

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОДГОТОВКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ
И КОНДЕНСАТОРОВ МИКРОСХЕМ

Методические указания к лабораторной работе 34

УДК 621.382.83: 621.316.8: 621.319.4

Проводится анализ различных методов пассивной подгонки тонкопленочных резисторов и конденсаторов. Оценивается целесообразность введения в технологический процесс изготовления гибридной микросхемы операции подгонки.

Исследуется также подгонка уплотнением резистивного слоя, 54-факельным разрядом, электроскоровым методом. Проводится выбор оптимального метода подгонки по точности, трудоемкости и возмущающему воздействию, вносимому в параметры подгоняемого элемента.

Рекомендуется студентам специальности 0705.

Составитель М.Н. П и г а н о в

Утверждены на редакционно-издательском совете института 16.12.81г.

Ц е л ь р а б о т ы - исследование методов пассивной подгонки тонкопленочных резисторов и конденсаторов.

ЗАДАНИЯ:

1. Оценить точность изготовления тонкопленочных резисторов (ТНР) и конденсаторов (ТНК).
2. Изучить методы подгонки тонкопленочных элементов.
3. Произвести подгонку тонкопленочных резисторов и конденсаторов различными методами.
4. Выбрать оптимальный метод подгонки по точности, трудоемкости и возмущающему воздействию, вносимому в параметры элемента.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

КРИТЕРИЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДГОНКИ

Существующие в настоящее время методы изготовления ТНР и ТНК, как правило, не обеспечивают достаточной точности и воспроизводимости их номиналов. Разброс номиналов составляет 5-30%. Выход годных микросхем по этой причине составляет всего 40-80%. Наличие брака приводит к увеличению фактической трудоемкости T изготовления микросхемы в $\frac{100}{\beta}$ раз.

Уменьшить процент брака можно введением в технологический процесс дополнительной операции - подгонки номиналов элементов.

Критерием целесообразности введения в технологический процесс подгонки является соотношение трудоемкости изготовления микросхемы без проведения подгонки и с подгонкой.

Допустимую трудоемкость изготовления одной микросхемы с подгонкой можно определить по формуле

$$T_{n \text{ подн}} = \frac{\beta_n}{\beta} T, \quad (1)$$

где β_n - процент выхода годных микросхем с применением подгонки;

β - процент выхода микросхем без подгонки;

T - трудоемкость изготовления одной микросхемы без подгонки.

Подгонку элементов микросхемы целесообразно проводить в том случае, если время, затрачиваемое на ее проведение t_n , не превышает $t_{n \text{ подн}}$, $t_n \leq t_{n \text{ подн}}$,

где $t_{n \text{ доп}} = T_{n \text{ доп}} - T$ - допустимое время подгонки.

С учетом выражения (1) допустимое время подгонки можно записать в следующем виде

$$t_{n \text{ доп}} = \frac{\beta_n}{\beta} T - T = T \left(\frac{\beta_n}{\beta} - 1 \right).$$

Если средняя трудоемкость подгонки одного элемента составляет t'_n , то число элементов в микросхеме n , при котором выгодно производить подгонку, составляет

$$n = \frac{t_{n \text{ доп}}}{t'_n} = \frac{T(\beta_n/\beta - 1)}{t'_n}.$$

Следует отметить, что введение подгонки является единственно возможным методом получения прецизионных RC-элементов микросхем.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОНКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

2.1. Виды подгонки

Подгонка резисторов может быть индивидуальной или групповой. Индивидуальная подгонка целесообразна при независимых отклонениях погрешностей сопротивления резисторов. Если уход за пределы поля допуска вызван каким-либо доминирующим фактором для большинства резисторов интегральной микросхемы (ИМС), то целесообразно использовать групповую подгонку.

Величина сопротивления тонкопленочных резисторов определяется удельным сопротивлением резистивной пленки, ее геометрическими параметрами и выражается формулой

$$R = \rho \frac{\ell}{\beta d},$$

где ρ - удельное сопротивление резистивной пленки;

ℓ, β, d - соответственно длина, ширина и толщина резистора.

Таким образом, подгонку ТПР к номинальному значению можно производить путем изменения ρ , ℓ , β и d :

Удельное сопротивление резистивных пленок изменяют окислением границ зерен, составляющих пленку, либо их уплотнением. Длину резистивной пленки можно увеличить путем разрезания заранее предусмотренных шунтирующих перемычек из проводящего материала. Удалением части резистивного материала можно уменьшить ширину пленки.

Толщину резистивной пленки уменьшают окислением ее поверхности, либо удалением поверхностного слоя.

2.2. Методы подгонки удалением резистивного слоя

В настоящее время наибольшее распространение получили методы подгонки, основанные на удалении части резистивного материала. В этом случае сопротивление ТИР увеличивается.

Для увеличения сопротивления можно использовать механическое пропарывание, абразивную обработку, удаление материала с помощью электроэрозии, с помощью теплового воздействия электронного, ионного, либо лазерного лучей, электрохимическое травление. Подгонка в этом случае может быть осуществлена образованием продольных и поперечных резов (рис.1). Более точной является п р о д о л ь н а я
п о д г о н к а.

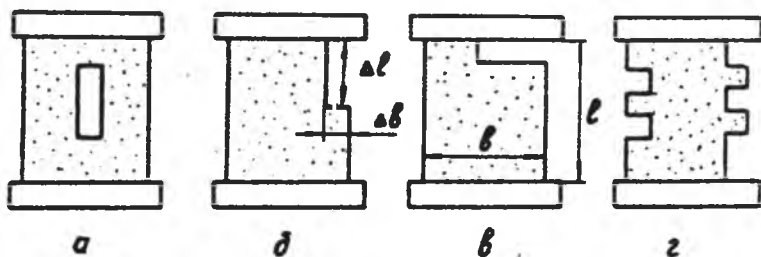


Рис.1. Образование продольных - а,б и поперечных - в,г резов

Аналитическое выражение величины изменения сопротивления при подгонке имеет следующий вид

$$\Delta R = \rho_s \frac{\Delta l}{b} \frac{\Delta b}{b - \Delta b},$$

где $\rho_s = \rho/d$ - удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки.

Выражение относительного изменения сопротивления имеет следующий вид

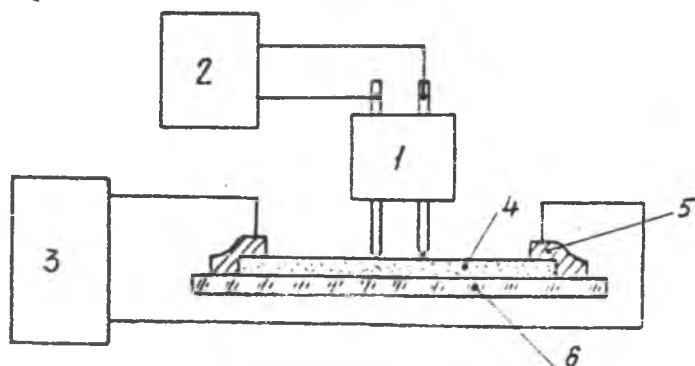
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \frac{\Delta b}{b - \Delta b}.$$

Наибольшее применение для подгонки ТПР удалением части резистивного слоя нашел лазерный метод. При воздействии на пленочный резистор концентрированного излучения лазера интенсивностью 10^{10} – 10^{12} Вт/м² происходит испарение пленки. При такой обработке диаметр пленки, удаленной за один импульс, может достигать 10–30 мкм, что позволяет производить подгонку с высокой точностью (до 0,01%).

Лазерный метод позволяет подгонять резисторы любых номиналов. Возможна также подгонка ТПР с защитным слоем. При этом можно производить измерение величины сопротивления в процессе подгонки.

более простой, доступной и дешевой является подгонка удалением резистивного материала с помощью электроэрозии. В этом случае используют электроискровой, электроконтактный, коронный, ВЧ-факельный разряды.

На рис.2 представлена схема электроискровой (электроконтактной) подгонки.



Р и с. 2. Схема электроискровой подгонки: 1 - рабочие электроды; 2 - источник напряжения; 3 - измеритель сопротивления; 4 - резистивный слой; 5 - контактные площадки; 6 - подложка

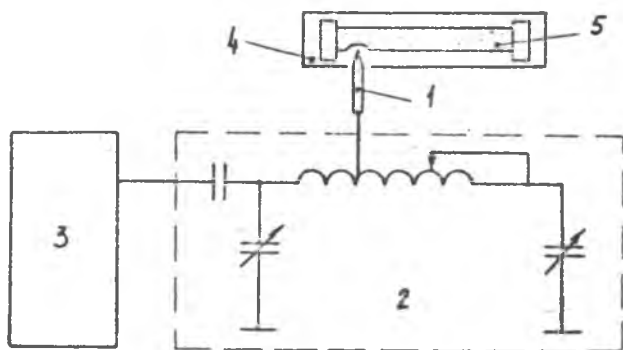
Для подгонки используют два электрода, расположенные на близком расстоянии друг от друга. Один из электродов выполнен в виде острой иглы. В момент подачи напряжения происходит удаление участка пленки вокруг острого электрода. Диаметр удаленного участка в 2–3 раза больше диаметра острия электрода. Точность подгонки дости-

гает 0,01%.

Управляемость процессом электроискровой подгонки улучшается, если один из электродов установить на контактную площадку, а вторым (острым) касаться резистивной пленки. В этом случае необходимо использовать более высокое напряжение; при этом возможно также выгорание контактной площадки.

Более технологичным и электробезопасным является ВЧ-факультетный метод. Свободный высокочастотный факультетный разряд представляет собой плазменное образование с ярко выраженным каналом и оболочкой. Температура воздуха в канале расположена в пределах 3000-10000°К. Особенностью факультетного разряда является то, что все источники тепла сосредоточены в одном канале разряда. Это позволяет производить подгонку с высокой точностью (0,00 - 0,01%).

Схема устройства для подгонки ТИР ВЧ-факультетным разрядом представлена на рис. 3.



Р и с. 3. Схема устройства для подгонки резисторов ВЧ-факультетным разрядом: 1 - рабочий электрод; 2 - П-образный LC - контур; 3 - ВЧ-генератор; 4 - подложка; 5 - тонкопленочный резистор

Устройство для подгонки состоит из ВЧ-генератора и рабочего электрода. ВЧ-генератор выполнен в виде последовательно включенных задающего генератора и усилителя мощности. Рабочий электрод с помощью коаксиального кабеля подключен к выходному П-образному контуру генератора.

Свободный ВЧ-факультетный разряд возбуждается на острие рабочего

электрода, находящегося под высокочастотным потенциалом ВЧ-генератора незатухающих колебаний.

Преимуществом данного метода является то, что для подгонки используется только один электрод.

Стабильность тонкопленочных резисторов после подгонки удалением резистивного слоя определяется многими факторами. Основными из них являются качество реза и состояние материала на периферии реза. Продукты разрушения в зоне реза могут образовывать нестабильные шунтирующие токопроводящие мостики. На периферии реза возможно появление значительных температурных напряжений, достаточных для возникновения микротрещин, проникающих в токопроводящий участок. Ток, проходящий по мостикам при определенной геометрии резистора, может вызвать локальный перегрев пленки. При недостаточной мощности излучения или разряда резистивный материал в зоне обработки может испариться не полностью, что ухудшает чистоту реза.

2.3. Методы подгонки в сторону уменьшения номинала

Для уменьшения величины сопротивления ТПР используют методы токовой подгонки, уплотнения резистивного слоя, отжига слоев при тепловом или высокочастотном нагреве и другие.

При токовой подгонке через резистор пропускается постоянный, переменный или импульсный ток. Если мощность, выделяющаяся на ТПР, будет выше допустимого значения, но меньше предельного, то сопротивление резистора будет увеличиваться или уменьшаться.

Мощность, выделяемая на резисторе, вызывает его нагрев и изменяет соотношение сопротивлений зерен пленки и границ между ними. С одной стороны, нагрев способствует упорядочению структуры пленки и уменьшению сопротивления. С другой – интенсивный нагрев вызывает окисление поверхности зерен и тем самым увеличивает сопротивление.

Величина изменения сопротивления в значительной степени определяется условиями получения резистивных пленок. Так, если пленка подвергалась термообработке в вакууме, либо напылялась при высоких температурах подложки, изменение сопротивления при подгонке за счет упорядочения структуры окажется незначительным и будет преобладать процесс, вызывающий увеличение сопротивления за счет окисления зерен. И наоборот, отсутствие термообработки, либо отсутствие кислорода при прохождении через резистор тока, например, если

резистор покрыт защитным слоем, обуславливает уменьшение сопротивления.

При токовой подгонке происходит увеличение температурного коэффициента сопротивления (рис.4).

Максимальное значение диапазона подгонки для токового метода составляет 30%, а максимально возможная точность - $\pm 0,01\%$.

Следует отметить, что данный метод имеет серьезные недостатки. Прежде всего он требует отключения резистора из схемы в процессе подгонки, чтобы избежать повреждения или изменения параметров других элементов. Кроме того, токовая подгонка изменяет сопротивление пленки весьма сложным образом. Сопротивлением некоторых резисторов не всегда удается управлять с достаточной точностью, у них обнаруживаются серии дискретных, а иногда больших ступенчатых изменений.

Безыма эффективным является метод уплотнения резистивного слоя. В этом случае в результате давления на резистивную пленку тупой иглой при одновременном скольжении ее по поверхности резистивного слоя происходит уплотнение пленки и необратимое повышение ее электропроводности (рис.5).

Величина изменения (уменьшения) сопротивления резистора зависит от ряда факторов: величины давления, создаваемого иглой; площади и глубины уплотненного участка; материала, плотности и толщины пленки; материала иглы.

Максимальное значение изменения сопротивления для резисторов на основе керметов составляет 100-300%, на основе металлов - 10%, на основе сплавов типа РС - 20%.

При ручной подгонке уплотнением легко достижима точность $\pm 0,1\%$. Опытные операторы обеспечивают точность подгонки до $\pm 0,01\%$ и выше.

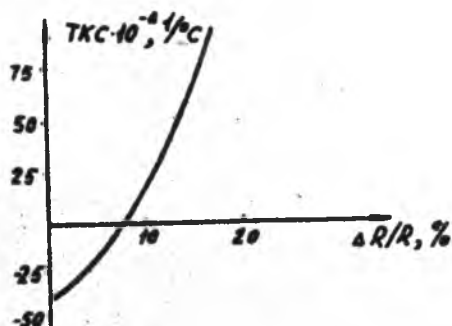
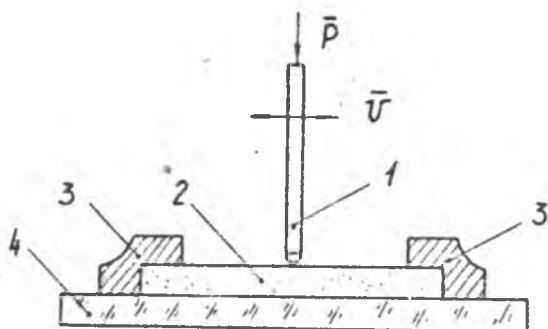


Рис.4. Типичная зависимость температурного коэффициента сопротивления ТПР от диапазона подгонки $\Delta R/R$



Р и с. 5. Схема подгонки ТПР уплотнением резистивного слоя:
 1 - рабочий электрод; 2 - резистивный слой; 3 - контактные площадки; 4 - подложка

для уменьшения трудоемкости подгонки используют устройство, выполненное в виде стержня с шариком или роликом на конце. В этом случае пленка уплотняется на большую глубину. Скорость подгонки качением рабочего инструмента в 2-3 раза выше, чем при подгонке скольжением иглы.

Если требуется высокая точность подгонки (0,001-0,01%), то уплотнение целесообразно осуществлять ударным воздействием рабочего инструмента. В этом случае площадь уплотненного за один цикл подгонки участка резистивного слоя будет минимальна.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОНКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

3.1. Механизмы изменения емкости

Величина емкости тонкопленочного конденсатора определяется по формуле

$$C = 8,84 \cdot 10^{-4} \frac{\epsilon S}{d},$$

где C - емкость ТПК, пФ;

ϵ - диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика;

S - площадь перекрытия обкладок, м²;

d - толщина диэлектрика, м.

Из формулы следует, что подгонку емкости ТПК к номинальному

значению можно осуществлять либо за счет изменения ϵ , либо за счет изменения площади перекрытия S , поскольку толщину диэлектрической пленки изменять нельзя.

Величину диэлектрической проницаемости можно изменять путем отжига диэлектрика при нагреве ТПК. Например, при отжиге титаната бария образуются другие соединения, в частности, окись бария, которая имеет другое значение ϵ . При этом величина изменения ϵ зависит от времени и от температуры отжига.

При отжиге происходит также рост зерен пленки, что ведет к увеличению диэлектрической проницаемости.

2.2. Методы подгонки в сторону уменьшения емкости

Наибольшее применение находят методы подгонки, основанные на изменении емкости путем уменьшения площади верхней обкладки. Для этого производят удаление части материала обкладки электроискровым, электроконтактным, факельным методами, лучом лазера, пробоем ТПК и т.д.

широко распространен метод электроконтактной подгонки. В качестве рабочего электрода используют металлические иглы с диаметром острия 10-30 мкм.

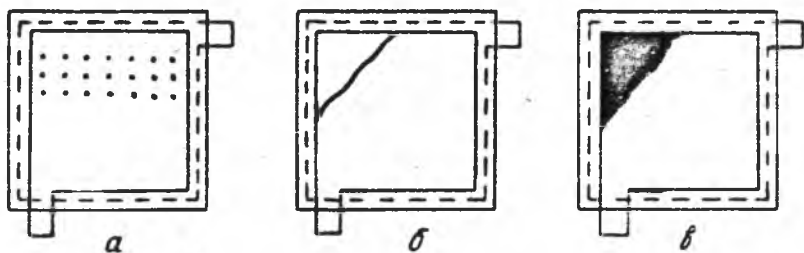
Выбор материала рабочего электрода производят по критерию чалатника

$$P = C \gamma \lambda T_{пл}^2,$$

где C - теплоемкость материала электрода;
 λ - коэффициент теплопроводности;
 γ - плотность;
 $T_{пл}$ - температура плавления.

Чем больше величина P материала электрода, тем выше его эрозионная стойкость. Для удаления пленок алюминия используют вольфрам, медь и другие материалы. Медный электрод обеспечивает хорошую обработку обкладки, но подвержен быстрому износу. Меньший износ наблюдается при использовании вольфрамового электрода.

Используют три варианта подгонки - удаление части обкладки прожиганием отверстий, отрезанием части верхней обкладки и полным удалением части верхней обкладки (рис.6).



Р и с. 5. Методы удаления части верхней обкладки ТПК: а - прожигание отверстий; б - отрезание части верхней обкладки; в - полное удаление части верхней обкладки.

Точность подгонки в первом случае будет максимальной - 0,01% и выше. Однако при подгонке по первому варианту возрастает тангенс угла диэлектрических потерь и снижается стабильность ТПК. Минимальное возмущающее воздействие в параметры конденсаторов вносят второй и третий варианты подгонки.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

1. Подложкодержатель.
2. Образцы исследуемых микросхем.
3. Устройство для подгонки ТПР уплотнением (игла с полусферическим закруглением, стержень с шариком на конце).
4. Устройство для электроконтактной подгонки ТПР и ТПК: рабочий электрод, источник питания.
5. Устройство для подгонки ТПР факельным разрядом: ВЧ-генератор, рабочий электрод.
6. Цифровой мост для измерения сопротивлений.
7. Измеритель емкости и тангенса угла диэлектрических потерь $\epsilon \delta$.
8. Измерительный зонд.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. В каких случаях целесообразно введение подгонки?
2. Чем индивидуальная подгонка отличается от групповой?
3. Какие методы подгонки ТПР Вам известны?
4. Нарисуйте схему электроискровой подгонки ТПР.
5. Сущность лазерной подгонки. Преимущества и недостатки.
6. Как осуществляют токовую подгонку?
7. Как влияет токовая подгонка на ИКС резисторов?
8. Сущность подгонки ТПР уплотнением резистивного слоя.
9. Какие методы используют для подгонки ТКК? Сущность электроконтактной подгонки конденсаторов.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить образцы забракованных микросхем. Уточнить номинальные значения сопротивлений ТПР и емкостей ТКК и точность их подгонки.
2. Измерить фактические значения сопротивлений ТПР, емкостей и t_{90} ТКК.
3. Установить микросхему в подложкодержатель.
4. Произвести подгонку ТПР уплотнением резистивного слоя, электроконтактным и бакельным методами (методика подгонки приведена в методических указаниях к работе).
5. Определить диапазон $\frac{\sigma R}{R}$, время τ_n , скорость ν_n и точность $\frac{\sigma R'}{R}$ подгонки каждым методом. Экспериментальные и расчетные данные занести в табл. I.

Таблица I

№ ТПР	метод подгонки	$R_{ном},$ кОм	$R_0,$ кОм	$R_n,$ кОм	$\frac{\sigma R}{R},$ %	$\tau_n,$ с	$\nu_n,$ %/с	$\frac{\sigma R'}{R},$ %
R1								
R2								

6. Определить максимальное значение диапазона подгонки ТПР при уплотнении качением и скольжением рабочего инструмента.
7. Определить время подгонки τ_n резисторов при уплотнении качением и скольжением для следующих значений точности $\sigma R'$:

0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0% и для диапазона подгонки $\delta R/R = 30\%$.

8. Произвести подгонку ТПК электроконтактным методом в трех режимах: прожиганием отверстий, отрезанием и полным удалением части верхней обкладки.
9. Определить диапазон $\frac{\delta C}{C}$, время, скорость и точность $\delta C'$ подгонки для каждого варианта. Данные свести в табл.2.

Таблица 2

№ ТПК	Вариант подгонки	$\frac{C_{ном}}{C_0}$, $\frac{C_n}{C_0}$	$\frac{C_n}{C_0}$, $\frac{C_n}{C_0}$	$\frac{C_n}{C_0}$, $\frac{C_n}{C_0}$	$\frac{\delta C}{C_0}$, %	$\Delta \lg \delta$, %	τ_n , с	v_n , %/с	$\delta C'$, %
С1									
С2									

10. Выбрать оптимальный метод и вариант подгонки: для ТПР - по максимальной точности и минимальной трудоемкости, для ТПК - по минимальной трудоемкости и $\Delta \lg \delta$ и по максимальной точности.

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы и задание.
2. Схема электроискровой подгонки ТПР.
3. Схема устройства для подгонки ТПР факельным разрядом.
4. Схема подгонки ТПР уплотнением резистивного слоя.
5. Схема вариантов подгонки ТПК удалением части верхней обкладки.
6. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
7. Зависимость $\tau_n = f(\delta R')$ при подгонке уплотнением резистивного слоя.
8. Экспериментальные данные по определению максимального значения диапазона подгонки при уплотнении качением и скольжением.
9. Выбор оптимального метода и варианта ТПР и ТПК.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

1. Нарисуйте схему устройства для подгонки ТПР методом ВЧ-факельного разряда.
2. От чего зависит точность подгонки ТПР и ТПК (на примере электроконтактного метода и метода уплотнения)?
3. Напишите формулу допустимой трудоемкости изготовления одной микросхемы с учетом подгонки.
4. Проведите анализ 3-х вариантов подгонки ТПК электроконтактным методом по точности и трудоемкости, по влиянию на свойства конденсаторов.
5. Напишите выражение изменения сопротивления при подгонке удалением части резистивного материала образованием резцов.
6. Какие факторы влияют на стабильность ТПР после подгонки удалением части резистивного слоя?
7. От чего зависит трудоемкость подгонки?
8. Как влияет процесс подгонки на свойства ТПР и ТПК (на примере проведенных исследований)?
9. Какова причина различия в значениях трудоемкости и максимального значения диапазона подгонки при уплотнении качеством и скольжением?

Л и т е р а т у р а

1. Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Э., Крюков Ю.Г. Конструкции и технология микросхем (ГИС и БГИС). Учебник для студентов вузов /Под ред. Ермолаева Ю.П. М.: Сов.радио, 1980, 256 с.
2. Сергеев В.С., Вожегин И.Н. Интегральные гибридные микросхемы. Массовая библиотека инженера (электроника). М.: Сов.радио, 1973, 63 с.
3. Монвилло Б.К., Щепкин Л.Н., Грамм С.А. Целесообразность пистровки резисторов в процессе изготовления микросхем. -Электронная техника. Серия б. Микроэлектроника, 1967, Вып.5, 93-95 с.
4. Прибор для подгонки тонкопленочных элементов микросхем/Чернобровкин Д.И., Мишанин Н.Д., Иганов М.Н. и др. Приборы и системы управления, 1978, № 6, с.45-46.

С о д е р ж а н и е

1. Теоретические основы. Критерий целесообразности проведения подгонки	3
2. Технология подгонки тонкопленочных резисторов.	4
2.1. Виды подгонки	4
2.2. Методы подгонки удалением резистивного слоя	5
2.3. Методы подгонки в сторону уменьшения номинала	8
3. Технология подгонки тонкопленочных конденсаторов	10
3.1. Механизмы изменения емкости	10
3.2. Методы подгонки в сторону уменьшения емкости	11
4. Описание лабораторной установки	12
5. Контрольные вопросы для проверки подготовленности к выполнению работы	12
6. Порядок выполнения работы	13
7. Содержание отчета	14
8. Контрольные вопросы для отчета по работе	14
Литература	15

Составитель Михаил Николаевич Лиганов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОДГОНКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ
И КОНДЕНСАТОРОВ МИКРОСХЕМ

Методические указания к лабораторной работе 34

Редактор Л. С о к о л о в а

Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к

Корректор С. П. Чернов

Подписано в печать 21.09.82 Формат 60x84 1/16 .

бумага оберточная белая. Печать оперативная.

Усл. п. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 300 экз.

Заказ № 266 . Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт имени академика С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Офсетный участок КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.