

ДЗ №1

Проектирование тонкопленочных гибридных интегральных микросхем

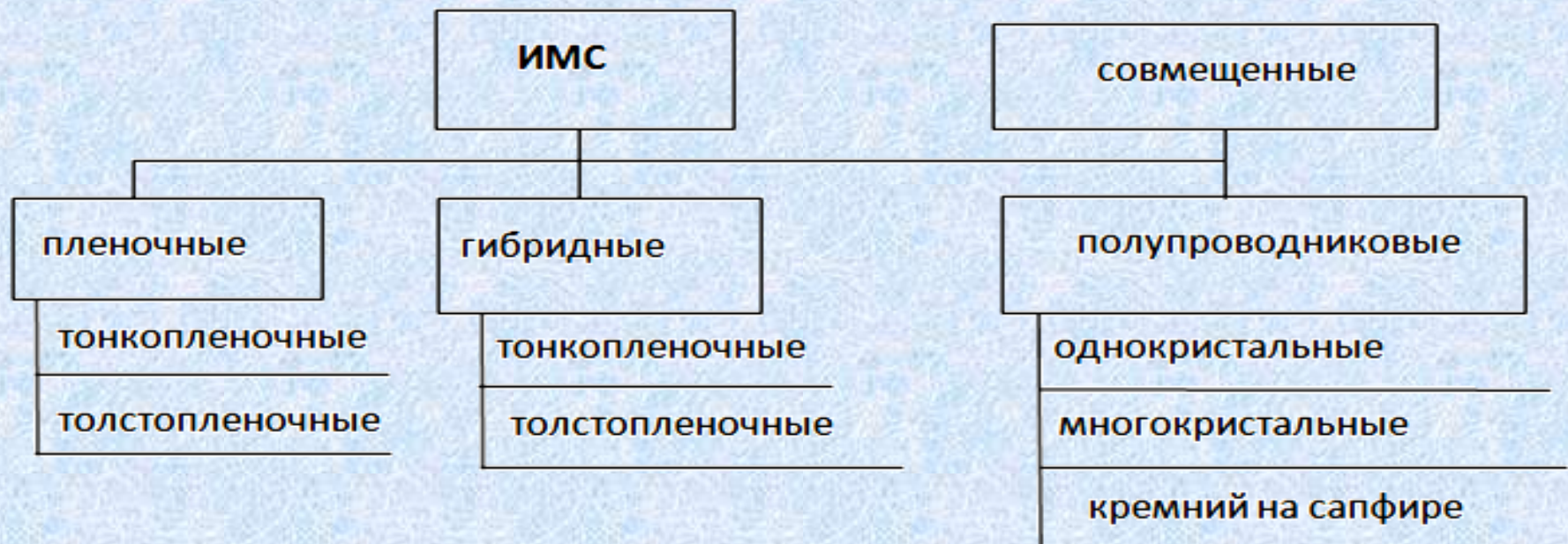
Поляков В.И., Стародубцев Э.В. Проектирование гибридных тонкопленочных интегральных микросхем: учебное пособие по дисциплине «Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ» – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 80 с.

Классификация интегральных микросхем

Интегральная микросхема (ИМС) – это конструктивно законченное микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования информации, содержащее совокупность электрически связанных между собой элементов (транзисторов, диодов, резисторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле.

По **конструктивно-технологическому** исполнению микросхемы делят на четыре группы:

пленочные, гибридные, полупроводниковые и совмещенные

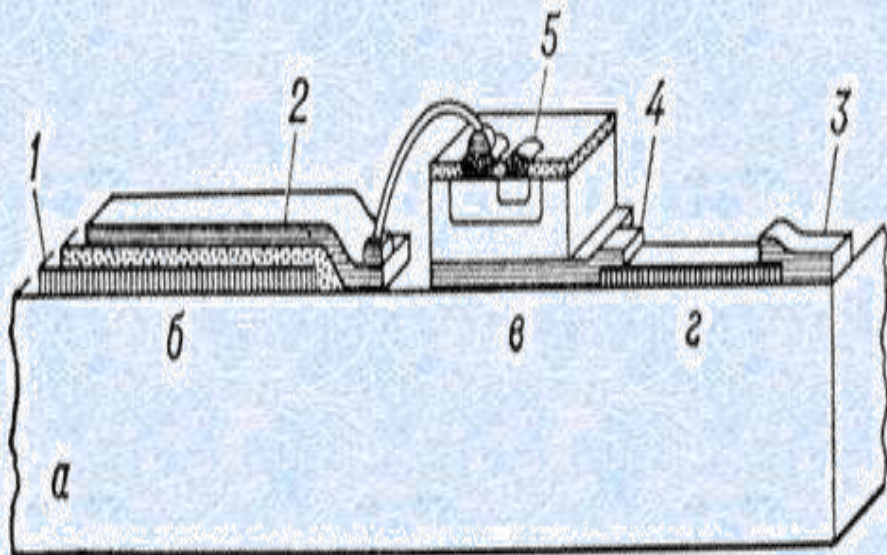


Пленочная микросхема — микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены только в виде пленок проводящих и диэлектрических материалов. Вариантами пленочных являются тонкопленочные и толстопленочные микросхемы. К тонкопленочным условно относят микросхемы с толщиной пленок менее 1 мкм, а к толстопленочным — микросхемы с толщиной пленок свыше 1 мкм.

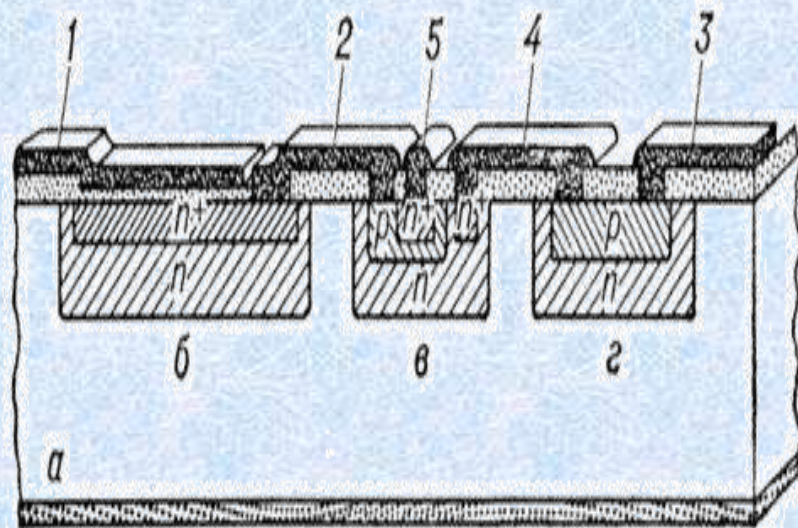
Гибридная микросхема — микросхема, пассивные элементы которой (резисторы, конденсаторы и индуктивности) выполнены в виде пленок (толстых или тонких), а активные (бескорпусные диоды, транзисторы и кристаллы микросхем) элементы - навесные. Одним из видов гибридной микросхемы является многокристальная микросхема.

Полупроводниковая микросхема — микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

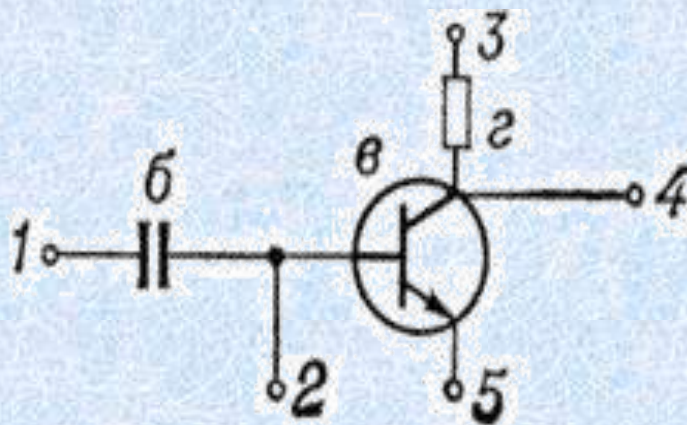
Совмещенная микросхема — микросхема, которая, кроме полупроводникового кристалла, содержит тонкоплёночные пассивные элементы, размещённые на поверхности кристалла.



а



б



Фрагмент ИС: а – гибридной, б – полупроводниковой ИС

Основными конструктивными элементами гибридных микросхем являются:

Подложка – диэлектрическая плата, предназначенная для выполнения на ней пленочных элементов.

Контактная площадка – электропроводящая площадка на подложке, предназначенная для контактирования (подсоединения) навесных элементов, внешних выводов и контроля параметров пленочных элементов.

Слой – часть пленочной микросхемы, выполненная за одну технологическую операцию, с применением одного трафарета (резистивный слой, проводящий слой, диэлектрический слой, защитный слой и т.д.).

Навесные полупроводниковые приборы - транзисторы, диоды, микросхемы.

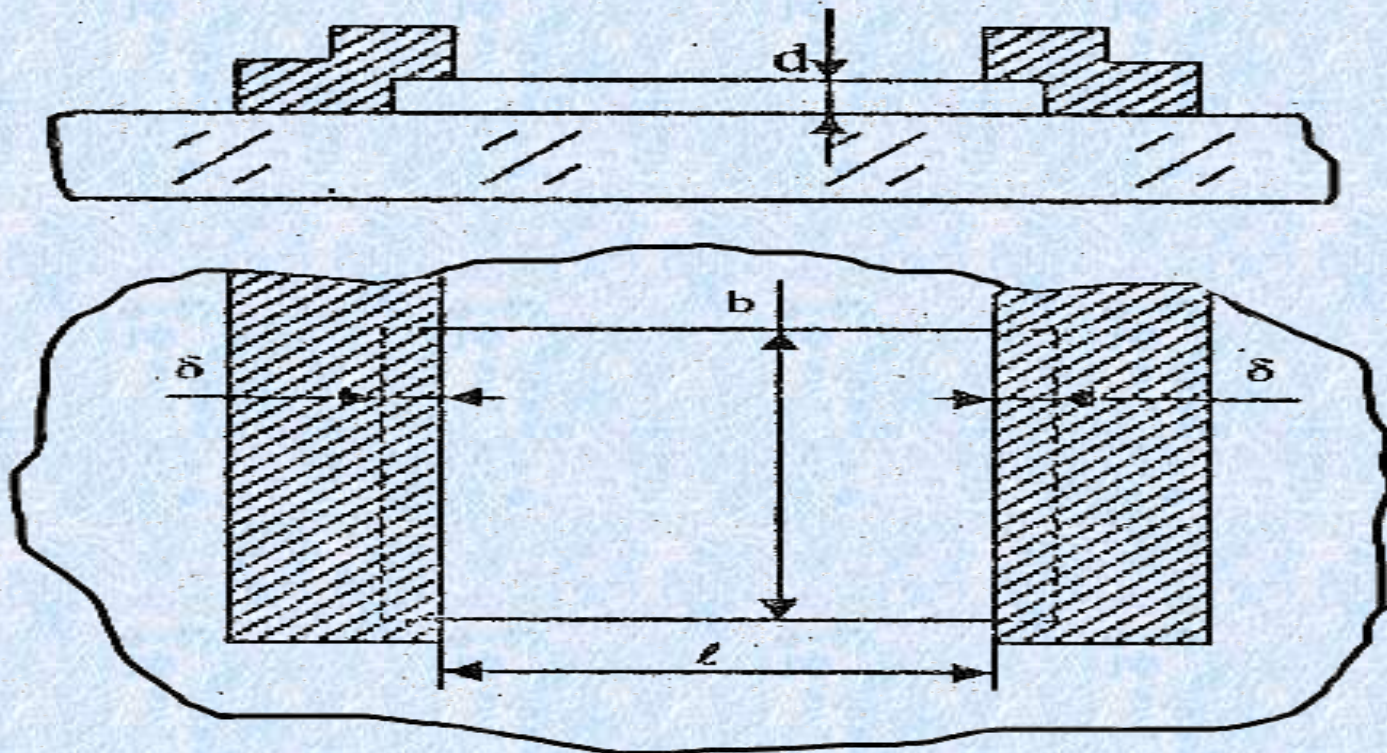
Топология – взаимное расположение и геометрическая форма пленочных элементов

Проектирование ГИС

1. Расчет размеров пленочных резисторов

Исходными данными для расчета размеров резисторов являются:

- номинальное значение R , Ом, кОм;
- погрешность номинального значения ΔR , %;
- номинальная мощность резистора W , Вт.



Конструкция тонкопленочного резистора

Введем конструктивные размеры резисторов:

l – длина, b – ширина, d – толщина, δ – величина перекрытия пленочных слоев, которая, в свою очередь, зависит от технологии изготовления (в работе примем $\delta=0,2$ мм).

Тогда сопротивление резистора равно

$$R = \rho \cdot \frac{l}{d \cdot b},$$

где ρ – удельное объемное электрическое сопротивление материала резистора, размерность которого [Ом · см].

Так как материал одновременно напыляемых резисторов и время напыления одинаковы (толщина пленки), для упрощения расчетов обозначим

$$\rho_{\square} = \frac{\rho}{d}$$

и назовем этот параметр удельным поверхностным сопротивлением пленочного резистора.

Введем понятие коэффициента формы пленочного резистора k_ϕ

$$k_\phi = \frac{l}{b}.$$

Тогда, с учетом введенных обозначений, формулу сопротивления пленочного резистора запишем в виде

$$R = \rho_\square \cdot k_\phi.$$

Отсюда следует

$$\rho_\square = \frac{R}{k_\phi} = R \cdot \frac{b}{l}.$$

Если резистор квадратной формы, то $k_\phi = 1$ и $R = \rho_\square$. Таким образом получается, что размерность ρ_\square есть [Ом] или [Ом/□, читается «Ом на квадрат»].

Последнее выражение размерности показывает, что ρ_\square численно равно сопротивлению резистора квадратной формы и не зависит от размера квадрата.

Основными электрическими параметрами пленочного резистора являются: R , ρ_{\square} , k_{ϕ} , ΔR .

Важными параметрами являются также максимальная удельная мощность рассеяния W_0 – это максимальная мощность, которую может рассеять резистор размером $1 \times 1 \text{ см}^2$, не разрушаясь и W – это максимальная мощность которую может рассеять резистор, оставаясь в пределах ΔR .

Рекомендуется следующая последовательность расчета.

Определяется оптимальное удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_{\square \text{opt}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n R_i^{-1}}}.$$

Выбирается материал резистивной пленки с удельным электрическим сопротивлением ρ_{\square} , ближайшим к вычисленному $\rho_{\square \text{opt}}$.

Необходимо, чтобы удельная мощность рассеяния W_0 была велика.

Наименование материала	$\rho_{\square}, \text{Ом}/\square$	Диапазон значений сопротивления, Ом	Удельная мощность рассеяния $W_0, \text{Вт}/\text{см}^2$
Сплав РС - 3001	800 - 3000	50 - 30000	2
Сплав РС - 3710	100 - 2000	10 - 20000	2
Кермет К-50С	1000 - 10000	100 - 100000	2
Спец. сплав №3	350 - 500	100 - 50000	2
Тантал ТВЧ	10 - 100	1 - 1000	3
Нихром	50 - 300	5 - 3000	1
Хром	500	50 - 30000	1

Определяется ширина резисторов b_w – ширина, обеспечивающая необходимую мощность рассеяния

$$b_w = \sqrt{\frac{\rho_{\square} \cdot W}{R \cdot W_0}}$$

Значение b_w округляется в **большую сторону** кратно шагу координатной сетки H . Рекомендуется выбирать $H = 0,1 \text{ мм}$.

Определяется ширина резисторов $b_{\text{точн}}$ – ширина, зависящая от заданной точности изготовления

$$b_{\text{точн}} = \begin{cases} 0,2 \text{ мм, при } \Delta R = \pm 20\%, \\ 0,3 \text{ мм, при } \Delta R = \pm 10\%; \end{cases}$$

Расчетное значение ширины каждого резистора b
 $b \geq \max [b_{\text{точн}}, b_{\text{W}}].$

Определяется длина резисторов.

Расчетное значение $l_{\text{расч}}$ для каждого резистора

$$l_{\text{расч}} = \frac{R}{\rho_{\Pi}} \cdot b = k_{\phi} \cdot b.$$

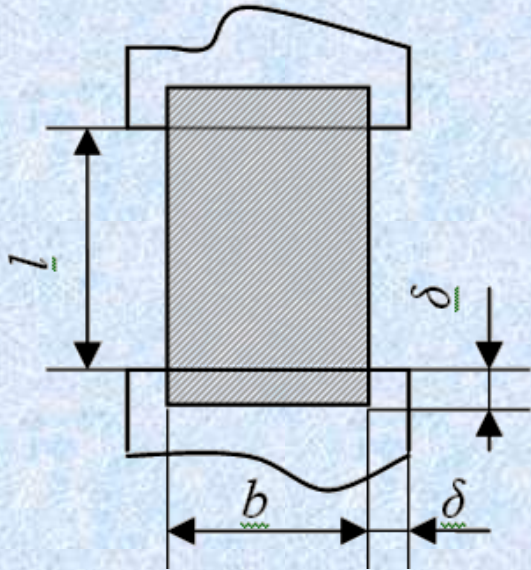
За длину резистора принимают **ближайшее** к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки H .

При округлении $l_{\text{расч}}$ рекомендуется оценить погрешность, вызванную округлением

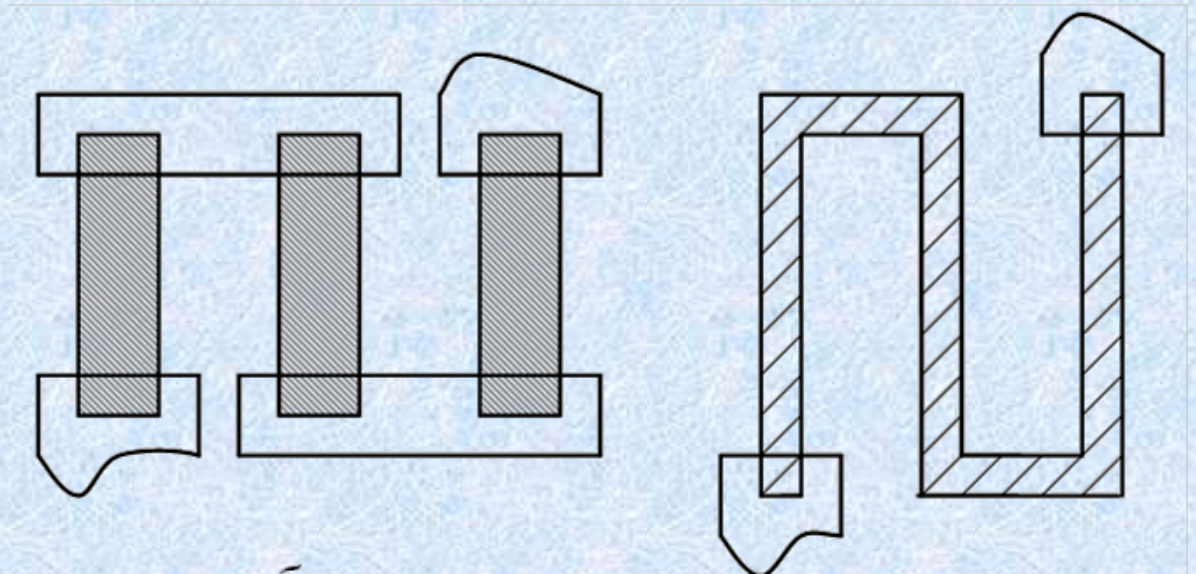
$$\Delta R' = \frac{|R - R'|}{R} \cdot 100\%, \quad \text{где } R' = \frac{l' \cdot \rho_{\Pi}}{b}, \quad \text{а } l' \approx l_{\text{расч}}.$$

Если $\Delta R' > \Delta R$, то необходимо увеличить ширину резистора ($b = b + H$) и пересчитать $I_{\text{расч}}$, чтобы округление длины давало бы меньшую погрешность.

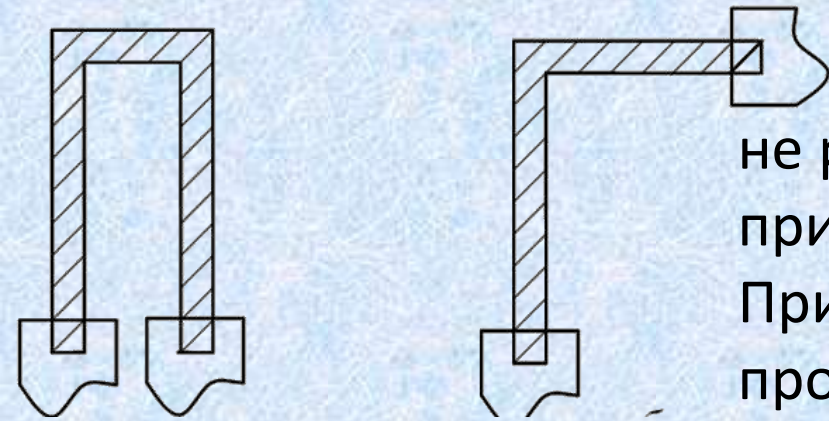
Приведенный порядок применяется для расчета размеров резисторов, имеющих $k_\phi < 10$, выполненных в виде прямоугольника



Если $k_\phi \geq 10$, то резистор выполняют в виде нескольких полосок или меандра



Конструкции резисторов типа меандр, использование которых не рекомендуется.



Эти конструкции не рекомендуются по следующей причине.

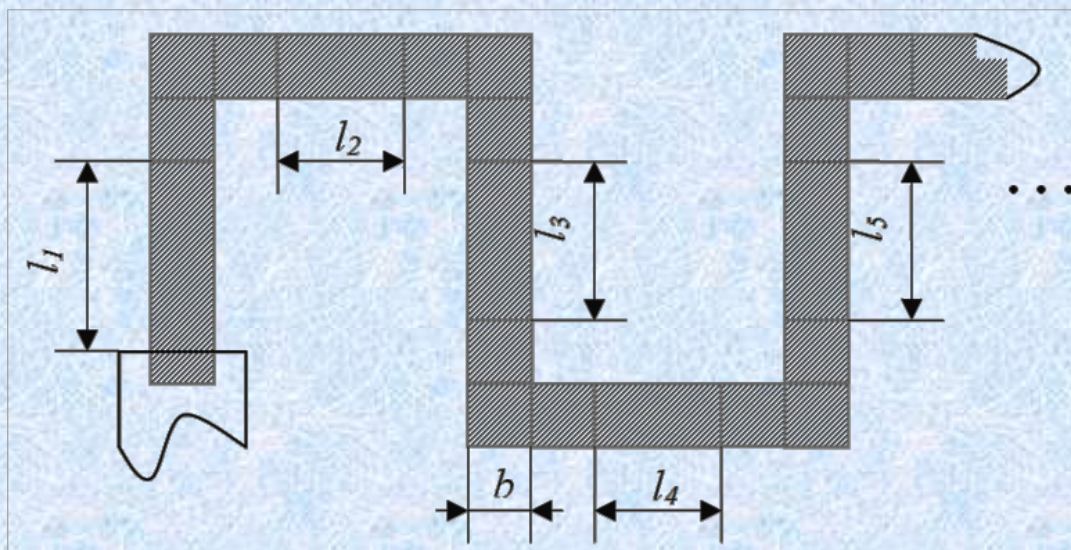
При смещении масок резистивного и проводящего слоев сопротивление изменится.

Поэтому контактные площадки резистора должны быть на одной оси (вертикальной или горизонтальной) и выходить в противоположные стороны.

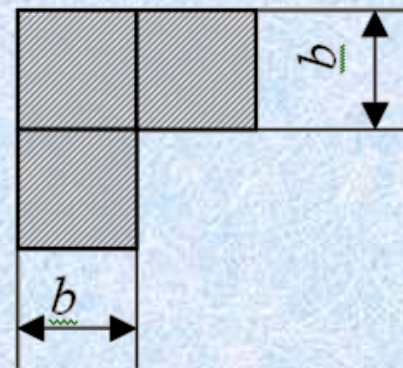
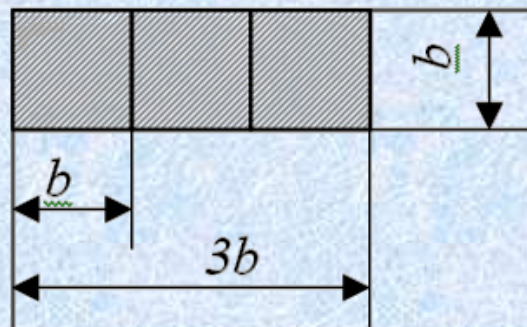
Сопротивление пленочного резистора типа меандр рассчитывается по формуле

$$R = R_{\text{угол}} \cdot n_{\text{угол}} + \rho_{\Pi} \cdot \frac{l_{\Sigma}}{b},$$

где $R_{\text{угол}}$ – сопротивление уголка, $n_{\text{угол}}$ – число уголков в меандре и l_{Σ} – суммарная длина прямоугольных участков меандра (без уголков)



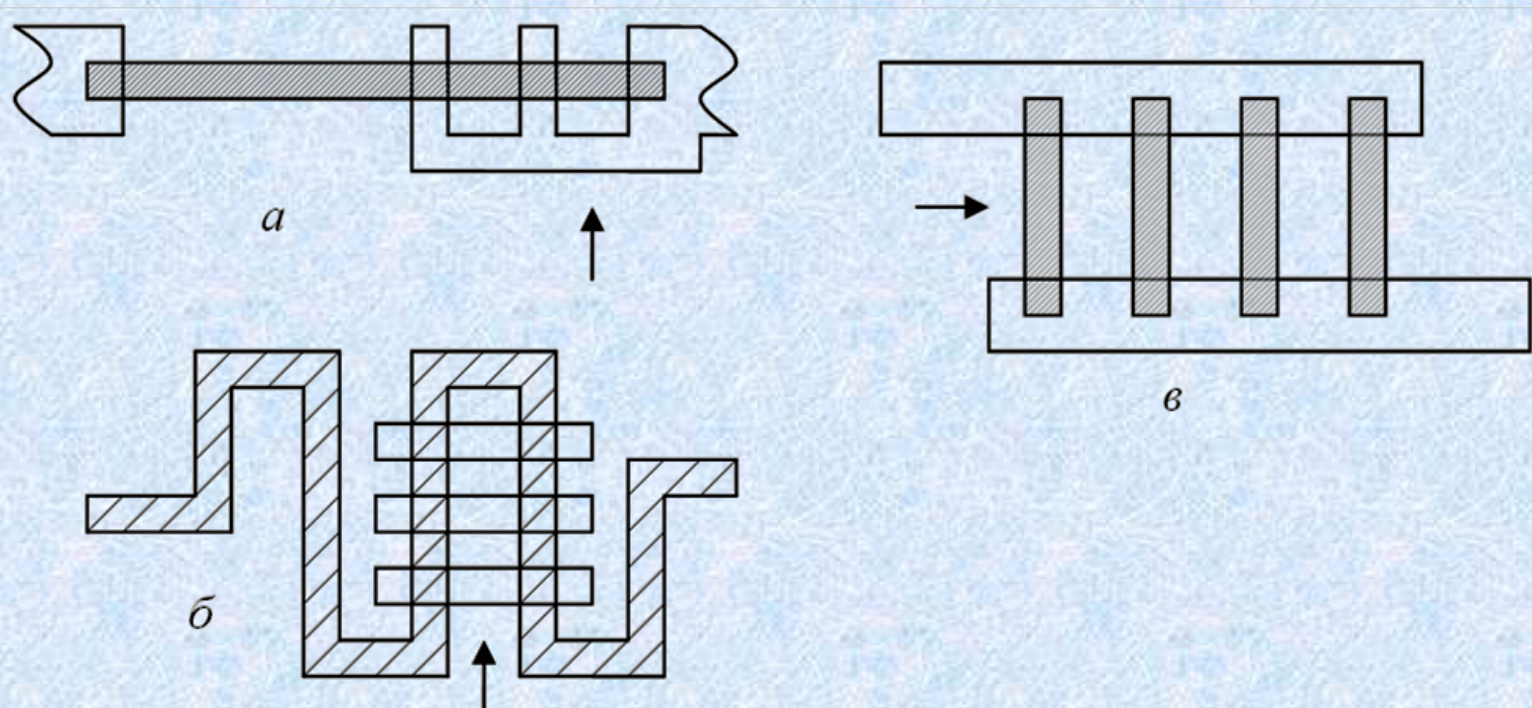
Сопротивление трех квадратов пленки равно $3\rho_{\square}$, а уголка из трех квадратов – $R_{\text{угол}} = 2,55 \rho_{\square}$.



Каждый уголок должен содержать ровно три квадрата пленки, т.е. необходимо, чтобы $l_i \geq 0$.

Конструкции точных пленочных резисторов

Схемное назначение некоторых резисторов требует высокой точности их изготовления, превосходящей технологические возможности современного оборудования для напыления микросхем. В таких случаях при конструировании микросхем применяют специальные пленочные резисторы, сопротивление которых можно изменять после изготовления.



Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

Подгонка величины сопротивления может производиться либо скачками – путем удаления заранее предусмотренных шунтирующих перемычек из проводящей (рис. а, б) или резистивной (рис. в) пленки, либо плавно – путем постепенного удаления части резистивной пленки. В обоих случаях изменить сопротивление можно лишь в сторону его увеличения.

В настоящее время известны различные способы подгонки сопротивления пленочных резисторов: лучом лазера, иглой микроманипулятора, электрической искрой.

2. Расчет размеров пленочных конденсаторов

Расчет пленочных конденсаторов сводится к определению его активной площади. Эта площадь рассчитывается по формуле

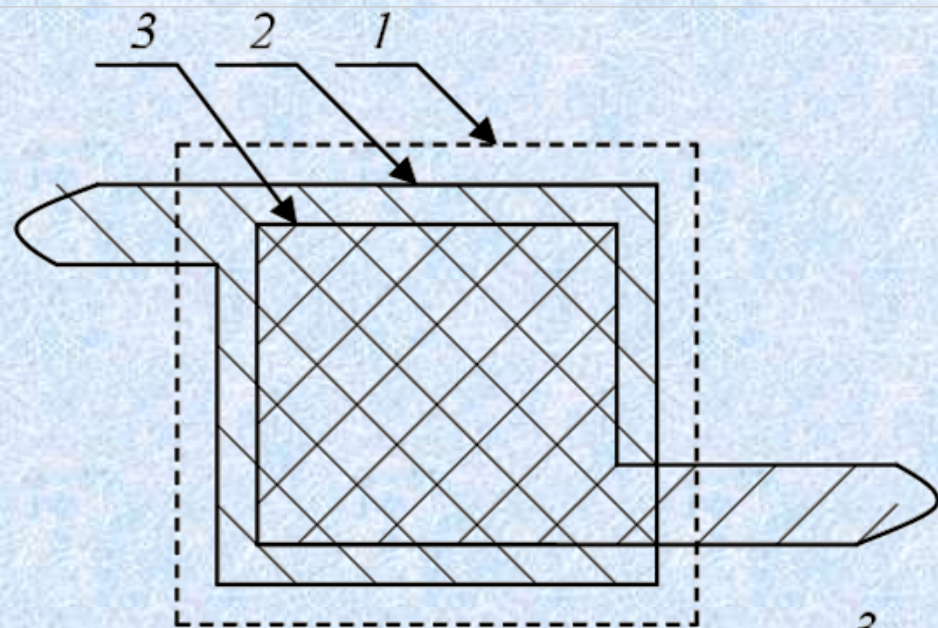
$$S = \frac{C}{C_0} \text{ (см}^2\text{).}$$

где C_0 - удельная емкость конденсатора – емкость на единицу площади $\left(\frac{n\Phi}{\text{см}^2} \right)$.

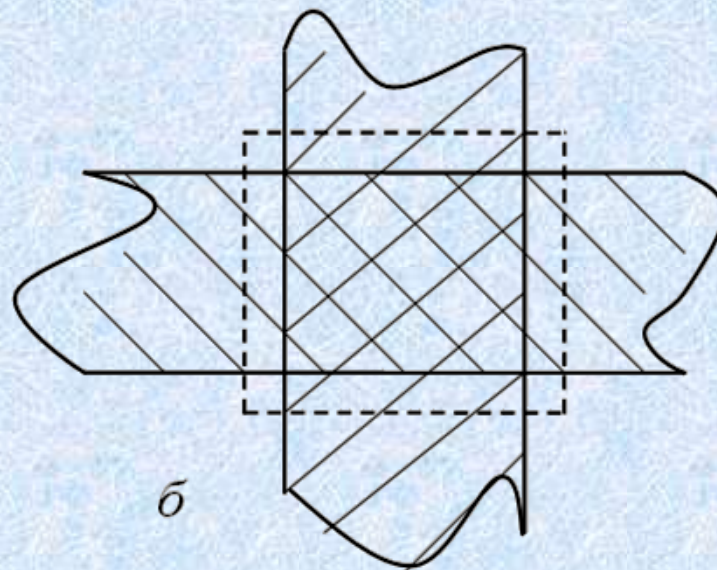
Для повышения точности необходимо выбирать наиболее простую форму обкладок. Площадь конденсатора не должна превышать 2 см^2 , минимальная площадь конденсатора равна $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$.

Характеристики диэлектрических материалов конденсаторов

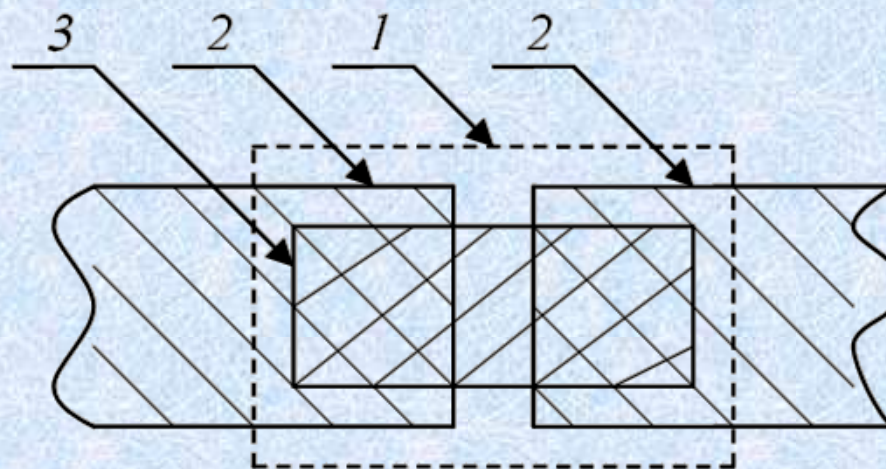
Наименование материала	Материал обкладок	Удельная емкость C_0 , пФ/см ²	Рабочее напряжение, В	Диэлектрическая проницаемость ε на частоте $f = 1\text{кГц}$
Моноокись кремния	Алюминий А99	$(5 - 10) \cdot 10^3$	60 - 30	5 - 6
Моноокись германия		$(5 - 15) \cdot 10^3$	10 - 5	11 - 12
Боросиликатное стекло		$(2,5 - 15) \cdot 10^3$	24 - 8	4
Стекло электровакуумное С41-1		$(15 - 40) \cdot 10^3$	12,6 - 6,3	5,2
Пятиокись тантала	Тантал ТВЧ	$(60 - 200) \cdot 10^3$	15 - 10	23
	Алюминий А99			



a



б



в

Разновидности конструкций тонкопленочных конденсаторов;
1 – диэлектрик; 2 – нижняя обкладка; 3 – верхняя обкладка

Конструкция пленочного конденсатора определяется площадью:

При $S \geq 5 \text{ мм}^2$ используется конструкция рис. а, у которой площадь верхней обкладки меньше, чем нижней.

При $1 \leq S \leq 5 \text{ мм}^2$ используется конструкция, представляющая собой пересечение пленочных проводников (рис. б).

При $0,1 \leq S \leq 1 \text{ мм}^2$ используются конструкции, представляющие собой последовательное соединение конденсаторов (рис. в).

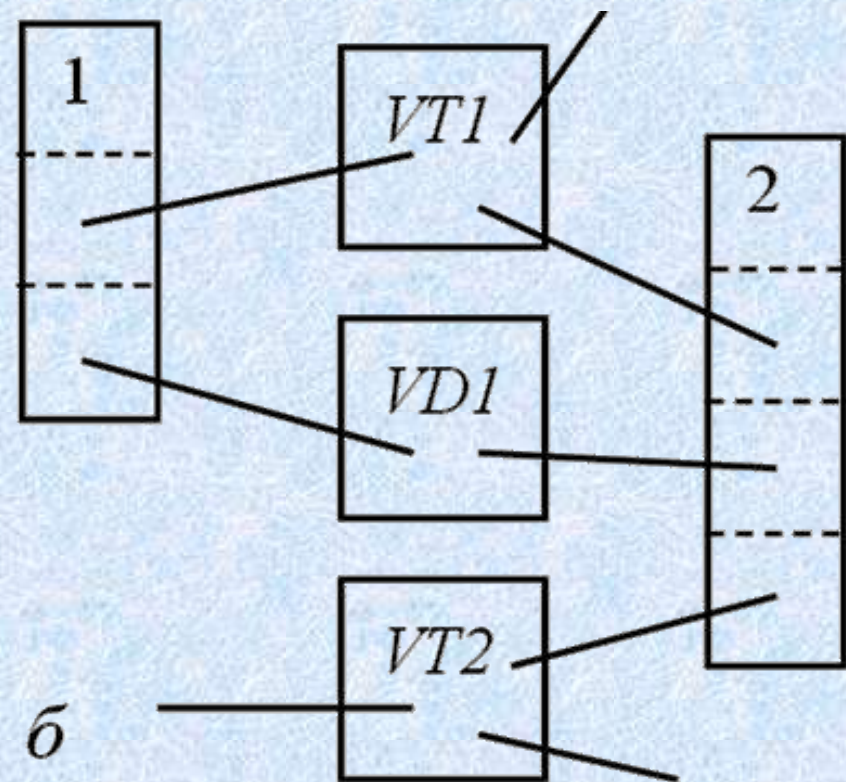
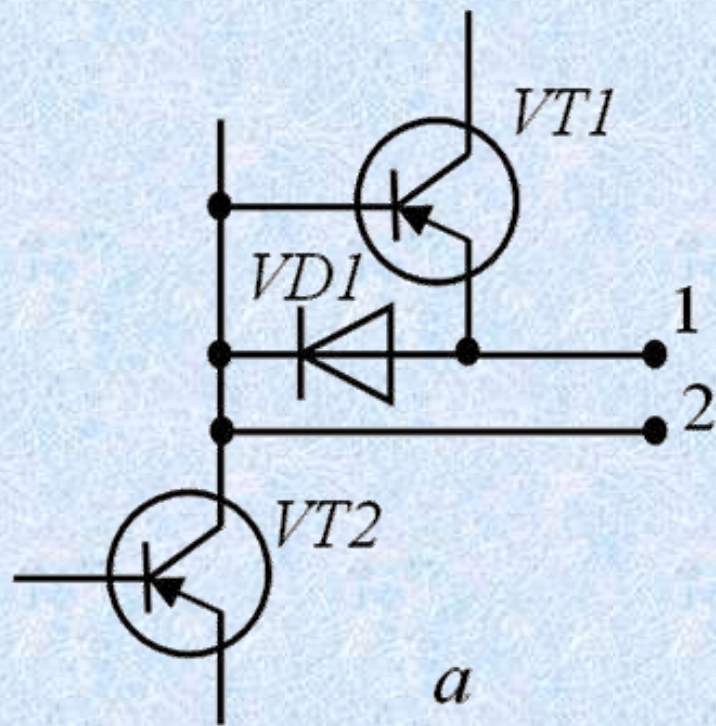
3. Конструирование пленочных межсоединений и контактных площадок

Конфигурацию межсоединений выбирают в виде полосок минимальной ширины, определяемой возможностями технологии. Желательно проектировать проводники как можно более простой формы.

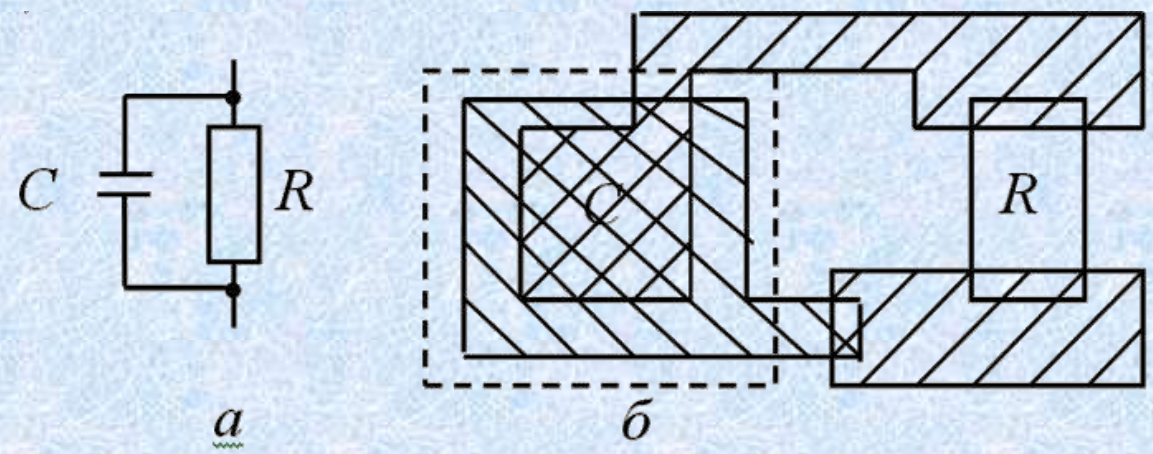
Контактные площадки в ГИС используются для подсоединения к выводам корпуса и для подсоединения выводов навесных активных элементов.

В первом случае контактные площадки располагаются равномерно вдоль края подложки с учетом шага расположения выводов корпуса. Во втором - контактные площадки могут располагаться в любом удобном месте подложки, в том числе и на ее периферии.

Для каждого вывода **необходима** своя контактная площадка. На рис. показан фрагмент принципиальной схемы (рис. а) и его топология (рис. б).



При наличии в принципиальной электрической схеме элементов R и C , взаимно шунтирующих друг друга, выводы резистора необходимо располагать в одном слое. На рис. показан фрагмент принципиальной схемы (рис. а) с шунтирующими элементами и его топология (рис. б).



Материал слоя	Толщина слоя, мкм	ρ_{\square} , Ом/□	Рекомендуемый способ контактирования
Алюминий А-99	0,3 – 0,6	0,03 – 0,06	Сварка
Золото Зл 999,9	0,6 – 0,8	0,03 – 0,04	Пайка, сварка
Серебро Ср 999,9	0,4 - 1	0,02 – 0,04	Пайка, сварка
Медь вакуум-плавленная	0,6 – 0,8	0,02 – 0,04	Пайка, сварка
Подслой нихрома Х20Н80	0,01 – 0,03	—	—

В зависимости от способа присоединения навесных элементов (пайка, сварка, термокомпрессия) выбираются конструктивные размеры контактных площадок.

Минимально допустимые размеры контактной площадки, необходимой для подпайки навесных элементов равны 700 на 700 мкм.

Минимально допустимые размеры контактной площадки для сварки - 400 на 400 мкм.

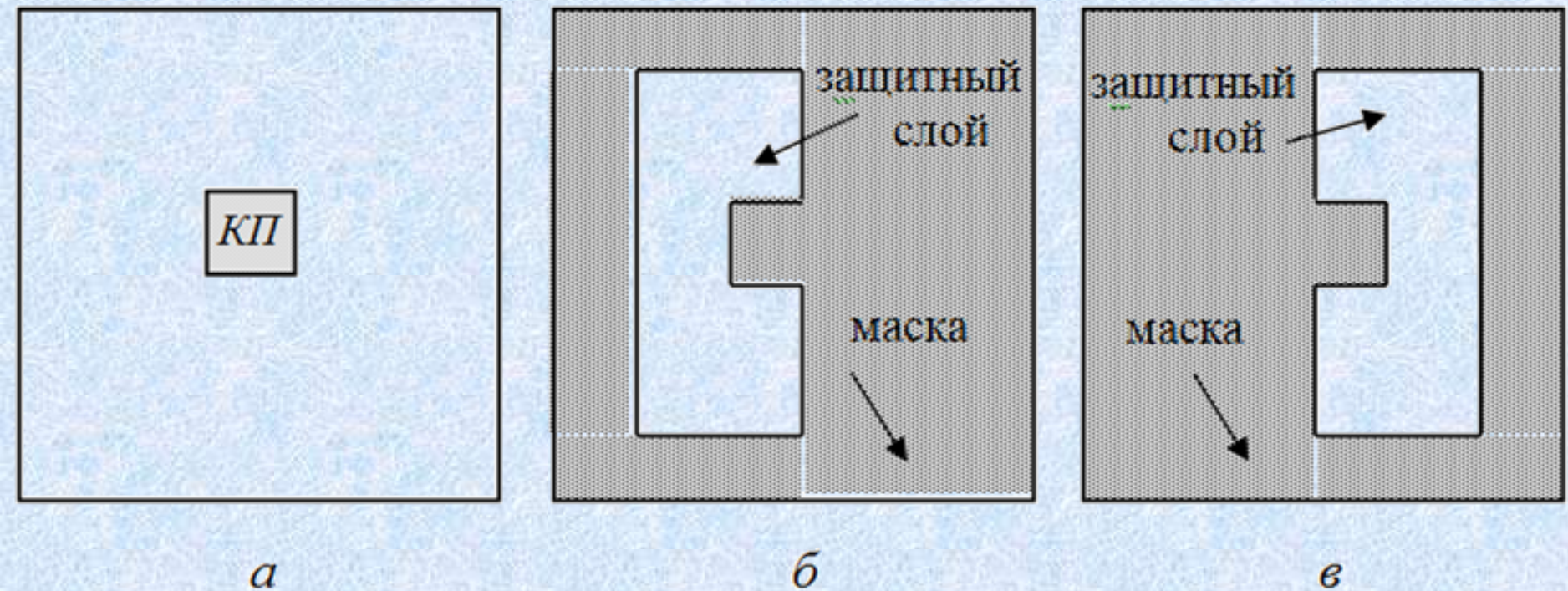
4. Проектирование защитного слоя

Защитный слой необходим для предохранения пленочных элементов схемы от внешнего воздействия и предохранения выводов активных элементов от короткого замыкания с пленочными проводниками.

Защитным слоем **обязательно** должны быть **покрыты** элементы схемы, к точности которых предъявляются требования, и **обязательно не покрыты** контактные площадки.

Защитный слой выполняется из любой диэлектрической пленки, кроме пятиокси тантала, т. к. она получается напылением тантала и последующим его окислением.

Если контактную площадку необходимо разместить в середине подложки (рис. а), то в маске защитного слоя над ней должен быть материал маски. В этом случае необходимо использовать составную маску (рис. б и в)



5. Активные элементы

В качестве навесных активных элементов при конструировании гибридных пленочных микросхем применяются бескорпусные полупроводниковые приборы.

При разработке топологии микросхемы необходимо предусмотреть на подложке свободные места (размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$) для установки активных элементов.

6. Подложка

Подложка в конструкции гибридной интегральной микросхемы является основанием, на котором располагаются пленочные элементы и навесные компоненты.

Материал диэлектрика	Удельное сопротивление, Ом*см	Диэлектрическая постоянная	Теплопроводность, кал/(см*с*°C)	КЛР, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Боросиликатное стекло	10^7	4,6	0,0027	3,3
Алюмооксидная керамика типа «Поликор»	10^{14}	10,8	0,075 – 0,08	7,5 – 7,8
Кварцевое стекло	10^{16}	4	0,0036	0,56 – 0,6
Ситаллы	$10^{13} - 10^{14}$	6,5	0,005 – 0,009	5
Лейкосапфир	10^{11}	8,6	0,0055	5

Промышленностью выпускаются подложки различных типоразмеров. Однако в качестве базовых преимущественно используются подложки размером 48x60 мм из ситалла и керамики. Другие типоразмеры подложек получаются делением сторон базовой подложки на части. Например, 12x10, 8x12, 6x7.5, 9.6x15.

7. Основные ограничения на топологию ГИС

1. Пассивные элементы, к точности которых предъявляются жесткие требования, располагаются на расстоянии не менее 1000 мкм от краев подложки.
2. Пассивные элементы, к точности которых не предъявляются жесткие требования, располагаются на расстоянии не менее 600 мкм от краев подложки.
3. Если элементы расположены в различных слоях, для их совмещения предусматривается перекрытие не менее 200 мкм.
4. При формировании пленочного конденсатора нижняя его обкладка должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, диэлектрическая пленка должна выступать за край нижней обкладки также не менее чем на 200 мкм.

5. Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами схемы составляют 300 мкм.
6. Минимально допустимые расстояния между контактными площадками для подпайки составляют 500 мкм.
7. Граница диэлектрика должна отстоять не менее чем на 500 мкм от края контактных площадок.
8. Минимально допустимая ширина пленочного резистора при $\Delta R=20\%$ – 200 мкм, при $\Delta R=10\%$ – 300 мкм.
9. Минимально допустимое расстояние от края навесного элемента до края контактной площадки – 500 мкм
10. Минимально допустимое расстояние между навесными элементами и навесными проводниками – 300 мкм.
11. Выводы активных элементов не должны пересекаться между собой, а также не должны проходить над контактными площадками и неизолированными участками проводников и в непосредственной близости от них (минимально допустимое расстояние – 300 мкм).

Пример ГИС

