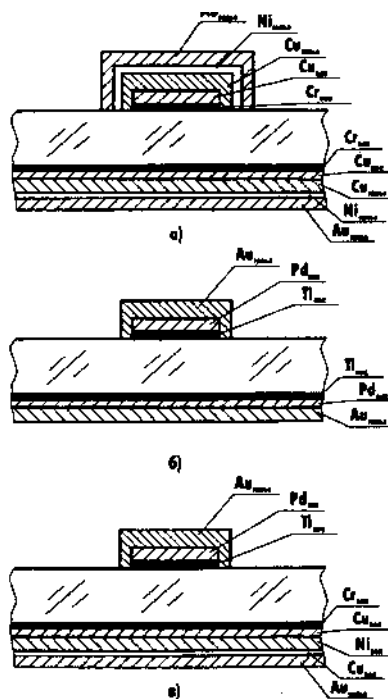


Рис. 10. Послойные структуры микрополосковых плот: а) на основе меди; б) на основе золота; в) оптимальная структура для бесфлюсовой сборки

В результате комплексного исследования многослойной тонкопленочной системы  $\text{Cr}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{гальв}}\text{-Ni}_{\text{альв}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$  установлено, что вследствие взаимодиффузии изменение процентного содержания атомов золота, меди и никеля в поверхностном слое образцов зависит от температуры отжига и толщины барьерного слоя никеля. До температуры 330°C эти изменения незначительны. Однако при дальнейшем повышении температуры процентное содержание золота в поверхностном слое резко снижается, а меди повышается. Процесс диффузии протекает более интенсивно в результате отжигов на воздухе по сравнению с вакуумом. С ростом толщины никеля в поверхностном слое МПЛ уменьшается количество атомов меди и возрастает процентное содержание атомов золота.

Определен температурно-временной интервал стабильности системы  $\text{Cr}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{гальв}}\text{-Ni}_{\text{альв}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$ . Методами ВИС и Оже-электронной спектроскопии показано, что при температуре отжига 300...350°C на поверхности МПЛ появляется незначительное количество атомов меди и никеля при времени отжига до 10 минут. При увеличении времени отжига концентрация атомов меди и никеля возрастает до больших значений. При температуре отжига 420°C на поверхности МПЛ наблюдается значительное увеличение атомов меди и никеля при времени термообработки более 3 минут. Следовательно, при температуре 420°C временным интервалом стабильности системы  $\text{Cr}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{гальв}}\text{-Ni}_{\text{гальв}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$  с толщиной никеля 0,6...0,8 мкм и золота 3 мкм является время отжига до 3 минут. При температуре отжига 330°C эту структуру можно считать стабильной при времени отжига до 10 минут. Исследования температурной стабильности МПП, сформированных на основе золота, (система  $\text{Ti}_{\text{вак}}\text{-Pd}_{\text{вак}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$ ) показали, что структура является стабильной при отжигах в вакууме и на воздухе при температурах до 500°C при временных выдержках в пределах 20 минут, что определяет целесообразность применения тонкопленочных систем на основе золота при температурах сборки более 400°C. Из приведенных исследований влияния диффузионных процессов на удельное сопротивление и СВЧ потери в микрополосковых структурах на основе меди следует, что при воздействии температурных отжигов на МПП со структурой  $\text{Cr}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{гальв}}\text{-Ni}_{\text{гальв}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$ , не превышающих 420°C и время 15 минут, средний уровень потерь не возрастает. Однако наблюдается рост разброса значений коэффициента затухания. В результате исследования влияния структуры микрополосковых плат и режимов ее термообработки на прочность сварных термокомпрессионных соединений установлено, что в структуре  $\text{Cr}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{гальв}}\text{-Ni}_{\text{гальв}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$  прочность микросварных соединений не зависит от толщины слоя никеля только в том случае, если МПП предварительно не отжигать. После прогрева МПП при 330°C в течение 10 минут удовлетворительная прочность (5 Гс) микросварных соединений обеспечивается при толщине слоя никеля 0,5...0,9 мкм. После отжига МПП при 420°C в течение 1 минуты усилие отрыва микросварных соединений более 5 Гс обеспечивается при толщине никелевого покрытия от 0,7 до 1,4 мкм. А с увеличением времени нагрева до 4...9 минут усилие отрыва становится менее 50% прочности золотой проволоки в исходном состоянии. Снижение прочности микросварных соединений объясняется интенсивной взаимодиффузией атомов меди и золота, протекающей через барьерный слой никеля, что подтверждается данными по температурно-временной стабильности системы  $\text{Cr}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{вак}}\text{-Cu}_{\text{гальв}}\text{-Ni}_{\text{гальв}}\text{-Au}_{\text{гальв}}$ .

Исследования поверхности образцов после проведения операций фотолитографии по-

казали, что в исходном состоянии поверхностный слой полосковых проводников содержит в основном углерод. Обработка поверхности образцов в неотожженном состоянии методом ионного травления позволяет легко и практически полностью удалить углеродосодержащие соединения, а значит создать благоприятные условия для осуществления бесфлюсовых сборочных процессов. После проведения отжига удалить органические соединения не удастся. Из этого следует важный для технологии изготовления ГИС СВЧ вывод: очистку поверхности МПП необходимо производить до температурных воздействий, осуществляемых в процессе термостабилизации покрытий, операций пайки и сварки.

Исследования растворения покрытий в процессе пайки микроплат на основания показали, что в структурах с системой металлизации на основе золота (Ti/Pd/Au... и др.) при пайке припоями на основе олова или свинца наблюдается полное растворение покрытий. Что снижает надежность паяных соединений. При пайке структур на основе меди (структурой  $Cu_{\text{вак}}-Cu_{\text{вак}}-Cu_{\text{гальв}}-Ni_{\text{гальв}}-Au_{\text{гальв}}$ , ... и др.) припоями на основе олова и свинца барьерный слой никеля ограничивает процесс растворения покрытий, что сохраняет медный проводящий слой и обеспечивает высокую надежность паяных соединений.

Таким образом, микрополосковые структуры на основе золота характеризуются оптимальным комплексом свойств для формирования высоконадежных сварных соединений. А структуры на основе меди с барьерным слоем никеля обеспечивают оптимальные условия для формирования паяных соединений.

Структуры на основе золота допускаются паять с применением золотосодержащих припоев (AuGe, AuSi, AuSn и др.). А структуры на основе меди - любыми припоями, но при условии, что если необходимо осуществлять термокомпрессионную разварку, то температура пайки не должна быть выше 330°C и время более 10 минут.

С учетом того, что в отличие от низкочастотных ГИС, при сборке ГИС СВЧ на лицевой стороне микроплат необходимо осуществлять монтаж навесных соединений на золото-содержащие припои и термокомпрессионную разварку, а экранной стороной микроплат паяют на основания, то высокая надежность бесфлюсовой сборки обеспечивается при структуре металлизации лицевой стороны на основе золота, а экранной стороны - на основе меди с барьерным слоем, ограничивающим растворение покрытий в процессе пайки. В четвертом разделе изложены результаты разработки технологии изготовления МПП с послойной структурой металлизации для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ. Проведена разработка маршрута и технологических процессов формирования МПП, представленные на рис. 11, для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ. Проведено исследование отжигов МПП на локальное расслаивание покрытий. В результате проведенных исследований разработан маршрут и весь комплекс входящих в него технологических процессов, обеспечивающих формирование оптимальной микрополосковой структуры для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ. Маршрут основан на изготовлении МПП с гальваническим наращиванием функциональных схем посредством технологических проводников и последующим их удалением методом фотолитографии и позволяет реализовать МПП любой конструктивной сложности, что делает разработанный маршрут наиболее универсальным. Важным является то, что при проведении гальванических процессов исключается применение промежуточных органических покрытий. Это предотвращает загрязнение электролитов, обеспечивает высокое качество и чистоту покрытий, а, следовательно - воспроизводимую бесфлюсовую сборку ГИС СВЧ.

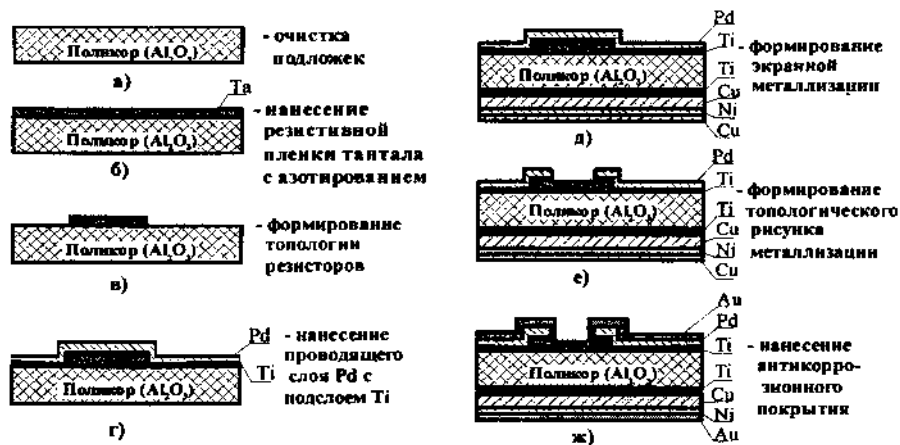


Рис.11. Структурная схема технологии формирования МПП для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ

За исключением слоя золота, все функциональные слои МПП наносятся методами вакуумного напыления, что обеспечивает высокую чистоту покрытий и точность их формирования, а, следовательно - воспроизводимость свойств.

Микроплаты с системой металлизации на лицевой стороне на основе золота (Ti-Pd-Au), а на экранной стороне - на основе меди с барьерным слоем (Cr-Cu-Ni-Au), обеспечивают высокую прочность сварных термокомпрессионных соединений (>8 Гс для проволоки диаметром 20 мкм) и возможность пайки на основания припоями на основе олова и свинца. При этом исключаются отказы ГИС СВЧ, связанные с отделением микроплат от оснований и отслоения сварных соединений. Процессы бесфлюсовой сборки воспроизводимо можно осуществлять до и после отжига микроплат при температурах 150.. 420°C.

В результате исследований влияния отжигов МПП на межслойное расслаивание функциональных слоев установлено, что расслаивание обуславливается внутренними напряжениями в гальванических покрытиях, накоплением и последующим разложением органических веществ в порах подложек, при условии, что поры зарощены, при проведении гальванических процессов и исключается применение беспористых подложек, функциональных слоев МПП, сформированных методами вакуумного осаждения, предотвращением проникновения органических веществ в поры подложек или качественным их удалением.

Разработанные на базе исследований технологические процессы позволили полностью исключить это явление, в результате - выход годных на операциях бесфлюсовой сборки с температурой более 300°C вырос с 6 до 100%.

Испытания микрополосковых плат на воздействие термоциклов и отжигов показали их высокую надежность и стабильность электрических характеристик проводящих и резистивных элементов, что позволило в условиях серийного производства снизить и застабилизировать коэффициент шума СВЧ усилителей и других приборов.

В пятом разделе сформулированы перспективные направления повышения надежности и воспроизводимости параметров ГИС СВЧ. Обосновано формирование топологии многокаскадных СВЧ МПП на единой подложке, Рис. 12.





Рис. 12. Внешний вид многокаскадного широкополосного СВЧ усилителя, выполненного на единой подложке

Разработана технология изготовления высоконадёжных металлизированных отверстий - рис. 13, и технология изготовления МПП с металлизированными отверстиями, защищёнными органической термостабильной пленкой - рис. 14.

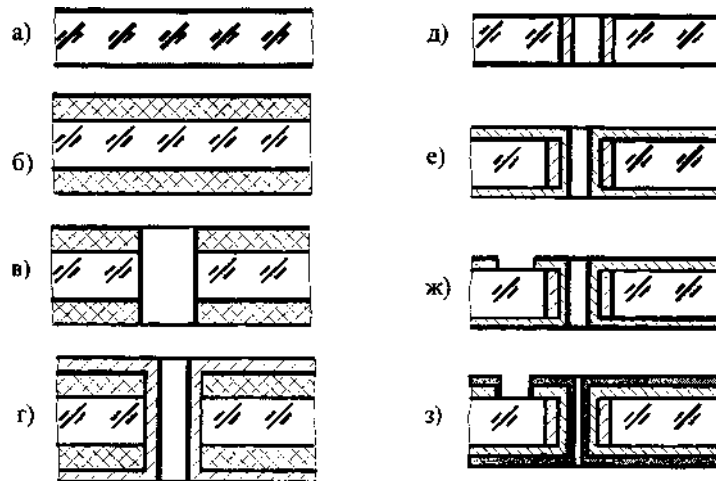


Рис. 13. Структурная схема технологии изготовления отверстия.

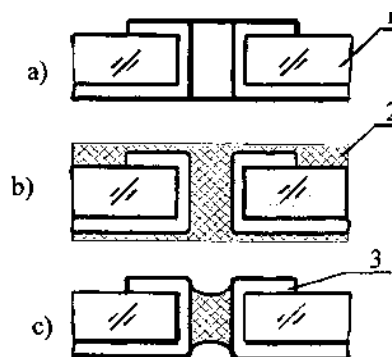


Рис. 14. Структурная схема технологии изготовления МПП с металлизированными отверстиями, защищенными органической термостабильной пленкой.

Кроме того, разработана технология изготовления МПП с тонкопленочными конденсаторами - рис. 15, а также технология изготовления внутрисхемных соединений через воздушный зазор (рис. 16).

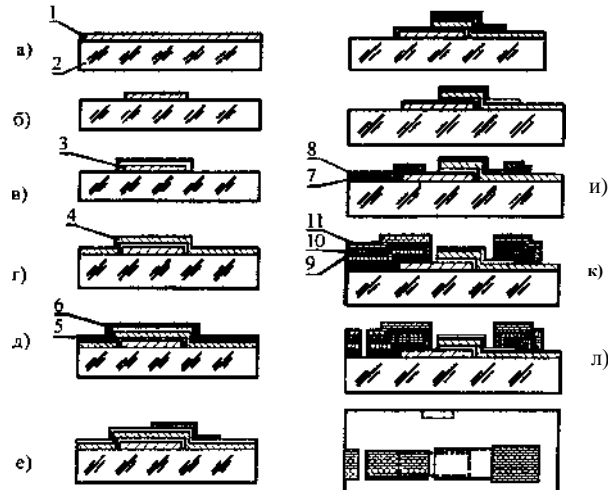


Рис. 15. Структурная схема изготовления МПП с тонкопленочными конденсаторами: 1. подложка (поликор); 2. пленка тантала Ta ( $h = 0,6$  мкм); 3. пленка  $Ta_2O_5$ ; 4. пленка двуокиси кремния  $SiO_2$ ; 5. пленка тантала Ta ( $\rho_s 50 \text{ Ом/D}$ ); 6. пленка меди Си ( $h = 1$  мкм); 7. подслоя хрома Cr ( $\rho_s 100 \text{ Ом/D}$ ); 8. пленка меди Си ( $h = 1$  мкм); 9. гальваническая медь Си; 10. гальванический никель Ni; 11. гальваническое золото Au.

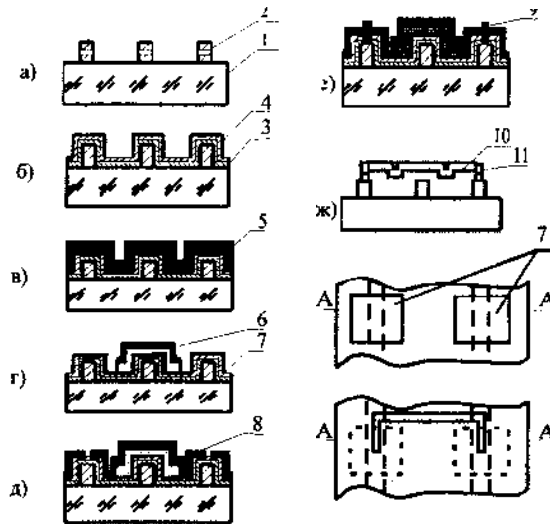


Рис. 16. Структурная схема технологии изготовления МПП с перемычками: 1. подложка; 2. микрополосковые линии; 3. титан; 4. медь напыленная; 5. медь гальваническая; 6. фоторезистивная маска; 7. контактные окна; 8. фоторезистивная маска; 9. золото гальваническое; 10. воздушный зазор; 11. перемычка.

Наиболее интересным конструктивно-технологическим вариантом являются разработки СВЧ ГИП с планарным монтажом активных элементов (рис. 17 и рис. 18).

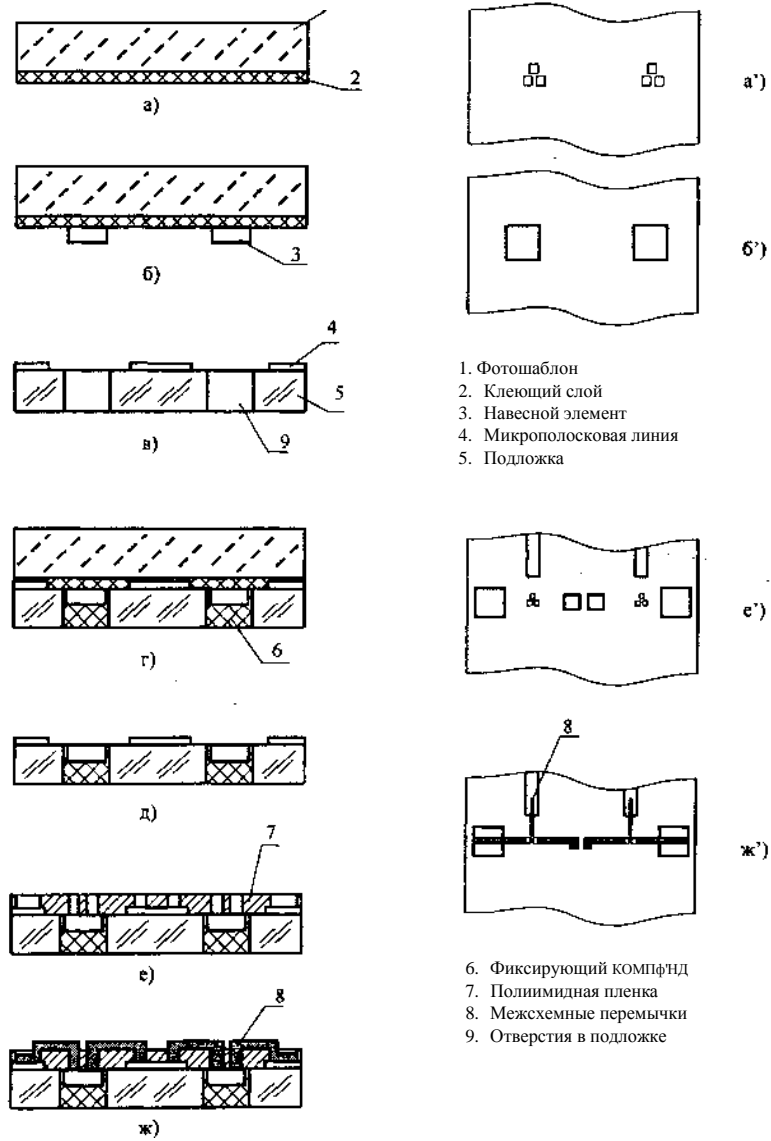


Рис. 17. Структурная схема монтажа навесных активных элементов при изготовлении ГИПС

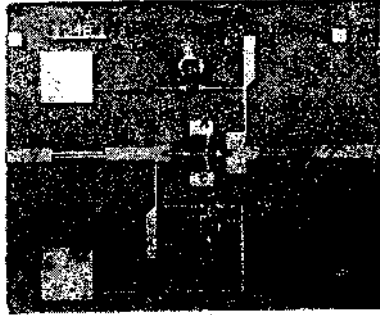


Рис. 18. Внешний вид ГИС с планарным монтажом бескорпусных GaAs транзисторов в отверстия микроплат.

Представленный вариант (рис. 18) является наиболее перспективным направлением повышения надежности, воспроизводимости электрических параметров и снижения цены ГИС СВЧ за счёт максимально возможной замены сварных и паяных соединений на соединения, сформированные с применением методов планарной технологии. Разработанные технологические процессы изготовления многокаскадных модулей на единой керамической подложке позволяют исключить из конструкции ГИС СВЧ крайне ненадежные межплатные сварные и паяные соединения.

Разработанные технологические процессы изготовления внутрисхемных соединений в мостах Ланге, подстроечных элементах и цепях питания осуществляются методами планарной технологии. В качестве изолирующего зазора используется воздух или пленка полиимида. Особенностью разработанных технологических процессов является возможность формирования высоконадежных перемычек при высоте микрополосковых проводников 3-12 мкм и при минимальных значениях ширины проводников и зазоров между ними ~ 15 мкм. Микрополосковые платы успешно прошли испытания на воздействие вибрационных, ударных, акустических и климатических воздействий. Разработаны технологические процессы формирования металлизированных отверстий в диэлектрических подложках для ГИС СВЧ.

Технология характеризуется последовательным тройным усилением металлизации химическим, вакуумным и гальваническими методами, что позволяет металлизировать отверстия с размерами от 50 мкм и выше в подложках из алюмооксидной керамики, сапфира и кварца. С целью исключения вытекания припоя через отверстия при пайке микроплат на основании разработана технология их защиты пленкой органического термостойкого диэлектрика. Разработана технология изготовления ГИС СВЧ с отверстиями, полностью заполненными металлом в планарной плоскости с подложкой, что позволило снизить значения переходных сопротивлений и исключить проблемы формирования фоторезистивной защитной маски. Созданы технологические процессы изготовления МПП с ТПК, ТПР и монтажом активных элементов методами планарной технологии, которые позволяют полностью исключить применение сварных и паяных соединений и тем самым изменить концепцию традиционной сборки ГИС СВЧ. Проведенные исследования и разработанные технологические процессы обеспечивают снижение трудоемкости или исключение ряда сборочных операций, повышают надежность и воспроизводимость электрических параметров, а также открывают новые перспективы для дальнейшего применения ГИС СВЧ в радиоэлектронной аппаратуре.

Шестой раздел посвящен исследованию надёжности ГИС СВЧ. в нём проведены исследования надёжности МПП, сформированных по разработанной технологии (рис. 19 и рис.20).

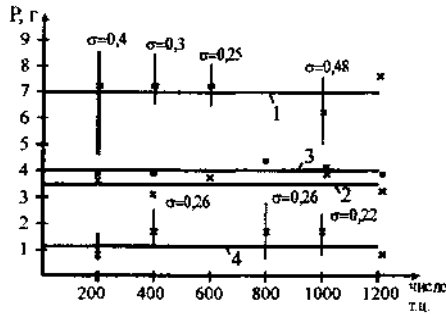


Рис. 19. Зависимость прочности сварных соединений проволоки Зл с платой от числа термоциклов:  
1, 2 - электроконтактная сварка проволоки Зл диаметром 30 и 20 мкм с платой;  
3,4 - термокомпрессионная сварка проволоки Зл диаметром 20 и 15 мкм с платой

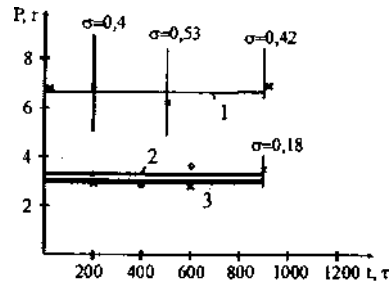


Рис. 20. Зависимость прочности сварных соединений проволоки Зл с платой от времени воздействия повышенной температуры +85°C:  
1, 2 - электроконтактная сварка проволоки Зл диаметром 30 и 20 мкм с платой  
3-термокомпрессионная сварка;

Высокий выход годных МПП обеспечивает высокую надёжность изделий и воспроизводимость электрических параметров.

Внедрение разработанной технологии изготовления МПП для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ в производство изделия «Ода - Ф» позволило поднять выход годных серийно выпускаемых модулей СВЧ в период с 1987 по 1990 г с 62% до 80% и повысить воспроизводимость параметров, что выразилось в снижении коэффициента шума.

На основе результатов испытаний, значений выхода годных и электрических параметров можно сделать вывод о высокой надёжности ГИС СВЧ, изготовленных по разработанной технологии.

Микрополосковые платы успешно прошли испытания в составе изделий, производимых ФГУП «НПП «Исток» в течение последних 16 лет (с 1988 по 2004 г) по требованиям, хозяйственного и специального назначения.

Результаты данной работы послужили основой для разработки стандарта предприятия СТП ТС0.010.013-88 «Модули СВЧ интегральные. Требования к конструированию предъявляемым к изделиям комплексом стандартов «Климат - 7» для изделий на родно-микрополосковых плат», а затем — руководящего отраслевого документа РД 110751 -90 «Модули СВЧ интегральные. Требования к конструированию микрополосковых плат».

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе на основе анализа литературных источников и проведенных исследований показано, что с повышением температуры до 300...400°C при проведении бесфлюсовых сборочных операций в микрополосковых структурах на основе меди (системы Cr/Cu/Au; Cr/Cu/Ni/Au и др.) наблюдаются деградационные явления. Они связаны с взаимодиффузией атомов и растворением покрытий в процессе пайки и приводят к снижению качества сварных и паяных соединений, увеличению уровня и разбросу коэффициента затухания.

Широко распространенные в производстве структуры на основе меди (Cr-Cu-Au; Cr-Cu-Ni-Au) и на основе золота (Ti-Pd-Au; Cr-Au; Ti-Pt-Au и др.) не отвечают всему комплексу требований бесфлюсовой сборки в диапазоне температур 300...400°C с точки зрения обеспечения оптимальных условий для формирования паяных и сварных соединений. В частности МПП на основе золота нельзя паять с применением припоев на основе олова и свинца, вследствие растворения покрытий, а МПП на основе меди после воздействия отжигов не обеспечивают надежности сварных термокомпрессионных соединений.

С целью создания послойной микрополосковой структуры, лишенной этих недостатков, в диссертационной работе:

- разработана методика расчета коэффициента затухания волны в многослойной полосковой линии, с учетом того, что различные участки сечения и слои полосковых проводников обладают различной проводимостью, микропрофилем и шероховатостью. Это позволяет рассчитать затухание в реальных микрополосковых структурах, сформированных по различным технологическим маршрутам, оценить вклад каждого участка сечения проводников в общие потери с учетом структуры слоев тонкопленочной металлизации.

На основе проведенных расчетов и экспериментальных измерений показано, что воспроизводимость параметров и низкий уровень коэффициента затухания в микрополосковых структурах на основе меди, помимо удельного сопротивления и шероховатости края, определяются соотношением толщин и точностью формирования покрытий и обеспечивается при разбросе толщин покрытий менее 100% при условии, что толщина верхнего слоя на всех гранях полосковой линии превышает 2...3 скин слоя.

В частотном диапазоне 8... 18 ГГц эти требования реализуются при ровности краев полосковых проводников менее одного микрона, толщине золотого покрытия более 2 мкм, поверхностном сопротивлении подслоя  $100 \pm 30$  Ом/С и толщине пленки меди не менее 1 микрометра. Барьерный слой никеля при этом полностью экранируется, и его толщину определяют только требования бесфлюсовой сборки.

- Проведено комплексное исследование многослойной тонкопленочной системы Сгвак / Сивак / Сигальв / Мгальв / Аигальв в исходном состоянии и под воздействием отжигов в температурном диапазоне 150...420°C.

Установлено, что процентное содержание атомов золота, меди и никеля на поверхности образцов зависит от температуры отжига и толщины барьерного слоя никеля. До температуры 350°C изменения концентрации атомов покрытий незначительны, но при дальнейшем увеличении температуры наблюдается резкое снижение концентрации атомов золота и повышение концентрации атомов меди.

Определен температурно-временной интервал стабильности системы  $Cr^{\wedge} - Cu^{\wedge} - Si^{\wedge}$ ,  $Ni_{un}j$ , - Аигал,,,,, при котором изменения концентрации атомов покрытий на поверхности образцов незначительны: при 350°C это время до 10 мин., а при 420°C - до 3 мин. Результаты этого исследования полностью коррелируют с данными, полученными в результате исследования влияния отжигов на прочность сварных термокомпрессионных соединений. С повышением температуры отжига прочность сварных соединений снижается, и приемлемый уровень прочности реализуется до температуры отжига 330°C (10 мин) при толщине барьерного слоя никеля в диапазоне 0,5...0,9 мкм, а если температура отжига 420°C - при длительности отжига менее 4 мин, причем толщина никеля в диапазоне 0,3... 1,2 мкм не играет существенной роли.

- Проведены исследования влияния диффузионных процессов на удельное сопротивление и СВЧ потери в микрополосковых проводниках, из которых следует, что при температурах отжига, не превышающих 420°C (15 мин) средний уровень не возрастает, но увеличивается разброс значений коэффициента затухания СВЧ энергии, при температурах отжига менее 350°C изменения как уровня потерь, так и разброса незначительны.
- Научно обоснована и разработана структура послойной металлизации микрополосковых плат для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ.

Структура имеет металлизацию на лицевой стороне микроплат на основе золота, а экранной стороны - на основе меди с барьерным слоем Ni, ограничивающим растворение

покрытий в процессе пайки. При этом на лицевой стороне реализуются оптимальные условия для монтажа навесных элементов на золотосодержащие припои и формирование сварных соединений, а на экранной стороне микроплат открывается возможность получать высоконадежные паяные соединения, применяя самый широкий спектр припоев. Проведены исследования поверхности образцов, из которых следует, что после проведения фотолитографических операций поверхность микрополосковых плат загрязняются углеродосодержащими соединениями, которые на 20...30% снижают прочности сварных термокомпрессионных соединений. В работе показано, что с целью повышения надежности сборочных операций микроплаты до проведения операций отжига необходимо очищать жидкостным или ионноплазменным методами.

- Разработан маршрут и весь комплекс входящих в него технологических процессов, обеспечивающих формирование разработанной микрополосковой структуры.

Маршрут основан на изготовлении с гальваническим наращиванием функциональных слоев посредством технологических проводников и последующим их удалением методом фотолитографии и позволяет реализовать МПП любой конструктивной сложности, что делает разработанный маршрут наиболее универсальным. Очень важно, что при проведении гальванических процессов исключается применение промежуточных органических покрытий, что предотвращает загрязнение электролитов, обеспечивает высокое качество и чистоту покрытий, а, следовательно, хорошие условия для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ.

За исключением слоя золота, все функциональные слои МПП наносятся методами вакуумного напыления, что обеспечивает высокую чистоту покрытий и точности их формирования, а, следовательно - воспроизводимость свойств.

Проведены исследования влияния отжигов на межслойное расслаивание функциональных слоев. Установлено, что расслаивание обусловлено внутренними напряжениями в гальванических покрытиях, накоплением и последующим разложением органических веществ в порах подложек, при условии, что поры зарастены гальваническими покрытиями, и исключается применением беспористых подложек, функциональных слоев МПП, сформированных методами вакуумного напыления, предотвращая проникновения органических покрытий в поры подложек или качественным их удалением. Разработанные на базе исследований технологические процессы позволили полностью исключить данный вид брака.

- Разработан технологический процесс очистки подложек перед вакуумным напылением, который обеспечивает уровень остаточных загрязнений не хуже  $10^{-8}$  г/см<sup>2</sup>, значение краевого угла смачивания менее 15° и в условиях серийного производства адгезионную прочность напыленных пленок более 300 кГ/см<sup>2</sup>.
- Фотолитографические процессы позволяют получать необходимую точность геометрических размеров топологических элементов микроплат при высоте 6 мкм ± 5 мкм, а при высоте 4 мкм - ± 3 мкм, шероховатость краев элементов топологии -1 мкм, минимально воспроизводимый размер элементов ~10 мкм.
- Разработана технология и исследованы свойства резистивных пленок на основе азотированного тантала. Резистивные пленки характеризуются высокой температурной стабильностью (уход номинала не превышает 1% при прогреве 330°C в течение 20 мин), высокой механической прочностью и отсутствием контактных переходных сопротивлений.
- По всем технологическим процессам определен допустимый разброс параметров и межоперационные времена хранения, обеспечивающие высокую воспроизводимость свойств полосковых структур.

Коэффициент затухания в микрополосковых плат характеризуется разбросом менее 0,5 дБ и на 8 ГГц составляет величину ~ 8 дБ/м и не меняется под воздействием отжигов до температуры 420°C. Прочность сварных термокомпрессионных соединений в диапазоне температур +50...- 420°C также не зависит от воздействия отжигов и составляет ~70% прочности на разрыв золотой проволоки в исходном состоянии.

Разработана альтернативная торцевому напылению технология металлизации отверстий, надежность и воспроизводимость параметров которых обеспечивается последовательным послойным усилением металлизации химическим, вакуумным и гальваниче-

ским методами.

Разработанная технология гарантирует высокое качество металлизации отверстий в подложках из поликора, сапфира, кварца, ситалла с минимальным размером 0,15 мм. Переходное сопротивление отверстий диаметром более 0,2 мм в подложках толщиной менее 1 мм не превышает 0,05 Ом. Технология исключает применение сварочных и паяных перемычек и расширяет схемотехнические возможности разработчиков ГИС СВЧ. Проведенные исследования и разработанные технологические процессы обеспечивают снижение трудоемкости сборочных операций, повышают надежность и воспроизводимость параметров, а также открывают новые перспективы применения ГИС СВЧ в радиоэлектронной аппаратуре.

Результаты исследований и разработанных технологических решений нашли свое отражение в руководящем отраслевом стандарте «Модули СВЧ интегральные. Требования к конструированию микрополосковых плат» РД11.0751-90. Требования к конструированию микросборок.

В результате проведенной работы открылась возможность, не ухудшая качества сварных соединений, проводить пайку микроплат на основания, используя припой на основе олова или свинца взамен дорогостоящих припоев на основе золота. При этом полностью исключается такой вид брака, как отслаивание подложек от оснований.

Внедрение результатов диссертационной работы в условиях серийного производства позволило поднять выход годных микроплат с температурой бесфлюсовой сборки более 300°C с 6 до 80%.

В работе получило развитие новое направление в технологии ГИС СВЧ, основанное на замене сварных и паяных соединений, а также ряда выводов навесных элементов на перемычки и тонкопленочные элементы, сформированные с применением методов планарной технологии.

Разработанные технологические процессы изготовления многокаскадных модулей на единой керамической подложке позволяют исключить из конструкции ГИС СВЧ крайне ненадежные межплатные сварные и паяные соединения.

Разработанные технологические процессы формирования внутрисхемных соединений через воздушный зазор и пленку органического диэлектрика позволяют в сравнении со сварными и паяными перемычками повысить надежность соединений и снизить трудоемкость их монтажа более чем в три раза.



#### Публикации по теме диссертации.

1. Климачев И. И., Потапов Н. В. Разработка технологии изготовления микрополосковых плат на пленке меди толщиной 5...6 мкм//Спец.электроника, сер. Электроника СВЧ, вып.4.,1989.
2. Климачев И. И., Потапов Н. В. Способ изготовления микросхем// А .С. №1228770, МКЛ. Н 05К3/08.
3. Климачев И.И, Волошко С. И., Гусак С. И. Сидоренко С. И. Теоретические модели описания диффузии в двухслойных тонкопленочных системах//Металлофизика, №6,1989 г. декопир. рукопись (ВИНИТИ) 24.11.89, №7032 В89.
4. Климачев И. И., Выморков Н. В., Ковтунова А. Д., Силин Р. А. Анализ вклада различных участков сечения проводников микрополосковой линии на величину коэффициента затухания//Электронная техника., Сер. Электроника СВЧ, Вып.3 (397), 1989.
5. Климачев И. И., Выморков Н. В., Ковтунова А. Д., Силин Р. А. Влияние формы проводника МПЛ на коэффициент затухания//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ . Вып. 4 (408), 1988 г.
6. Климачев И. И. Способ изготовления микросварки//А.С. №1155150, МКЛ Н05К3/18.
7. Климачев И. И., Джуринский К. Б., Шнек В.М., Решетников А.М. Способ изготовления металлизированных диэлектрических деталей//А.С. №1217858 от 9.7.84 г.
8. Климачев И. И., Свечников С. А., Косенко В. Е., Способ изготовления СВЧ микросхем. //Положительное решение от 25.11.89.
9. Климачев И.И, Стародубов И.П., Потапов Н.В. Отработка производственной технологии изготовления микросборок// НТО №224-7729 по т.№2820,1986 г.
10. Климачев И. И. Разработка унифицированной технологии металлизации отверстий// НТО №208-7713.7.6080, шифр «Сегмент 8Т-1» , 1986 г.
11. Климачев И.И, Потапов Н.В. Разработка лабораторной технологии изготовления планарных приёмных модулей для АФАР/Л НТО №197-6821 шифр «Опора-Ф», 1983г.
12. Климачев И. И., Яремчук Б. Г., Косенко В. Е., Разработка тонкопленочной технологии изготовления полосковых плат на основе пленок золота. // НТО № 196-7701, шифр «Сопка», 1985 г.
13. Климачев И. И., Косенко В.Е., Яремчук Б. Г. Разработка унифицированной технологии изготовления пассивной части ВЧ и СВЧ ГИС. // НТО № 170 - 7675, шифр «Сегмент -7Т», 1986.
14. Климачев И. И., Калина В. Г., Квлинский Ю. Ф. Разработка миниатюрного полупроводникового усилительно-преобразовательного модуля в диапазоне - 66... + 554 МГц на современных ГИС СВЧ // НТО по т. 5390 «Оникс-1Ф» 1984г.
15. Климачев И. И., Ровенский Г. В., Виноградов В. Г., и др. Разработка двух входных усилительных модулей с коэффициентом шума 10 дБ, с коэффициентом усиления 20 и 30 дБ // НТО по т. 8680 «Одиссея-5», 1985г.
16. Климачев И. И., Родионов А. Д., Лисицын А. А.,. Отработка технологии и конструкции приемного СВЧ-модуля «Ода» // НТО по т. «Сегмент-ПРМ», 1986г.
17. Климачев И. И., Рыжик Э. И., Садчикова Т. П. Разработка двух входных усилительных модулей с коэффициентом усиления 20 и 30 дБ // НТО по т. 8240 «Одиссея-4», 1985г 1984г.
18. Климачев И. И., Коробкин В. А. Исследование и разработка формирования соединительных перемычек в мостах Ланге групповыми методами // НТО № 213-8003 по т. №№ 5910 и 3550, 1988г.

19. Климачев И. И., Коробкин В. А. Исследование и разработка групповой технологии монтажа навесных элементов // НТО № 125-8457 по т. 3290 НИР «Ока», 1988г.
20. Климачев И. И. Разработка и совершенствование базовой технологии изготовления микрополосковых плат повышенной сложности // НТО № 157 - 8193 шифр «Ока», 1988г.
21. Климачев И.И., Цыкин А.В. Унификация технологии ГИП и ГМИП// Тезисы докладов в сб. «Перспективы развития СВЧ электронной техники», 14 общеинститутский семинар ГК, НПО «Исток», 1988г.
22. Климачев И. И. Групповая технология монтажа навесных элементов на ГИП и ГМИП. //Тезисы докладов в сб. «Перспективы развития ЭТ». 14 общеинститутский семинар ГК НПО «Исток», 1988г.
23. Климачев И. И., Свечников С. А., Косенко В. Е., Крикунов А.И. Создание СВЧ гибридных интегральных планарных схем. // Тезисы докладов в сб. «Перспективы развития СВЧ ЭТ, повышение качества ИЭТ», 15 общеинститутский семинар ГК, НПО «Исток», 1989г.
24. Климачев И.И., Иовдальский В.А., Мурсков А.Ф., Северюхина Л.И., Савцова А.Ф. Модули СВЧ интегральные. Требования к конструированию микрополосковых плат.//РД11 0751-90.
25. А. С. № 1609427 приоритет 11.10.1988г. «Способ изготовления ГИС СВЧ диапазона с воздушной изоляцией межсоединений». Климачев И. И и др.
26. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение от 5.11.1996 г. по заявке №05057130/09 (036453). Корпус мощного СВЧ полупроводникового прибора. Климачев И. И., Иовдальский В.А.,
27. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение от 5.11.1996 г. по заявке №05056217/09 (035906). Корпус мощного СВЧ полупроводникового прибора. Климачев И. И., Иовдальский В.А., Цикин А. В., Лапин В. Г., Коробкин В. А.
28. Климачев И. И., Иовдальский В.А. Формирование внутрисхемных соединений тонкоплёночных элементов ГИС СВЧ.// «Плёнки-2004». Материалы Международной научной конференции «Тонкие плёнки и наноструктуры», 7-10 сентября 2004 г., Москва: МИРЭА, 2004, часть 2. ISBN5-7339-0481-X, УДК.539.216.2:539.234:621.315.5., с. 164-166
29. Климачев И. И., Иовдальский В.А. Оптимизация структуры металлизации плат ГИС СВЧ для бесфлюсовой сборки./Межрегиональный семинар «Современное приборостроение: новые разработки, организационные и технологические вопросы» ЦНТИ «Прогресс». Г. Санкт-Петербург 2004 г. с. 10-12
30. Климачев И.И., Калашников Ю. Н., Сидоренко С. И., Литвинова Т.В., Иовдальский В.А. Зависимость прочности сварных соединений от структуры полосковой линии и режимов ее термообработки./Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. Вып. 1-4, 2004 г. с. 47-54.
31. Климачев И. И., Иовдальский В.А., Северюхина Л.И., Родионова А.Д., Стародубов И.П. Унификация типоразмеров микрополосковых плат для гибридноинтегральных схем СВЧ.//Электронная техника. Сер.1 Электроника СВЧ. Вып.6 (440), 1991г. с. 46-47.
32. Климачев И. И., Иовдальский В.А., Евтюхин А.Н., Сафронов В.С., Северюхина Л.И., Яремчук Б.Г., Родионова А.Д., Хомякова Л.А. СТП.ТС0.010.017-91. Платы микрополосковые. Фотошаблоны. Технические требования.// НПО «Исток». Введен указанием №189 от 20.06.91г. с 1.07.91г.

Издано в печать 20.02.2005 г.  
Реформа 60x84x/16. Объем 1 учеб.-мет. л.  
Тираж 50 экз. Издательство ОАО «Иск-Вуко-Витек»