

На правах рукописи

СЕМЕНИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**Исследование и разработка прогрессивной технологии
прецизионных гибких полиимидных шлейфов
для высокоплотного монтажа**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2006

Работа выполнена на кафедре «Микроэлектроника»
Московского государственного института электронной
техники (технического университета)

Научный руководитель доктор технических наук
Грушевский А.М.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Коробов А.И.

Доктор технических наук Жуков А.А.

Ведущая организация : ФГУП «Научно-исследовательский институт
точных приборов», г. Москва

Защита состоится «_____» _____ 2006 г. в _____
часов на заседании диссертационного совета Д 212.134.03 при
Московском государственном институте электронной техники
(техническом университете) по адресу: 124498, Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭТ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2006г.

Соискатель Семенин С.Н.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор Коледов Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Гибкие печатные шлейфы (ГПШ) в последнее время получили самое широкое применение при создании изделий электронной техники, обеспечивая высокое качество электрических соединений как в стационарных, так и в подвижных конструкциях. Устойчивость к перегибам обеспечивает использование ГПШ в таких конструкциях электронных приборов (ЭП) как неоднократно складываемых в книжку или свертываемых в рулон. Конструктивно выполняемые по принципу организованных выводов они обеспечивают уменьшение габаритов и веса ЭП, возможность применения автоматизированных процессов их изготовления и монтажа, снижая тем самым трудоемкость технологического процесса и повышая надежность соединений. По массо-габаритным показателям ГПШ имеют значительные преимущества по сравнению с плоскими ленточными кабелями (типа ЛППЛ или ЛПП), изготавливаемыми на основе плющенной медной (луженной или без лужения) проволоки.

Наиболее широкое использование в качестве оснований шлейфов получили полиимидные пленки, которые наряду с хорошими электрофизическими и прочностными свойствами, характеризуются высокой устойчивостью к термовоздействиям (гибкость пленок сохраняется в широком диапазоне: от температур жидкого азота до 673 К), отсутствием существенных газовыделений в вакууме, высокой радиационной стойкостью.

Однако, доминирующим технологическим направлением изготовления ГПШ до сих пор являлась субтрактивная технология, предполагающая использование фольгированных медью гибких полиимидных пленок, фотопечати и травления металла с последующим облуживанием монтажных выводов. Такая технология не обеспечивает выполнение современных требований по плотности монтажных выводов, характеризуется существенно высокой трудоемкостью при создании двусторонних шлейфов.

Для изготовления гибких широкоформатных (более 100 мм) двусторонних шлейфов с повышенной плотностью монтажных выводов (шаг < 0,3 мм) весьма перспективной является полуаддитивная технология. При этом для обеспечения наибольшей прочности сцепления металлического слоя с полиимидной пленкой металл целесообразно наносить методами тонкопленочного осаждения в вакууме с предварительным активированием поверхности полиимида.

Монтажные выводы таких шлейфов после гальванического «усиления» покрываются финишным легкоплавким покрытием, обеспечивающим процесс пайки шлейфа в составе прибора. Однако в современных условиях высокоплотного монтажа приборов электронной техники даже такие шлейфы имеют ограничения. Требуется новая технология, комплексно решающая проблемы, связанные как непосредственно с процессом изготовления прецизионных гибких шлейфов с высокоплотным (шаг 0,15 мм и менее) расположением выводов, так и с процессом прецизионного монтажа таких шлейфов в составе приборов. Ограничение разрешающей способности (шага) выводов вызвано вероятностью замыкания соседних выводов как при изготовлении шлейфов, так и при монтаже приборов (пайке) из-за нестабильности теплового воздействия и, как следствие, нестабильности по прочности соединения и растеканию припоя, вплоть до короткого замыкания монтажных выводов шлейфа. При этом требуется такая технология изготовления шлейфов, которая обеспечивала бы высокие электрофизические параметры коммутационных дорожек, исключаящие искажения сигналов, а также обеспечивала бы повышенную устойчивость шлейфов к многократным (до десятков тысяч) перегибам с радиусом до 1 мм и менее.

Именно поэтому, тема диссертации, посвященная технологии производства прецизионных широкоформатных гибких шлейфов на полиимидной пленке с повышенной устойчивостью к многократным перегибам для высокоплотного монтажа приборов электронной техники является важной и актуальной.

Предмет исследования диссертации

Предметом исследования диссертации являются проблемы, связанные с разработкой физико-технологических основ создания новой технологии изготовления полиимидных прецизионных гибких шлейфов, наиболее полно отвечающих требованиям высокоплотного монтажа современных приборов электронной техники.

Целью работы является исследование и разработка прогрессивной технологии изготовления прецизионных гибких шлейфов на полиимидной пленке для высокоплотного монтажа изделий электронной техники.

Для реализации цели диссертации автором определены и сформулированы следующие основные задачи:

- обоснование нового конструктивно-технологического решения создание полиимидных крупноформатных прецизионных

гибких шлейфов, наиболее полно отвечающих требованиям высокоплотного монтажа;

- разработка и исследование физико-технологических принципов создания полиимидных двусторонних шлейфов с монтажными балками, имеющими разное финишное покрытие противоположных сторон: облегчающее растекание припоя и исключающее его растекание, и характеризующихся высокими адгезией металлических слоев к полиимидной пленке и стабильностью линейных размеров;

- моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов гибкого шлейфа для обеспечения повышенной устойчивости к многократным перегибам;

- разработка и исследование технологии прецизионного высокоплотного монтажа двусторонних полиимидных шлейфов;

- разработка технологии изготовления полиимидных двусторонних шлейфов для высокоплотного монтажа приборов электронной техники.

Научная новизна работы:

1. Разработана концепция технологии прецизионных гибких полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа, основанная на двусторонней металлизации полиимидной пленки в вакууме и формировании в отверстиях полиимида монтажных балок с разным финишным покрытием противоположных сторон: облегчающим растекание припоя и исключающим его растекание.

2. Обоснованы и подтверждены экспериментально оптимальные технологические параметры процесса односторонней контактной микросварки двусторонних гибких полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа электронных приборов.

3. Теоретически показана и экспериментально выявлена зависимость максимальной ширины прецизионного шлейфа от уровня напряженно-деформированного состояния материалов шлейфа для обеспечения высокоплотного монтажа.

4. Установлена значимость влияния на прочностную надежность шлейфа следующих конструктивно-технологических параметров:

- толщины медных проводников и полиимидной пленки;
- наличие защитного покрытия;
- допустимого радиуса перегиба в области упругих деформаций.

5. Установлена взаимосвязь и на основе регрессионного анализа получена математическая модель стойкости полиимидных шлейфов к многократным перегибам от соотношения толщин конструктивных материалов шлейфа. Показано, что использование защитных покрытий из полиимидного лака позволяет существенно повысить их стойкость к многократным перегибам.

Новизна полученных результатов подтверждена положительными решениями по двум заявкам о выдаче патентов РФ на изобретения.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основе результатов проведенных исследований:

- разработана новая технология изготовления полиимидных прецизионных гибких шлейфов, позволяющих повысить плотность монтажных паяемых выводов (шаг до 0,15 мм), увеличить при заданной плотности выводов линейный размер монтажной зоны до 120 мм, повысить стойкость шлейфа к многократным перегибам при расширении рабочего диапазона допустимого радиуса перегиба от десятков до 1,0 мм и существенном, не менее чем в 1,8 раза, повышении запаса прочности медных проводников шлейфа;

- разработка технологии изготовления шлейфов выполнена комплексно с обеспечением разработки технологического процесса микроконтактирования (односторонней контактной микросварки) выводов двусторонних полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа электронных приборов.

Практическое использование результатов работы определено тем, что:

- технические решения, полученные в диссертации, обеспечили создание ряда изделий электронной техники с параметрами на уровне мировых достижений. Акты об использовании результатов диссертации оформлены на таких предприятиях, как ОАО «Завод Компонент» (г.Зеленоград) в составе серийно выпускаемых вычислителей, ЗАО «НИИМП-Т» (г.Зеленоград) при монтаже многокристальных модулей памяти в трехмерном исполнении и плоских информационных экранов, ОАО «АЭРОПРИБОР-ВОСХОД» (г.Москва) при монтаже прибора высотомера;

- результаты диссертации используются в учебной программе по дисциплине «Компьютерно-интегрированные технологии монтажа и сборки ЭВС» в Московском государственном институте электронной техники (техническом университете).

Методики исследований и достоверность результатов

Методики исследований базируются на теоретических физико-химических основах материаловедения и механики твердых тел, математическом моделировании, в экспериментах используется современная точная исследовательская аппаратура.

Достоверность основных результатов подтверждается большим объемом и комплексностью проведенных исследований, соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, положительными испытаниями промышленных образцов, обсуждениями на научно-технических конференциях и положительными экспертизами заявок на изобретения.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 5 научно-технических конференциях:

1. Микроэлектроника и информатика – 2003. 10-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, Зеленоград, 2003г.

2. Микроэлектроника и информатика – 2004. 11-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, Зеленоград, 2004г.

3. Микроэлектроника и информатика – 2005. 12-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, Зеленоград, 2005г.

4. Электроника и информатика - 2005. V Международная научно-техническая конференция, Москва, Зеленоград, 2005г.

5. Микроэлектроника и информатика – 2006. 13-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, Зеленоград, 2006г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 3 статьях, 5 тезисах докладов на научно-технических конференциях и двух заявках о выдаче патентов РФ на изобретения, по которым получены положительные решения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, содержащих 28 рисунков и 8 таблиц, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы – 125 страниц.

На защиту выносятся:

1. Новая концепция технологии полиимидных прецизионных гибких шлейфов для высокоплотного монтажа, основанная на двусторонней металлизации полиимидной пленки в вакууме и формировании в отверстиях полиимида монтажных балок с разным финишным покрытием противоположных сторон: облегчающим растекание припоя и исключающим его растекание, и характеризующихся высокими адгезией металлических слоев к полиимидной пленке и стабильностью линейных размеров.

2. Установленные закономерности влияния конструктивно-технологических факторов на напряженно-деформированное состояние элементов шлейфа при силовом воздействии и зависимость запаса прочности материалов шлейфа от величины теплового воздействия на основе конечно-элементных моделей шлейфа. Зависимость допустимого радиуса перегиба от толщины проводника в области упругой деформации.

3. Полученная математическая модель устойчивости шлейфа к многократным перегибам от соотношения толщин конструкционных материалов на основе регрессионного анализа.

4. Новый способ и результаты экспериментального обоснования оптимальных параметров технологии прецизионного высокоплотного монтажа полиимидных шлейфов, основанной на односторонней контактной сварке и контактировании с выводом шлейфа по стороне, имеющей финишное покрытие, исключающее растекание припоя.

5. Технология изготовления полиимидных двусторонних шлейфов, обеспечивающая высокую (шаг до 150 мкм) плотность выводов шлейфа для монтажа приборов электронной техники, увеличение монтажной зоны шлейфа до 120 мм, повышение стойкости шлейфа к многократным перегибам в широком рабочем диапазоне допустимого радиуса перегиба от десятков до 1,0 мм.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ состояния научно-технической проблемы. На основе современных конструктивно-

технологических требований приведены результаты технологических разработок по созданию гибких прецизионных шлейфов для высокоплотного монтажа приборов электронной техники. Показано, что технология гибких шлейфов представляет собой комплексную технологическую проблему, включающую как непосредственно технологию изготовления прецизионных гибких шлейфов с высокоплотным (шаг 0,15 мм и менее) расположением выводов, устойчивых к многократным перегибам, так и технологию высокоплотного монтажа таких шлейфов в составе приборов. На основе анализа возможных используемых материалов для такой технологии определена перспективность применения полиимидной пленки. Показано, что альтернативой для используемой в настоящее время субтрактивной технологии, в значительной степени не обеспечивающей современных требований к высокоплотным шлейфам, весьма перспективной является полуаддитивная технология, при этом предполагающая первоначально наносить металлические слои на полиимидную пленку методами тонкопленочного осаждения в вакууме.

Показано, что наиболее важными проблемами, определяющими качество таких шлейфов и сдерживающими становление технологии их изготовления и, соответственно, требующими своего решения, являются стабильность линейных размеров гибких полиимидных плат, обеспечивающая возможность создания прецизионных структур, адгезия металлических слоев к полиимиду с обеспечением устойчивости к многократным перегибам и техника высокоплотного монтажа.

Показано, что наиболее оптимальным для получения низкоомных (сопротивление не более 0,1 Ом) контактов при монтаже шлейфов следует считать неразъемные методы микроконтактирования сваркой или пайкой. Методы микроконтактирования пайкой, хотя и уступают незначительно методам сварки по обеспечению плотности монтажа выводов шлейфа, однако определены автором как наиболее технически предпочтительными, поскольку допускают многократную перепайку, что крайне важно для высокоплотных многовыводных шлейфов, тем самым принципиально повышая ремонтпригодность и снижая себестоимость прибора. Показано, что в условиях высокоплотного монтажа ограничение разрешающей способности (шага) выводов вызвано возможностью замыкания соседних выводов как при лужении, так и при пайке двусторонне облуженных выводов.

На основании вышеизложенных положений определена концепция новой технологии прецизионных гибких полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа, основанная на полуаддитивной технологии с применением двусторонней металлизации полиимидной пленки в вакууме и формировании в отверстиях полиимида монтажных балок с разным финишным покрытием противоположных сторон: облегчающим растекание припоя и исключающим его растекание, и основанная на микроконтактировании методом бесфлюсовой импульсной пайки. Определены и сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе представлены результаты комплексных исследований процессов, определяющих новую технологию изготовления прецизионных двусторонних полиимидных шлейфов с высокоплотным расположением монтажных балочных выводов, имеющих разное финишное покрытие противоположных сторон для микромонтажа, на одной стороне облегчающее растекание припоя, а на другой исключающее его растекание, при этом сами шлейфы характеризуются высокими адгезией металлических слоев к полиимидной плате, стабильностью линейных размеров и стойкостью к многократным перегибам.

Показано, что определяющим техпроцессом, во многом ответственным за решение вышеназванных проблем, является технология тонкопленочной металлизации полиимидной пленки в вакууме и, в первую очередь, нанесения слоя хрома, когда закладываются механизмы адгезионного взаимодействия, стабильности линейных размеров шлейфа и возможности формирования различного финишного покрытия противоположных сторон балок. Исследовано влияние параметров процесса металлизации полиимидной пленки в вакууме на адгезию слоев металла к полиимиду с учетом предварительной активации поверхности подложки, на структуру и внутренние напряжения таких слоев, а также стабильность линейных размеров подложки в целях обеспечения требований высокоплотного монтажа гибких шлейфов. Рассмотрены вопросы напряженно-деформированного состояния материалов шлейфа. Проведено моделирование с целью обеспечения повышенной устойчивости шлейфов к перегибам.

Экспериментально установлена зависимость внутренних напряжений слоев хрома, уходов линейных размеров полиимидной платы и адгезии слоев хрома к полиимиду от толщины хрома (рис.1).

УЛР платы и уровень внутренних механических напряжений практически линейно увеличиваются с увеличением толщины слоя хрома. Наибольшие величины адгезии достигаются с подслоями $60 \leq \rho_s \leq 200 \text{ Ом/}\square$. С учетом того, что наибольшая стабильность по прочности после контактирования микропайкой наблюдается при номиналах подслоя хрома от 100 до 30 Ом/□, оптимальным для обеспечения достаточной адгезионной прочности и линейной стабильности шлейфов определен подслоя хрома с номиналом $50 \leq \rho_s \leq 70 \text{ Ом/}\square$.

Установлено, что область оптимальных температур для получения воспроизводимых высоких значений адгезии находится в интервале от 373 до 423 К. При этом, оптимальным процессом активации поверхности полиимида для обеспечения адгезии определена комплексная обработка в хромовой смеси на основе серной кислоты с последующей электрофизической обработкой в плазме тлеющего разряда с температурой предварительного нагрева подложки до 373 К.

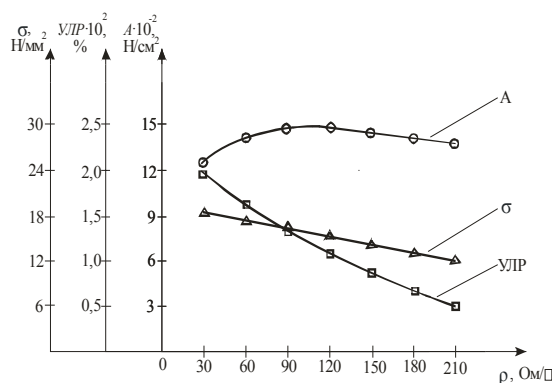


Рис. 1. Зависимость внутренних напряжений слоев хрома (σ), уходов линейных размеров (УЛР) полиимидной платы и адгезии (A) слоев хрома к полиимиду от поверхностного сопротивления (ρ) слоев хрома.

Анализ экспериментальных результатов по влиянию обработки полиимидных плат в плазме тлеющего разряда непосредственно перед металлизацией в вакууме (рис.2) на адгезию позволяет говорить о температуре предварительного нагрева подложки в 373К как оптимальной, так как величина адгезии более 1700 Н/см^2 уже соизмерима с когезией полиимида.

В процессе металлизации полиимида в вакууме в

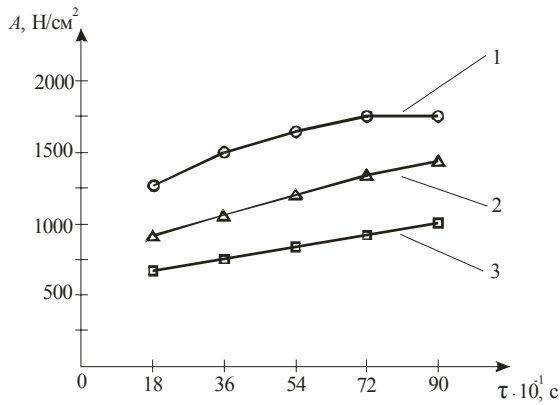


Рис.2. Зависимость адгезии слоев Ст-Си к полиимидной плате от времени обработки платы в тлеющем разряде.

Среда аргона. Режим: $P=1 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст., $U=2$ кВ, $I=80$ мА.

1 и 2 - при температуре платы 373 К с предварительной обработкой в горячей и холодной хромовой смеси соответственно.

3 - при температуре платы 293 К с предварительной обработкой в горячей хромовой смеси.

металлическом слое возникают внутренние механические напряжения, которые во многом определяются температурой подложки и могут вызывать существенные деформации полиимидной платы.

Экспериментально выявлена и теоретически показана зависимость максимальной монтажной ширины полиимидного шлейфа от уровня внутренних напряжений слоев меди с подслоем хрома.

Принимая допущения, что система находится в пределах упругой деформации, внутренние напряжения слоев в основном определяются уровнем термических напряжений, смещений металлического покрытия относительно полиимидной подложки не происходит, прочностные свойства изотропны, то рассматривая плоско-напряженное состояние в нашей системе и решая уравнение теории упругости с учетом аксиальной симметрии для тонкой полиимидной подложки, абсолютные деформации в металлическом слое U_{Me} и подложке U_{PM} определяются:

$$U(r) = \alpha(1 + 2\mu) \left\{ \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr + \frac{1 - \mu}{1 + \mu} \frac{r}{R^2} \int_0^R T(r) dr \right\} \quad (1)$$

где $T(r)$ - аксиально-симметричная функция, R – радиус подложки, α и μ - ТКЛР и коэффициент Пуассона соответственно.

Величина термических напряжений σ_0 определится из суперпозиции не совпадающих по величине абсолютных деформаций.

С другой стороны для σ_0 , в нашем случае обозначая все величины, относящиеся к металлу индексом Me , а относящиеся к подложке – $ПМ$, для шлейфа с шириной монтажной зоны L при изложенных в начале раздела допущениях:

$$\sigma_0 = \frac{E_{ПМ}}{1 - \mu_{ПМ}} \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Из этого выражения относительная деформация полиимидной платы шлейфа определится как:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1 - \mu_{ПМ}}{E_{ПМ}} \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

И, принимая для расчёта максимальной ширины шлейфа (L) при заданной ширине монтажного вывода (b) следующие конструктивно-технологические граничные условия:

1. Размер монтажной контактной площадки коммутационной платы прибора равен размеру (ширине) монтажной балки полиимидного шлейфа.

2. Максимальное смещение балки шлейфа относительно контактной площадки коммутационной платы не должно превышать величину $0,5 b$,

окончательно, получим:

$$L \leq \frac{1}{2} \frac{E_{ПМ}}{1 - \mu_{ПМ}} \cdot b \cdot \frac{1}{\sigma_0}, \quad (4)$$

где

$$\sigma_0 = \frac{\alpha_{ПМ} \frac{1 + 2\mu_{ПМ}}{1 + \mu_{ПМ}} - \alpha_{Me} \frac{1 + 2\mu_{Me}}{1 + \mu_{Me}}}{\frac{1 - \mu_{Me}}{E_{Me}} + \frac{1 - \mu_{ПМ}}{E_{ПМ}}} \cdot \Delta T$$

Полученные расчетные зависимости представлены на рис.3.

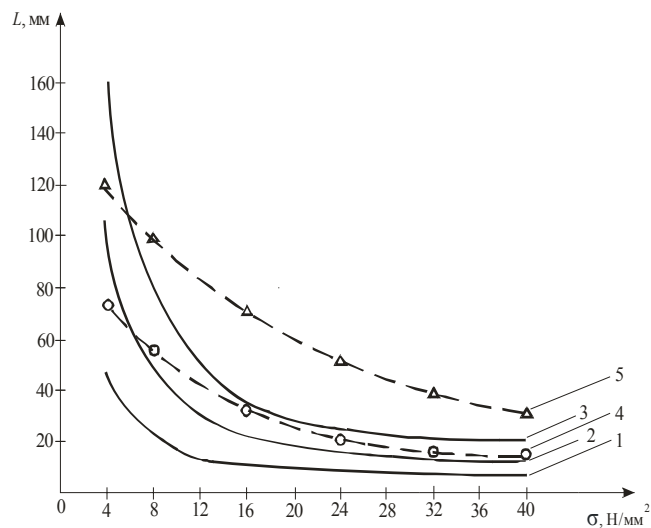


Рис.3. Влияние внутренних напряжений (σ) металлических слоев меди с подслоем хрома на максимальную монтажную ширину (L) полиимидного шлейфа.

1, 2 и 3 - расчетные зависимости при ширине металлического проводника (монтажной балки) 0,1; 0,2 и 0,3 мм соответственно.

4 и 5 - экспериментальные зависимости при ширине монтажной балки 0,1 и 0,2 мм соответственно.

На основе этой зависимости, определяющей процесс металлизации, выработаны принципы формирования крупноформатных шлейфов. Достаточно хорошее соответствие между расчетной и экспериментальной зависимостями свидетельствует об адекватности принятой модели. Это, в конечном итоге, обеспечивает прогнозирование возможной максимальной ширины шлейфа (до 120 мм) при заданной минимальной ширине (до 0,1 мм) монтажных выводов (балок) шлейфа.

С целью снижения температуры подложки при металлизации, особенно возможного начального перегрева, и как следствие, для повышения стабильности линейных размеров платы шлейфа, чем обеспечивается возможность изготовления прецизионных широкоформатных шлейфов разработан техпроцесс двустадийного нанесения хрома с оптимально обоснованными скоростями: 0,8 – 1,0

нм/с до номинала поверхностного сопротивления 250 Ом/□ (образования сплошной пленки, обеспечивающей заметный отвод тепла за счет отражения и отвода на металлическую оснастку), затем скорость нанесения хрома 2,5 - 3,0 нм/с до номинала 50 – 70 Ом/□, и меди - 10-13 нм/с до толщины 1,0 – 1,2 мкм. При скоростях конденсации хрома 1,5 нм/с для подложек, предварительно прогретых до 353 К, наблюдается дополнительный разогрев подложек не более 30-40 К.

Нанесение металлических слоев в вакууме на полиимидные подложки проводилось на промышленных установках либо термическим испарением (тигель с электронно-лучевым нагревом) – установка УВН-74П-3, либо с использованием магнетронной системы распыления – установка УРМ3.279.061.

По результатам электронографических исследований установлено, что тонкие пленки хрома в диапазоне толщин, соответствующих номиналу от 200 Ом/□ до 20 Ом/□ на полиимидной плате имеют мелкокристаллическую структуру кубической модификации, какая-либо ориентация по отношению к полиимиду отсутствует.

Микрорельеф подслоя хрома с поверхностным сопротивлением 200 Ом/□ на полиимидной плате достаточно равномерен, размер кристаллитов не более 20 нм. При номинале $50 \leq \rho_s \leq 70$ Ом/□ размер кристаллитов несколько увеличивается, не превышая, однако, величину 25 нм. Микрорельеф слоев Ст-Си также достаточно равномерен. При термическом методе испарения размер кристаллитов меди в плоскости подложки составляет от 0,1 до 0,3 мкм. При распылении с использованием магнетрона размер кристаллитов меди несколько больше и достигает величины 0,5-0,7 мкм.

Медь с подслоем хрома (во всем диапазоне оптимальной толщины) характеризуется крайне незначительным уровнем напряженности - параметр решетки, измеренный фотометодом, для всех образцов по сравнению с постоянной решетки массивного образца завышен незначительно.

Таким образом, установлено, что применение подслоя хрома с номиналом $50 \leq \rho_s \leq 70$ Ом/□ позволяет получать слои меди на полиимидной плате однородные по структуре и характеризующиеся малой величиной внутренних напряжений в широком диапазоне толщины меди и температуры подложки при металлизации, что создает

перспективы разработки технологии шлейфов для высокоплотного монтажа.

Установлены закономерности влияния конструктивно-технологических факторов на напряженно-деформированное состояние элементов шлейфа при силовом воздействии и зависимость запаса прочности материалов шлейфа от величины теплового воздействия на основе конечно-элементных моделей шлейфа. Определена зависимость допустимого радиуса перегиба от толщины проводника в области упругой деформации.

Моделирование и прочностной анализ проведены с помощью программного комплекса COSMOS Works, интегрированного в CAD-систему Solid Works. Получены модели для различных конструкций шлейфов: А – базовый вариант, проводник на пленке; В - проводник в пленке расположен несимметрично; С - проводник в пленке расположен симметрично. На рис. 4 представлены также расчетные коэффициенты запаса прочности для меди, определенные по формуле

$$n = [\sigma] / \sigma_{\text{экв}}$$

где $[\sigma]$ - допустимое напряжение; $\sigma_{\text{экв}}$ - эквивалентное максимальное напряжение, определенное с использованием конечно-элементных моделей.

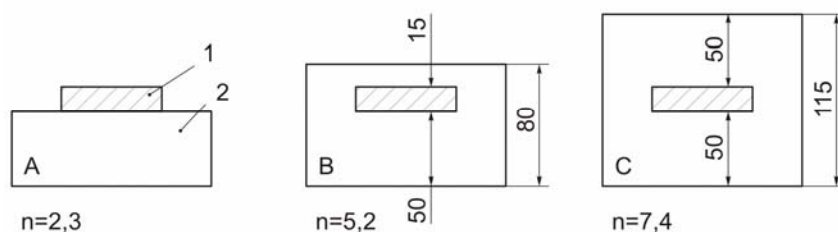


Рис.4. Зависимость запаса прочности «n» выводов шлейфа от конструкции шлейфа: без защитного покрытия (А), с толщиной покрытия равной толщине вывода (В) и с толщиной покрытия равной толщине полиимидной платы (С).

1 – проводник (вывод шлейфа), 2 - полиимидная плата шлейфа.

Показано, что использование полиимидных защитных покрытий (вариант В и С) позволяет существенно повысить прочность медных проводников – запас прочности возрастает в 1,8...2,55 раза.

Характерная диаграмма распределения эквивалентных напряжений представлена на рис.5 в виде изолиний на фоне деформированной модели шлейфа.

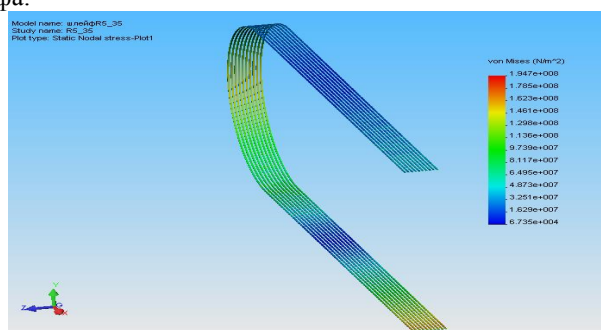


Рис.5. Напряженно-деформированное состояние шлейфа при постоянной силовой нагрузке с проводниками толщиной 35 мкм.

Показано, что максимальные термомеханические напряжения при тепловом воздействии локализуются на поверхности медных проводников в местах изменения формы соединяемых материалов (рис. 6). При нагреве шлейфа до 373 К максимальные напряжения в медных проводниках составляют $\sigma_{\max} = 50$ МПа, что соответствует запасу прочности $n=3$, и указывает на достаточно высокую термоупругость разрабатываемого полиимидного шлейфа.

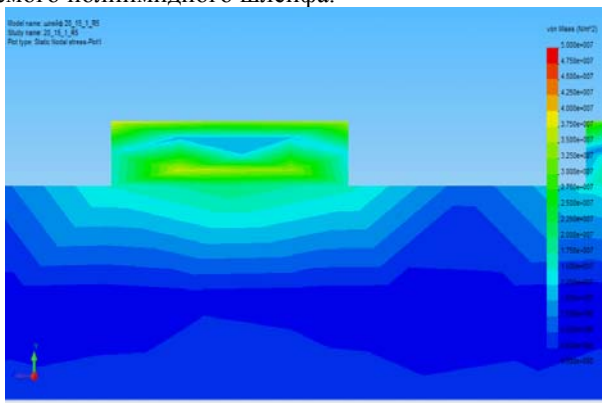


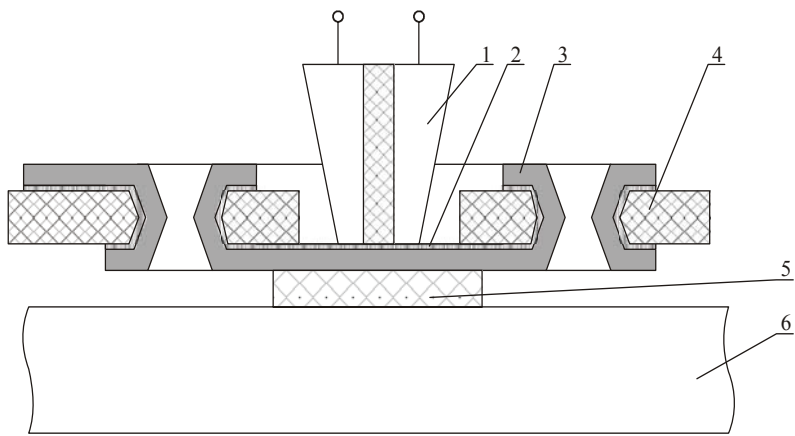
Рис.6. Термоупругие напряжения в сечении полиимидного шлейфа при нагреве до 373 К.

В третьей главе представлены результаты исследования и разработки технологии высокоплотного монтажа гибких двусторонних полиимидных шлейфов в составе приборов с обоснованием конструктивно-технологических особенностей и оптимизации метода микроконтактирования.

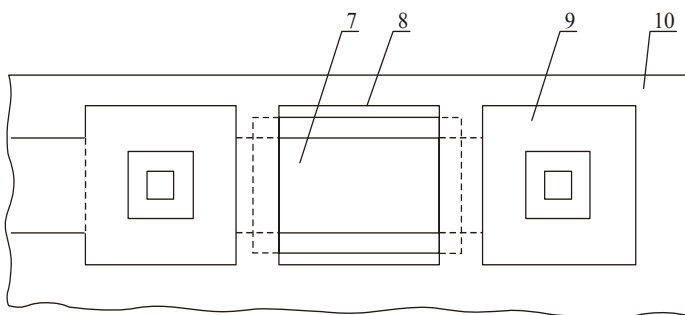
Разработан новый способ и экспериментально обоснованы оптимальные параметры технологии прецизионного высокоплотного монтажа полиимидных шлейфов, основанной на односторонней контактной сварке и контактировании монтажного инструмента с выводом двустороннего шлейфа по стороне, имеющей финишное покрытие, исключающее растекание припоя (рис.7). Эффект достигается путем формирования монтажных выводов в виде балок за счет расположения их в отверстиях полиимида. При этом покрытием одной стороны балки, предназначенной для контактирования с платой прибора является легкоплавкое покрытие, а покрытием противоположной стороны, предназначенной для контакта с монтажным рабочим инструментом, является слой хрома с удельным поверхностным сопротивлением $50 \leq \rho_s \leq 70 \text{ Ом/}\square$. В этих условиях при использовании метода сдвоенным электродом в режимах бесфлюсовой импульсной пайки-сварки прочность микроконтакта характеризуется высокими величинами и стабильностью, что и обеспечивает тем самым высокоплотный микромонтаж шлейфов с шагом балок до 0,15 мм.

Показано, что с целью исключения излишнего растекания и, тем более, разбрызгивания припоя представляется целесообразным применения процессов монтажа, протекающих при невысоких и кратковременных температурных воздействиях и давлении.

Установлено, что микроконтактные узлы, формируемые способами СКИН или сдвоенным электродом в режимах бесфлюсовой импульсной пайки-сварки, в условиях высокоплотного монтажа (шаг выводов до 0,15 мм) характеризуются более высокой прочностью и хорошим омическим контактом, стабильностью по сравнению с узлами, формируемыми микропаяльником, практически не имеют случаев «закорачивания» балок и сужения зазоров между ними, обеспечивая тем самым более высокоплотный микромонтаж (табл.1).



а) схема расположения комплектующих.



б) вид сверху.

Рис.7. Схема монтажа двустороннего гибкого шлейфа со свободным от полиимида и облуженным с одной стороны балочным выводом на плату.
 1 - двоянный электрод; 2 - подслоя хрома; 3 - медь с финишным легкоплавким покрытием; 4 - полиимид; 5 - контактная площадка платы; 6 - плата; 7 - балочный вывод; 8 - вскрытое "окно" в полиимиде; 9 - укрепляющая контактная площадка шлейфа; 10 - шлейф.

Таблица 1

Прочность соединения балочных выводов шлейфа
в зависимости от способа микроконтактирования.

Способ Микроконтакти- рования	Прочность соединения			Количество случаев уменьшения зазора между выводами при микроконтак- тировании
	Усилие отрыва, F ср, Н	Диспер сия, σ, Н	Метод испыта ния	
1. Исходное состояние (ПМВ на балочном выводе шлейфа)	0,89	0,10	сдвиг	нет
2. Односторонняя контактная сварка сдвоенным электродом: - монтаж с КП платы - имитация	0,25 0,92	0,03 0,11	отрыв сдвиг	нет
3. Сварка косвенным импульсным нагревом: - монтаж с КП платы - имитация	0,25 0,92	0,03 0,12	отрыв сдвиг	5%
4. Микропаяльник: - монтаж с КП платы - имитация	0,27 0,96	0,05 0,15	отрыв сдвиг	10%

Примечания. 1. Имитация проводилась в оптимальных рабочих режимах для каждого из способов (как и непосредственно пайка), но не на облуженную КП платы, а на алюминиевой пластине.

2. Прочность на отрыв определялась под углом 90° к поверхности платы, а на сдвиг - под углом 45° тарированной иглой.

Установлено, что зависимости прочности микроконтактных соединений таких шлейфов от напряжения, длительности импульса и давления инструмента носят экстремальный характер. Оптимальными

параметрами процесса бесфлюсового микроконтактирования сдвоенным электродом определены: напряжение - 50-70 В, время сварки - 0,04-0,05 с, усилие нагружения (давление) - 0,5-0,6 Н.

В четвертой главе на основе выполненных исследований представлены результаты разработки промышленной технологии изготовления гибких прецизионных полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа приборов электронной техники. Рассмотрены вопросы алгоритма построения технологического маршрута, обеспечения устойчивости шлейфов к многократным перегибам, тестового контроля качества технологических процессов. Приведены эксплуатационные показатели, результаты испытаний и использования.

Выполненные исследования в диссертации позволили технически обоснованно разработать новую промышленную технологию изготовления гибких полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа электронных приборов (рис.8) с учетом основных положений: обеспечение высокой плотности монтажных выводов, снижение трудоемкости, обеспечение необходимой надежности электрокоммутиации и повышенной стойкости к перегибам.

Исходя из теоретических выводов диссертации, что для повышения стойкости шлейфов к многократным перегибам (особенно для ширины проводника 100 мкм и менее и радиусе перегиба до 1 мм) требуется защита, разработана технология защиты полиимидным лаком (АД-9103), позволяющая значительно увеличить стойкость гибких шлейфов к перегибам.

На основе регрессионного анализа получена математическая модель стойкости полиимидных шлейфов к многократным перегибам от соотношения толщин конструкционных материалов шлейфа:

$$Y = 1,71 + 1,13x_1 + 0,216x_2 - 0,194x_3 - 1,38x_1^2 + 0,62x_2^2 + 0,696x_4^2 - 0,292x_1x_2 + 0,233x_1x_3 + 0,33x_1x_4 - 0,24x_2x_3 - 0,39x_2x_4 - 0,234x_3x_4,$$

где $x_1 = (d_{л1} - d_{л0}) / d_{л0}$; $x_2 = (d_{л2} - d_{л0}) / d_{л0}$; $x_3 = (d_{cu} - d_{cu0}) / d_{cu0}$; $x_4 = (d_{sn} - d_{sn0}) / d_{sn0}$ - исходные данные в нормированной форме и выражены посредством переменных величин: $d_{л1}$ и $d_{л2}$ - толщины защитного покрытия лака на прямой и обратной сторонах платы шлейфа соответственно, d_{cu} - толщина слоя меди проводника, d_{sn} - толщина бессвинцового покрытия (Sn-Bi) на проводнике, облегчающего растекание припоя и обеспечивающего защиту меди от окисления. При этом $d_{л0} = 30$ мкм, $d_{cu0} = 10$ мкм, $d_{sn0} = 3$ мкм.

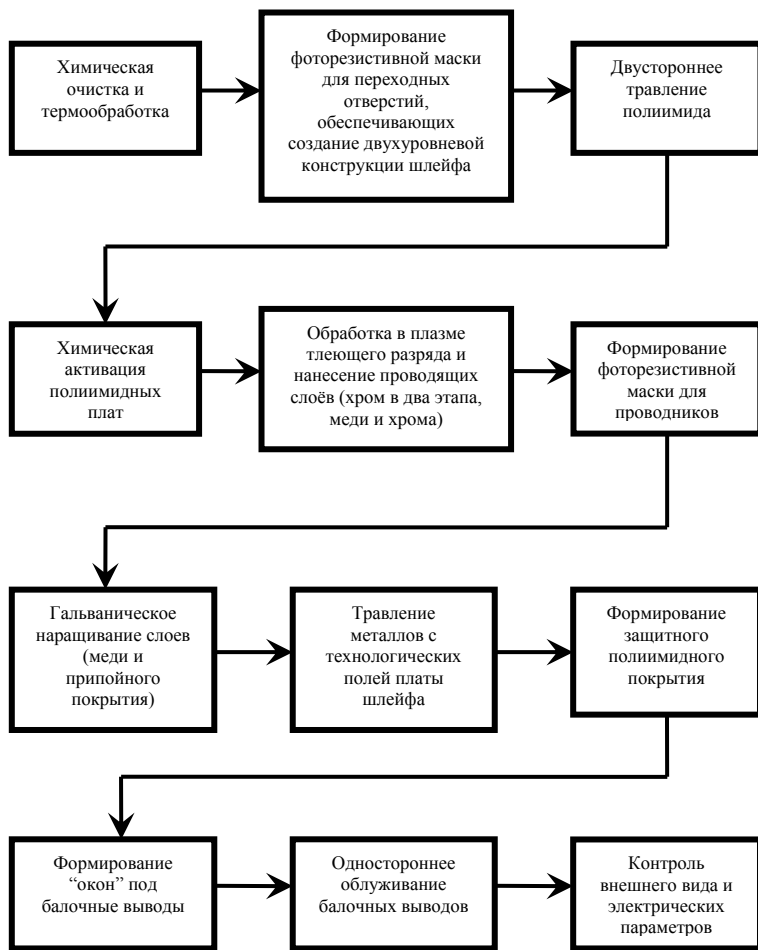


Рис.8. Структурная схема разработанного технологического процесса изготовления гибких прецизионных шлейфов на полиимидной пленке для высокоплотного монтажа приборов электронной техники.

Определено оптимальное сочетание толщин защитного покрытия и металлизации: толщина лака на лицевой стороне - 40 мкм; толщина лака на обратной стороне - 25 мкм; толщина слоя меди - 15-20 мкм; толщина защитного покрытия (Sn-Bi) – 3-5 мкм.

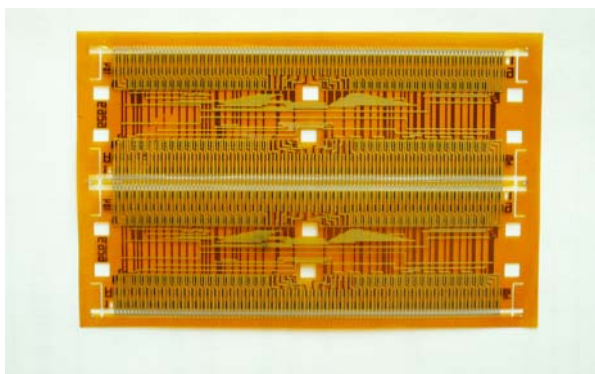
Для получения информации о качестве проведения технологических процессов и активного воздействия на техпроцесс особенно в условиях широкономенклатурного производства с целью поддержания установленного процента выхода годных использованы тестовые структуры. Тестовые структуры, являясь основой статистических методов контроля применительно к двусторонним полиимидным шлейфам, изготавливались в работе в едином технологическом цикле с рабочими проводниками и содержали все конструктивные элементы (балки) и их сочетания (укрепляющие «заклепки»), что и реальная плата. Эффективность тестового и межоперационного контроля подтверждена устойчивостью общего процента выхода годных в условиях промышленного производства для технологии изготовления и высокоплотного монтажа гибких полиимидных шлейфов. При оперативном проведении контроля и технологических корректировок, необходимость которых выявлена при использовании тестовых структур, годовые колебания общего процента выхода годных в производстве ОАО «Завод «Компонент» на протяжении 2 лет составили не более 0,3%.

Показано, что разработанные гибкие полиимидные шлейфы, характеризуются высокими техническими эксплуатационными параметрами. Верхние границы интенсивностей отказов, определенные на уровне достоверности 0,9 составляют: для паяных монтажных микросоединений балок – $1,6 \times 10^{-11}$ час⁻¹, при этом удельная погонная паразитная емкость проводников не более 0,3 пФ/см, удельное погонное сопротивление проводников – не более 0,01 Ом /см, задержка распространения сигнала – не более 0,07 нс/см, минимальный шаг выводов - 0,15 мм, при ширине монтажной зоны шлейфа до 120 мм.

Использование гибких полиимидных шлейфов при создании электронных приборов позволило сократить массу и габариты в 1,5 - 2 раза по сравнению с аналогичными приборами, изготавливаемыми на основе традиционных гибких печатных шлейфов.

Положительные результаты квалификационных испытаний подтвердили правильность конструктивно-технологических решений, установленных на основе исследований диссертации, и готовность производства к промышленному выпуску широкоформатных гибких

полиимидных шлейфов (рис.9) для высокоплотного монтажа с присвоением технической документации литеры «О₁».



а) базовая конструкция двустороннего шлейфа с шагом балочных выводов 0,25 мм с односторонним облуживанием.



б) базовая экранированная конструкция многовыводного (128 дорожечного) шлейфа с шириной выводов 100 мкм.

Рис.9. Прецизионные гибкие шлейфы на полиимидной пленке, изготавливаемые по разработанной технологии, для высокоплотного монтажа приборов электронной техники.

Все виды испытаний проведены на шлейфах, изготовленных на внедренном производственном участке предприятия ОАО «Завод «Компонент» при непосредственном личном участии автора диссертации.

Акты об использовании результатов диссертации оформлены на таких предприятиях, как ОАО «Завод «Компонент» (г.Зеленоград) в составе серийно выпускаемых вычислителей, ЗАО «НИИМП-Т» (г.Зеленоград) при монтаже многокристалльных модулей памяти в трехмерном исполнении и плоских информационных экранов, ОАО «АЭРОПРИБОР-ВОСХОД» (г.Москва) при монтаже прибора высотомера. Результаты диссертации используются в учебной программе по дисциплине «Компьютерно-интегрированные технологии монтажа и сборки ЭВС» в Московском государственном институте электронной техники (техническом университете).

Заключение

Современные тенденции микроминиатюризации приборов электронной техники показывают, что эффективность решения этого вопроса определяется повышением степени интеграции и во многом разработкой новых технологий компактного монтажа.

Показано, что актуальным и перспективным является монтаж приборов с использованием гибких печатных шлейфов. Наиболее оптимальным решением в этом направлении представляется использование для шлейфов гибкой полиимидной пленки. Однако, основными факторами, сдерживающими развитие и становление этого направления, являются, прежде всего, технологические проблемы, обусловленные требованиями все более компактного высокоплотного монтажа современных приборов, принципиально отличающегося от существующих технологий монтажа гибких печатных полиимидных шлейфов, освоенных промышленностью.

В современных условиях высокоплотного монтажа требуется новая технология, комплексно решающая проблемы, связанные как непосредственно с процессом изготовления полиимидных шлейфов с высокоплотным (шаг 0,15 мм и менее) расположением выводов, так и с процессом прецизионного монтажа таких шлейфов в составе приборов, характеризующихся, при этом, высокой механической устойчивостью к многократным перегибам с минимизацией радиуса перегиба.

Потребовались поисковые работы, и на основе комплекса исследований в рамках данной диссертации вышеотмеченные проблемы нашли свои решения, на основе которых разработана новая технология изготовления прецизионных полиимидных шлейфов, обеспечивающая высокоплотный монтаж приборов электронной техники. Оригинальность и научная новизна найденных решений подтверждена положительными решениями по двум заявкам о выдаче патентов РФ на изобретения.

Основные результаты работы:

1. Разработана концепция технологии полиимидных прецизионных гибких шлейфов для высокоплотного монтажа, основанная на двусторонней металлизации полиимидной пленки в вакууме и формировании в отверстиях полиимида монтажных балок с разным финишным покрытием противоположных сторон: облегчающим растекание припоя и исключаящим его растекание, и характеризующихся высокими адгезией металлических слоев к полиимидной пленке и стабильностью линейных размеров гибкой платы.

2. Экспериментально выявлена и теоретически показана зависимость максимальной монтажной ширины полиимидного шлейфа от уровня внутренних напряжений слоев меди с подслоем хрома. Для стабилизации температуры полиимидной платы при металлизации, определяющей уровень термических напряжений, разработан способ двустадийного нанесения хрома с оптимально обоснованными скоростями: 0,8–1,0 нм/с до номинала поверхностного сопротивления 250 Ом/□, затем скорость нанесения хрома 2,5 - 3,0 нм/с до номинала 50 – 70 Ом/□, и меди - 10-13 нм/с до толщины 1,0 – 1, 2 мкм.

Достаточно хорошее соответствие между расчетной и экспериментальной зависимостями свидетельствует об адекватности принятой модели. Это, в конечном итоге, обеспечивает прогнозирование возможной максимальной ширины шлейфа (до 120 мм) при заданном минимальной ширине (до 0,1 мм) монтажных выводов (балок) шлейфа.

3. Установлены закономерность влияния конструктивно-технологических факторов на напряженно-деформированное состояние элементов шлейфа при силовом воздействии и зависимость запаса прочности материалов шлейфа от величины теплового воздействия на основе конечно-элементных моделей шлейфа. Максимальные термомеханические напряжения локализуются на поверхности медных

проводников в местах изменения формы соединяемых материалов. В условиях эксплуатации шлейфа даже при 373 К максимальные напряжения в медных проводниках составляют $\sigma_{\max} = 50$ МПа, что соответствует запасу прочности $n=3$, и указывает на достаточно высокую термоупругость разработанного полиимидного шлейфа.

4. Установлена взаимосвязь и на основе регрессионного анализа получена математическая модель стойкости полиимидных шлейфов к многократным перегибам от соотношения толщин конструкционных материалов шлейфа. Показано, что использование защитных покрытий из полиимидного лака для полиимидных шлейфов позволяет существенно повысить их стойкость к многократным перегибам.

5. Разработан новый способ и экспериментально обоснованы оптимальные параметры технологии прецизионного высокоплотного монтажа полиимидных шлейфов, основанной на односторонней контактной сварке и контактировании монтажного инструмента с выводом двустороннего шлейфа по стороне, имеющей финишное покрытие, исключающее растекание припоя. Эффект достигается путем формирования монтажных выводов в виде балок за счет расположения их в отверстиях полиимида. При этом покрытием одной стороны балки, предназначенной для контактирования с платой прибора является легкоплавкое покрытие, а покрытием противоположной стороны, предназначенной для контакта с монтажным рабочим инструментом, является слой хрома с удельным поверхностным сопротивлением $50 \leq \rho_s \leq 70$ Ом/□. В этих условиях при использовании метода сдвоенным электродом в режимах бесфлюсовой импульсной пайки-сварки прочность микроконтакта характеризуется высокими величинами и стабильностью, что и обеспечивает тем самым высокоплотный микромонтаж шлейфов с шагом балок до 0,15 мм.

6. Выполненные исследования в диссертации позволили технически обоснованно комплексно разработать новую промышленную технологию изготовления гибких полиимидных шлейфов и их высокоплотного монтажа для приборов электронной техники. Гибкие полиимидные шлейфы, изготовленные по разработанной технологии, обеспечивают создание широкого спектра современных электронных приборов, характеризуются высокой стабильностью параметров и надежностью при воздействии дестабилизирующих факторов.

7. Разработанные технологические процессы изготовления гибких полиимидных шлейфов и их монтажа внедрены в ОАО «Завод Компонент» и использованы на ряде предприятий (ЗАО «НИИМП-Т», ОАО «АЭРОПРИБОР-ВОСХОД») при разработке высокоинтегрированных электронных приборов.

Такая технология полиимидных шлейфов во многом обеспечила высокие тактико-технические характеристики вычислителей и многокристальных модулей памяти в изделиях ОАО «Завод Компонент», нашедших широкое применение в качестве бортовых вычислительных и информационных комплексов космических систем. В рамках инновационных технологий результаты диссертации использованы при разработке плоских информационных экранов и высоотомеров.

8. Результаты диссертации используются в учебном процессе Московского государственного института электронной техники (техническом университете) в курсе «Компьютерно-интегрированные технологии монтажа и сборки электронных средств».

Основные публикации по теме диссертации

1. Семенин С.Н. Применение гибких шлейфов при создании современной электронной аппаратуры. Микроэлектроника и информатика – 2003. 10-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2003, с 35.

2. Семенин С.Н. Конструктивно-технологические особенности изготовления гибких шлейфов, устойчивых к многократным перегибам. Микроэлектроника и информатика – 2004. 11-ая Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2004, с.340.

3. Грушевский А.М., Семенин С.Н., Лыгач В.В. Высокоплотный межъячеечный монтаж электронных средств на основе гибких прецизионных шлейфов. Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2005, №4, с. 77-82.

4. Семенин С.Н., Рудакова Ю.Н. Монтаж гибких печатных шлейфов с алюминиевыми выводами. Микроэлектроника и информатика – 2005. 12-ая Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2005, с. 81.

5. Грушевский А.М., Семенин С.Н., Жуков П.А., Карвасарный В.В. Технология прецизионного монтажа на полиимидных платах. Известия вузов. Электроника №6, 2005, с. 36 – 40.

6. Грушевский А.М., Блинов Г.А., Семенин С.Н., Жуков П.А. Многокристальные модули памяти в трехмерном исполнении на полиимидном основании. Электроника и информатика - 2005. V Международная научно-техническая конференция: Тезисы докладов. Часть 1.- М.: МИЭТ, 2005, с. 221-222.

7. Погалов А.И., Грушевский А.М., Семенин С.Н., Блинов Г.А. Моделирование и прочностной анализ гибких шлейфов. Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2006, №1, с.49-50.

8. Грушевский А.М., Плис Н.И., Семенин С.Н., Балабанов В.Т. Электронный модуль бесконтактной идентификации. Заявка о выдаче патента РФ на изобретение № 2005115040 от 18.05.2005г.

9. Грушевский А.М., Блинов Г.А., Семенин С.Н. Прецизионный гибкий шлейф и способ высокоплотного монтажа электронных приборов с помощью таких шлейфов. Заявка о выдаче патента РФ на изобретение № 2005122151 от 13. 07.2005г.

10. Семенин С.Н. Оптимизация процесса металлизации полиимида в технологии производства прецизионных гибких шлейфов. Микроэлектроника и информатика – 2006. 13-ая Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2006, с. 108 .

Подписано в печать:

Заказ № ____ . Тираж _____ экз. Уч.-изд.л. ____ . Формат 60x84 1/16

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ (ТУ).